

**Konzeption und Evaluation
eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs
zur Veränderung von Schülervorstellungen
mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen
und graphischer Modellbildung**

Dissertation zur Erlangung des
naturwissenschaftlichen Doktorgrades
der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Thomas Wilhelm
aus Würzburg

Würzburg 2005

Eingereicht am: 13.7.2005
bei der Fakultät für Physik und Astronomie

1. Gutachter: Prof. Dr. Dieter Heuer
2. Gutachter: Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner
der Dissertation.

1. Prüfer: Prof. Dr. Dieter Heuer
2. Prüfer: Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner
3. Prüfer: Prof. Dr. Jean Geurts
im Promotionskolloquium.

Tag des Promotionskolloquiums: 24.10.2005

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Inhalt der Arbeit	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	2
2	SCHÜLERVORSTELLUNGEN ZUR KINEMATIK UND DYNAMIK.....	5
2.1	Generelle Aspekte zu Schülervorstellungen	5
2.1.1	Der Begriff „Schülervorstellungen“	5
2.1.2	Ursachen von Schülervorstellungen	6
2.1.3	Eigenschaften von Schülervorstellungen.....	8
2.1.4	Kompartimentalisierung von Schülervorstellungen.....	9
2.1.5	Lernertheorien in der Entwicklung physikalischer Kompetenz.....	10
2.1.6	Zielsetzung des Physikunterrichts bezüglich Schülervorstellungen	12
2.2	Schülervorstellungen zur Mechanik.....	13
2.2.1	Zu den Begriffen „Ort“ und „Weglänge“	13
2.2.2	Zum Begriff „Geschwindigkeit“	13
2.2.3	Zum Begriff „Beschleunigung“	14
2.2.4	Zum Begriff „Kraft“	17
2.2.4.1	Der Clusterbegriff „Kraft“	17
2.2.4.2	Schülervorstellungen vom Begriff „Kraft“	18
2.2.4.3	Einordnung von Schülervorstellungen in die Niveaustufen von Hericks.....	21
2.2.5	Schülervorstellungen über Physik.....	23
2.2.6	Schülervorstellungen über das Lernen.....	24
2.3	Relevante Lehrervorstellungen.....	26
2.3.1	Lehrervorstellungen über das Lernen	26
2.3.2	Lehrereinschätzung des Mechanikunterrichts.....	27
3	IKONISCHE REPRÄSENTATIONEN.....	31
3.1	Bilder und Multicodierung im Physikunterricht	31
3.1.1	Bildhafte Darstellungen	31
3.1.2	Multicodierung.....	35
3.2	Dynamisch ikonische Repräsentationen	37
3.2.1	Vorteile dynamisch ikonischer Darstellungen	38
3.2.2	Verschiedene Abstraktionsniveaus in der Darstellung	41
3.2.2.1	Der Verlauf einer Größe.....	41
3.2.2.2	Vergleich verschiedener Größen	44
3.2.3	Forschungsergebnisse	45
3.3	Das Softwaresystem PAKMA/VisEdit	47

4 INTERVENTIONSSTUDIE ZUR GRAPHISCHEN MODELLBILDUNG MIT VISEEDIT.....	51
4.1 Grundlegendes über Modellbildungssysteme.....	51
4.1.1 Die Eingabe bei unterschiedlichen Modellbildungssystemen	51
4.1.2 Besondere Möglichkeiten bei einer Modellbildung mit PAKMA/VisEdit.....	55
4.2 Didaktische Begründung für den Einsatz von Modellbildungssystemen.....	57
4.2.1 Betonung der physikalischen Struktur	57
4.2.2 Zur didaktischen Funktion authentischer Probleme und Aufgaben.....	59
4.3 Forschungsergebnisse zu Modellbildung in der Literatur	62
4.4 Ziele und Beschreibung des Unterrichts	64
4.4.1 Zielsetzung	64
4.4.2 Die Modellbildung im Unterricht	65
4.4.3 Die thematisierten Problemstellungen	66
4.5 Unterrichtserfahrungen.....	70
4.5.1 Beobachtungen im Unterricht.....	70
4.5.2 Bewertung der Schüler.....	71
4.5.3 Veränderungen in Concept Maps.....	74
4.5.3.1 Allgemeines zu Concept Mapping	74
4.5.3.2 Vorgehen zur Gestaltung der Maps	75
4.5.3.3 Auswertung der Maps	76
5 ENTWICKLUNG EINES KONZEPTES ZUM KINEMATIK- UND DYNAMIKUNTERRICHT	85
5.1 Ziele des Konzeptes	85
5.2 Vorarbeiten in Würzburg.....	87
5.3 Zur Didaktik und Methodik des Unterrichts	88
5.3.1 Der Begriff „Geschwindigkeit“	88
5.3.2 Der Begriff „Beschleunigung“	91
5.3.3 Verschiedene Realisierungsmöglichkeiten zur Kinematik	98
5.3.3.1 Messung mit Maus oder Graphiktableau	98
5.3.3.2 Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen	99
5.3.3.3 Messung mit einem GPS-Empfänger.....	100
5.3.3.4 Die Spurenplatte	101
5.3.3.5 Das Spiel „Autorennen“	104
5.3.4 Die Behandlung des zweiten newtonschen Gesetzes.....	105
5.3.4.1 Grundlegende Vorbemerkungen.....	105
5.3.4.2 Erarbeitung des zweiten newtonschen Gesetzes.....	109
5.3.4.3 Anwendungen des zweiten newtonschen Gesetzes.....	115
5.3.4.4 Grobstruktur des Dynamikunterrichts.....	120
5.3.5 Die Behandlung des dritten newtonschen Gesetzes.....	121

5.3.6	Verschiedene Messmöglichkeiten zur Dynamik	125
5.4	Unterrichtsstrategien	126
5.4.1	Aspekte kontinuierlichen Lernens im Gesamtkonzept	127
5.4.2	Aspekte diskontinuierlichen Lernens im Gesamtkonzept.....	128
5.4.3	Thematisieren von Schülervorstellungen.....	130
5.4.4	Dynamisch ikonische Repräsentationen für Vorhersagen nutzen	132
5.5	Unterrichtsmaterialien für Lehrer	135
6	EVALUATION DES UNTERRICHTSKONZEPTES	139
6.1	Zielsetzung und Ablauf.....	139
6.2	Lehrerstudien	140
6.2.1	Zusammensetzung der Lehrergruppe.....	140
6.2.2	Gründe der Lehrer für die Teilnahme	141
6.2.3	Testergebnisse zu didaktisch-methodischen Prioritäten	142
6.2.3.1	<i>Didaktisch-methodische Prioritäten bayerischer Physiklehrer.....</i>	<i>142</i>
6.2.3.2	<i>Didaktisch-methodische Prioritäten der teilnehmenden Lehrer.....</i>	<i>146</i>
6.3	Schulpraktische Erfahrungen der Lehrer	147
6.3.1	Erfahrungen im Kinematik-Unterricht.....	147
6.3.1.1	<i>Aspekte zur Akzeptanz der Inhalte und zum vorgeschlagenen Stundenumfang.....</i>	<i>147</i>
6.3.1.2	<i>Von den Lehrern eingebrachte Ideen</i>	<i>148</i>
6.3.1.3	<i>Probleme mit dem Unterrichtskonzept</i>	<i>150</i>
6.3.1.4	<i>Gesamteinschätzung der Lehrer</i>	<i>151</i>
6.3.2	Erfahrungen im Dynamik-Unterricht.....	152
6.3.2.1	<i>Aspekte zur Akzeptanz der Inhalte und zur benötigten Unterrichtszeit</i>	<i>152</i>
6.3.2.2	<i>Lehrereinschätzungen der angebotenen Materialien</i>	<i>154</i>
6.3.2.3	<i>Gesamteinschätzung</i>	<i>156</i>
6.3.3	Erfahrungen mit der Modellbildung	157
6.3.3.1	<i>Modellbildung im Unterricht.....</i>	<i>157</i>
6.3.3.2	<i>Modellbildung in Prüfungsaufgaben</i>	<i>159</i>
6.4	Schülerstudien zur Kinematik	160
6.4.1	Aufgaben zur zweidimensionalen Kinematik.....	161
6.4.1.1	<i>Ergebnisse traditioneller Klassen.....</i>	<i>161</i>
6.4.1.2	<i>Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich.....</i>	<i>163</i>
6.4.2	Graphen zur eindimensionalen Kinematik.....	165
6.4.2.1	<i>Der Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“</i>	<i>165</i>
6.4.2.2	<i>Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen zur Geschwindigkeit.....</i>	<i>169</i>
6.4.2.3	<i>Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen zur Beschleunigung.....</i>	<i>172</i>
6.4.2.4	<i>Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich.....</i>	<i>175</i>
6.4.3	Beschleunigung beim senkrechten Münzwurf.....	181
6.4.3.1	<i>Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen</i>	<i>181</i>
6.4.3.2	<i>Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich.....</i>	<i>186</i>

6.5 Schülerstudien zur Dynamik.....	188
6.5.1 Der FCI-Test	188
6.5.1.1 Diskussionen um den Test.....	188
6.5.1.2 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen	191
6.5.1.3 Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich.....	197
6.5.2 Aufgaben zur eindimensionalen Dynamik.....	202
6.5.2.1 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen bei Textaufgaben zur Kraft	202
6.5.2.2 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen bei Graphenaufgaben zur Kraft.....	205
6.5.2.3 Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich.....	207
6.5.3 Concept Maps aus Treatmentklassen.....	211
6.6 Schülerstudien zu Vorstellungen über Physiklernen.....	216
6.6.1 Epistemologische Tests und der MPEX-Test	216
6.6.2 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen	219
6.6.3 Ergebnisse in Treatmentklassen.....	225
6.6.4 Zusammenhang zwischen MPEX-Ergebnis und Physikverständnis	226
7 WEITERER EINSATZ VON TEILEN DES GESAMTKONZEPTES	229
7.1 Verwendung im BMBF-Projekt „Vernetztes Studium Chemie“	229
7.2 Einsatz in einer Vorlesung für Lehramtsstudenten (Hauptschule).....	230
7.2.1 Beschreibung der Veranstaltung.....	230
7.2.2 Erfahrungen und Testergebnisse.....	231
7.3 Umsetzung im MultiMechanics Project.....	234
7.3.1 Projektbeschreibung.....	234
7.3.2 Schulpraktische Erfahrungen der Lehrer	236
7.3.3 Testergebnisse.....	237
7.3.3.1 Beschleunigungspfeile	237
7.3.3.2 Graphen zur eindimensionalen Kinematik	238
7.3.3.3 Test „Beschleunigung beim Münzwurf“	239
7.3.3.4 Aufgaben zur eindimensionalen Dynamik	240
7.3.3.5 Ergebnisse beim FCI-Test	241
7.3.3.6 Fragebogen zur Modellbildung	243
7.3.3.7 Concept Maps	244
7.3.3.8 Testergebnisse zu Vorstellungen über Physiklernen	247
7.3.3.9 Zusammenfassung der Testergebnisse.....	248
8 ZUSAMMENFASSUNG	251
8.1 Testergebnisse über Schülervorstellungen in konventionell unterrichteten Klassen..	251
8.2 Ideen des entwickelten Unterrichtskonzeptes	254
8.3 Ergebnisse der Interventionsstudie zur Modellbildung	255
8.4 Erfahrungen der Lehrer mit dem Gesamtunterrichtskonzept.....	256

8.5 Empirischer Vergleich der Treatmentgruppe mit Vergleichsgruppen.....	257
8.6 Resümee	259
9 ABSTRACT	261
9.1 Test results on students' conceptions in conventionally taught classes.....	261
9.2 Ideas of the developed teaching concept	264
9.3 Results of the intervention study on modelling	265
9.4 Teachers' experiences with the overall teaching concept.....	265
9.5 Empirical comparison of the treatment group with the control groups	266
9.6 Summary.....	268
10 LITERATURVERZEICHNIS	271
11 ANHANG	IX
11.1 Technische Realisierungen verschiedener Messverfahren.....	ix
11.1.1 Die zweidimensionalen Mausmessung	ix
11.1.1.1 Mausmessung über den Windows-Maustreiber.....	ix
11.1.1.2 Graphiktableau über den Windowstreiber	xi
11.1.1.3 Maus als serielles Messgerät.....	xii
11.1.2 Messung mit der Spurenplatte	xii
11.1.3 Die eindimensionale Mausmessung in der Dynamik.....	xiii
11.1.3.1 Maus als Bewegungssensor für eine eindimensionale Bewegung	xiii
11.1.3.2 Maus als Bewegungssensor für zwei eindimensionale Bewegung.....	xiv
11.2 Zur beiliegenden CD	xv
11.2.1 Die Lehrer-CD	xv
11.2.2 Die verwendeten Tests	xvi
LEBENS LAUF	XVII
DANKSAGUNG	XIX

1 Einleitung

1.1 Inhalt der Arbeit

Zahlreiche Untersuchungen haben ergeben, dass viele Schüler nach dem Mechanikunterricht im Gymnasium nicht über angemessene physikalische Vorstellungen verfügen. Schüler zeigen Vorstellungen, die den aktuellen physikalischen Vorstellungen widersprechen und eher historischen Vorstellungen ähneln. Im Kapitel 2 werden deshalb als Einführung einige Aspekte solcher Schülervorstellungen, ihre Quellen, Eigenschaften und Folgen dargelegt.

Der Physikunterricht zur newtonschen Mechanik, die bisher im neunjährigen Gymnasium vor allem in der elften Jahrgangsstufe unterrichtet wurde, erzielt also nur unbefriedigende Ergebnisse. Viele Unterrichtsideen in der didaktischen Literatur der vergangenen 20 Jahre betreffen aber diesen Unterricht. Das zeigt einerseits, wie stark hier Veränderungen des Unterrichts wünschenswert sind, und andererseits, wie wenig man bisher erfolgreich ist und dass neue Vorschläge gefragt sind. Ein Grund für dieses Dilemma ist, dass Alltagsvorstellungen vor allem von „Oberflächenmerkmalen“ bestimmt werden, während sich physikalische Sichtweisen auf „Tiefenstrukturen“ konzentrieren, die nicht direkt erfahrbar sind: Oberflächenmerkmale sind Eigenschaften, die der Beobachtung direkt zugänglich sind, wie z.B. Farbe, Form und Schnelligkeit $|\vec{v}|$, während Tiefenstrukturen einerseits Größen sind, die erst erschlossen werden müssen, wie z.B. Beschleunigung, und andererseits Zusammenhänge zwischen Größen sind, wie z.B. $\vec{a} \sim \vec{F}$. Der bisher im Unterricht eingeschlagene Weg ist also offensichtlich nicht sehr erfolgreich: Im traditionellen Unterricht werden zu Phänomenen Experimente gemacht, quantitative Gesetzmäßigkeiten gefunden und zu diesen quantitative Aufgaben gelöst. Erklärungen, die das physikalische Konzept vermitteln sollen, sind dabei stets verbal. Um Tiefenstrukturen direkt einsichtig zu machen, sind auch andere Vermittlungs- und Codierungsformen nötig. Eine wesentliche Hypothese dieser Arbeit geht davon aus, dass dynamisch ikonische Repräsentationen, wie Vektorpfeile und Verbindungslinien, die physikalische Größen kontextnah in einer Animation darstellen, im Physikunterricht helfen können, physikalische Strukturzusammenhänge zu erkennen. Im Kapitel 3 wird allgemein auf Bilder im Physikunterricht und Multicodierung eingegangen, sowie die Vorteile der dynamisch ikonischen Repräsentationen aufgezeigt.

Eine weitere ikonische Repräsentation von physikalischem Wissen erhält man, wenn man Wirkungszusammenhänge in der Dynamik dadurch visualisiert, dass man in einem Netzwerk Beziehungen zwischen den symbolisch dargestellten Größen durch Wirkungspfeile wiedergibt. In einer graphischen Modellbildungssoftware werden solche graphischen Wirkungszusammenhänge erstellt und können automatisch in ein Rechenprogramm umgesetzt werden, das den physikalischen Ablauf berechnet und dann auch die zeitlichen Verläufe der interessierenden Größen darstellt – geeigneterweise nicht nur durch Graphen, sondern auch durch Animationen. In einer Interventionsstudie wurden dazu Erfahrungen mit dem Modellbildungssystem VisEdit im Unterricht gesammelt: Diese Studie, theoretische Grundlagen und Ergebnisse sind in Kapitel 4 dargestellt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein neues Gesamtkonzept für den Kinematik- und Dynamikunterricht entwickelt, dessen Grundideen in Kapitel 5 dargelegt werden und verschiedene Aspekte integriert. Nach WODZINSKI (1996, S. 5) lassen sich unter allen Untersuchungen zur Frage, welche Konsequenzen aus der Schülervorstellungsforschung für den Unterricht zu ziehen sind, zwei Stränge unterscheiden: Zum einen Untersuchungen, die neue Elementarisierungen vorschlagen und überprüfen, und zum anderen Untersuchungen, die sich mit geeigneten Unterrichtsstrategien beschäftigen. Darüber hinaus gibt es nach WODZINSKI (1996, S. 5) Untersuchungen zu den Möglichkeiten, Schülervorstellungen durch den Einsatz des Computers als Medium zu ändern. Die hier vorliegende Untersuchung betrifft alle drei erwähnten Richtungen: Ausgehend von neuen Möglichkeiten des Computereinsatzes werden für den Mechanikunterricht der beginnenden Oberstufe neue Elementarisierungen unter Nutzung dynamisch ikonischer Repräsentationen vorgeschlagen und dazu ein neues Unterrichtskonzept entwickelt. In diesem Unterrichtskonzept werden auch Aspekte neuer Unterrichtsstrategien verwendet, die z.T. ebenso erst durch den Computereinsatz und durch dynamisch ikonische Repräsentationen möglich werden.

MANDL beschreibt drei Funktionen neuer Medien für das Lehren und Lernen (Mandl et al., 1998, S. 5 und S. 19-26): Erstens als innovatives Tool im Sinne eines Werkzeugs für die Anregung und Unterstützung von Lehr-Lernprozessen im Unterricht, zweitens als Anlass für die Entwicklung und Anwendung neuer Lehr-Lernformen und drittens als Unterrichtsgegenstand. In diesem Unterrichtskonzept wird der Computer hauptsächlich im Sinne der ersten Funktion genutzt. Es geht dabei nicht darum, den traditionellen Unterricht mit Multimedia-Elementen zu bereichern, sondern mit den Möglichkeiten der dynamisch ikonischen Repräsentationen *neue Vorgehensweisen, neue Elementarisierungen, neue Unterrichtsstrategien* und *neue Schwerpunktsetzungen* zu realisieren. Dazu werden den Lehrern viele Hilfen für den Unterricht an die Hand gegeben.

Kapitel 6 enthält die Evaluation dieses Unterrichtskonzeptes, das von 13 Lehrern in 17 Klassen eingesetzt wurde. Dabei interessiert sowohl, welche Erfahrungen die Lehrer mit diesem Konzept machten, als auch welche Ergebnisse die Schüler in verschiedenen Verständnistests im Vergleich zu herkömmlich unterrichteten Klassen erzielten. Das Vorbereitungs- und Begleitseminar für die teilnehmenden Lehrer in Kombination mit den erstellten Unterrichtsmaterialien und erläuternden Texten, die von den Lehrern in deren Unterrichtsvorbereitung durchgearbeitet wurde, ist außerdem eine neue wirkungsvolle Art der Lehrerfortbildung mit Langzeitwirkung. In Kapitel 7 wird noch von weiterem Einsatz von Teilen des Unterrichtskonzeptes in anderen Projekten berichtet.

Neben der Zusammenstellungen einiger theoretischer physikdidaktischer Grundlagen (Kapitel 2, 3 und 4.1 bis 4.3) wird in dieser Arbeit vor allem ein Konzept entworfen, begründet (Kapitel 4.4 und 5) und empirisch evaluiert (Kapitel 4.5, 6. und 7) (Konzeption und Entwicklung sowie Implementation und Evaluation).

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ein Ziel dieser Arbeit war, ein Unterrichtskonzept für den Kinematik- und Dynamikunterricht zu Beginn der Oberstufe des Gymnasiums zu entwickeln, das durch den Einsatz geeigneter bildlicher Repräsentationen den Schülern das Verstehen der newtonschen Mechanik erleichtert. Im Zusam-

menhang mit den Möglichkeiten ikonischer Repräsentationen am Computer sollten Möglichkeiten für neue Elementarisierungen und neue Unterrichtsstrategien aufgezeigt werden. Da nicht davon ausgegangen wird, dass eine doppelte Codierung im Unterricht mit Sprache und Bild bzw. allgemein eine Multicodierung immer automatisch zu besserem Lernen führt, war zu überlegen, wo und wie ikonische Repräsentationen sinnvoll erscheinen. Beispielsweise ermöglicht heute der Einsatz eines Computers zur Messwerterfassung und zur dynamischen Darstellung der Messwerte mittels Vektorpfeile die didaktisch sinnvolle Einführung der kinematischen Größen anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen (Kapitel 5.3.1 bis 5.3.3), um so bei den Schülern ein vektorielles Verständnis dieser Größen zu erreichen. Ein anderes Einsatzgebiet ikonischer Repräsentationen betrifft die graphische Modellbildung, bei der die berechneten Abläufe durch Animationen dargestellt werden. Diese graphische Modellbildung hilft den Schülern in der Dynamik, die entscheidenden Wirkungszusammenhänge zu erfassen und damit ein strukturelles Verständnis zu gewinnen (Kapitel 4).

Das Unterrichtskonzept sollte aber nicht nur die Schüler, die danach unterrichtet wurden, erreichen, d.h. deren Vorstellungen verändern, sondern auch die Lehrer erreichen, d.h. dass sie dieses Konzept aufgrund ihrer Unterrichtserfahrungen so überzeugt, dass sie es weiterhin einsetzen und weiterempfehlen. Dazu muss es nicht nur in der augenblicklichen Schulsituation gemäß dem gerade gültigen Lehrplan durchführbar sein. Für die Lehrer muss das Konzept auch einsichtig, die Grundideen ohne großen Aufwand umsetzbar sein und sie müssen bei diesem Vorgehen genügend positive Rückmeldung von den Schülern erhalten. Um den Transfer der Ideen in den Unterricht zu unterstützen, wurden Unterrichtsmaterialien für die Lehrer erstellt (siehe Kapitel 5.5) und eine Lehrerfortbildung durchgeführt.

Um zu prüfen, inwieweit beide Ziele erreicht werden, nämlich einerseits das Verständnis der newtonschen Mechanik bei den Schülern zu fördern und andererseits die Lehrer von dem Konzept zu überzeugen, wurden zwölf Lehrer gewonnen, die den gesamten Unterricht in insgesamt 16 Klassen durchführten. Abschließend wurden die Akzeptanz und die Einschätzung der Lehrer, die entsprechend unterrichteten, erhoben (siehe Kapitel 6.3). Damit sollte die Umsetzbarkeit des Konzeptes bzw. einzelner Aspekte durch Lehrer, die das Konzept nicht mit entwickelten, überprüft werden. Um zu ermitteln, ob die Schüler bei diesem Unterricht mehr Verständnis der newtonschen Mechanik erreichten, wurden Veränderungen in den Schülervorstellungen (Vor-/Nachtest-Design) mit Veränderungen in konventionell unterrichteten Klassen verglichen (Trainings-/Kontrollgruppen-Design). Aufgrund der Rahmenbedingungen waren nur paper-and-pencil-Tests möglich. Dabei war bewusst, dass nicht alle Bedingungen in den Versuchsklassen und Vergleichsklassen genau kontrolliert werden konnten. Da es sich nicht um wenige Prinzipien und um keine kurze Unterrichtssequenz handelte, sondern um ein Unterrichtskonzept für mindestens ein halbes Schuljahr, ist dies im gegebenen finanziellen und organisatorischen Rahmen nicht möglich. Die Arbeit verfolgt also einen globalen Ansatz aus physikdidaktischer Sicht, der den Unterricht in ganzen Klassen im Blick hat, und nicht spezielle Fragestellungen zum Lernen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen aus psychologischer Sicht (siehe Kapitel 3.2.3, letzter Absatz).

Im Vordergrund dieser Arbeit stehen somit die Konzeption eines Unterrichts und die Sammlung erster Erfahrungen und erster empirischer Ergebnisse über die Wirksamkeit im Unterricht. Gleichzeitig werden mit dieser Arbeit Erfahrungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen und graphischer Modellbildung im Unterricht vorgelegt.

2 Schülervorstellungen zur Kinematik und Dynamik

Das Forschungsgebiet „Schülervorstellungen“ hat sich in den Siebziger Jahren international etabliert. Es ist das aktivste Forschungsgebiet in der Naturwissenschaftsdidaktik, wobei in der Physikdidaktik der größte Teil der Untersuchungen im Bereich Mechanik liegen. Hier sollen einige Aspekte aus der Schülervorstellungsforschung dargelegt werden und insbesondere die wichtigsten Vorstellungen beschrieben und erläutert werden.

2.1 Generelle Aspekte zu Schülervorstellungen

2.1.1 Der Begriff „Schülervorstellungen“

Als erstes wird geklärt, was in dieser Arbeit mit dem Begriff „Schülervorstellungen“ gemeint ist und wie umfassend er gesehen werden soll. Ferner werden alternative Begriffe genannt, die im Gebrauch sind. Dabei soll es auch um die Wertung der Schülervorstellungen gehen, die oft mit diesen Begriffen verbunden wird. Die unterschiedlichen Begriffe spiegeln aber auch Sichtweisen und unterschiedliche theoretische Ansätze der verschiedenen Arbeitsgruppen wieder.

Sowohl im deutschen als auch im englischen Sprachraum gibt es eine ganze Reihe von Begriffen für die Vorstellungen, die die Schüler auf vielen Gebieten der Physik haben, noch bevor diese Gebiete im Unterricht behandelt werden (Duit, 1990, S. 112). Da diese Vorstellungen in der Regel nicht mit den Konzepten der Physik übereinstimmen, werden sie zum Teil abwertend mit Begriffen wie „Fehlvorstellungen“, „Fehlkonzepte“, „spontanes Denken“ oder „intuitive Physik“ benannt. Da diese negative Wertung in dieser Arbeit nicht geteilt wird und die positiven Aspekte der Vorkenntnisse dadurch zu sehr in den Hintergrund rücken, werden diese Begriffe hier kaum verwendet. Die Begriffe „Schülervorstellungen“ oder „Schülervorverständnis“ weisen dagegen auf die Schule hin: sie sind insofern nicht ganz angemessen, weil die gleichen Vorstellungen auch bei Erwachsenen (z.B. Zeyer, 1981) und zum Teil bei Vorschulkindern gefunden werden können. Ohne negative Konnotation sind Begriffe wie „Vorverständnis“, „Denkrahmen“ oder „Präkonzepte“. Eine Erklärung für das Phänomen enthalten die Ausdrücke „Alltagsvorstellungen“ und „Alltagstheorien“, so dass dies recht angemessene Begriffe sind. Mit diesen Begriffen wird den vorhandenen Denkstrukturen der Schüler ein gewisser positiver Wert beigemessen.

Trotzdem wird hier der Begriff „Schülervorstellungen“ verwendet, zum einen weil er neben „Alltagsvorstellungen“ der in der Fachdidaktik am häufigsten verwendete Begriff ist, zum anderen weil es hier vor allem um die Vorstellungen von Schülern in der elften Jahrgangsstufe des Gymnasiums gehen soll. Außerdem werden auch Vorstellungen diskutiert, die nicht durch die Alltagserfahrung, sondern durch den Physikunterricht selbst entstanden sind.

Unter Schülervorstellungen sind im engeren und ursprünglichen Sinn die Vorstellungen der Schüler von physikalischen Phänomenen und Begriffen, von deren Beziehungen untereinander sowie von physikalischen Gesetzmäßigkeiten gemeint. Die Schüler ordnen den physikalischen Begriffen alternative oder umfassendere Bedeutungen als ein Physiker zu und haben andere Sichtweisen von Phänomenen, sowie andere Vorstellungen vom Wesen und von den Eigenschaften der Dinge der Welt.

Der Begriff „Schülervorstellungen“ hat jedoch mittlerweile eine Ausweitung der Bedeutung erfahren (Wodzinski, 1996, S. 5): Im weiteren Sinn gehören zu den Schülervorstellungen auch allgemeine Denkrahmen und Interessen der Schüler, d.h. die übergreifenden Vorstellungen der Schüler von Gegenständen, Zielen, Fragestellungen, Arbeitsweisen und Erkenntnismethoden der Physik sowie übergreifende und themenspezifische Interessen und Einstellungen (Schecker, 1984b, S. 194). Schließlich gehören dazu auch Vorstellungen über den eigenen Lernprozess. NIEDDERER und SCHECKER meinen, dass sich diese Forschungsrichtung in den achtziger Jahren in zwei Teilbereiche spezialisiert hat: „in den Bereich Schülervorstellungs- und Präkonzeptforschung einerseits (z.B. Jung, Nachtigall, Duit, von Rhöneck, Driver) und den Bereich der allgemeineren Vorverständnisse, ‚epistemological beliefs‘, ‚nature of science‘ (s. Höttecke 2001)“ (Niedderer, Schecker, 2004, S. 248).

Der Fachdidaktiker unterstellt den Schülern letztlich gewisse Konzepte, Theorien und Begriffsdefinitionen, um deren Vorstellungen zusammenfassen und beschreiben zu können und vor allem, damit ihm das Verhalten der Schüler verständlicher wird. Gewissermaßen bildet man sich Vorstellungen über die Vorstellungen der Schüler.

2.1.2 Ursachen von Schülervorstellungen

Die Gegenstände und Themen der Physik begegnen den Schülern nicht zum ersten Mal im Physikunterricht, weil es häufig Dinge und Phänomene unserer Alltagswelt sind, mit denen wir täglich zu tun haben. Viele Vorstellungen stammen aus sinnlichen Erfahrungen, die die Schüler beim Umgang mit diesen Alltagsphänomenen tagtäglich machen. Diese Flut der auf uns einströmenden Sinneseindrücke muss geordnet werden. Das Denken ergänzt diese Eindrücke, erweitert und verändert sie und verknüpft sie mit anderen. Sinnliches Erleben und Denken sind in einem ständigen Wechselspiel ineinander verwoben, wobei das eine nicht ohne das andere auskommen kann. Unser Denken bewertet alle Eindrücke. Die im Denken hergestellten Zusammenhänge und Gedanken werden dann für wahr gehalten, wenn sie mit vielen Eindrücken sinnvoll ergänzt werden können, also auf einem breiten und sicheren Fundament im Bereich der Sinneswahrnehmung ruhen (Schön, 1992, S. 259). So bilden sich Alltagstheorien, die sich für den Schüler in seiner Umwelt als angemessen, hilfreich und damit als „wahr“ erweisen, da sie Vorhersagen über und angemessenen Umgang mit diesen Dingen bis zu einem gewissen Grad ermöglichen. Diese Alltagsvorstellungen stimmen meistens in wesentlichen Merkmalen nicht mit den physikalischen Vorstellungen überein, reichen aber zur Erklärung alltäglicher Phänomene aus.

Deshalb werden die Schülervorstellungen auch „kontextabhängige Wahrheiten“ genannt (Fischer, 1992, S. 64; Minstrell, 1991, S. 113). So ist zum Beispiel die Aussage, dass schwere Objekte schneller fallen als leichte, einerseits für den Physiker unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes (und des Auftriebs) bzw. im Vakuum eine falsche Aussage, da alle Objekte die gleiche Fallbeschleunigung erfahren, andererseits aber in unserer Welt mit der vorhandenen Luft eine zutreffende Aussage, falls gleiche aerodynamische Eigenschaften vorliegen und sich die Objekte nur in der Masse unterscheiden. Das Bilden solcher Erklärungsmuster und damit das Erkennen gewisser Ge-

setzmäßigkeiten ist somit eine beachtenswerte Leistung. Die wissenschaftlichen Konzepte unterscheiden sich aber von den Alltagstheorien u.a. durch einen allgemeineren Geltungsbereich.

Die Alltagssprache hält viele solche Erklärungsmuster bereit, die man sich durch den verständigen Gebrauch der Sprache aneignet (Hericks, 1993, S. 126). Sie bewahrt dabei in vielen Formulierungen Vorstellungen, die von der Wissenschaft zum Teil als überholt angesehen werden und sie verwendet physikalische Begriffe in anderen Bedeutungen als die Physik.

Vorstellungen werden auch geprägt durch den Umgang mit Massenmedien, dem Lesen von Büchern, durch den gesamten Bereich sozialen Lernens im täglichen Leben. Das Physikbild mancher Schüler, ihre Vorstellungen und ihr Vorwissen über Physik werden eventuell auch durch die Lektüre von Science Fiction-Literatur geprägt. Hier wird ein wissenschaftlich wirkendes Vokabular verwendet, so dass es nicht einfach ist, zwischen Fiktion und Wissenschaft zu unterscheiden. Da aufgrund dieser vielen, aber vergleichbaren Quellen bei den meisten Schülern auch vergleichbare Alltagskenntnisse entstehen, kann man deren Struktur untersuchen und verallgemeinert darstellen.

Außerdem entstehen Vorstellungen dadurch, dass Alltagssituationen spontan in bestimmter Weise strukturiert werden, was an allgemeinen Schemata liegen kann, die sich sehr früh ausbilden (Wodzinski, 1996, S. 18). Man kann auch sagen, dass sich viele Vorstellungen auf eine Erfahrungsgestalt eines Ursache-Wirkungszusammenhangs zurückführen lassen, die sich in vielen Alltagsanwendungen bewährt hat (Anderson, 1986).

Schließlich können sogar durch den Physikunterricht selbst Vorstellungen geweckt oder unterstützt werden, die den physikalischen zuwiderlaufen. Von den Schülern missverstandene - d.h. auf dem Hintergrund ihrer Vorstellungen interpretierte -, an sich zutreffende Informationen des Lehrers führen bei den Schülern zu Vorstellungen, die der Lehrer nicht beabsichtigt hatte (Duit, 1992, S. 285). Das Problem ist, dass die Sinnesdaten, die ein Adressat empfängt, keine ihnen innewohnende Bedeutung haben, sondern diese erst vom Adressaten aufgrund seiner Vorstellungen bekommen. So ergibt sich folgendes Problem: Der Lehrer sagt etwas, das im Rahmen seiner physikalischen Vorstellungen eine bestimmte Bedeutung hat. Der Schüler interpretiert das Gesagte aufgrund seines andersartigen Vorverständnisses (er hat ja noch nicht die physikalische Vorstellung) jedoch anders, also aus Sicht des Lehrers falsch. Umgekehrt hat die Antwort des Schülers im Rahmen seiner vorunterrichtlichen Vorstellungen eine bestimmte Bedeutung. Der Lehrer interpretiert das aufgrund seiner anderen Vorstellungen (er kennt evtl. nur die physikalische Vorstellung) jedoch auch anders als vom Schüler gemeint und bestätigt ihm z.B. fälschlicherweise die Richtigkeit der Aussage. So redet man aneinander vorbei und missversteht sich („hermeneutischer Zirkel“) (Duit, 2002, S. 7). Auf diese Weise macht der Unterricht nach NACHTIGALL aus den ursprünglichen Präkonzepten häufig Misskonzepte (Nachtigall, 1992, S. 12). Damit ist nach NACHTIGALL in erster Linie gemeint, dass zwar noch präkonzeptionell gedacht wird, aber das wohldefinierte physikalische Vokabular zur Erklärung benutzt wird.

Die beim Schüler bereits vorhandenen Vorstellungen führen zu Schwierigkeiten, die sich in *sachbedingte*, *lehrbedingte* und *innenbedingte* Lernschwierigkeiten unterscheiden lassen. Sachbedingte Lernschwierigkeiten ergeben sich aus der Komplexität und Abstraktheit der Inhalte, wofür WODZINSKI die Schwierigkeiten mit dem Begriff „Beschleunigung“ als ein Beispiel nennt (Wodzinski,

1996, S. 22). Lehrbedingte Schwierigkeiten ergeben sich wie genannt aus dem Unterricht, wobei nicht optimale Elementarisierungen und Vorgehensweisen Ursachen sind. Innenbedingte Lernschwierigkeiten liegen am kognitiven Apparat des Schülers, wobei sich Gedächtniskapazität, Konzentrationsvermögen, vorhandene Vorstellungen u.a. auswirken.

2.1.3 Eigenschaften von Schülervorstellungen

Die Schülervorstellungen können zwar von Schüler zu Schüler variieren, sie weisen aber gemeinsame Grundzüge auf, die es ermöglichen, im Rahmen didaktischer Forschung verallgemeinerbare Aussagen zu machen, obwohl es Vorstellungen individueller Schüler sind (Hericks, 1993, S. 129). Unterscheiden muss man zwischen spontan erzeugten Vorstellungen, auch „ad-hoc-konstruierte Vorstellungen“ genannt (Häußler et al., 1998, S. 177), die durch eine Befragung in einer konkreten Situation erzeugt werden und Vorstellungen, die fest verwurzelt sind und immer wieder zum Tragen kommen. NIEDDERER und SCHECKER verwenden dafür die beiden Begriffe „current construction“ und „deep structure“ (Niederer, Schecker, 1992b, S. 79 f.). DYKSTRA ET AL. (1992) unterscheiden deshalb auch zwischen • Fehlkonzepten im Sinne „falscher“ Antworten, • Fehlkonzepten im Sinne von Vorstellungen über bestimmte Phänomene, die zu „falschen“ Antworten führen und • grundlegende Überzeugungen, die in verschiedenen Situationen immer wieder zum Vorschein kommen.

Die physikalischen Begriffe sind in den Schülervorstellungen wie in der Umgangssprache Sammelbegriffe, die vielfältige Bedeutungen haben können. Die konkret gemeinte Bedeutung eines Begriffs ergibt sich häufig erst an dem jeweiligen Kontext, in dem das Wort benutzt wird (current construction). Die Begriffe selbst und ihre Beziehungen bleiben meist relativ unbewusst und können nicht an sich, sondern nur unter dem Einfluss konkreter Aufgabenstellungen, also bezüglich konkreter Situationen geäußert werden. Auffällig ist auch, dass ein Schüler oft gleichzeitig vielfältige und widersprüchliche Vorstellungen hat. So können in physikalisch äquivalenten Situationen ganz unterschiedliche Vorstellungen aktiviert werden, wofür äußere, physikalisch unbedeutende Aspekte entscheidend sind. Ein außenstehender Beobachter bekommt dann leicht den Eindruck, dass die Schülervorstellungen inkohärent sind. Folglich ist die Überzeugungskraft eines Demonstrationsexperimentes oder einer Analogie beschränkt, da es für den Schüler nicht unbedingt auf andere Kontexte übertragbar ist.

Schülervorstellungen können auch sinnstiftend miteinander vernetzt sein, so wie auch eine physikalische Theorie durch ein Netz von Begriffen, Regeln und Vorstellungen beschrieben werden kann (deep structure). Deshalb ist beim Lernen oft nicht nur eine Vorstellung, sondern ein ganzes Netz, eine ganze Sichtweise zu ändern, was viel schwieriger ist als eine einzelne, isolierte Vorstellung zu ändern.

Erschwerend für den Unterricht ist, dass Schülervorstellungen außerordentlich stabil und dauerhaft sind. Selbst wenn die Schüler die physikalische Vorstellung verstehen, glauben sie entsprechende Behauptungen häufig nicht. So sind meist auch nach dem entsprechenden Unterricht immer noch dieselben Vorstellungen vorhanden, obwohl der Lehrer sich sehr um eine Veränderung bemühte. Gerade nach dem Unterricht, wenn das oberflächlich angelernte Sachwissen wieder vergessen wurde, treten die alten Vorstellungen wieder stärker hervor (Demidow et al., 1997, S. 196). Das ist

recht verständlich, da die oben dargelegten Quellen für die Alltagserkenntnisse ständig vorhanden sind. So wurden auch prinzipiell gleiche Vorstellungen bei Menschen unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Vorbildung - lediglich mit verschiedenen Häufigkeiten - gefunden. Die Vorstellungen bleiben außerdem dadurch stabil, dass Schüler im Unterricht in Experimenten häufig genau das sehen, was sie aufgrund ihrer Vorstellungen erwarten (Ein Beispiel beschreibt SCHLICHTING, (1991, S. 77), weitere nennt DUIT (1992, S. 283, oder 1989, S. 37 f., oder 1996, S. 154)). Aber selbst wenn sie sehen, dass ein einziger Versuchsausgang ihren Vorstellungen widerspricht, ändern sie deshalb noch nicht ihre Sichtweise (Duit, 1993a, S. 5). Die bekannte Tendenz, von den vorhandenen Ansichten und Bewertungen möglichst wenig abzuweichen, wird in der Psychologie „Perseverationstendenz“ genannt.

Bei Schülern sind aber nicht nur inkorrekte oder unvollständige Vorstellungen zu finden, sondern auch der unangemessene Einsatz eines an sich korrekten Konzeptes, d.h. ein richtiges Konzept wird überstrapaziert und auch dann immer wieder verwendet, wenn gerade ein anderes Konzept angemessen wäre (Mandl, Gruber, Renkl, 1993a, S. 25).

2.1.4 Kompartimentalisierung von Schülervorstellungen

Der Physikunterricht in der Schule geht häufig nicht auf die vorhandenen Schülervorstellungen ein, sondern stellt das physikalische Konzept vor, das sich jeder Schüler anzueignen hat. Das führt zum Entstehen gewisser Wissensstrukturen, die von MANDL, GRUBER und RENKL (1993a, S. 27) mit dem Begriff „Wissenskompartimentalisierung“ (im Englischen: „knowledge compartmentalization“ (Mandl, Gruber, Renkl, 1993b, S. 162)) bezeichnet werden. Gemeint ist, dass das Wissen über einen bestimmten Bereich aus verschiedenen, separat gehaltenen und nicht miteinander verknüpften Teilen zusammengesetzt ist. MANDL, GRUBER und RENKL unterscheiden drei Arten von Wissenskompartimentalisierung:

Als erstes ist die Kompartimentalisierung von korrekten und inkorrekten Konzepten zu nennen. Im Schulunterricht wird häufig nicht versucht, die vorhandenen Fehlkonzepte durch korrekte Konzepte zu ersetzen, sondern es wird ein zusätzliches Wissen vermittelt, so dass dann korrekte und inkorrekte Konzepte unberührt nebeneinander stehen bleiben. Das größte Problem bei dieser Art von Wissenskompartimentalisierung ist, dass in Situationen, in denen Wissen angewendet werden soll, die Schüler oft auf ihre alten Fehlkonzepte vertrauen, anstatt auf das neu erworbene, adäquatere wissenschaftliche Wissen. Im Gespräch mit Schülern ist häufig auch ein Hin- und Herspringen zwischen den zwei Theorien festzustellen. Spontan verwendet der Schüler eher sein altes Modell, wechselt aber bei einem kleinen Hinweis sofort zum neugelernten Modell über.

WILHELM (1994, S. 81) berichtet von einem Beispiel für dieses Verhalten in einem Interview, bei dem zwei Schülerinnen mit lautem Denken den Fragebogen „Fragen zu Kraft und Bewegung“ bearbeiten sollten (siehe Kapitel 6.4.2.1). Dabei haben sie fast durchgehend und überzeugt aristotelisch geantwortet. Anschließend wollten sie die richtigen Antworten wissen. Nachdem mit wenigen Worten das newtonsche Konzept in Erinnerung gerufen wurde, konnte eine Schülerin plötzlich selbst die gleichen Aufgaben richtig beantworten. Solche Verständnistests zeigen also nur, welche

Vorstellung Schüler spontan nutzen. Es ist durchaus möglich, dass sie trotz physikalisch falschen Antworten auch über das physikalische Konzept verfügen.

Zweitens gibt es eine Kompartimentalisierung unterschiedlicher korrekter Konzepte. Im Unterricht wird ein komplexes Thema in der Regel stark vereinfacht dargestellt und in verschiedene Themen aufgeteilt. Nach MANDL ET AL. (1993a, S. 28) werden möglicherweise unterschiedliche wissenschaftliche Konzepte, die eng miteinander verknüpft sind, als separate Wissenseinheiten erworben und unabhängig voneinander gespeichert. Die Gefahr dabei ist, dass die Komplexität des Gegenstandes in der realen Welt nicht gewürdigt wird und es in der Anwendung dieser Wissensstrukturen zu unangemessenen Übereinfachungen kommt.

Schließlich gibt es noch die Kompartimentalisierung von Symbolsystemen und Dingen der wirklichen Welt, d.h. es fehlt der Transfer zwischen diesen beiden. „*Die Gesetze der Physik werden bei dieser Form der Kompartimentalisierung also im Prinzip wie die Spielregeln eines erfundenen Spiels aufgefasst, die überhaupt nichts mit den Entitäten und Prozessen der wirklichen Welt zu tun haben*“ (Perkins et al., 1988, zitiert nach Mandl et al., 1993a, S. 28). Daraus folgt, dass einerseits Alltagsvorstellungen in der Schule nicht zum Lösen arithmetischer Probleme verwendet werden - sondern bedeutungslose Formelmanipulationen ohne Verständnis der Relevanz für das tägliche Leben durchgeführt werden -, und auf der anderen Seite die Schulkenntnisse nicht zum Erklären der alltäglichen Geschehnisse benutzt werden.

Man kann davon ausgehen, dass es nach einem Lernprozess immer ein komplexes Nebeneinander verschiedener Vorstellungen (alter und neu erworbener) gibt. Die Frage ist, ob es ein unberührtes und unbewusstes oder ein bewusstes, reflektiertes Nebeneinander ist. Des Weiteren ist die Frage, ob die Schüler auch über die physikalische Vorstellung verfügen und welche Vorstellung sie bei physikalischen Fragestellungen als erstes verwenden.

HARTMANN zeigt, dass Schüler zur gleichen mechanischen Fragestellung, wenn man ihnen Zeit lässt, verschiedene (meist zwei) und miteinander konkurrierende Erklärungen erzeugen (Hartmann, Niedderer, 2003 und 2004; Hartmann, 2004). Über 70 % der Schüler der elften Jahrgangsstufe mit Physik-Leistungskurs geben so bei typischen qualitativen Aufgaben mehrere Erklärungen ab und zwar sowohl vor als auch nach dem Unterricht (Hartmann, Niedderer, 2003, S. 4). Der Anteil der physikalischen Erklärungselemente in den Interviews steigt dabei durch den Unterricht der elften Jahrgangsstufe von 32 % vor dem Unterricht auf 47 % direkt nach dem Dynamikunterricht. Sind die gleichen Aufgaben schriftlich als Multiple-Choice-Aufgaben zu lösen, ist der Anteil mit 12 % (vorher) bzw. 41 % (nachher) geringer, so dass die Ergebnisse von Multiple-Choice-Aufgaben das Wissen und die Fähigkeiten der Schüler nicht völlig korrekt beschreiben.

2.1.5 Lernertheorien in der Entwicklung physikalischer Kompetenz

Durch den Unterricht und das dadurch angeregte Lernen entstehen beim Schüler Vorstellungen, die sich von den Alltagsvorstellungen unterscheiden, aber noch nicht den angestrebten Vorstellungen entsprechen (z.B. in der geometrischen Optik: siehe Goldberg, 1994, S. 45 – 49). NIEDDERER nennt dies Zwischenzustände (Niedderer, 1999, S. 56). Beim Lernen durchläuft ein Lerner evtl. mehrere Zwischenzustände, so dass auch von einem Lernpfad gesprochen wird.

SCHENK entwickelte allgemein ein Konzept von Lernertheorien (Schenk, 1984), das HERICKS weiterentwickelte (Hericks, 1993, S. 103). Die Entfaltung der konzeptuellen Dimension physikalischer Kompetenz, also in welcher Weise der Lernende Sachverhalte der Wirklichkeit sieht, die in physikalischer Hinsicht als Tatbestände elaborierter Theorien beschrieben werden können, sieht HERICKS als sukzessive Umgestaltung von Lernertheorien an (Hericks, 1993, S. 106). Im Bereich Mechanik unterscheidet er in der Entwicklung der konzeptuellen Dimension vier Niveaustufen, d.h. vier Lernertheorien (KM 0 bis 3: Konzeptuale Dimension Mechanik) (Hericks, 1993, S. 124 – 137), die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die Schülervorstellungen werden hierbei mit den Theorien der Wissenschaftler verglichen: Wissenschaft ist als Versuch einer theoriengeleiteten Erschließung von Wirklichkeit zu sehen. Die Sicht des Wissenschaftlers auf bestimmte Sachverhalte ist durch die Theorien, von denen er sich leiten lässt, in gewisser Weise vorstrukturiert. Eine Theorie legt dabei ein Raster auf die ursprünglich einheitliche Gesamtwirklichkeit, indem sie die Gegenstände der Betrachtung zusammenfasst und ordnet. Ähnliches gilt für die Schülervorstellungen, so dass sie als Lernertheorien aufgefasst und bezeichnet werden können.

Alltagstheorien zur Mechanik (KM 1): Die Vorstellungen, die ein Schüler vor bzw. zu Beginn eines Physikunterrichts hat, werden als Alltagstheorien beschrieben und sind der Ausgangspunkt physikalischer Kompetenzentwicklung. Diese Alltagstheorien kommen aus der Alltagssprache, die Erklärungsmuster für entsprechende Sachverhalte bereithält und die man sich durch den Gebrauch der Sprache aneignet. Über die Sachverhalte, die zur Mechanik zählen, im Alltag angemessen reden zu können, wird von jedem Menschen in unserer Kultur erwartet. Ein Beherrschen dieser Alltagssprache reicht auch für den alltäglichen Umgang mit diesen Sachverhalten aus. Durch ihre Bedeutung für die alltägliche Kommunikation haben die Alltagstheorien eine soziale Geltung. „*Physikalische Theoriebildung über diese Alltagstheorien hinaus weiter zu entwickeln, setzt ein spezifisches Interesse des Einzelnen an Physik voraus, wie es nicht für jeden in unserer Gesellschaft notwendig ist*“ (Hericks, 1993, S. 127).

Vorwissenschaftliche Lernertheorien (KM 2): Die Alltagstheorien der Mechanik werden bei einer Entwicklung der physikalischen Kompetenz dadurch weiterentwickelt, dass - beispielsweise durch den Physikunterricht angeregt - neue Elemente in die Alltagstheorien eingebaut werden und die bereits verwendeten Begriffe in Richtung auf ihre physikalische Gebrauchsweise präzisiert und differenziert werden. So kann eine in sich mehr oder weniger geschlossene Theorie entstehen, die sich zwar deutlich von der ursprünglichen Alltagstheorie unterscheidet, aber noch nicht der wissenschaftlichen Lernertheorie entspricht.

Wissenschaftliche Lernertheorien (KM 3): Diese Niveaustufe der physikalischen Kompetenz ist das, was angesichts der im Physikunterricht üblicherweise vermittelten Anforderungen und thematisierten Sachverhalte günstigstenfalls erwarten werden kann. Diese Lernertheorie wird als „wissenschaftlich“ bezeichnet, weil sie einer physikalischen Theorie am nächsten liegt, hier also der newtonschen Mechanik. Dieses Niveau beinhaltet nicht die volle Beherrschung der physikalischen Theorie: das kann vom Physikunterricht in der Schule nicht erwartet werden.

Kritisch regredierte Konzeptualisierung der Mechanik (KM 0): Viele Schüler verlieren in der unterrichtlichen Konfrontation mit Physik die Fähigkeit, das Interesse oder den Mut, mechanische Sachverhalte unter Einsatz von Alltagstheorien zu konzeptualisieren und in entsprechender Weise über sie zu reden. Die Alltagstheorien werden also nicht weiterentwickelt, sondern es geschieht ein erlernter Rückgang der Kompetenz unter die Ausgangsbasis. Schüler auf dem Niveau der Alltagstheorien können unbefangen mit diesen Alltagsvorstellungen argumentieren. Schüler auf dem Niveau der kritisch regredienten Konzeptualisierung haben die Unzulänglichkeiten der Alltagstheorie und Alltagssprache aus der Sicht der Physik gelernt und erfahren. Sie wissen aber nicht, wie sie Fachsprache und Fachkonzepte an ihre Alltagstheorien anpassen können. Es bilden sich keine neuen Lernertheorien, sondern es bleibt ein „physikalisch sprachloser“ Schüler zurück.

2.1.6 Zielsetzung des Physikunterrichts bezüglich Schülervorstellungen

Man ist sich in der Didaktik einig, dass es weder möglich noch sinnvoll ist, Alltagsvorstellungen bei den Schülern vollständig zu eliminieren. In diesem Fall hätten die Schüler ja auch Probleme, im Alltag mit anderen über die Phänomene zu kommunizieren. *„Auch der angehende Physiker wird weiterhin [...] sich in alltäglichen Gesprächen, in denen seine Partner in aller Regel Nichtphysiker sind, zweckmäßig der angemessenen Alltagssprache bedienen“* (Hericks, 1993, S. 132). Außerdem ermöglichen diese Vorstellungen ja ein Zurechtkommen in der Umwelt.

NIEDDERER unterscheidet hier zwei Varianten der Veränderung von Schülervorstellungen: *„- Die Weiterentwicklung und Veränderung bestehender (Alltags-) Strukturen (,conceptual change‘) [in Richtung der physikalischen Konzepte]. - Den Aufbau paralleler ‚wissenschaftlicher‘ Denkstrukturen neben den weiter bestehenden Alltagsstrukturen, wobei im Sinne eines bewussten Nebeneinander auch mitgelernt werden muss, wann welche Begriffe und Strukturen angemessen sind“* (Niedderer, 1988, S. 88). Dabei hält er die zweite Zielrichtung für angemessener, weil er eine echte, vollständige Überwindung von Alltagsvorstellungen, also einen echten Wechsel des Konzeptes, oft als uneffektiv und wenig aussichtsreich ansieht.

Beim Aufbau eines physikalischen Konzeptes zusätzlich zur Alltagsvorstellung ist das bewusste Nebeneinander wichtig, denn ein unberührtes Nebeneinander wissenschaftlicher und alltagsnaher Vorstellungen im Sinne einer Kompartimentalisierung (siehe Kapitel 2.1.4) führt zu dem Problem, dass doch das falsche Konzept verwendet wird, wenn das richtige benötigt wird. Die Schüler sollen zwischen den verschiedenen Konzepten unterscheiden können und die jeweiligen Stärken und Schwächen kennen, so dass sie beurteilen können, welche Erklärung wann sinnvoll ist. In vielen Alltagssituationen können ihre Vorstellungen als Grundlage zum Handeln genutzt werden, während sie in anderen Situationen kein erfolgreiches Handeln ermöglichen.

Ein solches nicht-unberührtes, bewusstes Nebeneinander erfordert jedoch auch im gewissen Sinn einen Konzeptwechsel, also eine Veränderung oder Weiterentwicklung des Vorverständnisses, so dass man den Begriff „Konzeptwechsel“ auch weiter fassen kann, wie es häufig auch gemacht wird. D.h. der Begriff „Konzeptwechsel“ oder „conceptual change“ ist unglücklich gewählt, da ein Wechsel im Sinne eines Austausches nicht gelingen kann (Häußler et al., 1998, S. 193 und Duit, 1996, S. 146). Jeder Lernweg von Schülervorstellungen hin zu wissenschaftlichen Vorstellungen

wird deshalb hier als Konzeptwechsel bezeichnet, wobei man zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Wegen unterscheiden kann (siehe auch Kapitel 5.4).

Für einen Konzeptwechsel geben POSNER ET AL. folgende Bedingungen an (Posner, Strike, Hewson, Gertzog, 1982 oder Strike, Posner, 1985):

1. Die Schüler müssen mit dem bereits vorhandenen Konzept in einer Situation unzufrieden sein.
2. Eine neues Konzept muss wenigstens minimal verstanden sein. Es muss also minimal begriffen werden, wie Erfahrung mit dem neuen Konzept befriedigend strukturiert werden kann.
3. Ein neues Konzept muss augenblicklich intuitiv einleuchtend erscheinen.
4. Ein neues Konzept muss das Potential in sich tragen, auf neue Situationen ausgeweitet werden zu können.

2.2 Schülervorstellungen zur Mechanik

Die Mechanik ist ein großes und wichtiges Gebiet der Physik. Außerdem beschäftigt sie sich mit Vorgängen, die der Erfahrung der Schüler näher stehen als andere Teilgebiete der Physik. Deshalb gibt es gerade in diesem Bereich besonders viele Schülervorstellungen. Das Forschungsgebiet „Schülervorstellungen“ gibt es erst seit den Siebziger Jahren in der Naturwissenschaftsdidaktik und ist somit noch eine relativ neue Forschungsrichtung. In der Bibliographie „Students’ and Teachers’ Conceptions and Science Education“ von DUIT (2004) (<http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>) findet man über 6000 englische und deutsche Einträge zu diesem Thema, d.h. Literaturhinweise auf Artikel über empirische Forschung und auf theoretische Veröffentlichungen. Hier findet man auch lange Listen von Schülervorstellungen mit Angabe entsprechender Literaturquellen. Die meisten Untersuchungen zu Schülervorstellungen fanden dabei bisher in dem Gebiet Mechanik statt.

So muss hier eine Beschränkung in der Beschreibung von Schülervorstellungen vorgenommen werden. Es sollen die wichtigsten Vorstellungen von den kinematischen Begriffen und vom Begriff „Kraft“ dargestellt werden. Nicht betrachtet werden soll also der gesamte Bereich der Statik. Auf manche kinematische Probleme (wie z.B. die Superposition von Geschwindigkeiten) oder auf Probleme mit der Wahl des Bezugssystems soll nicht eingegangen werden. Auch Rotationsbewegungen und die damit verbundenen Probleme mit der Zentripetalkraft bleiben hier außer Betracht.

2.2.1 Zu den Begriffen „Ort“ und „Weglänge“

Im traditionellen Unterricht wird oft nicht klar zwischen Ort und Weglänge unterschieden. Da sich hier alle Körper in der Regel eindimensional in positive Koordinatenrichtung bewegen und beim Nullpunkt beginnen, haben der Ort und die zurückgelegte Weglänge identische Werte. Erst bei zweidimensionalen Bewegung kann hier sinnfällig unterschieden werden: Ort nennt man einen Punkt im Bezugssystem. Weglänge nennt man die Länge der Bahnkurve.

2.2.2 Zum Begriff „Geschwindigkeit“

Was schnell und langsam bedeutet ist schon elfjährigen Schülern intuitiv klar (Rhöneck, 1983). Im Alltag wird Geschwindigkeit (englisch: velocity) aber auf eine positive skalare Größe (Betragsgrö-

ße) reduziert, die man mit Schnelligkeit oder Tempo (englisch: speed) bezeichnen könnte. Beim physikalischen Geschwindigkeitsbegriff handelt es sich dagegen um eine vektorielle Größe, die Schnelligkeit und Bewegungsrichtung angibt. Bei eindimensionalen Bewegungen äußert sich der Richtungscharakter der Geschwindigkeit nur noch im Vorzeichen. Es ist verständlich, dass manchen Schüler widerstrebt, bei einem Auto, das in negative Koordinatenrichtung fährt, zu sagen, es fahre mit -60 km/h . Schüler bezeichnen dies als Unsinn.

Die Schüler meinen aus dem Alltagsgebrauch bereits zu wissen, was Geschwindigkeit ist und im Unterricht nur die entsprechenden Formeln dazu lernen zu müssen. So wird auch die Richtung nur der „eigentlichen“ Geschwindigkeit, die für die Schüler die Schnelligkeit ist, hinzugefügt, ohne dass Schnelligkeit und Richtung zu einer neuen Größe verschmelzen (Schecker, 1985, S. 254). Sie aktualisieren diesen Sachverhalt nur, wenn sie gezielt danach gefragt werden, sonst wird ihnen das in der Regel nicht bewusst. So liegt normalerweise für Schüler bei der gleichförmigen Kreisbewegung eine konstante Geschwindigkeit (statt konstante Schnelligkeit) und folglich keine Beschleunigung vor.

Daneben treten weitere Probleme mit der Richtung auf. WODZINSKI weist darauf hin, dass im Gegensatz zur Physik im Alltagsverständnis zwei Körper dann die gleiche Richtung haben, wenn sie auf das gleiche Ziel zulaufen (Wodzinski, 1996, S. 42). Bei Kreisbewegungen liegt im Alltagsverständnis immer die gleiche Richtung vor, nämlich „immer im Kreis herum“, und Schüler zeichnen entsprechend überall den Richtungspfeil kreisförmig gebogen ein.

Des Weiteren ist den Schülern die allgemeine Definition der Geschwindigkeit $v = \Delta x / \Delta t$ auch nach dem Unterricht häufig nicht bewusst und sie greifen auf die vereinfachte Darstellung $v = s/t$ aus dem Anfangsunterricht bzw. aus dem Mathematikunterricht zurück, obwohl diese nur für eindimensionale Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit ohne Anfangsort gilt. Diese Gleichung wird im Anfangsunterricht offensichtlich so fest verankert, dass sie kaum zu relativieren ist, wozu auch die Formelgläubigkeit der Schüler beiträgt. Schüler meinen, bei den unterschiedlichsten Bewegungen die Momentangeschwindigkeit mit $v = s/t$ berechnen zu können. Eine Differenzierung zwischen den Punktgrößen Ort und Zeitpunkt und den Intervallgrößen Weglänge bzw. Ortsdifferenz und Zeitdifferenz fehlt.

Die Untersuchung aus Kapitel 6.4.2.2 zeigt jedoch, dass Schüler zu Beginn der elften Klasse zu großen Teilen zumindest zu einer beschriebenen eindimensionalen Bewegung den richtigen Geschwindigkeits-Zeit-Graphen finden – abhängig von der Aufgabe (97 % bei konstantem v , 88 % bei gleichmäßig größerem v und 81 % bei Richtungsänderungen). Diese Werte steigen durch den Unterricht weiter an (98 % bei konstantem v , 97 % bei gleichmäßig größerem v und 92 % bei Richtungsänderungen).

2.2.3 Zum Begriff „Beschleunigung“

Im Alltagsgebrauch meint „Beschleunigung“ das „Schnellerwerden“, also die Zunahme der Schnelligkeit, d.h. des Geschwindigkeitsbetrags. Anders als in der Physik versteht man darunter aber keinen Quotientenbegriff. Der Zeitraum, in dem das Schnellerwerden stattfindet, wird gelegentlich zusätzlich angegeben. *„Beschleunigung ist demnach keine auf den zeitlichen Verlauf des Vorgangs*

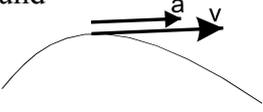
bezogene Größe, sondern eine Bilanzgröße, die aus dem Vergleich von Anfangs- und Endzustand ermittelt wird. Daher ist verständlich, dass mit einer großen Beschleunigung eher das Erreichen großer Endgeschwindigkeiten assoziiert wird als eine starke zeitliche Änderung, die auch bei kleinen Differenzen kleiner Absolutbeträge auftreten kann“ (Schecker, 1985, S. 264). Wegen dieses Differenzcharakters, den die Beschleunigung für die Schüler hat, kann sich die Beschleunigung eines Körpers für manche Schüler nur auf ein Zeitintervall beziehen und es ist für sie auch nicht möglich, einem Zeitpunkt eine Beschleunigung zuzuordnen, was insbesondere bei Umkehrpunkten (tiefster Punkt beim Trampolinspringen, höchster Punkt beim senkrechten Wurf) auftritt.

Der Begriff der Beschleunigung ist für die newtonsche Mechanik aber ein zentraler Begriff. Als zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit - als Veränderung der Veränderung des Ortes mit der Zeit - ist die Beschleunigung jedoch der Erfahrung nicht so leicht zugänglich wie Ort oder Geschwindigkeit und ihre quantitative Erfassung ist sehr viel schwieriger.

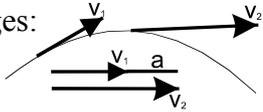
So wird der Begriff Beschleunigung von den Schülern in seiner Komplexität oft reduziert (siehe Abb. 2.1). Am Drastischsten ist die Reduktion auf Geschwindigkeit. Dies entspricht dem Alltagsgebrauch, bei dem man unter einer beschleunigten Bewegung „nur“ eine schnelle Bewegung versteht, wie es beispielsweise bei dem Begriff der „beschleunigten Bearbeitung eines Aktenstückes“ deutlich wird (Pohl, 1944, S. 14). Bei qualitativen Aufgaben zur Beschleunigung antworten Schüler dann so, als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden (Heuer, Wilhelm, 1997) (siehe Kapitel 6.4.2.3 und 6.4.3.1). DYKSTRA (1991, S. 42 - 44) legt dar, dass Schüler vor dem Unterricht nur eine undifferenzierte Sicht von Bewegung haben und nicht zwischen verschiedenen Bewegungsformen und nicht zwischen den verschiedenen Bewegungsgrößen (Geschwindigkeit/Beschleunigung) unterscheiden.

Von mehr Verständnis zeugt die Reduktion der vektoriellen Beschleunigung auf eine skalare Größe, nämlich die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (als absolute Größe $\Delta|\vec{v}|$ oder als auf ein Zeitintervall Δt bezogene Größe $\Delta|\vec{v}|/\Delta t$). Wird Beschleunigung so verstanden, bereiten nach

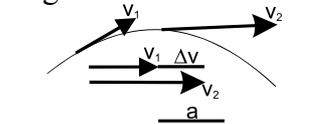
☹ Kein prinzipieller Unterschied zwischen Beschleunigung und Geschwindigkeit $\vec{a} \sim \vec{v}$, nur verschiedene Formeln



☹ Beschleunigung ist Änderung des Geschwindigkeitsbetrages: $a = \Delta|\vec{v}|$ ist eine Zahl
(positive) Beschleunigung = schnellerwerden
negative Beschleunigung = langsamerwerden



☹ Beschleunigung ist Änderung des Geschwindigkeitsbetrages pro Zeit: $a = \Delta|\vec{v}|/\Delta t$ ist eine Zahl
(positive) Beschleunigung = schnellerwerden
negative Beschleunigung = langsamerwerden



☹ Beschleunigung ist eine vektorielle Größe: $\vec{a} = \Delta\vec{v}/\Delta t$ hat eine Richtung.

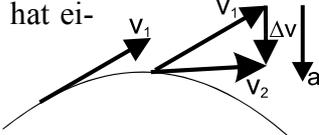


Abb. 2.1: Überblick über Schülervorstellungen zur Beschleunigung

dem entsprechenden Unterricht auch negative Beschleunigungen meistens kaum Probleme. „Beschleunigen“ heißt demnach „schnellerwerden“, auch als „positive Beschleunigung“ bezeichnet; „negative Beschleunigung“ bedeutet dann „langsamerwerden“, „verzögern“, „bremsen“.

Wird nun Beschleunigung als eine solche skalare Größe betrachtet, die die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (pro Zeiteinheit) angibt und deren Vorzeichen die Zu- bzw. Abnahme des Geschwindigkeitsbetrages anzeigt, führt dies zunächst kaum zu Problemen, da sich ein Körper in der Schule meist in positive Richtung bewegt.

Erst bei Bewegungen in negative Richtung - wie sie bei Bewegungen mit Richtungswechsel auftreten - führt diese Vorstellung zu entgegengesetzten Ergebnissen als das physikalische Konzept (siehe Kapitel 6.4.3.1), bei dem die vektorielle Beschleunigung der Quotient aus der Änderung des Geschwindigkeitsvektors durch zugehöriges Zeitintervall ist (Beispiel: In negative Richtung schneller werden ist eine negative Beschleunigung). Besonders schwierig wird es dann bei der zweidimensionalen Bewegung, da eine Kreisbewegung mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag dann keine Beschleunigung ergibt und eine Zentripetalbeschleunigung nicht verstehbar ist. Entsprechend wird bei einer Kurvenfahrt mit veränderlicher Geschwindigkeit von den Schülern nur die tangentielle Komponente der Beschleunigung angegeben (siehe Kapitel 6.4.1.1). Diese unangemessenen Reduktion findet man sogar in Universitätslehrbüchern, in denen beim mathematischen Pendel die tangentielle Beschleunigung als die (gesamte) Beschleunigung dargestellt wird, ohne darauf zu verweisen, dass die Bewegung auf dem Kreisbogen einen radialen Beschleunigungsanteil ergibt (Reusch, Heuer, 2000, S. 349). Die Kraft durch das Seil kompensiert eben nicht die radiale Komponente der Gewichtskraft, sondern ist (außer in den Umkehrpunkten) größer, sonst könnte sich der Pendelkörper nicht auf einer Kreisbahn bewegen.

Die Untersuchungen in den Kapiteln 6.4.1.1, 6.4.2.3 und 6.4.3.1 zeigen insgesamt, dass im herkömmlichen Unterricht nur ein recht kleiner Teil der Schüler so ein physikalisches Verständnis der Beschleunigung erreichen, dass sie auch bei Kurvenfahrten und eindimensionalen Bewegungen mit Richtungsumkehr physikalisch korrekte Antworten geben können. Der traditionelle Unterricht erreicht also nicht viel mehr, als dass ein großer Teil der Schüler Beschleunigung als Änderung des Geschwindigkeitsbetrages konzeptualisieren. In der Regel lassen sich nach dem Mechanikunterricht alle drei verschiedenen Vorstellungen ($\vec{a} \sim \vec{v}$, $a \sim \Delta|\vec{v}|$ und $\vec{a} \sim \Delta\vec{v}$) gleichzeitig in einer Klasse finden, wobei es von der Aufgabenstellung abhängt, welche dieser Vorstellung überwiegend genutzt wird.

Sollen Gymnasiasten nach dem Mechanikunterricht bei einer eindimensionalen Bewegung die Beschleunigungsrichtung als Pfeil einzeichnen (siehe 6.4.1.1), wird dies noch von fast allen richtig gelöst (ca. 90 %). Bei einer zweidimensionalen Bewegung lösen nur 5 % bis 12 % die Aufgabe richtig, während die Hälfte bis Dreiviertel der Schüler nur eine Art tangentielle Beschleunigung angibt (siehe 6.4.1.1). Auch die Untersuchungen von REIF und ALLEN (1992) sowie von HESTENES und WELLS (1992) zeigen große Schwierigkeiten von amerikanischen Schülern und Studenten bei der Richtung der Beschleunigung bei krummlinigen Bewegungen.

Sollen die Gymnasiasten nach dem Mechanikunterricht bei den eindimensionalen Bewegungen aber Zeit-Graphen auswählen, geben ca. 50 % eine Antwort, die wenigstens einem gewissen Beschleunigungsverständnis entspricht ($a \sim \Delta|\vec{v}|$ oder $\vec{a} \sim \Delta\vec{v}$), während ca. 40 % nur der Geschwindigkeit entsprechend ($\vec{a} \sim \vec{v}$) antworten (siehe 6.4.2.3). Die Kombination von „Beschleunigungsrichtung ermitteln“ und „Graphen interpretieren“ ist bei eindimensionalen Bewegungen offensichtlich deutlich schwerer als jede dieser Aufgaben allein. Sollen aber bei einer eindimensionalen Bewegung mit Richtungsumkehr nur Vorzeichen angegeben werden, geben ebenso ca. 40 % Antworten, als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden (siehe 6.4.3.1). Ca. ein Drittel antwortet entsprechend der Schnelligkeitsänderung $a \sim \Delta|\vec{v}|$ und ca. ein Sechstel schafft eine Antwort, die wenigstens bis auf den Umkehrpunkt richtig ist.

2.2.4 Zum Begriff „Kraft“

Zu Schülervorstellungen zum Begriff „Kraft“ wurden schon viele Untersuchungen durchgeführt. SCHECKER (1985) legte in seiner Dissertation eine kurze Zusammenfassung der bis dahin gemachten Untersuchungen über Schülervorstellungen vor (Es handelt sich hierbei um die Untersuchungen von ARONS (1981), CHAMPAGNE et al. (1980), CLEMENT (1982), MCCLOSKEY (1983), JUNG, WIESNER, ENGELHARDT (1981), LEBOUTET-BARELL (1976), SCHENK (unveröffentlichtes Manuskript von 1983), TROWBRIDGE ET AL. (1980 und 1981), VIENNOT (1979), WARREN (1979), WATTS (1983) und WHITAKER (1983)). Es kann hier nicht darum gehen, alle Ergebnisse der vielen bisher durchgeführten Studien darzulegen, sondern lediglich darum, einen Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse zu geben. Andere neuere Übersichten über Schülervorstellungen zur Mechanik findet man z.B. bei WIESNER (1994) und bei MÜLLER ET AL. (2004).

2.2.4.1 Der Clusterbegriff „Kraft“

Der Begriff „Kraft“ ist bei den Schülern - wie viele andere Worte der Umgangssprache - ein Sammelbegriff, der nicht scharf definiert ist und vielfältige Bedeutungen haben kann. SCHECKER bezeichnet einen solchen Begriff als „Clusterbegriff“ (Schecker, 1985, S. 270, oder Schecker, 1984b, S. 196). „Kraft“ ist dabei nur ein sprachliches Zeichen für den Clusterbegriff Energie/Kraft/Schwung/Wucht/Stärke/Gewalt usw.; es sind verschiedene Namen, die den gleichen Clusterbegriff beschreiben. So ist auch „ $F = m \cdot a$ “ nur eine Formel für „Kraft“, wobei es für den Schüler noch ganz andere Formeln geben kann. „*Alle mechanischen Vorgänge (In-Bewegung-Setzen, Bewegung, Bewegungsänderung, Verformung) erfolgen unter dem Einfluss von Kräften. Körper können Kraft haben, Kraft ausüben, eine Kraft erfahren, Kraft speichern, Kraft verbrauchen usw. Kräfte sind die bestimmenden Antriebe für alle Veränderungen in den Konfigurationen der materiellen Dinge*“ (Schecker, 1985, S. 270). Die physikalischen Begriffe „kinetische Energie“, „Impuls“, „Leistung“, „Kraft“ und „Kraftstoß“ passen so zu einzelnen Aspekten des Clusterbegriffes „Kraft“, jedoch stimmen die Schülervorstellungen zum Teil mit keinem physikalischen Konzept überein. Es ist nicht so, dass der Schüler das eine Wort „Kraft“ für verschiedene Begriffe verwendet, die er inhaltlich trennen kann, oder dass er nur die Begriffe wie Vokabeln verwechselt; vielmehr sieht er keinen

Unterschied zwischen diesen Begriffen. Er lernt im Unterricht häufig nur, in Standardaufgaben an der richtigen Stelle das richtige Wort bzw. die richtige Formel zu verwenden, ohne den Clusterbegriff in klar getrennte physikalische Begriffe zu differenzieren. Demnach geht es nun darum, die physikalisch wichtigsten Facetten des Clusterbegriffs „Kraft“ in den Schülervorstellungen zu erläutern.

Insgesamt lässt sich die Bedeutung, in der das Wort „Kraft“ meist gebraucht wird, vielleicht am besten mit „Wirkungsfähigkeit“ beschreiben, was eher dem physikalischen Energiebegriff nahe kommt (Schecker, 1985, S. 270, oder Duit, 1976, S. 10). Wir verwenden auch als Physiker das Wort „Kraft“ im Alltag meistens im Zusammenhang mit „Kraft haben“ und in der Bedeutung „die Fähigkeit haben, etwas zu tun“. „Kraft“ wird also mit den Voraussetzungen zur Ausübung einer Tätigkeit bzw. mit den Voraussetzungen zur Wechselwirkung, nicht aber mit der unmittelbaren Wechselwirkung selbst in Verbindung gebracht (Weber, 1985, S. 283).

2.2.4.2 Schülervorstellungen vom Begriff „Kraft“

Eine Gliederung der Schülervorstellungen gestaltet sich recht schwierig, da verschiedene Vorstellungen eng vernetzt sind und - wie gezeigt - die Bedeutung des Begriffs nicht scharf abgegrenzt ist. Die hier getroffene Gliederung orientiert sich vor allem an SCHECKER (1985, S. 270 – 320) und JUNG (1980a, S. 110 – 115). Da sich die beschriebenen Vorstellungen in den Arbeiten sehr vieler Autoren finden, wird auf weitere Quellenangaben weitgehend verzichtet.

Sich bewegendende Körper haben Kraft:

Häufig wurde und wird bei Schülern die Vorstellung gefunden, dass ein sich in Bewegung befindender Körper eine Kraft besitzt, die man auch Wucht, Schwung oder innere Kraft nennen könnte. Man spürt diese Kraft, wenn man z.B. von einem sich bewegendem Körper getroffen wird, wie einem Fußball oder einem Auto. „*Man erkennt diese Kraft einmal in seiner Eigenbewegung (Durchsetzung gegen Bewegungswiderstände) und zum anderen in der Beeinflussung anderer Körper beim Stoß*“ (Schecker, 1985, S. 286). Beim Stoß wird aber nur die Kraft sichtbar, die der Körper schon davor in sich hatte. Diese Kraft ist eine Eigenschaft des bewegten Körpers und abhängig von der Masse und der Geschwindigkeit des Körpers. Er hat die Kraft beim In-Bewegung-Setzen erhalten und kann sie bei Gelegenheit abgeben. HERICKS spricht hier von der Kraft (bzw. Energie) *in* der Bewegung (Hericks, 1993, S. 131). Man könnte diesen Kraftbegriff annähernd mit dem physikalischen Begriff „Energie“ oder auch „Impuls“ beschreiben. Diese Kraft ist nach Schülervorstellungen proportional zur Gesamtwirkung bei einem Stoß, die z.B. an der Verformung eines Körpers zu sehen ist. Dabei spielt die Zeit der Einwirkung keine Rolle, sondern nur das Ergebnis. So hängt die Größe der Kraft z.B. auch von der erreichten Endgeschwindigkeit eines Beschleunigungsvorgangs ab, aber nicht vom Beschleunigungsvorgang selbst. Diese Kraft kann beim Stoß auch von einem Körper auf einen anderen übertragen werden („Kraftübertragung“). Man kann also sagen, dass hier eine Vermischung mit den Begriffen „Energie“ oder „Impuls“ vorliegt und Erfahrungen mit Kraftstößen eine Rolle spielen.

Für eine konstante Geschwindigkeit ist eine konstante Antriebskraft nötig:

Ebenso weit verbreitet ist die Vorstellung, dass für eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit der Einfluss einer von außen wirkenden, konstanten Kraft in Bewegungsrichtung nötig ist, die man mit Triebkraft, Bewegungskraft oder Antriebskraft bezeichnen könnte. HERICKS spricht hier von der Kraft (bzw. Energie) *zum* Bewegen (Hericks, 1993, S. 131). Diese wirkende Kraft ist proportional zu der Geschwindigkeit des Körpers und eine Zu- oder Abnahme der Geschwindigkeit kommt von einer Zu- oder Abnahme der Kraft. Ist jedoch kein externer Beweger vorhanden, bewegt der Körper sich zwar noch weiter durch die innere Kraft, die er von der vorher wirkenden äußeren Kraft gespeichert hat, wird aber immer langsamer und kommt zum Stillstand, weil er die gespeicherte Antriebskraft verbraucht. Diese Vorstellung hängt sehr eng mit der erstgenannten Vorstellung „Sich bewegende Körper haben Kraft“ zusammen. Ohne Antriebskräfte befindet sich ein Körper also in Ruhe oder kommt zur Ruhe. Diese Vorstellungen entsprechen unseren Erfahrungen in einer Welt, in der es stets Reibung gibt, und ohne Antrieb jede Bewegung zur Ruhe kommt. Wirken mehrere Kräfte auf einen Körper gleichzeitig ein, bewegt er sich je nach Vorstellung in Richtung der resultierenden oder in Richtung der stärksten Kraft.

Aktive Körper üben Kräfte aus, passive Körper leisten Widerstand:

Allgemein findet man bei Schülern die Tendenz, die Körper, die bei einem Vorgang beteiligt sind, in aktive und passive Körper einzuteilen. Nur den aktiven Körpern wird die Fähigkeit zugesprochen, eine Kraft auszuüben, während ein passiver Körper keine Kraft ausüben kann, sondern lediglich aktive Kräfte oder Bewegungen hemmen kann. In einer engeren Vorstellung zählen nur belebte Körper als aktive, in einer weiteren Vorstellung auch solche, die sich in Bewegung befinden oder sich wie eine Feder in einem Spannungszustand befinden. Schließlich gehören auch magnetische Körper oder eventuell bei Fallvorgängen schwere Körper durch ihre Gewichtseigenschaft dazu. Passive Körper sind dagegen solche, die sich nicht bewegen und sich in entspannten, stabilen Lagen befinden.

BAO ET AL. (2002) untersuchten bei Problemlöseaufgaben zum dritten newtonschen Gesetz, von welchen Merkmalen die Antworten von Studenten nach entsprechendem Unterricht abhängen: Zu einem großen Teil werden falsche Antworten gegeben gemäß den stabilen Vorstellungen „Der schwere Körper übt eine größere Kraft aus.“ und „Der schnellere Körper übt eine größere Kraft aus.“ Ebenfalls noch häufig, aber abhängig vom erhaltenen Unterricht zeigt sich die Vorstellung „Der Aktive übt die größere Kraft aus.“, wobei hier aber auch die Erfahrung eine Rolle spielen kann, dass der Stoßende ebenso gestoßen wird.

OPITZ zeigt an dem Beispiel zweier unterschiedlich schwerer schwimmender Magnete, dass die Mehrheit (69 %) der Studienanfänger naturwissenschaftlicher und technischer Fachrichtungen (N = 81) die Bewegung, d.h. die Geschwindigkeit, richtig voraussagen können (schwerer Magnet ist langsamer). Dennoch geben 43 % dieser Studenten, die die richtigen Geschwindigkeiten angeben, falsche Kräfte im Sinne von „leichterer Magnet erfährt geringere Kraft“ an (Opitz, 1997, S. 209). Das bedeutet, dass diese Schüler so antworten, als wäre nach der Beschleunigung der Körper statt nach der auf ihnen einwirkenden Kräfte gefragt. Insgesamt geben nur 31 % aller Studenten richtige Kräfte an.

Eng damit verbunden sind Vorstellungen von Absichten und Zielen. Aktive Kräfte dienen in Schülervorstellungen einem bestimmten Ziel, d.h. sie können mit einem bestimmten Ziel auf sich oder auf andere Körper einwirken. Passive Widerstände sind ohne Absicht nur Hemmnisse. Demnach sind Reibungskräfte immer nur Widerstände gegen Bewegungen, aber keine wirklichen Kräfte.

Beispielsweise wurden Schüler mit der Aussage konfrontiert, dass es beim Anfahren eines Autos die Straße ist, die die beschleunigende Kraft ausübt, was von den Schülern entschieden als völlig absurd abgelehnt wurde: Die Straße, die einfach nur so daliege (passiv, absichtslos), könne doch keine Kraft ausüben und kein Auto beschleunigen (aktiv, zielgerichtet) (Jung, Wiesner, 1980, S. 117, und Engelhardt, Wiesner, 1983, S. 18, und Schecker, 1985, S. 195). Ebenso gilt für die Schüler, dass ein Sprinter sich selbst durch seine eigene Kraft vom Startblock abstoßen kann, während der Startblock keine Kraft ausübt, sondern als Widerstand ein Wegrutschen des Fußes verhindert (Schecker, 1985, S. 310). *„Ein Tisch übt auf ein auf ihm liegendes Buch keine Kraft aus. Er verhindert lediglich als Hemmnis, dass das Buch auf den Boden fällt“* (Schecker, 1985, S. 311).

Bei diesen Aussagen merkt man schon, dass das 3. newtonsche Axiom überhaupt nicht verstanden wird. Die Formulierungen „actio gleich reactio“ bzw. „Kraft gleich Gegenkraft“ verleiten allerdings auch zu der beschriebenen Einteilung in eine aktive Ursache und in eine passive Wirkung. In der newtonschen Sichtweise sind jedoch beides völlig gleichberechtigte Kräfte. Das 3. Axiom wird von den Schülern meistens so verstanden, dass beide Kräfte am gleichen Körper angreifen. *„Die 'Gegenkraft' wird von einem Körper als passiver Widerstand gegen eine von außen einwirkende Kraft mobilisiert“* (Schecker, 1985, S. 311). Wirkt also auf einen ruhenden Körper eine äußere Kraft ein, bewirkt seine Gegenkraft, dass er sich nicht oder nur allmählich in Bewegung setzen lässt. *„Eine Beeinflussung des in Wechselwirkung stehenden Körpers wird aus drei Gründen oft nicht ins Auge gefasst:*

- *Die Gegenkraft ist die Reaktion eines passiven Körpers.*
- *Sie hat nicht das 'Ziel', den anderen Körper zu beeinflussen.*
- *Die Bewegungsrichtung des in Gang gesetzten Körpers ist entgegengesetzt zu der Richtung, in der er die Kraft ausüben müßte“* (Schecker, 1985, S. 311).

Bei den beschriebenen Vorstellungen spielen auch Überwindungsvorstellungen eine entscheidende Rolle. Damit ein Körper beschleunigt wird, muss für manche Schüler die von außen wirkende Kraft größer sein als die Gegenkraft bzw. größer als die Trägheit des Körpers, die als Gegenkraft bezeichnet wird. Aber *„der ganze Vorgang wird nicht unter dem Aspekt von Größen auf einer einheitlichen Dimension gesehen“* (Jung, 1980a, S. 112 - 113), denn die Trägheit bzw. die Gegenkraft sind in der Schülervorstellung keine Kräfte. Ist die äußere Kraft nicht groß genug, bewegt sich nach dieser Vorstellung der Körper nicht; das bedeutet, dass hier eine Schwellenvorstellung vorliegt.

Insgesamt kann man sagen, dass viele Aspekte der Schülervorstellungen zum Begriff „Kraft“ stark an Aspekte der Aristotelischen Bewegungslehre bzw. ihrer scholastischen Interpretation oder mehr noch an Aspekte der Impetustheorie erinnern. Hier sei nochmals erwähnt, dass diese Vorstellungen *„relativ geschlossene und widerspruchssarme Strukturen [haben], die diesen Aussagen eine erstaunliche Leistungsfähigkeit und Beständigkeit verleihen“* (Weber, 1989, S. 22).

Absolute Zahlenwerte:

Die Untersuchungen in den Kapiteln 6.5.1.2, 6.5.2.1 und 6.5.2.2 und zeigen, wie viele bzw. wie wenige Schüler vor und nach dem Mechanikunterricht der Oberstufe des Gymnasiums in typischen Testaufgaben entsprechend dem newtonschen Konzept antworten bzw. entsprechend den beschriebenen Alltagsvorstellungen antworten. Bei den sehr unterschiedlichen qualitativen Multiple-Choice-Denkaufgaben des FCI-Tests, bei denen als Alternativen typische Alltagsvorstellungen beschrieben werden, antworten nach der Mittelstufe (nach der S I) 28 % der Schüler richtig im physikalischen Sinn (siehe Kapitel 6.5.1.2). Durch einen geringen mittleren relativen Zugewinn von nur 18 % geben nach dem Mechanikunterricht der Oberstufe (S II) 41 % eine korrekte Antwort.

Wenn die Schüler zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen die passende Kraft $\vec{F} \sim \vec{a}$ - beschrieben in Textform - auswählen sollten, wird dies nach der Mittelstufe (nach der Sekundarstufe I) im Durchschnitt nur von ca. ein Siebtel der Schüler richtig gelöst (siehe Kapitel 6.5.2.1). Im traditionellen bayerischen Unterricht der elften Jahrgangsstufe gibt es hierbei einen geringen relativen Zugewinn (bezogen auf den möglichen Zugewinn) von ca. 20 %, so dass nach diesem Unterricht ein Drittel der Schüler diese einfachen Aufgaben richtig lösen. Antworten, bei denen eine der Geschwindigkeit entsprechende Kraft angegeben wird, werden dagegen nach der Mittelstufe von ca. zwei Dritteln der Schüler gegeben. Dieser Anteil nimmt durch den Unterricht auf die Hälfte der Schüler ab, die restlichen Schüler geben diverse andere Antworten.

Werden dagegen die möglichen Antworten stattdessen als Zeit-Kraftgraphen vorgegeben, werden die quasi gleichen Aufgaben nach der Mittelstufe von unter ein Zehntel der Schüler im newtonschen Sinne $\vec{F} \sim \vec{a}$ beantwortet (siehe Kapitel 6.5.2.2). Durch den Unterricht steigt dieser Anteil auf nur ca. zwei Zehntel an (relativer Zugewinn: ca. 15 %). Der Anteil von Antworten, bei denen eine zur Geschwindigkeit proportionale Kraft $\vec{F} \sim \vec{v}$ angegeben wird, ist nach der Mittelstufe bei ca. 69 % und fällt durch den Unterricht nur auf 65 % ab. Die Kombination von „Kraftrichtung ermitteln“ und „Graphen interpretieren“ ist wohl deutlich schwerer als jede dieser Aufgaben allein.

2.2.4.3 Einordnung von Schülervorstellungen in die Niveaustufen von Hericks

Im Kapitel 2.1.5 wurde bereits vorgestellt, dass nach SCHENK bzw. HERICKS die Schülervorstellungen im Bereich Mechanik in vier Niveaustufen, also vier Lernertheorien, unterschieden werden können (Niveaustufen der Entwicklung der „Konzeptualen Dimension Mechanik“ = KM). Die Schülervorstellungen sollen noch einmal unter diesem Aspekt betrachtet werden (Hericks, 1993, S. 130 f., S. 133 - 137).

Alltagstheorien zur Mechanik (KM I): Auf der Stufe der Alltagstheorien wird zwischen natürlichen, d.h. selbst-verständlichen Bewegungen, die keiner Erklärung bedürfen (wie z.B. die Planetenbewegung und die Fallbewegung), und unnatürlichen, erklärungsbedürftigen Bewegungen (wie z.B. die Bewegung eines Autos auf ebener Strecke) unterschieden. Als wichtigstes Kriterium zur Charakterisierung aller Alltagstheorien gilt die Vorstellung, dass jede unnatürliche Bewegung „Kraft“ im Sinne des Clusterbegriffes „Kraft“ erfordert und ohne Antrieb wieder zur Ruhe kommt. Hierzu gehört sowohl die Vorstellung „Sich bewegende Körper haben Kraft“, als auch die Vorstellung „Für

eine konstante Geschwindigkeit ist eine konstante Antriebskraft nötig“. Reibung wird als ein stets vorhandener Einfluss aus allen Beschreibungen alltäglicher Bewegungen herausgehalten. Die Reibungswiderstände im newtonschen Sinne als Kräfte anzusehen, würde die Beschreibung dieser Bewegungen auch nur unnötig kompliziert werden lassen (Hericks, 1993, S. 130). Da also für jede unnatürliche Bewegung ein Aufwand von Kraft benötigt wird, wird auch nicht zwischen Bewegungen mit gleich bleibender oder sich verändernder Schnelligkeit unterschieden; jede Bewegung hat einen dynamischen Aspekt und beinhaltet Kraft. Deshalb kann auch nicht zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung unterschieden werden. Die Schüler kennen keine rein kinematischen, bewegungsbeschreibenden Begriffe.

Vorwissenschaftliche Lernertheorien (KM 2): Das charakteristische Element der vorwissenschaftlichen Lernertheorien, das gegenüber den Alltagstheorien neu dazugekommen ist, ist die Beschleunigung. Sie wird als positive Änderung der Schnelligkeit angesehen (skalare Größe). Entsprechend wird eine negative Änderung der Schnelligkeit als Bremsen (oder negative Beschleunigung) verstanden. Das Cluster Antriebskraft/-energie wird von der Bewegung an sich auf das Beschleunigen übertragen. Man braucht also Kraft/Energie zum Beschleunigen und zum Bremsen. Bewegungen werden somit in Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit und beschleunigte Bewegungen unterteilt. Die Unterscheidung „natürliche“ oder „unnatürliche“ Bewegungen ist hinfällig geworden. Alle Bewegungen einschließlich Fallbewegungen sind mechanisch erklärungsbedürftige Bewegungen.

Die beschriebene Vorstellung „aktive Körper üben Kräfte aus, passive Körper leisten Widerstand“ gehört zu den vorwissenschaftlichen Lernertheorien. Hier wird in einer Art Aktivitätsdenken zwischen aktiven, wirkenden Ursachen (= Kräfte) und passiven, verursachten Folgen (= Widerstände) unterschieden. Es wird zwar akzeptiert, Widerstände als Kräfte zu bezeichnen, aber trotzdem werden sie von Antriebskräften unterschieden. Die Antriebskraft bewirkt Bewegung bei Anwesenheit von Widerständen und Beschleunigung bei Abwesenheit von Widerständen. Bei einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit unter Einfluss von sowohl Reibung als auch einer konstanten Kraft sieht der Schüler zwar, dass sich die gerichtete Antriebskraft (echte Kraft) und die ungerichteten Widerstände aufheben, er kann diese Bewegung aber nicht wie der Physiker als „kräftefrei“ bezeichnen (Hericks, 1993, S. 134). Auch das Missverstehen des dritten newtonschen Axioms als Folge des Aktivitätsdenkens gehört zu den vorwissenschaftlichen Lernertheorien. Hier wird deutlich, dass die Vorstellungen der vorwissenschaftlichen Lernertheorien erst durch den Physikunterricht entstehen.

Wissenschaftliche Lernertheorien (KM 3): Auf dieser Niveaustufe werden Bewegungen unter dem Einfluss von Kräften zutreffend beschrieben. SCHENK (1984, S. 117) bezieht das allerdings nur auf eindimensionale Bewegungen eines Körpers, während mehrdimensionale Bewegungen und die Bewegung zweier Körper wie Mond und Erde nicht korrekt beschrieben werden können.

Kritisch regredierte Konzeptualisierung der Mechanik (KM 0): Die Schüler dieser Stufe vermeiden jede mechanische Konzeptualisierung und wollen Aufgaben nur über Gleichungen und Rechnungen lösen, was ihnen bei konventionellen Aufgaben durchaus gelingt.

2.2.5 Schülervorstellungen über Physik

PRIEMER (2003, S. 161 f.) versteht unter „epistemologischen Überzeugungen“ Vorstellungen über die Praxis des naturwissenschaftlichen Arbeitens, den epistemologischen Status von naturwissenschaftlichem Wissen, die Strukturierung und Klassifikation von Wissen und die persönliche Bedeutung naturwissenschaftlicher Inhalte für den Lernenden. URHAHNE und HOPF (2004, S. 71) verstehen unter „epistemologischen Überzeugungen“ sowohl Vorstellungen über die Struktur des Wissens als auch über den Wissenserwerb. GRYGIER ET AL. (2004, S. 1) (Günther et al., 2003, S. 150) verwenden dagegen den Begriff „Wissenschaftsverständnis“ als einen vereinfachenden, elementarisierten Begriff, der erkenntnistheoretische, wissenschaftstheoretische und wissenschaftliche Aspekte der Philosophie einschließt. Sie betonen, dass das Verstehen der Natur der Naturwissenschaften erfolgreiches Lernen naturwissenschaftlicher Inhalte unterstützt (Grygier et al., 2004, S. 5), und legen dar, dass empirische Untersuchungen diese These für Schüler der Sekundarstufe I bestätigen, während es für die Sekundarstufe II nur punktuelle Untersuchungen gibt (z.B. Mikelskis-Seifert, 2002). PRIEMER (2003, S. 160 f.) gibt auch mehrere internationale Untersuchungen an, die zeigen, dass individuelle Ansichten über Wissen und Lernen große Bedeutung für Lernerfolge haben.

Schülervorstellungen über Naturwissenschaften sind sehr heterogen und die entsprechenden Studien zeigen kein einheitliches Bild (Höttecke, 2001, S. 71). Hier können nur solche Vorstellungen beschrieben werden, die bei vielen Schülern vorkommen. Nach DEANNA KUHN (1989) liegt ein Problem darin, dass Schüler nicht zwischen Theorie und experimentellen Belegen differenzieren und so zu einer einzigen Darstellung der Dinge kommen, wie sie sind („*a single representation of, the way things are*““, KUHN, 1989, S. 687). So verstehen sie den Zusammenhang zwischen Theorie und Experiment nicht. Schüler tendieren damit häufig zu der Auffassung, die Physik bilde die Wirklichkeit eins-zu-eins ab, sie entwerfe eine wahrheitsgetreue Kopie der Welt; Schüler sind also naive Realisten (Kircher, 1995, S. 246 f., Priemer, 2003, S. 161). Alles, was wir über die Wirklichkeit wissen, ist aber menschliche Konstruktion, was für Schüler eine fremde Vorstellung ist. Das konstruierte Wissen muss sich im Einklang mit der Realität erweisen und die Wissenschaftsgeschichte hat gezeigt, dass immer wieder Widersprüche zwischen physikalischen Wissen und der Realität auftraten, die zu einer Veränderung der physikalischen Sicht führten. Physik ist eine theoriebildende Wissenschaft und „*Physik lernen' bedeutet [...] ‚physikalische Modellbildung*“ (Kircher, 1995, S. 91). Unter diesem umfassenden Begriff „Modell“ fallen Schülervorstellungen und physikalische Hypothesen genauso wie bewährte Theorien. Für Schüler aber sind die wissenschaftlichen Objekte (wie z.B. Atom, Lichtstrahl, Elektron) genauso real wie Gegenstände des Klassenzimmers.

MEYLING (1990, S. 154 f.) gibt einen Überblick über Schülervorstellungen von S II-Schülern zu wissenschaftstheoretischen Begriffen und naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung (Kircher, 1995, S. 247 f.). Demnach sind die Schüler sehr am Begreifen der Realität interessiert, die sie für erkennbar halten. Nach ihrer Ansicht besteht das physikalische Wissen aus wahren Aussagen über diese Realität, während physikalische Theorien nach ihrer Meinung nur hypothetische, noch nicht bewiesene Aussagen sind. Erkenntnisse werden nicht durch Intuition, sondern nur empirisch aus dem Experiment oder durch deduktives Ableiten aus bekannten Naturgesetzen gewonnen. Auch die TIMS/III-Studie ergab, dass Schüler glauben, dass Physiker die in der Natur existierenden physika-

lischen Gesetze Schritt für Schritt entdecken; Wissen wird demnach nicht konstruiert (Köller et al., 2000, S. 267).

Eine ausführliche Analyse von Schülervorstellungen über die Natur der Naturwissenschaften gibt HÖTTECKE (gegliedert in vier Punkte), wobei er sich vor allem auf angelsächsische Beiträge stützt (2001, S. 41 – 84, und gekürzt 2004, S. 264 - 274): Bezüglich der Person des Naturwissenschaftlers besteht eine große Spannbreite von z.T. widersprüchlichen Vorstellungen; er wird aber eher als ein einzeln arbeitendes Individuum und als Mann gedacht, dessen Motivation in einem persönlichen Bedürfnis nach Wissen (Neugier) liegt und dessen Arbeitsplatz ein Labor ist. Neben meist adäquaten Vorstellungen von Hypothesen findet man meist inadäquate Vorstellungen von Theorien, die als Gegensatz zur Praxis angeblich praktische Erfahrung ersetzen und nicht eindeutig bewiesene Hypothesen seien (Aus Hypothesen werden durch fortschreitende Bestätigung Theorien und danach eindeutig bewiesene Gesetze); naturwissenschaftliches Wissen sehen Schüler wohl meistens richtigerweise als veränderlich an – allerdings aus verschiedenen Gründen. Schüler glauben, dass Wissenschaftler empirisch arbeiten sollen, wobei sie neutral, objektiv und nicht theoriegeladen messen; es ist kein zielgerichtetes Handeln im Rahmen bestimmter Denk- und Handlungszwänge; für jüngere Schüler ist es ein eher planloses Ausprobieren und Entdecken, während erfahrenerer Schüler ein naiv-empiristisches Verständnis entwickeln. Schließlich haben die Schüler keine adäquate Vorstellung von der sozialen Dimension wissenschaftlicher Wissensproduktion, sondern schätzen die Selbstevidenz von Fakten höher ein als die Bewertung durch die scientific community, was durch den traditionellen empiristisch-induktivistischen Physikunterricht gefördert wird.

Im Kapitel 6.6.2 wird gezeigt, dass viele bayerische Gymnasiasten Physik als Sammlung einzelner Fakten statt als ein verbundenes Gefüge ansehen. Außerdem wird gezeigt, dass viele Schüler meinen, die in Physik gelernten Ideen haben wenig Bezug zu Geschehnissen außerhalb des Klassenzimmers.

2.2.6 Schülervorstellungen über das Lernen

Beim Lernen der Kinematik und Dynamik spielen auch die Vorstellungen eine Rolle, die Schüler vom Lernen haben, so dass hier sehr kurz auf dieses lernpsychologische Thema eingegangen wird. Wie Schüler lernen, wird schließlich davon bestimmt, wie Schüler über Lernen denken. URHAHNE und HOPF unterteilen nach HOFER und PINTRICH epistemologische Vorstellungen in „Vorstellungen über die Struktur des Wissens“, also hier über physikalisches Wissen, und in „Vorstellungen über die Struktur des Wissenserwerbs“, also über das Lernen der Physik (Urhahne, Hopf, 2004, S. 73 f.) Zunächst ist festzustellen, dass Schüler Lernen als einfache Übernahme von Wissen ansehen, so wie man ein Geldstück übergibt. Wissen wird demnach einfach gespeichert und passiv eingelagert. *„Es dominiert bei Lehrern wie Schülern die traditionelle passive Sicht vom „Einfüllen“ des Lernstoffes. Dies führt bei den Schülern zu einem Lernverhalten, bei dem das eher mechanische Abschreiben von Informationen im Vordergrund steht und nicht die aktive Verarbeitung der Information“* (Duit, 1990, S. 124). Diese Fehlvorstellung mag bei Englisch-Vokabeln noch einigermaßen akzeptabel sein, nicht aber wenn es um das Lernen physikalischer Konzepte geht. Schüler lernen so Neues „dazu“, ohne es ausreichend mit dem Vorhandenen zu vernetzen. *„Während Oberstufenschüler und –*

schülerinnen Planungs-, vor allem aber Überwachungsstrategien offensichtlich regelmäßig und systematisch einsetzen, wenn sie sich für Mathematik und Physik vorbereiten, sind verstehensorientierte Erwerbsstrategien, mit denen aktiv Sinnstrukturen herausgearbeitet werden [...] eher selten anzutreffen“ (Baumert et al., TIMSS/III, 2000a, S. 211).

Es besteht aber heute in der kognitiven Lehr-Lern-Forschung Übereinstimmung darin, dass Lernen und menschliche Erkenntnis allgemein nur auf der Basis des vorhandenen Vorwissens, also der bereits gebildeten Vorstellungen und Konzepte, möglich ist, da neue Sachverhalte an vorhandenem Vorwissen angebunden werden (Renkl, 2002, S. 592). Dabei werden Informationen nicht nur integriert, sondern sie bewirken evtl. eine (im Lernverlauf evtl. mehrfache) Umstrukturierung des vorhandenen Wissens, was als kognitive Entwicklung (Niedderer, 1999) bezeichnet wird. Lernen ist dabei ein aktiver Prozess des Schülers, der seine Vorstellungen und damit auch sein Wissen selbst konstruieren muss und damit ein Netzwerk aufbaut bzw. umbaut. „*Verstehen heißt, Einsicht in größere Zusammenhänge gewinnen, z.B. durch die Aktivierung von Umfeldwissen, durch Analogien, Metaphern, Modelle, durch Verknüpfen bisher getrennter Erfahrungen ein Phänomen nicht nur einlinig zu erklären, sondern es von verschiedenen Standorten, damit unter verschiedenem Blickwinkel wahrzunehmen und es in einem umfassenderen Kontext einzubetten“* (Nachtigall, 1992, S. 11). Dieses Verstehen ist ein individueller Denkprozess, der oft sprunghaft geschieht. Das Ergebnis eines solchen Vorgangs ist Verständnis für den Sachverhalt, ein Durchschauen von Informationen, das als operatives Wissen bezeichnet wird im Gegensatz zu deklarativem Wissen als Informationswissen. Zu einer Veränderung der Schülervorstellungen ist ein solches Verstehen nötig. Man lernt etwas nicht dadurch, dass man es sich merkt, aufschreibt, auswendig lernt oder wiederholt (memorieren, mechanisches Lernen), sondern dadurch, dass man sich damit auseinandersetzt, darüber nachdenkt, es verarbeitet, überprüft, kritisiert und schaut, wieweit es zu dem passt bzw. nicht passt, was man bisher weiß (elaborieren und transformieren, verständnisvolles Lernen).

KÖLLER ET AL. (TIMSS/III, 2000, S. 230) zitieren eine Studie von RYAN, die zeigt, dass College-Studenten, die als naive Erkenntnistheoretiker (überdauerndes Wissen ist wahr oder falsch) eingestuft werden, primär Memorierstrategien einsetzen, während Studenten mit einer relativistischen Konzeption verstärkt Elaborationsstrategien einsetzen. Dies wird von URHAHNE und HOPF (2004, S. 80) bestätigt, die dies detaillierter untersuchten. SCHOMMER (Köller et al., TIMSS/III, 2000, S. 230) hat Überzeugungen von Studenten bezüglich des Lernens vorgestellt: Die Lernfähigkeit ist angeboren und unveränderbar; Wissen besteht aus unverbundenen Fakten; Lernen gelingt in kurzer Zeit oder nie; Erkenntnisse sind sicher und unveränderbar.

In Kapitel 6.6.2 wird gezeigt, dass Schüler laut ihren eigenen Antworten im Physikunterricht Gegebenes ohne Überprüfung übernehmen, d.h. sie übernehmen keine Verantwortung für die eigene Wissenskonstruktion. Entsprechend konzentriert sich die Mehrheit auf Auswendiglernen und auf die Anwendung von Gleichungen, d.h. sie bemühen sich zu wenig um das Verständnis zugrunde liegender Ideen. Die Gleichungen können nach Schülermeinung nur erinnert, aber nicht erschlossen werden.

2.3 Relevante Lehrervorstellungen

Wenn ein neues Unterrichtskonzept umgesetzt werden soll, dann ist es auch wichtig, welche Vorstellungen Lehrer bisher haben. Interessant sind deren Vorstellungen über Lehren und Lernen physikalischer Inhalte, ihre Vorstellungen, wie guter Physikunterricht aussieht, aber auch evtl. fachlich inkorrekte Vorstellungen. Speziell wäre interessant, wie Lehrer mit Fehlvorstellungen der Schüler umgehen. Dies zu erforschen hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Wie man Vorstellungen der Lehrer zum Lehren und Lernen in den Naturwissenschaften erfassen kann, legt FISCHLER dar (Fischler, 2001). Einen Überblick über verschiedene Studien zum Verhalten von Physiklehrern und deren didaktischen Grundeinstellungen gibt WILLER (2003, S. 423 – 453).

Nach FISCHLER (2000, S. 28) gibt es viele Untersuchungen zu den Vorstellungen von Lehrern über das Lehren und Lernen, bei denen kognitive Aspekte im Umfeld des Unterrichts im Vordergrund stehen („Teachers’ Thinking“, „subjektive Theorien“). Insgesamt ist eine Vielfalt von Forschungsansätzen zu finden. An fachbezogenen Ergebnissen ist festzustellen, dass die Kenntnisse von Lehrern über die wissenschaftstheoretischen Grundlagen der Naturwissenschaften nur mangelhaft sind (Fischler, 2000, S. 29). Vorherrschend ist die Vorstellung, dass Erkenntnisfortschritt vor allem durch Experimentieren und induktives Schließen geschieht (siehe auch Kapitel 2.2.5). Aus Gesprächen und Erfahrungen bei Lehrerfortbildungen kann des Weiteren geschlossen werden, dass bei Lehrern bei den fachlichen Inhalten ebenso noch Fehlvorstellungen (in geringerem Maße wie bei den Schülern) vorhanden sind und neben der korrekten Sichtweise existieren, worauf hier nicht näher eingegangen wird.

2.3.1 Lehrervorstellungen über das Lernen

FISCHLER (2000, S. 29) erklärt zwar, dass Untersuchungsergebnisse zu Lehrervorstellungen zum Lernen kein einheitliches Bild ergeben, meint aber doch, dass die Tendenz erkennbar ist, dass traditionelle Vorstellungen von der Aufnahme des Wissens bei Lehrern zahlreicher sind als konstruktivistische Sichtweisen. *„In der Regel so scheint es, stehen Lehrer der [...] passiven Sicht vom Lernen näher als der Sicht des Lernens als aktiver Konstruktionsprozeß“* (Duit, 1993a, S. 7). Man findet also auch bei Lehrern ähnliche Vorstellungen über das Lernen wie bei Schülern: Lernen wird anscheinend als passive Übernahme von Wissen statt als aktiver Prozess angesehen (Willer, 2003, S. 312). Der Lehrer pflanzt demnach das Wissen in die leeren Köpfe. Lehrer meinen so z.T., sie könnten das Lernen der Schüler ganz direkt bestimmen, ohne zu sehen, dass Lernen ein Entwicklungsprozess des kognitiven Systems in Wechselwirkung mit der Lernumwelt ist.

So findet man eine Vorstellung, die SCHENK ET AL. als wissenschaftslogisches Kompetenzerwerbungsmodell bezeichnet haben (Schenk et al., 1982, S. 6, zitiert bei Niedderer, 1999, S. 49). Demnach lernt ein Lerner einen Begriff sofort, wenn er mit Bezeichnung, Definitionsgleichung und Dimension eingeführt wird. Dabei überträgt er eine mathematische Operation formal auf eine physikalische Relation, die er damit gleichzeitig versteht. So wird in dieser Vorstellung eine Theorie während des Lernens vollständig verarbeitet und die geistige Struktur in Einklang mit der Theorie gebracht. Aber diese verbreitete Vorstellung, im Physikunterricht müsse nur alles ganz exakt definiert

und richtig experimentell demonstriert werden, dann verschwänden die Fehlvorstellungen von selbst, ist falsch (siehe Kapitel 2.1.2 bis 2.1.4).

Nach BAUMERT ET AL. (1997, S. 201 f.) glauben Naturwissenschaftslehrer in Deutschland (wie in den USA) außerdem an natürliche Begabungen für Naturwissenschaften, während in Japan die Anstrengung eine höhere Bedeutung hat. In den USA führt diese Einstellung dazu, dass verstärkte Anstrengungen beim Schüler und besondere helfende Bemühungen des Lehrers nicht als notwendig erachtet werden. Auch im Hinblick auf den Pygmalion-Effekt ist diese Einstellung kritisch zu sehen.

2.3.2 Lehrereinschätzung des Mechanikunterrichts

Interessant ist, wie Lehrer ihren bisherigen Mechanikunterricht in der Jahrgangsstufe 11 sehen und wo aus ihrer Sicht Änderungsbedarf besteht. In diesem Zusammenhang ist eine Umfrage des ISB Bayern (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung) interessant, die im Vorfeld der neuen Lehrplanerstellung durchgeführt wurde und bei der 180 Physiklehrer an bayerischen Gymnasien schriftlich befragt wurden (veröffentlicht unter <http://www.isb.bayern.de/gym/physik/ph-lp-bf.pdf>). Die Ergebnisse beziehen sich auf den bayerischen Lehrplan von 1992 für das neunjährige Gymnasium. Dies ist insofern günstig, da das entwickelte Unterrichtskonzept vor allem mit bayerischen Lehrern im Rahmen dieses Lehrplans durchgeführt wurde.

Bei den Umfrageergebnissen fällt auf, dass insbesondere die elfte Jahrgangsstufe ein besonderes Problem darstellt. So wird in keiner anderen Jahrgangsstufe von so vielen Lehrern angegeben, dass das Anspruchsniveau zu hoch ist (13 % im naturwissenschaftlichen Zweig und 20 % in anderen Zweigen gegenüber durchschnittlich 4,7 % bei allen anderen Lehrplänen) (die exakten Zahlenwerte wurden auf Anfrage zur Verfügung gestellt). Dass der Lehrplan in der verfügbaren Zeit nicht zu erfüllen ist, wird am häufigsten für den nicht-naturwissenschaftlichen Zweig der neunten Jahrgangsstufe (27 % „nicht zu erfüllen“, 37 % „kaum zu erfüllen“; Physik nur hier einstündig) und für den nicht-naturwissenschaftlichen Zweig der elften Jahrgangsstufe (19 % „nicht zu erfüllen“, 44 % „kaum zu erfüllen“) genannt. Aber auch unabhängig von der Zeitproblematik wird die Realisierbarkeit bei keinem anderen Lehrplan seltener als „gut möglich“ bezeichnet als in dem nicht-naturwissenschaftlichen Zweig der elften Jahrgangsstufe (48 % gegenüber sonst durchschnittlich 71 %). Außerdem wird in keiner anderen Jahrgangsstufe der Anteil der im Lehrplan ausgewiesenen Experimentierpraxis so häufig als „zu gering“ eingeschätzt (34 % bzw. 36 % aller Lehrer je nach Zweig im Gegensatz zu durchschnittlich 21,5 % in den anderen Jahrgangsstufen). Für die Umsetzung und Akzeptanz des hier erarbeiteten Gesamtkonzeptes für die Kinematik und Dynamik ist diese Unzufriedenheit der Lehrer bzw. diese Schwachstelle des Lehrplans grundsätzlich eine positive Ausgangslage und Herausforderung - insbesondere das Empfinden, dass das Anspruchsniveau bisher zu hoch ist und die Realisierbarkeit schlecht möglich ist, also beim bisherigen Vorgehen viele Schüler Probleme haben. Andererseits ist es ein Problem, dass bisher schon die verfügbare Zeit mit Recht als zu kurz bezeichnet wird.

Fragt man dagegen nach den einzelnen Lerninhalten in der elften Jahrgangsstufe, findet man dennoch vor allem Zustimmung zu den Inhalten (die Werte konnten nur ungefähr aus den Graphiken

abgelesen werden). Über 80 % der Lehrer sind für eine Erhaltung der Themen „newtonsche Gesetze und Anwendungen“ (83 %), „Erhaltungssätze“ (83 %), „Einfach krummlinige Bewegungen“ (80 %) und „Gravitation“ (80 %). Dagegen sind nur 71 % für eine Erhaltung des Themas „Einfache lineare Bewegungen“ und 19 % für eine Kürzung. Als Grund hierfür nennen Lehrer das viele quantitative Rechnen mit den Bewegungsfunktionen¹ zu dem Spezialfall konstanter Beschleunigung. Ein Streichen, Ausweiten oder Verschieben wird dagegen kaum gewünscht. Die relative Unzufriedenheit mit den einfachen eindimensionalen Bewegungen ist eine gute Ausgangslage für das hier vorgestellte Unterrichtskonzept, bei dem die kinematischen Begriffe anhand zweidimensionaler Bewegungen eingeführt werden. Bedauerlich ist dagegen, dass die Lehrer mit der bisherigen kurzen Behandlung der krummlinigen Bewegungen zufrieden sind.

Interessant ist auch, was die Lehrer zu den von ihnen verwendeten Unterrichtsmethoden (unabhängig von der Jahrgangsstufe) angaben (die exakten Zahlenwerte wurden auf Anfrage zur Verfügung gestellt). „Oft“ werden demnach nur das fragend-entwickelnde Gespräch (90 % der Lehrer), der Lehrervortrag (45 %) und Schülerübungen (32 %) eingesetzt. Die TIMSS-Videostudie Mathematik hatte ebenso zu dem Ergebnis geführt, dass in Deutschland bei Lehrern offenbar ein einziges Skript vorherrscht, das durch einen eng geführten fragend-entwickelnden Unterricht gekennzeichnet ist (Baumert et al., 1997, S. 225 f.; Duit et al., 2001, S. 308). Die TIMS/III-Studie ergab ferner, dass aus Schülersicht der Physikunterricht der Oberstufe hauptsächlich Demonstrationsunterricht ist mit nur seltenen Schülerexperimenten (Baumert et al., 2000b, S. 295 f.). Allerdings gaben bei der bayerischen Umfrage 48 % der Lehrer an, dass sie Lehrervorträge in Zukunft weniger häufig nutzen wollen; 27 % wollen das fragend-entwickelnde Gespräch häufiger und ebenso viele seltener einsetzen. Das passt zu einer bundesweiten Lehrerumfrage aus dem Jahr 1995, die ergab, dass der Frontalunterricht und der Lehrervortrag zwar weit verbreitet, aber eher ungeliebt sind (Kanders et al., 1996, S. 94). Nur sehr wenige der bayerischen Physiklehrer setzen andere, eher reformpädagogische Unterrichtsmethoden „oft“ ein (7 % Unterrichtsprojekt, 5 % Stillarbeit, 5 % Schülerreferat, 5 % selbständiges Arbeiten, 4 % Partnerarbeit, 1 % Gruppenarbeit, 1 % Lernzirkel, 0 % Freiarbeit). Die meisten Lehrer gaben an, dass sie dies „selten“ oder „nie“ einsetzen (50 % bei Unterrichtsprojekt, 60 % Stillarbeit, 47 % Schülerreferat, 60 % selbständiges Arbeiten, 54 % Partnerarbeit, 64 % Gruppenarbeit, 91 % Lernzirkel, 91 % Freiarbeit). Da diese methodischen Prioritäten nur langsam verändert werden können, muss ein neues didaktisches Konzept so sein, dass es einerseits Lehrer mit ihren methodischen Prioritäten annehmen und umsetzen können, aber andererseits auch erste Schritte zu weiterer Methodenvielfalt anregt.

Der Computer, der an sich noch keine Unterrichtsmethode ist, wird nach dieser Befragung von 15% der Lehrer „oft“, von 53 % „gelegentlich“, von 29 % „selten“ und von 4 % „nie“ eingesetzt. Wichtig ist aber, dass 56 % ihn in Zukunft häufiger einsetzen wollen, was gute Voraussetzungen für Unterrichtskonzepte sind, die den Computer benötigen.

¹ Der nicht eindeutige Begriff „Bewegungsgleichung“ wird vermieden, da er sowohl für die Bewegungsdifferentialgleichungen als auch für deren Lösung benutzt wird. Die Lösungen der Bewegungsdifferentialgleichungen werden deshalb hier „Bewegungsfunktionen“ genannt.

Allerdings hat GRÖBER in einer Umfrage zur Physikmedienausstattung unter 57 der 117 staatlichen Gymnasien von Rheinland-Pfalz (49 %) (für Bayern liegen keine Daten vor) ermittelt, dass 26 % der Gymnasien keinen stationären PC in den Physikräumen haben und 60 % keinen stationären Beamer (Gröber, 2005, S. 33). 81 % der Schulen planen auch keine Anschaffung von Physiksoft- und -hardware (Gröber, 2005, S. 32). Das bedeutet, dass der Computereinsatz für den Lehrer an vielen Schulen mit einem hohen organisatorischen Aufwand für die Bereitstellung transportabler Geräte verbunden ist.

Bei einer weiteren Umfrage von GRÖBER (2005, S. 34) unter 293 der 796 Physiklehrer an rheinland-pfälzischen Gymnasien (37 %) gaben 69 % der Lehrer an, dass sie Simulationen im Unterricht eingesetzt haben (11 % durchgehend in mindestens einer Klasse), und 68 % die PC-Messung (17 % durchgehend in mindestens einer Klasse). 51 % setzten bereits IBEs ein, 41 % Modellbildung und 22 % die Videoanalyse. Dabei werden bei Simulationen, Modellbildung und Videoanalyse viele verschiedene Programme genutzt, während bei der Messwerterfassung fast nur Cassy verwendet wird, das 53 % der Lehrer bereits genutzt haben. Auch in dieser Umfrage zeigen die Lehrer Interesse am Computereinsatz im Unterricht. Auf einer vierstufigen Skala geben 82 % hohes oder noch hohes Interesse an der PC-Messung an, 73 % an Simulationen, 65 % an IBEs, 64 % an Modellbildung und 55 % an Videoanalyse, was gute Voraussetzungen für das vorgeschlagenen Unterrichtskonzept sind. Trotzdem haben 84 % der Lehrer in den letzten drei Jahren trotz entsprechender Angebote keine Fortbildung zum Computereinsatz besucht. Dies könnte daran liegen, dass sie den Aufwand für die Umsetzung im Unterricht, d.h. für den Transfer der vorgetragenen Informationen in den Unterricht, als für sich zu hoch annehmen, denn nach HAENISCH (1994, S. 5) ist die direkte Umsetzbarkeit von Fortbildungsinhalten aus Lehrersicht die wichtigste Bedingung für einen Fortbildungstransfer.

Die Untersuchung im Kapitel 6.2.3.1 zu didaktischen und methodischen Prioritäten der Lehrer beim Lehren der Mechanik in der Oberstufe zeigt, dass die Interpretation von Diagrammen, das Üben von Rechenaufgaben und Demonstrationsversuche am intensivsten eingesetzt werden, wobei andererseits 30 % der Lehrer angeben, dass in ihrem Unterricht zu viele Rechenaufgaben gemacht werden.

3 Ikonische Repräsentationen

3.1 Bilder und Multicodierung im Physikunterricht

3.1.1 Bildhafte Darstellungen

Bilder im weiteren Sinn sind alle nonverbalen, mit den Augen wahrnehmbare Zeichen. Zunächst kann man in künstlerische Bilder, unterhaltende Bilder und informierende Bilder unterscheiden (Weidenmann, 1994, S. 9), wobei hier nur informierende Bilder von Interesse sind (siehe Abb. 3.1). Die informierenden Bilder lassen sich in Abbilder und logische Bilder einteilen (Weidenmann, 1991, S.43 – 46). Zu den Abbildern gehören Fotografien, Zeichnungen, Gemälde, Filme und Animationen, wogegen man zu den logischen Bildern die verschiedensten Diagramme oder schematischen Darstellungen zählt (siehe unten). Außerdem sind die analogen Bilder (bildliche Analogien) als Sondergruppe der Abbilder zu erwähnen, da sie durch eine Analogie zu etwas Bekanntem auf nicht darstellbare Strukturen hinweisen wollen (Beispiel: Bild des Bohrschen Atommodells). ISSING (1983, S. 12; 1994, S. 153) unterteilt deshalb die informierenden Bilder in Abbildungen (= Abbilder), analoge Bilder (= bildliche Analogien) und logische Bilder (Kircher et al., 2000, S. 223).

Abbilder (oder Abbildungen) zeigen wesentliche Merkmale eines Objektes, die in der realen Welt existent und visuell wahrnehmbar sind, wobei dies auch Sachverhalte einer schwer zugänglichen Wirklichkeit sein können. Dabei können wesentliche Teile betont und andere weggelassen werden. Insbesondere die Reduktion auf das Wesentliche, um vom Unwesentlichen abzulenken, wird in den Animationen, die in diesem Unterrichtskonzept verwendet werden, genutzt (z.B. wird ein Luftkissengleiter als bewegtes Rechteck dargestellt).

Analoge Bilder (bzw. bildliche Analogien) sind zwar in ihrer äußere Gestaltung der von Abbildungen ähnlich (häufig sind realistische Gegenstände dargestellt), zielen aber in der Aussage auf eine analoge Bedeutung, die über das Dargestellte hinausgeht. Somit verweisen bildliche Analogien auf nicht direkt dargestellte Strukturen, Relationen, Funktionen und Prozesse durch in-Beziehung-Setzen zu bereits vorhandenem Wissen. Bildliche Analogien nutzen strukturelle Analogien (z.B. das Atommodell als Analogie zwischen dem Aufbau eines Atoms und dem Aufbau des Planetensystems) oder funktionale Analogien (z.B. Elektronendrift als Bild für den elektrischen Strom in Metallen) (Issing, 1994, S. 149 f.; Kircher et al., 2000, S. 223). Analoge Bilder werden in diesem Unterrichtskonzept nicht genutzt.

Bei den logischen Bildern ist der dargestellte Inhalt nicht direkt in der Realität beobachtbar, es besteht keine Ähnlichkeit, d.h. die zu visualisierenden Entitäten sind logischer Natur. Mit den logi-

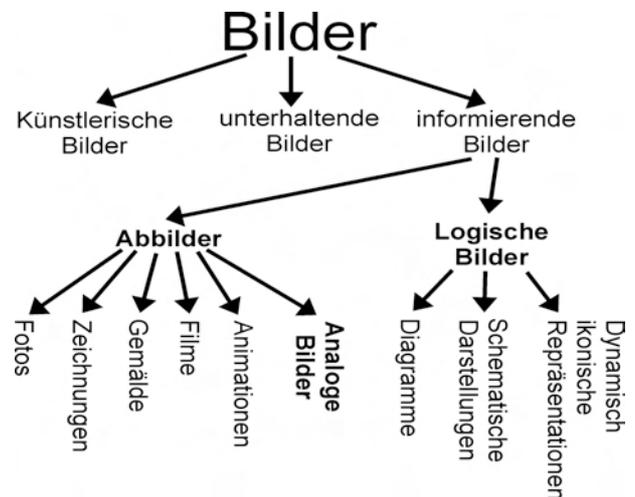


Abb. 3.1: Mögliche Klassifizierung von Bildern

schen Bildern ist es möglich, abstrakte Strukturen, Relationen, Mengen, Abläufe und Konzepte zu visualisieren, ohne auf äußere Begleitfaktoren, die Oberflächenstruktur, einzugehen. Sie sind Zeichensysteme, die durch Konvention ihre Bedeutung erlangt haben. Dabei wird zwischen der Visualisierung qualitativer und quantitativer Zusammenhänge unterschieden (Schnotz, 1994, S. 97 ff.). Qualitative Zusammenhänge werden dargestellt durch Venn-Diagramme (Flächen für Objektmengen) und durch Graphen, die aus Knoten und Kanten bestehen (Knoten durch Ellipsen, Rechtecke oder andere geometrische Formen dargestellt; ungerichtete Kanten durch Linien, gerichtete Kanten durch Pfeile dargestellt). Sie werden bei der graphischen Modellbildung genutzt. Für quantitative Zusammenhänge werden im physikalisch-wissenschaftlichen Bereich vor allem Liniendiagramme genutzt. Zu nennen sind aber auch Histogramme, Balken-, Säulen-, Kreis-, Streu- und Isotyp-Diagramme. Aber auch die unten erläuterten dynamisch ikonischen Repräsentationen (siehe Kapitel 3.2), bei denen physikalische Größen durch Pfeile, Flächen oder Positionen dargestellt werden, sind logische Bilder.

Bilder erfüllen verschiedene Funktionen, wobei man in der Literatur viele Funktionen von Bildern findet (siehe z.B. Issing, 1983, S. 14). Klassischen Funktionen von Bildern sind nach LEVIN (1981, S. 211 - 217) die dekorative Funktion, die Motivations-, Wiederholungs-, Repräsentations-, Organisations-, Interpretations- und Transformationsfunktion. Bezüglich Wissensvermittlung nennt GIRWIDZ die Zeigefunktion, Fokusfunktion, Konstruktionsfunktion, Situierungsfunktion, physikspezifische Visualisierungen und die Motivationsfunktion (Kircher, Girwidz et al., 2000, S. 226 ff.). Eine andere Liste gibt WEIDENMANN (1991, S. 34 - 39). Die Zeigefunktion meint die Vermittlung angemessener bildhafter Vorstellungen von Gegenständen und Abläufen. Unter Fokusfunktion versteht man die Darstellung von Details und das Hinweisen auf Teilbereiche, wenn bereits Vorkenntnisse vorhanden sind. Mit der Konstruktionsfunktion konstruiert ein Bild beim Lernenden neues Wissen, indem es hilft, bekannte Sachverhalte oder mentale Modelle aus bereits bekannten zusammenzusetzen. Physikspezifische Visualisierungen bieten optische Vorstellungshilfen (Beispiele: Vektoren für physikalische Größen, Feldlinienbilder, Elektronendichteverteilungen). Diese können direkt an experimentelle Messwerte anknüpfen, können bildhafte Analogien sein oder räumliche oder mehrdimensionale Zusammenhänge aufzeigen. Bekommt ein Lernender zu einem Thema, zu dem er kein Vorwissen hat, ein mentales Modell in Bildform bereitgestellt, übt das Bild eine Ersatzfunktion aus, wobei solche Bilder durch viele Informationen häufig eine Überforderung darstellen. Wird durch die Bildwahrnehmung kein neues Wissen erworben, aber die bereits vorhandene Wissensstruktur aktiviert, spricht man von der Aktivierungsfunktion. Je nach Ausprägung der Wissensstrukturen erfüllt ein und dasselbe Bild unterschiedliche Funktionen bei den Lernenden. Die Gestaltung eines Bildes sollte sich nach der Funktion richten, die es beim Betrachter erfüllen soll und nach dessen Vorwissen.

Bilder sind auch Ergänzung von und Hilfe zum Verständnis von Texten (Weidenmann, 1991, S. 39 – S. 43) und können so eine multiple Codierung unterstützen. Dabei fungiert die Abbild- oder darstellende Funktion zur Konkretisierung der Textinformation, zur Ergänzung und Veranschaulichung des Materials. Die interpretierende Funktion hilft bei der Erklärung und dem Verständnis von schwierigen Textinhalten, durch Aktivieren von Vorwissen. Unter der Verwandlungsfunktion oder

auch transformierenden Funktion versteht man originelle bildliche Neuschöpfungen, die als Eselsbrücken das Behalten von Begriffen oder Aussagen durch eine konkretere und leichter erinnerbare Form erleichtern sollen (auch gedächtnisstützende Funktion). Werden komplexe Sachverhalte oder Situationsbeschreibungen statt verbal nur durch ein Bild dargestellt, hat man eine Ersatzfunktion für komplexe Beschreibungen. Wird der Inhalt des Textes visuell widergespiegelt, handelt es sich um eine Repräsentationsfunktion. Bei Bildanleitungen sind dagegen die Bilder die primäre Informationsquelle und der Text organisiert die Bilder. Eine dekorative Funktion liegt vor, wenn nur Interesse für den Text geweckt werden soll. Aus den unterschiedlichen Funktionen von Bildern in Zusammenhang mit Texten sieht man, dass die Beziehung zwischen Bildern und Texten sehr unterschiedlich sein kann. Die Informationen in Text und Bild können redundant sein (Kongruenz), sie können sich wechselseitig ergänzen (Komplementarität) oder aus der Text-Bild-Information können durch das Vorwissen Schlüsse über das Dargestellte hinaus gezogen werden (Elaboration).

Nicht nur beim Verarbeiten eines Textes spielt die Organisationsfunktion von Bildern und die Strukturierung kognitiver Inhalte durch Bilder eine Rolle. Bilder mit dieser Funktion verbessern z.B. Struktur und Zusammenhang von Textinhalten oder heben einen solchen hervor. Allgemein lenken Bilder die Aufmerksamkeit und strukturieren die Informationsaufnahme, wodurch sie die Effektivität des Arbeitsgedächtnisses verbessern. Als konkrete Ausführungsformen sind zu nennen (Girwidz, 2001, S. 7): • Concept maps (Begriffslandkarten), die Inhalte und Konzepte mit ihrem Beziehungsgefüge räumlich-bildhaft angeordnet zeigen, • Advanced Organizer, die der Vorstrukturierung dienen und die Gliederung neuer Inhalte aufzeigen, oder • clickable charts bei Computeranwendungen, die strukturierte, bildhafte Übersichten anbieten und beim Anwählen von Bildabschnitten entsprechende Erweiterungen anzeigen.

Schließlich können Bilder auch zu einer intensiven Beschäftigung mit Lerninhalten motivieren. Sie können Interesse wecken und Gefühle ansprechen.

LEVIN ET AL. (1987) verglichen in einer Metaanalyse die Bildfunktionen hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Reproduzierbarkeit eines Textes (jeweils Kontrollgruppe nur Text, Experimentalgruppe Text und Bild). Dabei zeigten sich keine positiven Lerneffekte bei rein dekorativen Funktionen. Positive Effekte gab es bei repräsentierenden, organisierenden und interpretierenden Bildfunktionen. Texte mit Bildern mit transformierender Funktion (Eselsbrücken) ergaben die größte Effektstärke und damit die höchste Wirkung auf das Erinnern des dazugehörenden Textes.

Die meisten bisherigen Untersuchungen im Zusammenhang von Lernen mit Bildern konzentrieren sich auf das Verstehen von Texten und die gedächtnisstützende Funktion von Bildern. Weniger untersucht ist, wie Bilder zum Verständnis eines Sachverhaltes beitragen, wie es in dieser Arbeit intendiert ist.

Bilder können eine höhere Informationsdichte als Texte erreichen und durch zuviel Information zu einer kognitiven Überlastung führen. Deshalb seien einige Aspekte zur Wahrnehmung von Bildern, zur Bildinterpretation und zur kognitiven Verarbeitung genannt (eine Übersicht gibt GIRWIDZ, 2001, S. 20 - 27).

Die Aufnahme von Bildern kann prä-attentiv (Winn, 1993, S. 58 – 65; Weidenmann, 1994, S. 28 - 32), d.h. unbewusst ohne Belastung kognitiver Ressourcen und ohne die Möglichkeit einer kogniti-

ven Kontrolle, erfolgen. Abbilder vertrauter Gegenstände werden z.B. in Sekundenbruchteilen relativ unbewusst und automatisch richtig erkannt, ohne dass sie eine spezielle Aufmerksamkeit erfordern. Hierbei spielt die Figur-Hintergrund-Trennung eine wichtige Rolle und räumliche und zeitliche Nähe beeinflussen die Aufteilung der Aufnahmeeinheiten (Girwidz, 2001, S. 21). Entsprechend der Lesegewohnheiten von links nach rechts und von oben nach unten ist die Anordnung von Bedeutung.

Bei der attentiven Wahrnehmung (Winn, 1993, S. 66 - 74; Weidenmann, 1994, S. 32 - 37), d.h. der bewussten, absichtsvollen und zielgerichteten Bildverarbeitung, spielt die begrenzte Verarbeitungskapazität eine Rolle. Attentive Prozesse binden kognitive Ressourcen und sind selektiv (gezieltes "Herausfiltern" relevanter Informationen). Die Informationsdichte darf weder zu hoch noch zu niedrig sein. Wichtig sind Hilfsmittel wie Linien, Pfeile oder Zusammenstellungen, die die Aufmerksamkeit lenken (Girwidz, 2001, S. 21). Der Bildautor kann also durch Hervorheben einzelner Elemente oder auch durch entsprechende Instruktionen die Wahrnehmung lenken und die Wichtigkeit der Bildsegmente betonen. Eine pauschale Aufforderung des Lehrenden, ein Bild aufmerksam zu betrachten, bringt bezüglich der Verstehensleistung nicht viel. Bildbezogene spezifische Instruktionen könnten dagegen schon eher die Bildverarbeitung und folglich die Verstehensleistung erhöhen. Nach der Wahrnehmung muss ein Bild interpretiert werden (Winn, 1993, S. 74 - 85, zusammengefasst bei Girwidz, 2001, S. 22), wobei das Verstehen vom Vorwissen abhängt. Für diese Einpassung der Information in vorhandene Schemata ist eine Anstrengung nötig. Je weniger Kapazitäten für die Bilderfassung gebraucht werden, desto mehr sind für die Interpretation und damit das Lernen frei. Advanced Organizer können eine gute Hilfe für die richtige Interpretation sein. Des Weiteren kann die Art des Informationsangebotes bestimmte Interpretationstechniken anregen.

Die kognitive Verarbeitungskapazität ist begrenzt. Bekanntermaßen können nur etwa sieben neue Informationseinheiten (chunks) im Arbeitsgedächtnis gehalten werden (Mietzel, 1993, S. 175). Die „cognitive load“-Theorie (Chandler, Sweller, 1991) betont diese Grenzen, die bei der Unterrichtsgestaltung berücksichtigt werden müssen (Sweller, 1994). Das Informationsangebot, die Präsentation von Information, muss so strukturiert werden, dass der Arbeitsspeicher möglichst wenig belastet wird und so genügend Ressourcen für das Lernen vorhanden sind. Ungewohnte bildliche Darstellungen können deshalb durch ihre hohe kognitive Belastung dem inhaltlichen Verstehen im Wege stehen. Verringert wird die kognitive Belastung im Allgemeinen auch durch die Nutzung verschiedener Sinneskanäle durch eine multimodale Darstellung. Zusätzlich visuelle Anzeigen stören aber, wenn sie weitere kognitive Suchprozesse verlangen. In computergestützten Lernmaterialien können verbale Zusatzinformationen und farbliche Codierungen die kognitive Belastung reduzieren (Kalyuga et al., 1999). Allgemein ist die kognitive Belastung vom Vorwissen und kognitiven Fähigkeiten abhängig, so dass es hilfreich sein kann, dass unterschiedlichen Lernern unterschiedliche Darstellungen angeboten werden.

Informationen können jedoch unterschiedlich tief verarbeitet werden. SCHNOTZ und BANNERT (1999, S. 233) zeigten, dass anspruchsvollere Bilder eher zu einer intensiven Verarbeitung führen.

3.1.2 Multicodierung

Wissen, auch physikalisches Wissen, kann mit verschiedenen Symbolsystemen codiert und präsentiert werden, wobei die Art der Repräsentation die Form vorbereitet, in der Wissen gespeichert wird.

Die Theorie der dualen Codierung von PAIVIO (1986) unterscheidet zwei unterschiedliche, unabhängige Informationsverarbeitungssysteme, ein verbales (sprachliche Reize werden vom visuellen oder auditorischen System aufgenommen) und ein nonverbales System (vor allem für Bilder, aber auch für Geräusche, Handlungen etc.), zwischen denen Verbindungen bestehen. Verkürzt gesagt wird zwischen Sprache und Bildern unterschieden. Die doppelte Codierung sorgt dabei für eine bessere Verankerung im Gedächtnis und für eine bessere Abrufbarkeit. Allerdings gibt es interindividuelle Unterschiede, die sich als Lernpräferenzen äußern (Urhahne et al., 2000, S. 163). Eine aktuelle Weiterentwicklung dieser Theorie ist die generative Theorie des Multimedia-Lernens von MAYER (1997, S. 4 - 6). Demnach gibt es ein visuelles System zur Erzeugung visuellen Wissens und ein verbales für verbales Wissen. Der Lernende muss aber wichtige Informationen auswählen, sie organisieren und mit bestehendem Wissen verknüpfen, wobei die Auswahl und die Organisation im verbalen und visuellen System getrennt laufen, so dass er ein verbales und ein visuelles mentales Modell entwickelt, zwischen denen er später Verbindungen herstellt. Ein mentales Modell ist eine umfassende Repräsentation der Strukturen und Prozesse eines Realitätsbereichs und erlaubt die innere Simulation eines äußeren Vorgangs. In dem erweiterten Modell von SCHNOTZ und BANNERT (1999, S. 222) werden Bilder in Schritten verarbeitet: Zuerst wird es visuell wahrgenommen, dann semantisch verarbeitet, wozu ein mentales Modell konstruiert wird, und anschließend kann das mentale Modell zu propositionalen Repräsentationen in Beziehung gesetzt werden, die zum Beispiel beim Verstehen von Texten konstruiert werden.

Neben dem Multimediaprinzip, wonach Lernen erleichtert wird, wenn Text- und Bildinformationen parallel angeboten werden, gibt es weitere Prinzipien. URHAHNE ET AL. (2000, S. 164) nennen zwei Prinzipien zur Gestaltung lernförderlicher multimedialer Lernumgebungen, die sich aus den Forschungen von MAYER ergeben haben: Nach dem Kontiguitätsprinzip müssen zusammengehörige Texte und Bilder räumlich gemeinsam (verbale und visuelle Erklärungen eng nebeneinander, Prinzip der räumlichen Nähe, räumliches Kontiguitätsprinzip) und zeitlich gemeinsam (gesprochene und gezeigte Information gleichzeitig, Prinzip der simultanen Darstellung, zeitliches Kontiguitätsprinzip) dargeboten werden. Nach dem Modalitätsprinzip sollten Erklärungen nicht als Text auf dem Bildschirm, sondern in gesprochener Form als mitlaufender Kommentar gegeben werden, so dass verschiedene Aufnahmekanäle benutzt werden. Die Kombination von auditiver und visueller Info hilft zu besserem Erinnern. Ergänzend sind noch zu nennen (Girwidz, Rubitzko, 2003, S. 3): Das Kohärenzprinzip besagt, dass nicht-sachbezogene Informationen möglichst ausgeblendet werden sollen. Das Redundanzprinzip besagt, dass das Lernen mit bewegten Bildern, die mit gesprochenem Text kommentiert sind, durch die zusätzliche schriftbasierte Darstellung desselben Textes erschwert wird. Die Untersuchungen und Ergebnisse der Lernpsychologen zum Lernen mit Multimedia haben jedoch in der Regel das Lernen von einzelner deklarativem Wissen im Blick, während es der Physikdidaktik um das Lernen und Anwenden von Prinzipien und Konzepten geht.

In dem in dieser Arbeit entworfenen Unterricht werden am Bildschirm nur bildliche Darstellung genutzt, verbale Darstellungen beschränken sich auf wenige Begriffe. Da es sich nicht um Selbstlernereinheiten, sondern um Materialien für den Unterricht handelt, ist vorgesehen, dass der Lehrer zur richtigen Zeit die angemessenen verbalen Informationen gibt. Aber auch bei den rein visuellen Darstellungen ist eine Multicodierung möglich, denn die Informationen können bildlich verschieden kodiert werden. Aus dem Ansatz der kognitiven Flexibilität kann man folgern, dass Wissen in verschiedenen Formen präsentiert werden soll (Spiro et al., 1988, S. 378 f.). HEUER unterscheidet fünf

grundlegend verschiedene Codierungen (siehe Abb. 3.2) (Heuer, 2003a, S. 3). Die erste Ebene ist eine verbale Codierung durch Text. Die zweite Codierungsform ist ein visualisierter Ablauf. Dabei kann es sich um Videos oder Animationen handeln, aber auch um ein Bild, in dem ein Vorgang stroboskopartig dargestellt wird. Das bewegte Objekt kann dabei sowohl fotorealistisch, als auch durch vereinfachte ikonische Bilder repräsentiert werden. Hieraus können evtl. bereits qualitative und halbquantitative Aussagen über die zeitliche Entwicklung erkannt werden. Die dritte Ebene sind visualisierte Strukturaussagen. Dies ist möglich durch dynamisch ikonische Repräsentationen (bildhafte Darstellungen physikalischer Größen, wie Vektoren oder Flächen, die sich entsprechend der Größe dynamisch verändern, siehe Kapitel 3.2). Erst die vierte Ebene ist die übliche Darstellungsform in Form von Graphen oder in Form von algebraischen Gleichungen. Die fünfte Ebene, ein Wirkungsgefüge physikalischer Einzelaussagen, zeigt als Netzwerk alle physikalischen Abhängigkeiten, die den Ablauf bestimmen, so dass der Ablauf strukturell überschaubar und qualitativ verständlich wird.

Zu beachten ist allerdings, dass das Lesen der verschiedenen Codierungen auch gelernt werden muss. Werden zu viele unterschiedliche Repräsentationen gleichzeitig gezeigt, kann dies auch zu einer Überbelastung, einem „cognitive overload“ führen, der nach der „cognitive load“-Theorie (Sweller, 1994) Lernen behindert. Außerdem kritisiert MIKELSKIS (2004, S. 108) zu Recht, dass die Arbeiten von MAYER und SCHNOTZ keine fachdidaktischen Untersuchungen, sondern sehr allgemein sind und die umfassende Bestandsaufnahme von URHAHNE ET AL. (2000) zum Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht die Fachdidaktik ausblendet.



Abb. 3.2: Übersicht über Codierungen (nach Heuer, 2003, S. 3)

3.2 Dynamisch ikonische Repräsentationen

Dynamisch ikonische Repräsentationen sind nach HEUER (1996b; S. 2 f.) und BLASCHKE, HEUER (2000, S.86 f.) bildhafte Darstellungen physikalischer Größen, die sich entsprechend der Größe dynamisch verändern. Dazu gehören Säulen und Flächen, deren Flächeninhalt den Betrag einer physikalischen Größe repräsentiert, oder Balken, Pfeile und Linien, deren Länge oder Breite den Betrag einer Größe darstellt und deren Richtung die Richtung der Größe darstellt. KIRCHER ET AL. (2000, S. 114) meinen, die Darstellung vektorieller Größen durch Pfeile ist eine symbolische Repräsentation. SCHNOTZ (1994, S. 106) meint aber, dass alle logischen Bilder (und damit auch dynamisch ikonische Repräsentationen, siehe Kapitel 3.1.1) auf ein anderes Darstellungsprinzip als symbolische Repräsentationen beruhen. Animationen sind ebenso bildhafte Repräsentationen, die sich dynamisch ändern. Aber sie müssen nicht unbedingt etwas über physikalische Größen aussagen. Wenn sie sich jedoch physikalischen Größen entsprechend bewegen, kann man sie auch zu den dynamisch ikonischen Repräsentationen rechnen. Dynamisch ikonische Repräsentationen (und Animationen) können sowohl bei Simulationen als auch bei Messungen verwendet werden. Von HEUER wurden sie auch dynamische Physik-Repräsentationen genannt (Heuer, 1993 b, c, d und 1996 a).

In der kognitiven Psychologie unterscheidet man verschiedene Arten von Wissen, die sich durch ihre interne Repräsentation unterscheiden: deklaratives Wissen (Wissen über Fakten), prozedurales Wissen (Wissen über Prozesse, Techniken), verbal-sprachliche Repräsentationen (Wissen in Begriffen repräsentiert, Netzwerk von Begriffen) und ikonische Repräsentationen (bildhafte Repräsentationen). Durch die interne ikonische Repräsentation kann sich ein Kind ein Ereignis oder einen Gegenstand vorstellen, ohne dass diese tatsächlich vorhanden sind (Mietzel, 1993, S. 80), d.h. die mentale Repräsentation ist von der Wahrnehmung entkoppelt. Diese interne ikonische Repräsentation ist hier nicht gemeint. Die externen ikonischen Darstellungen helfen jedoch, sich selbst innere Bilder der Vorgänge zu machen. Das Potenzial von Medien liegt damit im Zusammenwirken externer Repräsentationen mit den entkoppelten internen Repräsentationen. Gerade wenn Lernende mit geringem Vorwissen nicht in der Lage sind, einen Ablauf mental zu simulieren, können die externe Repräsentation durch Animationen und dynamisch ikonische Repräsentationen helfen, eine Vorstellung aufzubauen, was als Supplantation interner Operationen im externen Medium bezeichnet wird (Girwidz et al., 2004, S. 2)

Vereinzelt findet man solche dynamisch ikonischen Repräsentationen auf der CD „cliXX Physik in bewegten Bildern“ von NORBERT TREITZ (z.B. Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren) (Treitz, 2000), in der Software des Projektes „Mechanik und Verkehr“ (Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Kraftvektoren) (Busse, 2003, S. 32; Bresges et al., 2004, S. 2), bei Crocodile Physics (z.B. Potentialsäulen) (Schwarze, 2003), in vielen Physlets und bei Interactive Physics. Bewusst eingesetzt werden sie in den Javaapplets des Projektes FuN-FiLM (= Forschungs- und Nachwuchskolleg Fachintegratives Lernen mit digitalen Medien), in dem auch untersucht wird, wie die Schüler verschiedene Repräsentationsformen nutzen und welche Fehlvorstellungen damit überwunden werden können (Rubitzko, Girwidz, 2004, S. 262 + 264). Schließlich können sie in dem Windows-Programm PAKMA (Heuer, 1996b, S. 6) und in dem betriebssystemunabhängigen Java-

Programm JPAKMA genutzt werden (Schönberger et al., 2002; Gößwein et al., 2002, Gößwein et al., 2003).

3.2.1 Vorteile dynamisch ikonischer Darstellungen

Dynamisch ikonische Repräsentationen haben viele Vorteile, die über die Dekoration der Darstellung, die Motivierung der Schüler und die Steuerung der Aufmerksamkeit durch die Bewegung hinausreichen. Für Schüler ist es nämlich nicht leicht, aus Versuchen neue Sachverhalte zu erschließen und Zusammenhänge zu erkennen, insbesondere wenn in quantitativen Versuchen Messdaten mit zu interpretieren sind. So kommt es manchmal sogar vor, dass die Schüler entgegen den tatsächlichen Gegebenheiten das sehen bzw. annehmen, was sie aufgrund ihrer Alltagsvorstellungen erwarten (Duit, 1992, S. 283). Daher ist es wichtig, die Versuchsdaten so aufzubereiten, dass im Kurzzeitgedächtnis genügend Ressourcen zur Verfügung stehen (kein cognitive overload), Versuchsaussagen im Zusammenhang mit anderen Sachverhalten zu analysieren und sie dann zueinander in Beziehung zu setzen.

Häufig werden funktionale Abhängigkeiten physikalischer Größen durch Graphen wiedergegeben. Dies ist aber nur ein effizientes Vorgehen für diejenigen, die bereits über angemessene physikalische Konzepte verfügen und außerdem Erfahrungen haben, mit Graphen umzugehen, Graphen also sicher lesen können. Denn hier kommen auf Schüler zwei Schwierigkeiten gleichzeitig zu: Die Aussagen des oder sogar der Graphen müssen erfasst, zueinander in Beziehung gesetzt, interpretiert und zweitens mit den vorhandenen Vorstellungen in Beziehung gebracht werden (Heuer, 1993b, S. 369), was für Nicht-Experten schwierig ist. Deshalb haben Schüler Schwierigkeiten, Liniengraphen zu verstehen und mit ihnen zu arbeiten (Berg, Smith, 1994; Heuer, Wilhelm, 1997).

Eine leichter zu erfassende, weniger abstrakte Darstellung der relevanten Größen ist deshalb wünschenswert. *„Eine Codierung von Aussagen in ein bildhaft orientiertes Notationssystem schlägt Brücken zu bestehenden Vorstellungen. Dadurch und durch die Visualisierung wird eine Hilfe für ein späteres Erinnern erleichtert“* (Heuer, 1993b, S. 369). Solche piktogrammartige Darstellungen einer Versuchssituation finden sich in vielen Schulbüchern. Ihr häufiges Vorkommen zeigt offensichtlich, dass sich Aussagen mit ihnen prägnant verdeutlichen lassen. Sie haben aber einen prinzipiellen Nachteil: Es handelt sich stets um statische Einzelbilder, die nur eine Momentansituation aufarbeiten und nicht einen Versuchsablauf (Wilhelm, Heuer, 2002b, S. 2). Mit einem Computer und geeigneter Software ist es jedoch möglich, solche physikalische Repräsentationen eines realen wie auch simulierten Versuchsablaufs dynamisch mit den zugehörigen zeitlichen Veränderungen am Bildschirm aufzuzeigen.

So ist es möglich, physikalische Größen zu veranschaulichen, die man sonst nicht direkt sehen oder wahrnehmen kann, wie z.B. Kräfte, Beschleunigungen, Spannungen oder Ladungen. Damit sind dynamisch ikonische Repräsentationen eine Hilfe zum Aufbau von qualitativen Vorstellungen. Besonders günstig ist, dass mehrere Größen (wie Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kräfte) gleichzeitig darstellbar sind, was eine Hilfe für Erklärungen sein kann. Dazu werden die verschiedenen Größen nicht unberührt nebeneinander einzeln dargestellt, sondern in Beziehung zueinander gebracht. Dynamisch ikonische Darstellungen werden genutzt, um durch ihre Anordnung nicht nur

die Größe jeder einzelnen Größe darzustellen, sondern auch Zusammenhänge zwischen den Größen darzustellen und Gründe für deren Verhalten deutlich zu machen. So wird z.B. in Abb. 3.3 in Teil 1 und 3 deutlich, dass v_{alt} und dv zusammen das aktuelle v ergeben. Während dem Ablauf kann man in allen drei Repräsentationen der Abbildung 3.3 sehen, dass v kontinuierlich größer wird, während dv in etwa konstant bleibt. Durch die Art der Anordnung der Pfeile werden also physikalische

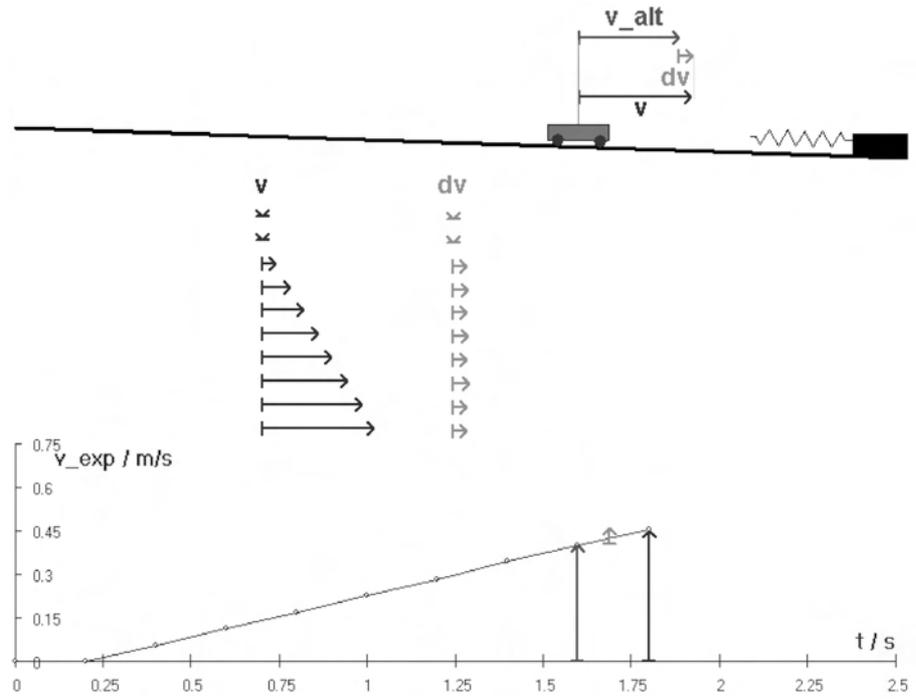


Abb. 3.3: Bildschirmkopie mit drei verschiedenen dynamisch ikonische Repräsentationen zu einem Versuch aus der eindimensionalen Kinematik mit Strukturaussagen (die drei bewegten Darstellungen können einzeln dazugeschaltet werden).

Strukturen mit sichtbar. Noch deutlicher ist das am Beispiel der Abb. 3.4 zu sehen, aus der nicht nur die augenblicklichen Größen beim Laden eines Kondensators zu entnehmen sind. Es wird zusätzlich dargestellt, dass die Spannung U_c am Kondensator stets proportional zur (zunehmenden) Ladung Q (dargestellt durch die Säule) ist. Außerdem wird deutlich, dass die Stromstärke I_c von der Differenz der Betriebsspannung U_b und der Kondensatorspannung U_c abhängt. Durch diesen Strom I_c wird eine Ladung Q auf dem Kondensator transportiert und eine zu Q proportionale Gegenspannung U_c aufgebaut. Je größer die Ladung Q

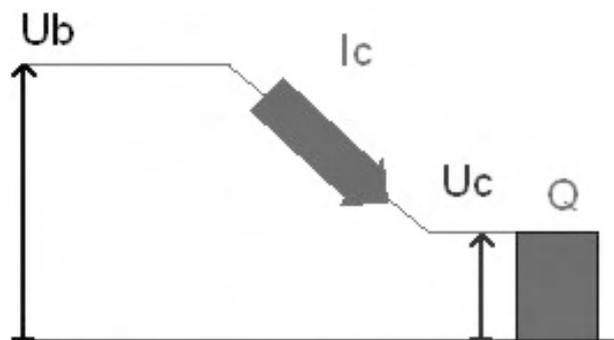


Abb. 3.4: Dynamisch ikonische Repräsentation mit Strukturaussagen zur Darstellung einer Kondensatoraufladung

bzw. die Spannung U_c wird, desto kleiner wird der Strom I_c und desto langsamer wächst die Ladung Q weiter. Die mitangezeigte Ladung Q ist hier also der Schlüssel zum Verständnis. In den beiden Beispielen (Abb. 3.3. und Abb. 3.4) wird also durch die Anordnung auch etwas über Strukturen ausgesagt. In diesem Sinn werden nicht nur Oberflächenmerkmale, wie Schnelligkeit oder Spannung (als Ausschlag am Voltmeter) sondern Tiefenstrukturen, Relationen zwischen Begriffen, dargestellt. Physikalische Strukturzusammenhänge sind damit unter Anleitung des Lehrers unmittelbarer und leichter erschließbar (Heuer, 1993d, S. 371), denn wichtige Größen und Aussagen sind durch die gewählte Kodierung ohne lange logische Implikationen direkt erfassbar.

Ein weiterer Vorteil ist es, wenn diese Darstellung gleichzeitig mit dem realen Versuch ablaufen kann, sozusagen „in Echtzeit“, also nicht erst etliche Zeit später. Während des Ablaufs des Realversuchs kann nun der Versuch mit der dynamischen Repräsentation auf dem Bildschirm verglichen werden und die Übereinstimmungen gesehen werden.

Günstig ist es, wenn ikonische Bildelemente für die relevanten physikalischen Größen so dargestellt werden, dass sie dynamisch mit einer Animation mitlaufen, um stets den Kontext mit zu sehen. Eine auf das Wesentliche reduzierte Animation des Versuchsablaufs, die gleichzeitig auf dem Bildschirm mit dargestellt wird, unterstützt das episodische Gedächtnis und erleichtert damit das Erinnern und eine spätere Interpretation eines Versuchsablaufs. Dies ermöglicht erst eine erfolgreiche Diskussion darüber.

Ein entscheidender Vorteil ist außerdem, wenn die Messwerte im Computer gespeichert sind und man deshalb diese dynamische Repräsentation auch ohne Realversuch erneut ablaufen lassen kann. Für die Schüler bleibt hierbei die dynamisch ikonische Repräsentation durch die gleichzeitig ablaufende Animation immer mit dem Geschehen des realen Versuchsablaufes verbunden. Einzelne Phasen des Ablaufs können so einem bestimmten Abschnitt des Versuchs zugeordnet werden. Die Gefahr ist wie gesagt stets, dass die Schüler die entscheidenden Dinge nicht sehen. Deshalb ist es von Vorteil, den Ablauf - nachdem die Aufmerksamkeit vom Lehrer auf ganz bestimmte Dinge gelenkt wurde oder nachdem in der Diskussion in der Klasse ganz bestimmte Fragen gestellt wurden - wiederholen zu können.

Außerdem ist es hilfreich, wenn man die Repräsentation langsamer, also in Zeitlupe ablaufen lassen kann, wobei die Reproduktionsgeschwindigkeit selbst gewählt werden kann. Damit ist es möglich, auch bei in Realität schnell ablaufenden Vorgängen in aller Ruhe die ikonischen Repräsentationen für die relevanten Größen zu beobachten. Sinnvoll für den Unterrichtseinsatz ist ferner, wenn zu beliebigen Zeitpunkten, z.B. bei entscheidenden Phasen, der Ablauf angehalten und diskutiert werden kann, um ihn anschließend ganz oder stückweise weiter laufen zu lassen.

In einer erweiterten Darstellung sollten zusätzlich zu diesen ikonischen Bildelementen Graphen mit angezeigt werden. Denn ihnen sind wichtige Aussagen über das gesamte Verhalten des Ablaufs zu entnehmen. Die Fähigkeit, Graphen zu interpretieren, ist ein relevantes Lernziel des Physikunterrichts. Während mit ikonischen Bildelementen ein momentaner Querschnitt über alle relevanten physikalischen Größen gegeben wird, stellt ein Graph einen Längsschnitt einer Größe über den ganzen Versuchsablauf dar (Heuer, Wilhelm, 2003, S. 106). Der synchrone Einsatz mehrerer verschiedener Kodierungssysteme, wie z.B. Pfeile und Graphen, bietet nun dem Lernenden die Möglichkeit, kurzzeitig von einer noch ungewohnten, logisch abstrakten Kodierung auf eine gewohntere bildliche zu wechseln, um so mit den gewonnenen zusätzlichen Informationen Verständnisschwierigkeiten abzubauen. Hat man die Möglichkeit, physikalische Aussagen dynamisch ikonisch darzustellen, ergeben sich damit neue Methodenkonzepte für den Unterricht, die zur Überwindung von Fehlvorstellungen beitragen können.

So ist die prägnante Art der Darstellung der Messwerte bzw. der Größen, die sich aus Simulationsergebnissen ergeben, auch ein wichtiger Kernpunkt dieses Unterrichtskonzeptes. Dabei werden vektorielle Größen, um die es sich bei den physikalisch relevanten Größen meistens handelt, so kodiert,

dass sie auch sofort als vektorielle Größen erkennbar sind, nämlich indem sie als Pfeile dargestellt werden. Dabei gibt die Länge der Pfeile den Betrag der Größen an und die Richtung der Pfeile die Richtung der Größen. Diese Darstellung der Größen ist anschaulich und leicht verständlich. Damit sollen die Schüler von Anfang an mit dem vektoriellen Charakter der betrachteten Größen vertraut gemacht werden. Denn häufig werden vektorielle Größen von den Schülern auf ihre Beträge reduziert (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Reibungskraft). Wird diese „Pfeildarstellung“ konsequent eingesetzt, tritt ein Übungs- und Gewöhnungseffekt auf und der Richtungscharakter wird von den Schülern verinnerlicht. Vielleicht wurde diese Darstellungsform bisher nicht im Unterricht eingesetzt, da deren Benutzung beim Medium Tafel aufwändig ist.

Natürlich stellen dynamisch ikonische Repräsentationen auch neue Anforderungen an die Lernenden. Die Darstellungen müssen ebenso gelesen und verstanden werden. Dabei muss die Aufmerksamkeit teilweise auf verschiedene Stellen gleichzeitig gerichtet werden. Schließlich müssen aufeinander folgende Einzelbilder verarbeitet bzw. zueinander in Beziehung gesetzt werden. In dem hier dargelegten Konzept (siehe Kapitel 5) wurde deshalb anfangs ausschließlich die eine Darstellung mit Vektorpfeilen verwendet, wobei deren Bedeutung und der Umgang mit ihnen sorgfältig eingeführt wurde und eine Vertrautheit damit geschaffen wurde. Auch später im Kurs wurde darauf geachtet, dass nicht zu viele verschiedene Repräsentationen gleichzeitig dargestellt werden. Weitere Probleme beim Einsatz von Animationen fassen GIRWIDZ ET AL. (2004) zusammen.

3.2.2 Verschiedene Abstraktionsniveaus in der Darstellung

Mit der Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen ist es möglich, schrittweise von einer anschaulichen Darstellung zu einer abstrakten Darstellung physikalischer Größen zu gelangen. Als Erstes werden Möglichkeiten aufgezeigt, eine Größe darzustellen, um den Verlauf der Größe zu erkennen. Danach werden Möglichkeiten gezeigt, mehrere Größen zu vergleichen, um Strukturaussagen zu finden.

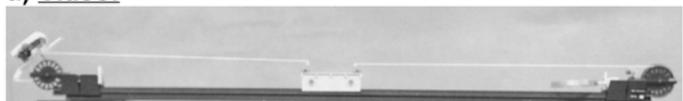
3.2.2.1 Der Verlauf einer Größe

Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten werden im Folgenden anhand eines Beispiels vorgestellt, wobei im Unterricht weder alle Zwischenschritte benutzt werden, noch damit alle Möglichkeiten erwähnt sind. Als Beispiel einer physikalischen Größe, deren Verlauf über die Zeit betrachtet werden soll, wird die Geschwindigkeit gewählt.

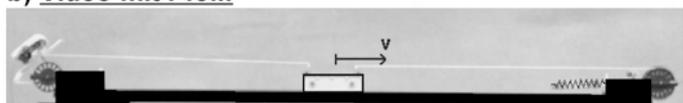
Als Vorgang wird ein Wagen betrachtet, der eine schiefe Ebene mit Reibung hinunterfährt und durch eine Feder wieder nach oben zurückgestoßen wird.

Ist es nicht möglich, einen Versuchsablauf real zu zeigen, kann man ein Video des Versuchs vorführen (siehe Abb. 3.5 a), an dem allerdings die relevante Größe (in der Abb. die Geschwindigkeit) noch nicht zu entneh-

a) Video:



b) Video mit Pfeil:



c) Animation mit Pfeil:

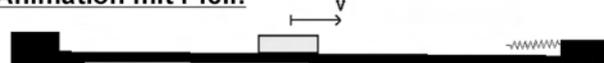


Abb. 3.5 a, b, c: Drei verschiedene Darstellungsmöglichkeiten eines Versuchs zur eindimensionalen Kinematik

men ist. Wenn die Bewegung quantitativ erfasst wurde und die Messwerte abgespeichert sind, kann man dann über das Video dynamisch ikonische Repräsentationen wie Pfeile legen (siehe Abb. 3.5 b) und so mit dem Ablauf die Größe verfolgen (Wilhelm et al., 2003, S. 24; Heuer, 2003a, S. 9). Die Länge dieses Vektors richtet sich nach den gemessenen Werten (oder evtl. nach den berechneten Werten einer Simulation, die mit dem Realablauf verglichen wird). Die Komplexität eines Videos steht aber im Gegensatz zu den Prinzipien zur Multicodierung (siehe Kapitel 3.1.2), die für eine auf wesentliche Aussagen reduzierte Darstellung sprechen. So fand beispielsweise DWYER (1982, S. 31), der Lernende mit unterschiedlich realistischen Abbildungen zum menschlichen Herzen lernen ließ (z.B. Strichzeichnungen, detaillierte Zeichnungen, Fotos eines Herzmodells, realistisches Fotos) heraus, dass Abbildungen mit relativ wenig realistischen Details am effektivsten waren. Verallgemeinert folgt daraus, dass sich auf das Wesentliche reduzierte Animationen des Versuchsablaufs, die keine ablenkenden Details mehr enthalten, für Darstellungen im Unterricht eignen (siehe Abb. 3.5 c). Die im Ablauf wesentlichen Gegenstände wie Wagen oder Fahrbahn werden vereinfacht, aber in ähnlichen Farben dargestellt und bewegen sich auf dem Bildschirm genau entsprechend der gemessenen oder berechneten Bewegung. Sie erleichtern den Schülern den Bezug zum Experiment und das Erinnern. Die feststehenden Gegenstände (wie die Fahrbahn) und die bewegten Gegenstände (wie der Wagen) können als Animationen bereits über das Video gelegt werden und bleiben nach dem Wegschalten des Videos sichtbar. Wären die Objekte im Video schwerer zu erkennen, wäre eine Überblendtechnik sinnvoll, wie sie GIRWIDZ und RUBITZKO (2003, S. 3) nutzen, um vom Foto zur Schemazeichnung zu kommen. Macht man eine Realmessung oder führt eine Modellbildung durch, hat man im Allgemeinen kein Video zur Verfügung. Deshalb ist hier die auf das Wesentliche reduzierte Animation besonders wichtig, um die relevante Größe im Kontext des Ablaufs zu sehen.

Realistische Abbilder, wie Videos oder Fotos, sind also als ein Teil einer Multicodierung sinnvoll. Werden dynamisch ikonische Repräsentationen auf Videos gezeichnet, erfüllt dies die Forderung nach zeitlicher und räumlicher Kontiguität (ein weiteres Beispiel ist in Abb. 5.9 dargestellt). Nach SULEDER, HEUER (2004, S. 1) wird damit eine Brücke vom Experiment zur Computerdarstellung geschlagen.

In einem weiteren Schritt kann man den Geschwindigkeitsvektor der Animation nochmals einzeichnen, aber den Anfangspunkt unbewegt lassen (ortsfester Vektor), um die Veränderung der Länge besser beobachten zu können.

Interessiert man sich für den Verlauf des Ortes, kann man den sich bewegenden Wagen der Animation wie bei einer Stroboskopaufnahme mehrfach in festen Zeitabständen an seiner jeweiligen Position fest einzeichnen, was man als „Stempeln“ bezeichnen kann (siehe Abb. 3.6, oben). Bewegt

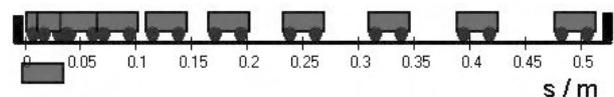
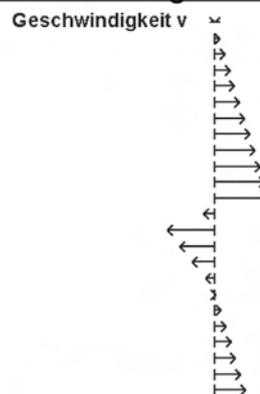


Abb. 3.6: Dynamisch ikonische Repräsentationen mit „Stempeln“ zur Ortsdarstellung

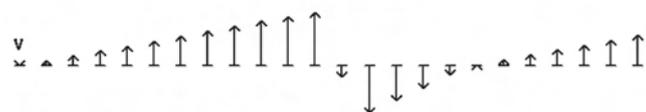
sich der Wagen außerdem mit der Zeit langsam gleichmäßig nach unten, erhält man schon eine Vorstufe eines Graphen, bei dem nach unten die Zeit und nach rechts der Ort aufgetragen ist (siehe Abb. 3.6, unten).

Genauso wie das Animationsobjekt Wagen gestempelt wurde, kann man auch den Pfeil für die Geschwindigkeit stempeln. Sinnvollerweise bewegt sich der Pfeil nicht mit dem Objekt, sondern wandert nur mit der Zeit nach unten (siehe Abb. 3.7 a). Betrachtet man nur die Spitzen der Pfeile, erhält man eine Vorstufe eines Graphen, bei dem nach unten die Zeit und nach rechts die Geschwindigkeit aufgetragen ist (Stempeldiagramm). In einem nächsten Schritt kann man das Stempeldiagramm um 90° drehen, um so näher an einen Zeit-Geschwindigkeitsgraphen zu kommen (siehe Abb. 3.7 b). Wenn der Pfeil nun, während er mit der Zeit nach rechts läuft (Anfangspunkte auf der x-Achse), mit seiner Spitze eine Linie zeichnet und nicht mehr gestempelt wird, erhält man einen Zeit-Graphen mit einem mitlaufenden Pfeil (siehe Abb. 3.7 c, Pfeil gerade bei 6,4s). Hiermit soll der Schwierigkeit der Schüler entgegengewirkt werden, die x-

a) Untereinander gestempelte Pfeile:



b) Nebeneinander gestempelte Pfeile:



c) Graph mit einem mitlaufenden Pfeil:

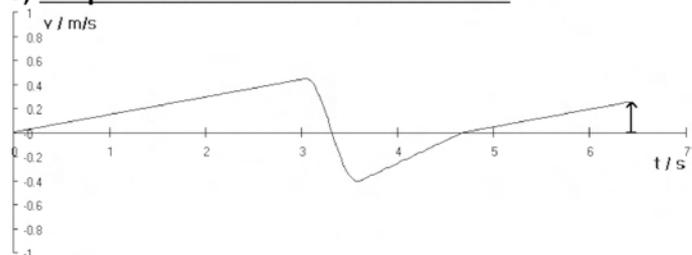


Abb. 3.7 a, b, c: Weitere drei verschiedener Darstellungsmöglichkeiten der Geschwindigkeit eines Wagens

Achse als Zeitachse zu erkennen, denn im Versuch entspricht die Horizontale meist dem Ort und bei der zweidimensionalen Kinematik betrachtet man zuerst x-y-Diagramme. Der entscheidende Vorteil dieser Repräsentationen ist, dass man die relevanten Größen nicht nur zu jeweils einem Zeitpunkt sieht, sondern mit dem ganzen, bis dahin abgelaufenen Versuch vergleichen kann, also hier die zeitliche Entwicklung dokumentiert wird (Längsschnitt).

In der üblichen Darstellung werden fertige Zeitgraphen gezeigt, ohne dass sie langsam durch Pfeile erstellt werden. Aber „erst nachdem der Lernende [...] Konzepte aufgebaut und qualitative Zusammenhänge erkannt hat, sollten Graphen [...] zur Präzisierung physikalischer Abhängigkeiten herangezogen werden, deren Interpretation dann zusätzliche Verarbeitungsprozesse erfordert“ (Heuer, 1993d, S. 371).

Mit den vorgestellten Zwischenschritten kommt man von einer anschaulichen Darstellung zum Zeitgraphen. Je nachdem wie neu oder vertraut den Lernenden Liniengraphen sind, müssen mehr oder weniger Zwischenstufen gewählt werden. Möglich ist auch, dass man neben der gerade zu betrachtenden Darstellung eine ältere anschaulichere Darstellungen wie die Animation weiterhin zum

Vergleich und zur Erinnerung sichtbar lässt, damit die Lernenden leichter bestimmte Phasen des Graphen bestimmten Phasen des Ablaufs zuordnen können.

3.2.2.2 Vergleich verschiedener Größen

Häufig interessiert im Physikunterricht nicht nur der zeitliche Verlauf einer Größe, sondern ihr Zusammenhang mit anderen Größen. Will man mehrere Größen darstellen, hat man prinzipiell die gleichen Darstellungsmöglichkeiten wie bei einer Größe, wobei sich aber die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Darstellungsmöglichkeiten verändern. Beim Stempeln z.B. können nicht zwei Größen direkt nebeneinander gestempelt werden, sondern nur mit einigem Abstand, was die genaue zeitliche Zuordnung beim Vergleichen erschweren kann (siehe Abb. 3.8).

Werden Pfeile in ein Video oder in eine Animation hineingezeichnet (siehe Abb. 3.9 a, eine Luftkissenbahn wird hin- und hergekippt und Hangabtriebskraft und Bewegung gemessen), ist ein Vergleich schwer möglich, wenn sich die Pfeile mit dem Objekt mitbewegen. Eine geeignete Darstellung ist, die Pfeile (zusätzlich) ortsfest zu zeigen (siehe Abb. 3.9 b; Wilhelm, 1994, S. 152 f.). Die Anfangspunkte (Fußpunkte) der Pfeile sind dabei fest und Richtung und Länge ändern sich entsprechend den dazugehörigen Größen. Da sich die Pfeile nicht mehr mit dem Gleiter bewegen, sind sie viel besser zu beobachten und zu vergleichen. Die Möglichkeit des Anhaltens und der Reproduktion mit verschiedenen Geschwindigkeiten bleibt jedoch wie bei der Animation erhalten. In dieser Darstellung hat man einen übersichtlichen Querschnitt durch die relevanten Größen zu jeweils einem Zeitpunkt, so dass man diese gut vergleichen kann.

Der nächste Abstraktionsschritt ist, alle relevanten Größen in einen Zeitgraphen

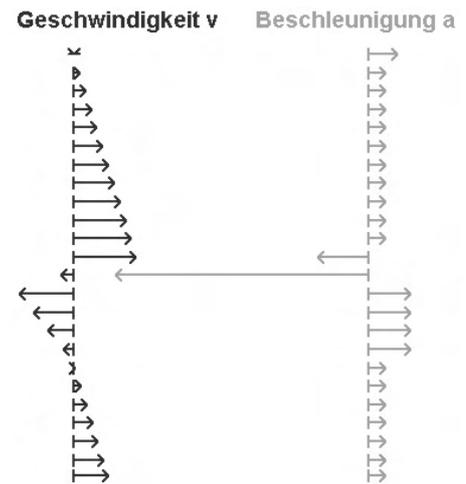
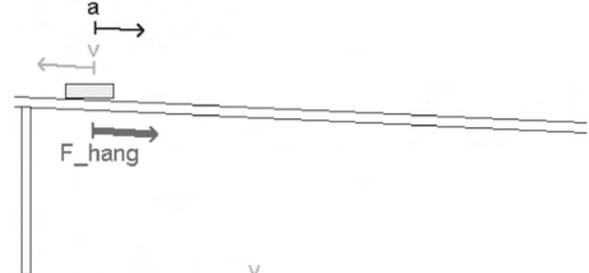
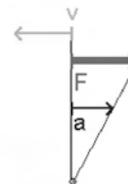


Abb. 3.8: Zwei Stempeldiagramme zum Vergleich

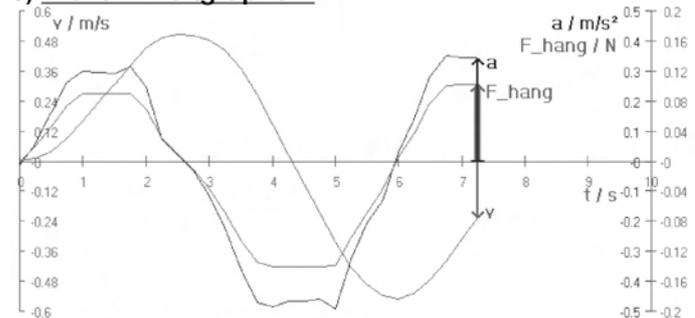
a) Animation mit Pfeilen:



b) Ortsfeste Pfeile:



c) Pfeile in Zeitgraphen:



d) x-y-Darstellung:

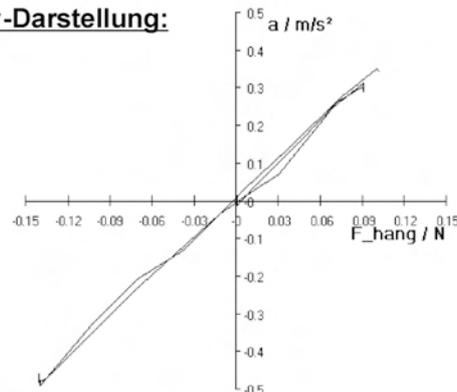


Abb. 3.9 a, b, c, d: Vier verschiedene Darstellungsmöglichkeiten zum Vergleich mehrerer Größen

einzuzeichnen (siehe Abb. 3.9 c). Auch hier können die verschiedenfarbigen Pfeile wieder eingezeichnet werden, so dass die Anfangspunkte dabei der Zeitachse entlang laufen und die Pfeile nach oben oder unten weisen. An der Spitze der Pfeile entstehen den Pfeilen farblich entsprechende Linien, so dass quasi die Pfeile den Graphen erstellen (Wilhelm, 1994, S. 152 f.). In der Physik würde man eine Größe in Abhängigkeit von einer anderen darstellen (siehe Abb. 3.9 d), was die abstrakteste Darstellung ist. Sie wird leichter verstanden, wenn sie nicht von Anfang an, sondern erst nach der Diskussion anschaulicherer Darstellungen gezeigt wird.

In allen Darstellungsformen der Abb. 3.9 wird visualisiert, dass die Beschleunigung a und die Hangabtriebskraft F_{hang} stets proportional zueinander sind, womit Strukturaussagen gemacht werden. Diese Aussage wird besonders im Teil b der Abb. 3.9 durch eine dynamisch ikonische Repräsentation in Form einer Verbindungslinie vom unteren Punkt zur Pfeilspitze von F deutlich.

3.2.3 Forschungsergebnisse

Es gibt viele Forschungsergebnisse zum Lernen mit Bildern oder Animationen bzw. zur Multicodierung, aber nur wenige, die sich mit dynamisch ikonischen Repräsentationen beschäftigen, bei denen physikalische Größen dynamisch in quantitativer Form in ikonischen Bildelementen, insbesondere mit Pfeilen, dargestellt werden. Zwei Studien haben sich bereits mit dynamisch ikonischen Repräsentationen beim Mechaniklernen beschäftigt.

BLASCHKE hat in einer Feldstudie in zwei Schuljahren (von 1996 bis 1998) in vier mathematisch-naturwissenschaftlichen Klassen eines Gymnasiums im Kinematik- und Dynamikunterricht eindimensionaler Bewegungen in der Jahrgangsstufe 11 intensiv dynamisch ikonischen Repräsentationen eingesetzt (Blaschke, 1999) (siehe auch Kapitel 5.2). Dabei wurden die Ergebnisse sowohl von Realexperimenten als auch von Simulationen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen wiedergegeben. In den gleichen Klassen hat REUSCH (private Mitteilung; Blaschke, Heuer, 2000, S. 90) später im Schuljahr einen Unterricht zur zweidimensionalen Kinematik und Dynamik ebenfalls mit dynamisch ikonischen Repräsentationen gehalten. Verschiedene Multiple-Choice-Testaufgaben wurden zu Beginn des Schuljahres (Vortest), nach der eindimensionalen Dynamik (Zwischentest) und am Schuljahresende (Endtest) gestellt, u.a. Testaufgaben mit Beschleunigungs-Zeit-Graphen, mit Kraft-Zeit-Graphen, mit Kraft-Text-Aufgaben und der FCI-Test (Informationen zu den Tests und Ergebnisse traditionell unterrichteter Klassen siehe Kapitel 6.4.2, 6.5.1 und 6.5.2). Die Vortestwerte befinden sich dabei im Bereich von Vergleichsklassen, während die Nachtestwerte extrem gut sind (Beschleunigungs-Zeit-Graphen: Vortest 9 %, Zwischen 70 %, End 91 %; Kraft-Zeit-Graphen: Vor 11 %, Zwischen 72 %, End 83 %; Kraft-Text-Aufgaben: Vor 15 %, Zwischen 76 %, End 83 %; FCI-Test: Vor 35 %, Nach 71 %, relativer Zugewinn $g = 55$ %) (Blaschke, 1999, S. B-7 und S. F-2, gemittelt über Schüler statt über Gruppen). Ein untersuchungsmethodischer Schwachpunkt ist allerdings, dass alle Versuchsklassen vom gleichen Lehrer unterrichtet wurden (der auch die Tests stellte und auswertete), aber die Vergleichsklassen von verschiedenen anderen Lehrern unterrichtet wurden. Des Weiteren ist ungeklärt, ob es sich um durchschnittliche oder um zufälligerweise besonders gute Klassen handelte. Die Nachtestwerte sind so gut, dass man an der methodischen Korrektheit bei der Testdurchführung zweifeln kann.

BLASCHKE hat die an seinem Unterricht teilnehmenden Schüler (N = 80) nach dem Unterricht nach deren Akzeptanz dynamisch ikonischer Repräsentationen gefragt (Aussagen konnten auf einer fünfstufigen Skala bewertet werden, woraus durch Zusammenfassen der beiden positiven und der beiden negativen Bewertungen nachträglich eine dreistufige Skala „Zustimmung/teilweise/Ablehnung“ gebildet wurde.) (Blaschke, 1999, S. 198 – 201 + Anhang H, I, J). Demnach helfen nach Schülermeinung Vektorpfeile beim Verstehen einer Bewegung (54 % Zustimmung, 28 % teilweise Zustimmung), sind Pfeile bei Animationen für das Verständnis der Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung wichtig (63 % Zustimmung, 24 % teilweise Zustimmung) und sehr hilfreich für das Verständnis der Begriffe Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft (70 % Zustimmung, 13 % teilweise Zustimmung). Allerdings wird weniger gesehen, dass Vektorpfeile das Verstehen eines Graphen unterstützen (36 % Zustimmung, 28 % teilweise Zustimmung) (Blaschke, 1999, S. 199). Interessant ist die Einschätzung in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit, wozu die Schüler entsprechend ihrer Zeugnisnoten in vier Kategorien eingeteilt wurden. Es wird vermutet, dass die wenigen sehr guten Schüler die Vektorpfeile nicht für ihr physikalisches Verständnis von Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft benötigen. *„Die vielen guten bis mittelmäßigen Schüler nehmen diese Hilfen sehr gerne an und setzen sie auch bewusst bei Lösungen von Problemen ein. Schwache Schüler jedoch haben auch mit diesen Visualisierungselementen noch teilweise Probleme, vor allem bei Kräften. Sie haben Schwierigkeiten, die Notwendigkeit und den Nutzen dieser Elemente für den Aufbau von physikalischer Kompetenz einzusehen und gebrauchen diese dementsprechend auch nicht so oft wie die besseren Schüler“* (Blaschke et al., 2000, S. 90, ähnlich bei Blaschke, 1999, S. 200). Die Unterschiede zwischen den vier Kategorien sind bei der Befragung aber meist nicht sehr groß (es wurden keine Aussagen über Signifikanzen getroffen).

In der DFG-Studie „Erwerb qualitativer physikalischer Konzepte durch dynamisch-ikonische Repräsentationen von Strukturzusammenhängen“ (Galmbacher et al., 2005a+b) sollte in der ersten Teilstudie ermittelt werden, inwieweit durch das Lernen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen das Verstehen von Liniendiagrammen gefördert wird. 110 Schüler der elften Jahrgangsstufe, die bereits im traditionellen Unterricht mit Graphen gearbeitet haben, haben dazu in Einzelarbeit in einer kompakten Lerneinheit von ca. 150 Minuten erstmals und ohne Leistungsdruck am PC mit dynamisch ikonischen Repräsentationen gearbeitet. Die Schüler wurden anhand von Vortests in drei leistungsgleiche Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe bekam nur die Animation simulierter Vorgänge und Liniendiagramme gezeigt. Die zweite Gruppe sah zusätzlich dynamisch ikonische Repräsentationen in der Form von Vektorpfeilen. Sie war im Nachtest etwas, aber nicht signifikant schlechter als die Gruppe, die nur mit Liniendiagrammen arbeitete. Dass die dritte Gruppe, die außer diesen zwei Repräsentationen noch Stempeldiagramme (siehe Kapitel 3.2.2.1, Abb. 3.7 b) hatte, genauso wie die erste Gruppe abschloss, spricht zumindest gegen einen cognitiv overload. Insbesondere Schüler mit geringem abstrakt-logischem Denkvermögen profitierten von den Stempeldiagrammen (Galmbacher et al., 2005b, S. 2 f.).

3.3 Das Softwaresystem PAKMA/VisEdit

Der Name „PAKMA“ steht für eine ganze Entwicklungsreihe eines Softwareprogrammes. Bereits in den 80er Jahren gab es ein Messwerterfassungssystem mit dem Namen „PAKMA“ für den Homecomputer Commodore C64 (Heuer, 1988), mit dem Liniengraphen und bewegte Bitmaps dargestellt werden konnten. Ende der 80er Jahre wurde eine Version für den „Amiga“-Computer erstellt (Heuer, 1992b, S. 353), mit der bereits Animationen und dynamisch ikonische Repräsentationen (mit größerem Aufwand skriptgesteuert) realisiert werden konnten. Die erste Implementation unter Windows 3.x wurde von 1991 bis 1993 durchgeführt. Dieses Windows-PAKMA wurde seitdem permanent weiterentwickelt, schrittweise um verschiedene Animationselemente ergänzt und die Bedienoberfläche an die Entwicklung von Windows angepasst. Die Animationselemente und dynamisch ikonischen Repräsentationen sind effizient über Dialoge erstellbar. Die schnelle Entwicklung der Computer-Hardware sowie der Betriebssysteme machte eine Neuprogrammierung von PAKMA notwendig. In gewissem Sinn erfolgte diese durch die Erstellung des betriebssystemunabhängigen Java-Programm JPAKMA (Schönberger et al., 2002; Gößwein et al., 2002, Gößwein et al., 2003). Die vorliegende Beta-Version sollte aber weiter optimiert werden.

Alle diese Programmversionen haben gemeinsam, dass mit Hilfe eines Editors mit einem vereinfachten Pascal ein „Kernprogramm“ geschrieben wird, das eine eventuelle Messung und alle Berechnungen steuert. Damit kann sowohl eine Realmessung als auch eine reine Simulation erstellt werden. Animationen und dynamisch ikonische Repräsentationen können sich entsprechend jeder darin gemessenen oder berechneten Größe bewegen.

1999 wurde zu PAKMA das Zusatzmodul „VisEdit“ erstellt (Cimander, 1999; Geißler, 1999). Hier werden mit einem graphischen Editor Symbole gesetzt, die für eine Messung einer bestimmten Größe oder für eine Berechnung einer Größe aus anderen Größen stehen. VisEdit kann dann aus diesen Angaben das Kernprogramm für PAKMA erstellen. Damit kann sowohl eine Realmessung in PAKMA programmiert werden als auch eine reine Berechnung, also Simulation, erstellt werden. Die graphische Erstellung einer Simulation nennt man eine graphische Modellbildung. Hierzu einige Begriffsdefinition: 1. Eine Realmessung oder Messwerterfassung bedeutet, dass über Sensoren tatsächliche Größen eines physikalischen Ablaufs aufgenommen werden, aus denen dann weitere physikalische Größen des Vorgangs berechnet werden können. 2. Eine Simulation dient dagegen der Nachbildung ausgewählter Realitätsaspekte (Kircher et al., 2000, S. 251) mit Hilfe einer (häufig nicht sichtbaren) vorgefertigten Berechnung, wobei sich in der Regel einzelne Parameter verändern lassen oder man in den Ablauf eingreifen kann, so dass die Folgen der Handlung deutlich werden. 3. Bei einem Modellbildungssystem werden nicht nur einzelne Parameter variiert, sondern der Benutzer muss selbst die Zusammenhänge zwischen den Größen angeben. Vom Modellbildungssystem wird nach diesen Angaben das Programm, nach denen die anschließende Simulation abläuft, erst erstellt, um eine Simulation entsprechend den eigenen Vorstellungen sehen zu können. Dabei gibt es gleichungsorientierte Modellbildung (in PAKMA möglich) und graphisch orientierte Modellbildung (mit PAKMA und VisEdit möglich) (siehe Kapitel 4.11.). VisEdit ist also ein Modul,

das nicht nur zur graphischen Modellbildung, sondern auch zum Programmieren von Messungen und Simulationen verwendet werden kann.

Sowohl bei einer Messwerterfassung als auch bei einer Simulation müssen die Daten dargestellt werden. Dazu können in PAKMA Graphen, Animationen und dynamisch ikonische Repräsentationen verwendet werden. Außerdem können in PAKMA zusätzlich Videos des Versuchsablaufs gezeigt und externe Daten (z.B. eines Videoanalyseprogramms) eingelesen werden.

Dem Softwaresystem PAKMA liegt damit eine Philosophie zugrunde, die sich deutlich von fast aller anderer Physik-Software für den Schuleinsatz unterscheidet, die in der Regel für spezielle Aufgabenbereiche erstellt wurden. So sind Messwerterfassungssysteme ausschließlich zum Messen (und evtl. zum Steuern) vorgesehen, was meist mit leichter intuitiver Bedienung durchführbar ist, ohne viel einstellen zu müssen; die Ergebnisse werden als Graphen ausgegeben. Graphische Modellbildungssysteme sind nur zum numerischen Lösen von Differentialgleichungen gedacht und geben die Ergebnisse ebenso als Graphen aus. Simulationssoftware ist im Allgemeinen nur für ein bestimmtes Thema erstellt. In PAKMA mit dem Zusatzmodul VisEdit sind nicht nur alle diese Funktionen möglich, sondern sie können auch gleichzeitig genutzt werden. Durch die Offenheit der Software gibt es für den Benutzer kaum Grenzen. Dadurch, dass der konkrete Ablauf mit einem erweiterten Pascal programmiert werden kann, gibt es für diejenigen, die programmieren kann, sehr viele Gestaltungsmöglichkeiten, insbesondere im Hinblick auf die unterschiedlichsten Simulationen. Auch die Animationen und dynamisch ikonischen Repräsentationen bieten sehr viele Darstellungsmöglichkeiten. Aber dadurch, dass man viel auswählen und einstellen kann, muss man z.T. auch viel einstellen. Durch seine Mächtigkeit ist es für viele Nutzer, Lehrer wie Schüler, nicht leicht, sich darin einzuarbeiten. Andererseits ist es damit ein geeignetes Werkzeug für physikdidaktische Forschung, da damit im Unterricht nicht nur verschiedene Darstellungen, sondern auch sehr viele unterschiedliche Vorgehensweisen ausprobiert werden können.

Eine ähnliche Philosophie hat die Software „Coach 5“, die vom AMSTEL Institut der Universität Amsterdam entwickelt wurde und ebenso recht vielseitig nutzbar ist. Mit Coach 5 ist neben einer Messwerterfassung und der Steuerung von Geräten, auch eine vorbildliche Videoanalyse und eine einfache Modellbildung möglich. Darüber hinaus können in einer Autoren-Umgebung Multimediaaktivitäten, Lehrmaterialien und Anleitungen erstellt werden, wobei Texte, Bilder und Videos eingefügt werden können. Hier können auch Messungen vorbereitet, Modelle vorgefertigt, Videoanalysen vorbereitet und sogar Links zu Internetseiten (z.B. mit Java-Applets) oder andere Dateien gesetzt werden. Mit Coach 5 ist es nicht möglich, selbst Animationen zu erstellen oder dynamisch ikonische Repräsentationen wie Vektorpfeile einzusetzen.

Auch PAKMA kann man auf drei unterschiedlichen Nutzungsniveaus einsetzen. Als „Anwender“ kann man fertige Simulationen (wobei man Startwerte und Parameter verändern kann) oder aufgezeichnete Realmessungen in Reproduktion ablaufen lassen. Dazu erschienen im Schroedel-Verlag bereits mehrere CDs zu den bekannten Schulbüchern „Dorn-Bader Physik“ für die Jahrgangsstufen 11 bis 13 (z.B. die CD „PAKMA 2002“ mit ca. 240 PAKMA-„Projekten“²). Zu diesen „Projekten“²

² Eine PAKMA-Datei, die sowohl ein Simulationsprogramm als auch ein Programm zur Messwerterfassung sein kann,

wurden ausführlich html-gesteuerte Anleitungen für Lehrer (mit Arbeitsaufträgen, die sie den Schülern stellen können) erstellt (auch im Format Word und pdf vorhanden). Außerdem wurde dafür eine vereinfachte Steuerung des Programmablaufs in PAKMA implementiert, die im Wesentlichen mit einer Schaltfläche auskommt. Als „Entwickler“ kann man dagegen selbst neue Simulationen erstellen und selbst neue Messungen konzipieren. Benutzt man PAKMA als Messwerterfassungssystem, was ursprünglich die Hauptintension war, hat man mehr Möglichkeiten bzgl. der Verarbeitung und Darstellung der Messergebnisse als mit anderen Programmen. D.h. man muss auch mehr Entscheidungen treffen, so dass man zwangsläufig auch mehr Probleme haben kann. Das Erstellen von Simulationen und Animationen ist leichter als etwa beim Erstellen eines Java-Applets. Dafür kann der Anwender eines Applets dieses als eigenständiges Programm laufen lassen, das meist mit wenigen Schaltflächen intuitiv bedienbar ist, während der PAKMA-Anwender zumindest eine vereinfachte Runtime-Version von PAKMA braucht. Schließlich kann man als „kundiger Anwender“ auch selbst fertige Simulationen und Messprogramme nach seinen Wünschen abändern. Eine für Lehrer empfehlenswerte Variante ist z.B., eine vorgefertigte Ausgabe (Animationen, dynamisch ikonische Repräsentationen und Graphen) unverändert zu übernehmen, aber die Berechnung der Simulation über das Modellbildungswerkzeug VisEdit mit den Schülern neu zu erstellen bzw. später nach den Wünschen der Schüler zu verändern. HEUER (2003a, S. 10+11) spricht hier von einer „interaktiven Modellbildungs-Simulation“.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Windows-Software PAKMA (und das betriebssystemunabhängige Java-Programm JPAKMA) multicodal ist, denn wie dargestellt werden mehrere Kodierungsformen (Bilder, Animationen, dynamisch ikonische Repräsentationen, Graphen und mit VisEdit graphische Wirkungsgefüge) zur Informationsvermittlung genutzt, auch wenn in der Regel kein Text oder Ton benutzt wird. PAKMA ist jedoch nicht multimodal, denn in der Regel wird durch die Software nur das visuelle Sinnesorgan angesprochen, evtl. höchstens noch in Schülerübungen mit der PC-Maus der Tastsinn (siehe Kapitel 5.3.1, 5.3.2 und 5.3.3.1). Der auditive Bereich ist völlig dem Lehrer überlassen, denn die Software PAKMA ist ein Werkzeug für den Lehrer (mit Einschränkung evtl. für den Schüler). Eine Interaktivität ist dadurch gegeben, dass der Ablauf (bei Simulationen und bei Reproduktionen von Originalmessungen) angehalten oder in einzelnen Schritten gezeigt werden kann oder bei Simulationen einzelne Parameter über Schieber verändert werden können. Eine weitergehende Interaktivität ist die Modellbildung - insofern, dass der Anwender hier selbst über das Rechenprogramm entscheidet, dass den Ablauf der Simulation steuert. Das Softwarewerkzeug PAKMA ist aber nicht als interaktive Lernumgebung konzipiert, in der der Schüler allein, individuell, selbstgesteuert und aktiv (etwa über Hyperlinks) Erfahrungen macht und lernt. Natürlich ist es allerdings heute mittels html möglich eine interaktive Lernumgebung zu erstellen, bei der aus dem verlinkten Lehrtext heraus PAKMA wie jede andere Software gestartet wird und dort die gestellten Lernaufgaben bearbeitet werden.

Der Begriff „Multimedia“ wird heute unterschiedlich und inflationär verwendet. Nach SONNENTAG (1996) ist ein Multimedia-System ein Computer-System (obwohl man streng genommen auch den

Computer als ein einziges Medium auffassen könnte), bei dem unterschiedliche Medien zu einem einzigen Informations-, Lern- oder Präsentationssystem integriert werden, wobei Texte, Graphiken, Fotos, Audio- oder Videokomponenten verwendet werden, von denen mindestens ein Medium zeitlich dynamisch ist (obwohl das nur visuelle Medien sind). Ein weiteres wesentliches Merkmal von Multimedia ist insbesondere die Interaktivität (Sonntag, 1996, S. 415; Issing et al., 1997, S. 60). Da dies alles bei PAKMA möglich ist (auch wenn häufig nur Animationen, dynamisch ikonische Repräsentationen und Liniengraphen genutzt werden), kann nach dieser Definition die Software PAKMA als Multimedia-System bezeichnet werden, jedoch nicht als Hypermedia-System. Da PAKMA insbesondere die Multicodalität ermöglicht, kann es auch als multicodale Lernumgebung bezeichnet werden.

Wichtig für den Einsatz von PAKMA ist das Ebenenkonzept. Damit ist gemeint, dass in einem Ausgabefenster zwar verschiedenste Ausgabeformen (verschiedene Graphen, verschieden dynamisch ikonische Repräsentationen, siehe Abb. 3.5 bis 3.9) vorhanden sind, diese aber mehreren Ebenen zugeordnet sind, von denen eine und damit eine bestimmte Konstellation der Ausgabeformen angezeigt wird. Der Anwender, in der Regel der Lehrer, wählt nun jeweils die Ebene und damit die Darstellungsformen aus, die gerade angemessen sind. Damit ist es einerseits möglich, einen „cognitive overload“ durch zu viele Darstellungen zu vermeiden, und andererseits, schnell (auch während des Ablaufes) eine andere Darstellungsform hinzuzuschalten. Es kann also schrittweise von anschaulichen zu abstrakteren Darstellungen umgeschaltet werden.

Um Referendaren die Fähigkeit zur eigenen und kollegialen Fortbildung zu vermitteln, hat NEUNZIGER mit Referendaren eine Fortbildungsveranstaltung für Lehrer durchgeführt, wobei man sich für das Programm PAKMA entschied (Neunziger et al., 2002). Dabei schätzte man die Vielzahl bereits ausgearbeiteter PAKMA-„Projekte“, aber auch die Möglichkeit, Schüler an die Programmierung heranzuführen, und hierbei wiederum die Offenheit und Leistungsfähigkeit. Des Weiteren wurde die Möglichkeit, Messdaten mit Modellen zu vergleichen und der kostengünstige Einsatz der Computermaus in Schülerversuchen gewürdigt. Die an der Fortbildung teilnehmenden Lehrer schätzten z.B., dass mit dieser Software Phänomene aus der Lebenswelt der Schüler behandelt werden können. Sie stellten aber auch fest, dass man als Lehrer erst einmal viel Zeit hineinstecken muss, wenn man alle Möglichkeiten ausnutzen will.

4 Interventionsstudie zur graphischen Modellbildung mit Vis-Edit

Zunächst werden Grundsätzliches zur Modellbildung, eine didaktische Begründung für den Unterrichtseinsatz und Forschungsergebnisse in der Literatur vorgestellt (Kapitel 4.1 bis 4.3). Dann werden die Interventionsstudie und deren Ergebnisse dargelegt (Kapitel 4.4 und 4.5).

4.1 Grundlegendes über Modellbildungssysteme

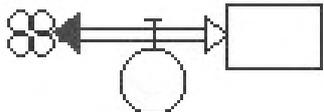
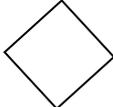
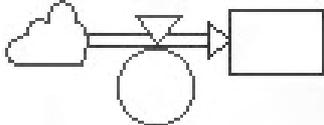
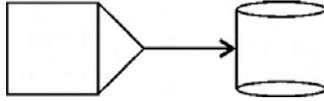
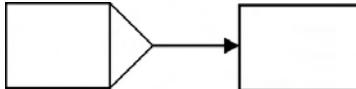
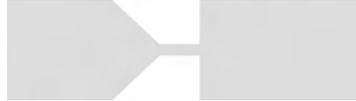
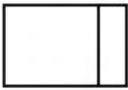
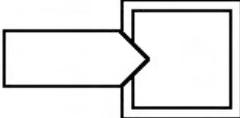
Ein physikalisches Modell ist „*ein reales oder fiktives Gebilde derart, dass reale oder fiktive Beziehungen zu dem Modellobjekt bestehen*“ (Kircher, 1995, S. 95). Dieses Modell von einem Objekt wird für einen bestimmten Zweck konstruiert, wobei Analogien zwischen bestimmten Entitäten des Modells und des Objekts bestehen. Demnach „*können (a) Gegenstände bzw. Gegenstandsarten Modelle von bzw. für etwas sein, und es können (b) Theorien oder Satzklassen Modell von bzw. für etwas sein*“ (Essler, 1971, S. 39). Weitere Klassifikationen von Modellen gibt KIRCHER an (1995, S. 136 – 140). SCHECKER nennt insbesondere gegenständliche Modelle, Gedankenmodelle und mathematische Modelle (1998b, S. 22). Ein Gedankenmodell ist nach MEADOWS eine möglichst systematische Reihe möglichst realer Annahmen über ein wirkendes System (Meadows et al., 1973, S. 14).

Die Bildung von Modellen ist eine grundlegende Methode der Physik. Im Kontext systemdynamischer Modellierung bedeutet Modellbildung die Konstruktion eines Netzwerkes physikalischer Begriffe und Beziehungen, mit denen das Verhalten eines physikalischen Systems beschrieben und vorausgesagt werden kann (Schecker, 1998b, S. 23). Ein Modellbildungssystem ist ein Computerprogramm, mit dem man physikalische Modelle konstruieren, durchrechnen und die Ergebnisse darstellen kann. Diese Modelle sind formal mathematische Modelle, die wiederum Realisierungen eines Gedankenmodells sind. Ziel solcher Modelle sind nicht eine Veranschaulichung eines Objektes, sondern beobachtete Phänomene und Abläufe zu verstehen und neue Erkenntnisse über die komplexen Zusammenhänge zu gewinnen.

4.1.1 Die Eingabe bei unterschiedlichen Modellbildungssystemen

Im Prinzip gibt es zwei Arten von Modellbildungssystemen: Gleichungsorientierte, programmiersprachennahe Systeme und graphisch-strukturorientierte Systeme (auch graphikorientiert bezeichnet). Gleichungsorientiert kann man Modellbildung mit einer Programmiersprache wie Basic oder Pascal oder in Excel durchführen; dies wird unter dem Begriff „Methode der kleinen Schritte“ im Unterricht eingesetzt. Allerdings kann man dabei nur das Euler-Verfahren als ein einfaches Näherungsverfahren verwenden, das bei manchen Vorgängen falsche Ergebnisse liefert. Es gibt dazu auch eigene Programme wie z.B. das alte Programm Dynamos zum Betriebssystem MS-DOS. Heute sind Modellbildungssysteme in der Regel aber graphisch-strukturorientiert. Im Schulbereich am bekanntesten sind STELLA, Powersim, Modus, Coach 5 und VisEdit und vor allem Dynasys, das nach einer Lehrerbefragung von GRÖBER (2005, S. 34) das in Rheinland-Pfalz am meisten einge-

setzte Modellbildungssystem ist (von anderen Bundesländern liegen keine Daten vor). Für den außerschulischen Bereich gibt es noch etliche professionelle Programme. Hier wird jeweils zuerst mit einem graphischen Modell-Editor durch Einführen der relevanten physikalischen Größen und ihren Verknüpfungen ein Modell erstellt. D.h. es werden Symbole für die einzelnen Größen gesetzt und entsprechend ihren Wirkungen miteinander verknüpft. Erst in einem zweiten Schritt werden diese qualitativ definierten Beziehungen zwischen den einzelnen Größen durch grundlegende physikalische Beziehungen quantifiziert (Schecker, 1992, S. 151). Die graphische Darstellung hat gegenüber Gleichungen viele Vorteile: Die Struktur des Modells ist schnell und einfach zu erkennen, was eine Diskussion darüber - z.B. in einer Gruppenarbeit von Schülern - erleichtert. Es ist sofort klar sichtbar, welche Größe auf welche andere einen Einfluss hat. Außerdem muss keine Programmiersprache, sondern nur die Arbeit mit sehr wenigen Symbolen gelernt werden.

Programm	Vorgabegröße (exogene Einwirkung)	Zwischengröße	Zustandsgröße (Speichergröße) mit Veränderung
STELLA Dynasys	Konstante 	Einflussgröße 	Zustandsgröße mit Änderungsrate 
Powersim			
Modus			
Moebius			
Coach 5			
VisEdit / PAKMA	Konstante 	Funktionsgröße 	Sammelgröße 

Tab. 4.1: Symbole in graphisch orientierten Modellbildungssystemen

Die Modellbildungssysteme gehen auf FORRESTER zurück, der in den 60er Jahren die Systemdynamik entwickelt hat. In der Systemdynamik sind vor allem drei grundsätzlich verschiedenartige Typen von Systemgrößen (Tab. 4.1, erste Tabellenzeile) zu unterscheiden (Bossel, 1992, S. 79 + 93):

1. Vorgabegrößen, d.h. Parameter und exogene Einwirkungen, also Größen, die von außen auf das System einwirken, aber von diesem nicht beeinflusst und verändert werden.
2. Zustandsgrößen, d.h. Speichergrößen, in denen sich der gegenwärtige Zustand eines Systems auch als Ausdruck seiner Geschichte widerspiegelt. Sie sind das Gedächtnis des Systems (Bossel, 1992, S. 19).
3. Zwischengrößen, d.h. Größen, die jederzeit direkt aus Vorgabe- und Zustandsgrößen ermittelt, d.h. berechnet werden können. Auch die Veränderungsrate der Zustandsgrößen gehören eigentlich zu dieser Kategorie, obwohl sie in der Tabelle zu den Zustandsgrößen dazugezeichnet wurden.

Verschiedene Modellbildungssysteme benutzen dazu unterschiedliche Symbole (Tab. 4.1), wobei in STELLA und Dynasys Konstanten und Zwischengrößen graphisch nicht explizit unterschieden werden. Die Änderungsraten bzw. die Änderungen bekommen in den meisten graphisch-orientierten Modellbildungssystemen ein eigenes Symbol, so dass man auf vier verschiedene Größen kommt (z.B. Schecker, 1998b, S. 27). Ist eine Größe gleichzeitig Zustandsgröße und Änderungsrate muss sie doppelt eingegeben werden, was zu Problemen führt und für Schüler verwirrend sein kann (Schecker, 1998b, S. 33 - 34). Bei STELLA, Dynasys und Powersim verwendet man folgende Analogie: durch eine Rohrleitung fließen die Änderungen in den Zustandsbehälter, wobei die Flüsse durch Ventile (die Änderungsraten) reguliert werden (stock-and-flow-Modelle, Fluss-Diagramme). TINKER (1993, S. 99) kritisiert, dass dabei ein intuitives Verständnis der Flüsse inkompressibler Flüssigkeiten nötig ist. Dabei darf man in STELLA nicht vergessen, auch negative Änderungen zuzulassen (biflow statt uniflow), da eine Begrenzung auf nur positive oder nur negative Werte in der Physik (im Gegensatz zu den Wirtschaftswissenschaften) nur wenig Sinn macht. Dieses „Fließen in den Zustandsbehälter“ entspricht dann dem Integrieren bei einer analytischen Lösung. TINKER (1993, S. 98) gibt zu bedenken, dass diese Darstellung mit der Metapher von Flüssen beim zweiten newtonschen Gesetz nicht sinnvoll erscheint (Was fließt gesteuert von der „Beschleunigung“ in das Reservoir „Geschwindigkeit“?). Laut SANDER (2000, S. 197) haben Studenten damit aber keine Probleme. Er berichtet dagegen von einem Vorzeichenproblem mit STELLA, bei dem STELLA automatisch negative Änderungsraten wählt, weil die Änderungsrate aus der Zustandsgröße herausgezogen wurde (Sander, 2000, S. 179)

Bei VisEdit wird eine andere Analogie benutzt und von einer Sammelgröße gesprochen. Eine Sammelgröße sammelt oder summiert viele kleine Änderungen auf. Beispielsweise ergibt die Summation aller Geschwindigkeitsänderungen Δv zusammen mit dem Startwert v_0 die augenblickliche Geschwindigkeit. Das Quadrat soll ein Reservoir darstellen, das der Größe entspricht. Dahinein geht eine Spritze, die die Änderung darstellt und sowohl positiv als auch negativ sein kann. Während die anderen Programme für diese Integration zwei Symbole brauchen, gibt es hier nur noch ein einziges Symbol. Die graphische Darstellung des Systems, das letztlich entsteht, wird bei STELLA/Dynasys und Powersim als Flussdiagramm aufgefasst, während bei Modus, Coach 5 und VisEdit das Netz

der mit Pfeilen verbundenen Größen eher eine Interpretation als Ursache-Wirkungsdiagramm nahe legt (obwohl sich auch hier Zustandsgrößen von anderen Größen unterscheiden).

Nach der Eingabe aller Größen und Beziehungen berechnet jedes Modellbildungssystem den Vorgang dann iterativ und numerisch. Bei Vorgängen aus der Dynamik bilden folgende drei Gleichungen den Kern der Berechnung:

- Das zweite newtonsche Gesetz $F = m\theta a$ und zwar in der Form $a = F / m$
- Die Definition der Beschleunigung $a = \Delta v / \Delta t$, aber in der Form $\Delta v = a \cdot \Delta t$
- Und die Definition der Geschwindigkeit $v = \Delta s / \Delta t$, wiederum in der Form $\Delta s = v \cdot \Delta t$

Das zweite newtonsche Gesetz in der Form $F = m\theta a$ ist allerdings missverständlich. Gemeint ist nicht eine Kraft, sondern die Summe aller angreifenden Kräfte, und auch nicht eine Masse, sondern die Summe aller bewegter Massen, also $\Sigma F = \Sigma m \cdot a$ oder besser $a = \Sigma F / \Sigma m$.

Kennt der Computer den Startwert s_0 , berechnet er in dem nächsten Zeitschritt Δt die Änderung Δs und kennt damit auch den neuen Ort s_1 . Das Gleiche passiert im nächsten und übernächsten Zeitschritt. Ist jeweils die Geschwindigkeit bekannt, kann auch immer die Ortsänderung und damit der Ort berechnet werden. Die Geschwindigkeit wiederum wird auf die gleiche Weise aus der Beschleunigung berechnet, während die Beschleunigung wiederum aus den bekannten Kräften berechnet werden kann.

Im Unterricht der Studie wurde dieses Prinzip des Aufaddierens der Änderungen für die Schüler an einigen PAKMA-„Projekten“ mit dynamisch ikonischen Repräsentationen dargestellt (Abb. 4.1 und 4.2). Man sieht die Darstellung der Ergebnisse einer Messung der Bewegung des Lehrers mit Hilfe eines Sonarmeters, wobei immer Ort und Ortsänderung nach einer Sekunde aufgetragen wurden. Man kann daran auch sehen: Alle hellblauen Δx ergeben addiert zusammen mit dem Startwert den augenblicklichen schwarzen Ort x . Im zweiten Beispiel ergeben alle roten Δv zusammen die aktuelle grüne Geschwindigkeit v . Bei einigen Modellen ist für ein genaueres Ergebnis statt dieses linearen Verfahrens (Euler-Verfahren) eine quadratische, kubische oder quadrische Näherung (Runge-Kutta-Verfahren) nötig, die ein Modellbildungs-

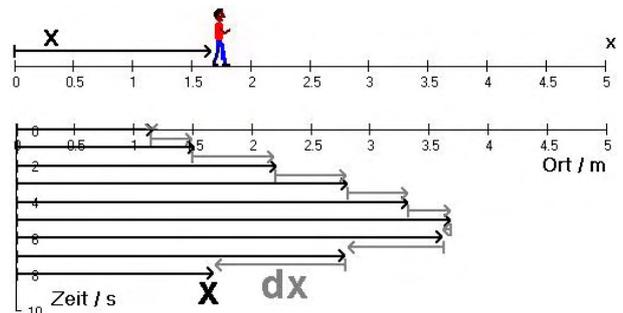


Abb. 4.1: PAKMA-„Projekt“ zum Verständnis des Modellbildungssystems, die Δx erzeugen x

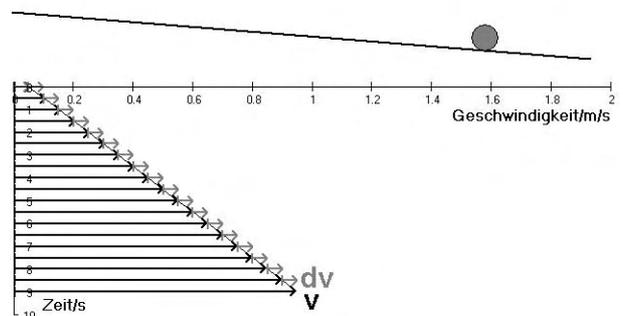


Abb. 4.2: PAKMA-„Projekt“ zum Verständnis des Modellbildungssystems, die Δv erzeugen v

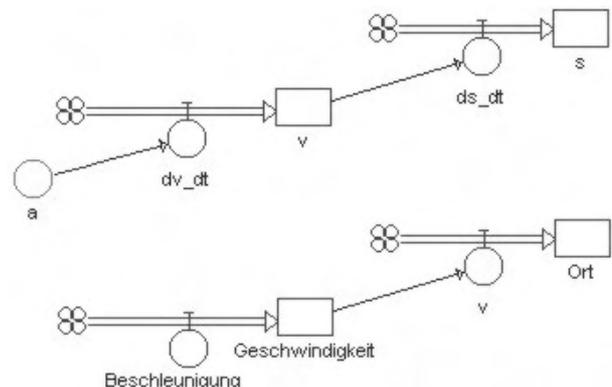


Abb. 4.3: Eingabe in STELLA oder Dynasys

system durchführen kann, aber für Schüler im Detail nicht nachvollziehbar sind.

Die Abb. 4.3 zeigt, wie die Größen in den älteren Modellbildungssystemen STELLA oder Dynasys eingegeben werden. Durch eine Rohrleitung fließen Ortsänderungen in den Zustandsbehälter Ort. Die Änderungsrate ds/dt ist das Ventil, das den Zufluss steuert. ds/dt ist aber die Geschwindigkeit. Diese entsteht genauso. Häufig wird die Änderungsrate auch gleich v genannt und die Zustandsgröße dann „Geschwindigkeit“. Die Geschwindigkeit tritt also unvermeidbar doppelt auf – einmal als normale Größe und einmal als Änderungsrate.

Das Modellbildungssystem VisEdit unterscheidet sich in einigen Punkten von anderen Modellbildungssystemen, die meist an STELLA orientiert sind. Ein struktureller Unterschied ist die Symbolik, die hier für sinnvoller gehalten wird. So tritt in

VisEdit (wie in Coach 5) die Geschwindigkeit nicht doppelt, sondern nur einfach auf (Abb. 4.4). Dadurch werden die Modelle übersichtlicher.

Ein entscheidender Unterschied ist aber, dass in STELLA oder Dynasys die Änderungsrate, z.B. dv/dt , also die Ableitung verwendet wird, während in VisEdit und Coach 5 nur die Änderung, z.B. Δv in einem festen Zeitintervall Δt verwendet wird. Das ist sinnvoll, weil sich Schüler mit Ratengrößen sehr schwer tun, während eine Änderung anschaulicher ist. BLISS (1994, zitiert bei Sander, 2000, S. 49, Originalliteratur nicht ausleihbar) berichtet, dass selbst Studierende Probleme mit der Änderungsrate hatten. Schließlich aber verwendet eh jedes System zum Berechnen die Änderung – deshalb sollte man dies auch deutlich machen. In VisEdit und Coach 5 muss die Gleichung für die Änderung (z.B. $\Delta x = v \cdot \Delta t$), also die umgeformte Definition von Geschwindigkeit und Beschleunigung, auch explizit eingegeben werden, während in STELLA/Dynasys der Computer dies selbst aufgrund der Symbolik tut. Das ist ungeschickt, weil ja die grundlegenden Formeln im Physikunterricht bewusst gemacht werden sollen.



Abb. 4.4: Eingabe in VisEdit

4.1.2 Besondere Möglichkeiten bei einer Modellbildung mit PAKMA/VisEdit

Die meisten Modellbildungssysteme bieten als einzige Darstellungsmöglichkeit der Berechnung die Ausgabe von Graphen an. Bei einer Modellbildung in VisEdit und der Ausgabe in PAKMA können außer Graphen auch dynamisch ikonische Repräsentationen genutzt werden wie Pfeile oder Animationen. Diese helfen, immer den Zusammenhang zum realen Vorgang im Blick zu behalten und Fehler im Modell schnell ohne Grapheninterpretation zu erkennen. Während in anderen Programmen der gesamte Graph auf einmal präsentiert wird, ist es in PAKMA auch möglich, ihn langsam entstehen zu lassen und dabei passende Animationen und Pfeile zu beobachten, die die Größen auf andere Weise repräsentieren.

Hat man einen physikalischen Vorgang modelliert, so stellt sich häufig die Frage, inwieweit das Modell der Wirklichkeit entspricht. Im Gegensatz zu anderen Modellbildungssystemen ist mit VisEdit und PAKMA ein direkter Vergleich von Experiment und Modell möglich, was kein anderes Modellbildungssystem in dieser Form bietet, obwohl das Wechselspiel von Modellieren und Experimentieren als wichtig angesehen wird (Sander et al. 2001, S. 149). SANDER (2000, S. 243) und

SANDER ET AL. (2001, S. 160 f.) zeigen, dass es bei Studenten nur zu oberflächlichen Vergleichen führt, wenn die Graphen nicht in einer Software übereinander gelegt werden können. Nur Coach 5 bietet noch die Möglichkeit, einen Graph von Modell und Experiment übereinander zu legen. Manche Modellbildungsprogramme behelfen sich damit, dass Messdaten umständlicher über Excel eingelesen werden können. Meist ist keine Darstellung in Echtzeit oder mit anderen Repräsentationsformen möglich.

In VisEdit ist es nun möglich, nicht nur graphisch eine Simulation für PAKMA zu programmieren, sondern auch graphisch mit Hilfe weiterer Symbole (z.B. einem Symbol „Messwert“) eine Messung für PAKMA zu programmieren (siehe Abb. 4.5). Dabei spielt ein Symbol namens „Veränderungsgröße“ eine entscheidende Rolle,

die numerisch die Veränderung (die der Ableitung entspricht) berechnet. Dabei stehen als Differentiationsverfahren nicht nur die Bildung von Differenzenquotient, sondern auch eine quadratische und eine Fünfpunkte-Näherung zur Verfügung. In der Version 1.5 kann eine Messung mit der PAKMA-Hardware, mit dem Sensor-Cassy, mit einer PC-Maus oder einem seriellen Messgerät programmiert werden. Da die Bewegung eines gemessenen Objektes in der Regel

nicht gleichzeitig mit der Berechnung der zugehörigen Simulation startet, wurde implementiert, dass auf Knopfdruck Messwerte aus dem Experiment (wie z.B. Ort und Geschwindigkeit) als neue Startwerte für die Modellrechnung übernommen werden (siehe Abb. 4.5).

Weitere zwei Möglichkeiten des Vergleichs mit der Realität ergeben sich bei sichtbaren Vorgängen aus der klassischen Mechanik durch den Einsatz von Videos (Suleder, Wilhelm et al., 2004): 1. Man kann den Modellablauf direkt mit einem Video vergleichen, das digital vorliegt und in PAKMA abläuft. Dazu wird ein Animationsobjekt wie z.B. ein Kreis, der sich als Animation nach dem VisEdit-Modell bewegt, über dem ablaufenden Video eingeblendet, wodurch die Zeit-Ort-Zeit-Übereinstimmung zwischen Animationsobjekt und realem Objekt im Video leicht zu überprüfen ist. Man versucht dann, das Modell bzw. die Startwerte so lange zu ändern, bis sich dieses Animationsobjekt auf dem Bildschirm genauso bewegt wie das bewegte Objekt im Video (Beispiel siehe Wilhelm et al., 2003, S. 25). 2. Für einen detaillierten Vergleich mit der Realität ist ein Vergleich der Daten aus einer Videoanalyse und der Modellbildung gleichzeitig in einem Fenster sinnvoll. Dazu kann man in PAKMA und im Java-Programme JPAKMA dynamisch ikonische Repräsentationen entsprechend den Daten sowohl aus der Videoanalyse als auch aus der Modellbildung gleichzeitig mit in das Video einblenden oder man kann im gleichen Fenster die zugehörigen Graphen direkt vergleichen (Suleder, Wilhelm et al., 2004). Ein Vergleich nur der entsprechenden Graphen ist auch

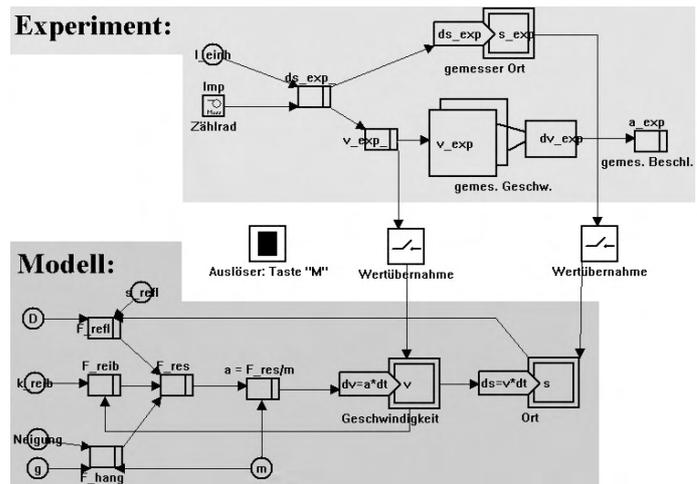


Abb. 4.5: Programmierung einer Messung eines Fahrrahnwagens auf der schiefen Ebene in VisEdit (mit Veränderungsgröße v_exp) und mit Messwerttransfer in das Modell

in Coach 5 möglich, wobei dort auch die Videoanalyse selbst möglich ist, so dass die Daten nicht importiert werden müssen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass bei Modellbildungssystemen zuerst ein bestimmter Vorgang vom Schüler beobachtet, in Erinnerung gerufen oder im Experiment untersucht wird. Dann werden Vermutungen über die zur Beschreibung des Vorgangs heranzuziehenden Größen gemacht und Hypothesen aufgestellt, zwischen welchen Größen welche Beziehungen bestehen. Dafür ist ein tieferes Verständnis der physikalischen Grundbegriffe und -regeln notwendig. So muss sich der Schüler z.B. zuerst fragen, welche Körper in Wechselwirkung stehen und welche Kräfte auf den betrachteten Körper einwirken. Entsprechend wird ein „Wirkungsgefüge“ erstellt. Dieses Modell wird dann vom Computer berechnet und vom Schüler durch den Vergleich zwischen einerseits erwartetem bzw. gemessenem und andererseits simuliertem Verhalten bewertet oder verändert.

Im Gegensatz zu anderen Modellbildungssystemen kann man mit VisEdit auch wie mit einer Tabellenkalkulation zu einem Satz vorgegebener Werte andere Werte nach Gleichungen berechnen. Die veränderbaren Werte werden dabei sinnvollerweise in PAKMA über Schieber eingegeben und eine statische Animation wird entsprechend den berechneten Werten ausgegeben (Beispiel: Heuer, 2003b, S. 33 f.). Man kann dies eine statische Modellbildung nennen im Gegensatz zur dynamischen Modellbildung, die hier ausschließlich betrachtet wird. Diese statische Modellbildung könnte aber im Unterricht zur Vorbereitung auf eine dynamische Modellbildung genutzt werden. Des Weiteren ist es mit VisEdit (über eine Sammelgröße) möglich, dass eine dieser Eingabegröße kontinuierlich erhöht wird. Damit kann man dann wie mit einem Funktionsplotter Funktionen zeichnen (die nicht zeitabhängig sind). Auch hier handelt es sich nicht mehr um dynamische Modellbildung, deren Zweck die Lösung von Differentialgleichungen durch numerische Integration über die Zeit ist. Aber auch hier wird visuell deutlich, welche Größen auf welche Größen einen Einfluss haben.

Die Möglichkeiten der Programmierung einer Messung, der Vergleich eines Modells mit Messdaten oder einem Video und die Möglichkeiten einer statischen Modellbildung zeigen, dass VisEdit/PAKMA ein sehr leistungsstarkes Modellbildungssystem ist. Zu beachten ist aber, dass es einige Einarbeitungszeit kostet, wenn man alle diese Funktionen nutzen will.

4.2 Didaktische Begründung für den Einsatz von Modellbildungssystemen

4.2.1 Betonung der physikalischen Struktur

Wichtige Aussagen über physikalische Abläufe können prinzipiell auf unterschiedliche Weise dargestellt werden, nicht nur in Graphen. Um die Abläufe von Versuchssituationen zu erklären oder bei Variation von Parametern vorherzusagen, ist mehr nötig als die aufbereiteten Daten zu kennen. Hierfür muss der Lernende Vorstellungen einbringen, wie eine Größe eine andere beeinflusst, wobei auch die Abhängigkeiten von bestimmten Bedingungen und von weiteren Größen zu berücksichtigen sind. Dies ist aber i. Allg. nur ein Glied in einer Kette von Abhängigkeiten, die zu bedenken sind, um den gesamten Ablauf zu verstehen. Um Vorstellungen beim Lernenden zu unterstützen, wie Einzelabhängigkeiten untereinander verknüpft sind, kann man solche Wirkungszusammenhänge auch dadurch sichtbar machen, dass in einer Skizze an der Tafel die Beziehungen zwi-

schen den Größen durch Wirkungspfeile wiedergegeben werden (siehe Abb. 4.6) (ein logisches Bild, auch Blockdiagramm genannt).

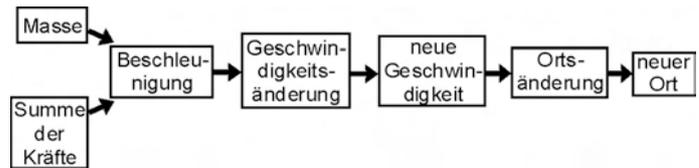


Abb. 4.6: Mögliche Tafelskizze, die Wirkungszusammenhänge zwischen Größen visualisiert.

Die lernpsychologische Intension beim Erstellen und Nutzen solcher Wirkungsketten

ist vergleichbar dem Einsatz von Concept Maps im instruktionellen Bereich. Es geht darum, gedankliche Strukturzusammenhänge bewusster zu machen und Hilfestellungen zu geben, wenn darauf zurückgegriffen werden soll, z.B. um Erklärungen zu geben. Solche graphischen Darstellungen von Strukturzusammenhängen wurden bisher im Physikunterricht kaum genutzt, obwohl sie für qualitative Begründungen sehr hilfreich sein können.

Werden solche graphischen Wirkungszusammenhänge nicht auf Papier sondern am Bildschirm mit einem Modellbildungssystem erstellt (siehe Abb. 4.7), so können sie automatisch in ein Rechenprogramm umgesetzt werden, das den physikalischen Ablauf berechnet und dann auch die zeitlichen Verläufe der interessierenden Größen darstellen kann.

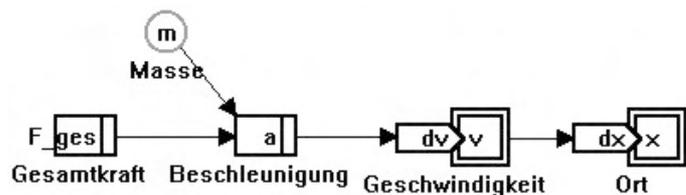


Abb. 4.7: Die „Newton-Maschine“, ein Teil der Wirkungsgefüge der meisten Modelle in der Dynamik, hier in PAKMA/VisEdit-Darstellung

Die physikalische Struktur eines Vorgangs wird also bei der graphischen Modellbildung betont. Es soll deutlich werden, welche Größe auf welche andere einen Einfluss hat, z.B. Gesamtkraft auf Beschleunigung, Beschleunigung auf Geschwindigkeit und diese auf den Ort. In VisEdit ist es nun möglich, diese Wirkungszusammenhänge klarer und übersichtlicher strukturiert darzustellen, als das üblicherweise in STELLA/Dynasys gemacht wird. So wurde in dieser Interventionsstudie immer darauf geachtet, die „dynamische Kette“ der „Newton-Maschine“ $F_{ges} \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$ in einer horizontalen Linie anzuordnen (siehe Abb. 4.7). Die einzelnen Kräfte wurden links von F_{ges} gleichwertig untereinander angeordnet. So kann man das Wirkungsgefüge stets von links nach rechts lesen, während in STELLA/Dynasys eher von unten nach oben gelesen wird. Nur Rückkopplungen gehen dagegen von rechts nach links.

Diese Darstellung der Wirkungsstruktur in einem Blockdiagramm kann man als eine eigene Darstellungsart von physikalischen Aussagen auffassen. Sie soll nicht anstelle, sondern als Ergänzung zu anderen Darstellungsarten hinzutreten. Nach HEUER kann man dann fünf Darstellungsebenen physikalischer Aussagen unterscheiden (siehe Abb. 3.2), die jeweils verschiedenen Repräsentationen des Wissens im Gedächtnis entsprechen (Heuer, 2003a, S. 3): Die höchste Ebene sind demnach Wirkungsgefüge, wie es in einem graphisch-orientierten Modellbildungssystem dargestellt wird, bei dem Zusammenhänge deutlich werden.

Wichtig sind die Lernprozesse beim Erstellen dieses Modells, die helfen, eigene Vorstellungen über die Strukturzusammenhänge zu klären. Zusätzlich zur Klärung der Vorstellungen beim Erstellen des Modells erhalten die Lernenden beim nächsten Schritt, nämlich der Berechnung und Darstellung des Modellablaufs ein entscheidendes Feedback: Entspricht das Phänomen bzw. die detaillierte

Vorhersage dem Modellablauf? Evtl. auftretende Diskrepanzen sind zu klären: Waren die eigenen Vorstellungen richtig, ist die Umsetzung in das Modell stimmig, wo wurden Aspekte wie die Richtungen von Kräften vergessen? Warum erwarte ich trotz eines sinnvollen Modells in einzelnen Details andere Ergebnisse oder andere Graphenverläufe? Dies sind Herausforderungen, denen sich die Lernenden stellen müssen und die die Lernprozesse weiterführen.

4.2.2 Zur didaktischen Funktion authentischer Probleme und Aufgaben

Eine Forderung, die zur Veränderung von Lernschwierigkeiten beim Lernen der Mechanik und insbesondere der newtonschen Dynamik immer wieder erhoben wird, ist die Ausrichtung des Unterrichts auf die Alltagserfahrungen. Im Physikunterricht machen Schüler durch einzelne Experimente nur wenig Erfahrungen, um die neuen Erkenntnisse zu verstehen und längerfristig zu behalten. Andererseits haben die Schüler gerade im Bereich Mechanik schon viele Vorerfahrungen zu den behandelten Themen. Diese Alltagserfahrungen müssen aktiviert und mit den physikalischen Konzepten in Zusammenhang gebracht werden. Beziehungen zwischen Alltagserkenntnissen und Fachkenntnissen müssen aufgedeckt bzw. hergestellt werden.

Häufig glauben Schüler, die physikalischen Erkenntnisse beziehen sich nur auf ideale Gedanken- und Laborwelten, mit denen man im Alltag nichts anfangen kann (Schecker, 1985, S. 166). Physikalische Aussagen und Gesetze sind demnach nur für Situationen unter Laborbedingungen gültig; im Physikunterricht werden also andere Vorstellungen verwendet als im Alltag. Deswegen ist es wichtig, dass im Physikunterricht authentische Probleme behandelt werden. Dabei sollen die Schüler erfahren, dass das physikalische Wissen für die reale Welt relevant und in ihr anwendbar ist. Dies wiederum kann auch für den Schüler motivierend sein. Die Schüler selbst fordern, dass sich der Physikunterricht stärker den Alltagsphänomenen zuwendet, für die sie sich interessieren. In einer Befragung von 449 Schülern der Sekundarstufe II stimmten 91 % der Aussage zu, dass Physik die Aufgabe habe, die Phänomene systematisch zu untersuchen, denen wir im Alltag begegnen (Schecker, 1985, S. 160).

Authentische Aufgaben sind - vor allem in der Mechanik - meistens auch komplexe Aufgaben. Im traditionellen Physikunterricht kommen jedoch kaum komplexe Aufgaben vor. Verschiedene Phänomene und Gesetzmäßigkeiten, die in der realen Welt gleichzeitig auftreten, werden separiert und dann getrennt behandelt, wodurch es zu einer Kompartimentalisierung unterschiedlicher korrekter Konzepte kommen kann (Kapitel 2.1.4). Der Schüler lernt nur verschiedene Einzelfakten und Themen, ohne ein umfassendes Verständnis zu bekommen und einen Zusammenhang zwischen den einzelnen Themen zu erkennen. Dies sollte durch den Einsatz komplexer Aufgaben reduziert werden können. Die Behandlung kann ferner helfen, die Tragfähigkeit physikalischer Konzepte zu sehen. Hiermit wird nicht gefordert, nur noch komplexe Aufgaben zu verwenden, sondern auch Aufgaben verschiedener Kompetenzstufen zu verwenden.

In den vergangenen 15 Jahren wurde wiederholt auf eine Überbetonung von Rechen- und Einsetzaufgaben - vor allem in der Mechanik und hier wiederum in der Kinematik - hingewiesen (z.B. Dittmann et al., 1988), aber daran hat sich bisher nur wenig geändert. Qualitative Zusammenhänge spielen im Unterricht im Vergleich zu quantitativen nur eine untergeordnete Rolle. Die Vorstellung,

dass es in Physik vor allem auf Formelkenntnis und Rechenfertigkeit ankommt, ist sehr verbreitet und beruht auf einer häufig anzutreffenden Schwerpunktsetzung im Unterricht (Schecker, 1985, S. 199). So kritisieren Lehrer an Schulbüchern am meisten, dass sie zu wenige Aufgaben enthalten (Merzyn, 1994, S. 110), obwohl die Anzahl der Aufgaben in Schulbüchern zugenommen haben (Dittmann et al., 1988, S. 389; Merzyn, 1994, S. 185). „Einsetzaufgaben“ sind hier aber wenig hilfreich, da die Schüler nur eine Rechenroutine durchführen. Zwar können die Schüler durch Auswendiglernen der Formeln und durch Trainieren der Einsetzaufgaben mit Hilfe einer Gegeben-Gesucht-Strategie, die HÄUßLER ET AL. (2000, S. 3) die Rückwärtssuche nennen, eine sichere Methode erlangen, um gute Noten zu erzielen, allerdings nur wenn diese Fähigkeiten des Formelkombinierens unangemessen gewichtet werden. Die Schüler lernen in einem solchen Physikunterricht letztlich nur, so zu reden, dass der Lehrer zufrieden ist (Aufschnaiter, Aufschnaiter, 2001, S. 414). Die Physik wird damit aber kaum verstanden oder gar Vorstellungen verändert. Unter den Gymnasiallehrern sind insbesondere die bayerischen am häufigsten der Meinung, das Rechnen von Übungsaufgaben führe zu Physikverständnis (Merzyn, 1994, S. 187) und diese setzen das Aufgabenlösen am häufigsten als Hausaufgabe ein (Merzyn, 1994, S. 97).

Als Folge der TIMS-Studie wird viel über eine neue Aufgabenkultur diskutiert (Schecker et al., 2001), z.B. im deutschen Verein zur Förderung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU, 2001, S. XI – XIV) oder in den bundesweiten BLK-Programmen „Sinus“ bzw. „Sinus-Transfer“ (Bund-Länder-Kommission, 1997, S. 32 - 33). Dabei wird wieder betont, dass der Schwerpunkt im Physikunterricht auf dem qualitativen Verstehen liegen sollte und nicht auf dem Auswendiglernen von Fakten und Formeln. Dieser Gesichtspunkt ist zwar nicht neu, scheint aber immer wenig umgesetzt zu werden. Dabei empfinden Schüler die quantitative Beschreibung von Gesetzmäßigkeiten mit Formeln als wenig interessant (Häußler et al., 1998, S. 134). Von Seiten der Universität wird kritisiert, dass die Erstsemester-Studenten zu sehr auf die speziellen Bewegungsfunktionen fixiert sind, die bei komplexen Vorgängen aber nichts nützen. Ein solches auswendig gelerntes Wissen wird sehr schnell wieder vergessen. Wird dagegen das physikalische Konzept verstanden und damit die Alltagsvorstellung geändert, kann dies langfristig Bestand haben. So wurde auch in einer bundesweiten Erhebung festgestellt, dass sich ein Physikunterricht, in dem das Entdecken und Verstehen von Gesetzmäßigkeiten im Vordergrund steht, auf das theoretische Wissen günstiger auswirkte als andere Unterrichtskonzepte und diese Unterrichtsart einen fördernden Einfluss auf die spätere Interessenlage hat (Häußler et al., 1987, S. 327).

Authentische und komplexe Aufgaben in der Dynamik bedeuten Aufgaben, in denen mehrere Kräfte gleichzeitig wirken und Reibung eine Rolle spielt. Denn bei fast allen Bewegungen in Natur und Technik spielen Reibungsvorgänge eine entscheidende Rolle. Im Physikunterricht wird aber in der Regel von Reibung abgesehen. Es werden vielfältige Idealisierungen vorgenommen, um „reine Phänomene“ zu erhalten, an denen sich einfache Begriffe, Prinzipien und Gesetze entwickeln lassen. Sie dienen also der Theoriebildung. Dabei darf der Physikunterricht aber nicht stehen bleiben. Wie in der angewandten Physik und der Technik muss es auch im Physikunterricht um die Anwendung der Theorien an realen Einzelfällen gehen. D.h. es muss auch ausführlich diskutiert werden, wie die physikalischen Abläufe ohne die Idealisierungen ablaufen.

Das Lösen von komplexen Rechenaufgaben ist in der Schule jedoch kaum möglich. Hängt z.B. eine Kraft und damit die Beschleunigung von der Geschwindigkeit oder vom Ort ab, kann dies zu Differentialgleichungen führen, die nur schwer oder überhaupt nicht explizit lösbar sind, sondern lediglich numerisch mit Hilfe eines Computers. Eine gute Lösung bilden hier die Modellbildungssysteme. *„Physikalische Modellbildung ist die Beschreibung eines Phänomens durch Formulierung von Hypothesen über die Verknüpfungen einer begrenzten Anzahl von Modellgrößen“* (Schecker et al., 1989, S. 360). Es geht um Hypothesen über die Verknüpfung von Größen. Simulation ist die Anwendung bzw. der Ablauf eines Modells unter Setzung bestimmter Randbedingungen, was erst nach Erstellen des Modells im zweiten Schritt möglich ist. Somit stehen Modellbildung und Simulation in enger Wechselwirkung. Von größerer didaktischer Relevanz ist aber die Entwicklung des Modells, nicht dessen Simulation. Natürlich werden auch hier noch Elementarisierungen vorgenommen. Man kann aber schrittweise den Grad der Elementarisierung verringern, indem man zunächst vernachlässigte Effekte wie Reibung zusätzlich berücksichtigt.

Man kommt selbst bei sehr komplexen Phänomenen mit wenigen Grundbegriffen und Grundregeln der Mechanik aus. Im gängigen Physikunterricht stehen mehr spezielle Gleichungen im Mittelpunkt; bei der Behandlung gleichförmig beschleunigter Bewegungen z.B. die Bewegungsfunktionen $x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v \cdot t + x_0$ und $v = a \cdot t + v_0$. Bei Modellbildungssystemen bilden die grundlegenden Definitionen wie $v = \Delta x / \Delta t$ und $a = \Delta v / \Delta t$ und fundamentalen Gesetze wie $a = \Sigma F / m$ die Grundlage. *„Eine große Anzahl von Phänomenen soll durch eine kleine Anzahl allgemeingültiger Gesetze und Regeln („power tools“) erklärt werden“* (Bethge, 1992, S. 153). Beim Arbeiten mit Modellbildung werden statt einer Fülle spezieller Formeln für Einzelfälle die strukturellen Zusammenhänge betont; nicht das quantitative Rechnen, sondern qualitative Zusammenhänge stehen im Vordergrund. Dieses qualitative Durchdenken physikalischer Probleme kann durch das Arbeiten mit Modellbildungssystemen gefördert werden.

Der bayerische Physiklehrplan für das achtjährige Gymnasium schreibt numerische Verfahren explizit für reale Bewegungsabläufe vor. Das Thema „die Mechanik Newtons“ ist dabei eingebunden in das Jahrgangsstufenthema „physikalische Weltbilder“ (zehnte Jahrgangsstufe): von historischen Weltbildern über ein mechanistisches bis hin zu modernen Weltbildern, wie sie die Quantenphysik liefert. Gerade die Vorhersagbarkeit in einem mechanistischen Weltbild und die Reichweite des zweiten newtonschen Gesetzes kann mit Modellbildung verdeutlicht werden. Zurzeit werden die physikalischen Grundzusammenhänge im Unterricht allerdings noch durch eine Vielzahl spezieller Lösungen überdeckt.

Neben diesen beiden Aspekten „Betonung der physikalischen Struktur“ und „Einbeziehung komplexer authentischer Probleme“ weisen SANDER (2000, S. 47) und SANDER ET AL. (2001, S. 149) außerdem darauf hin, dass beim Einbeziehen von Modellbildung in das experimentelle Praktikum an der Universität eine wissenschaftliche Vorgehensweise gefördert wird, indem zwischen theoretischer und experimenteller Perspektive hin und her gewechselt wird. Dabei wird die Möglichkeit geschaffen, eigene Ideen eigenständig zu entfalten und zu verfolgen.

4.3 Forschungsergebnisse zu Modellbildung in der Literatur

Nach SCHECKER, KLIEME ET AL. (1999, S. 21) zielen die bisher vorliegenden Untersuchungen zu Modellbildungssystemen weniger auf die Vermittlung fachcurricularer Inhalte durch Modellbildungssysteme, was der Gegenstand dieser Interventionsstudie ist, sondern auf die generelle Förderung systemischen Denkens (Hassell, 1987, und Ossimitz, 1996, S. 337); die Inhalte des Unterrichts wurden nach systemdynamischen Aspekten ausgewählt (Zumann et al., 1988) oder die Untersuchungen erfolgten in Laborsituationen statt in realem Schulunterricht (z.B. Bliss et al., 1993). In dieser Arbeit wird ein Modellbildungssystem primär zur Vermittlung von physikalischem Fachwissen im Schulunterricht eingesetzt. Dazu wurde in Deutschland bereits von BETHGE und SCHECKER im Rahmen des Modellversuchs „Computereinsatz im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe (CPU)“ eine mehrmonatige Erprobung in verschiedenen Physikleistungskursen (Jahrgangsstufen 11 – 13) in Bremen (gefördert vom Land Bremen) durchgeführt (siehe SCHECKER & NIEDDERER (1991), SCHECKER (1992), SCHECKER (1993), SCHECKER (1998b, S. 210 ff.), SANDER (2000, S. 50 f.)). Die einzige größere Studie in Deutschland zur Vermittlung von physikalischem Fachwissen im Schulunterricht ist das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Vorhaben „Physiklernen mit Modellbildungssystemen“ von 1996 bis 1999 an der Universität Bremen und dem Institut für Bildungsforschung in Bonn. SANDER hat ferner in einer Studie an der Universität Bremen die Wirkungen des Einsatzes graphisch-orientierter Modellbildung im physikalischen Praktikum untersucht (Sander, 2000, und Sander et al., 2001). HUCKE und FISCHER (1998 und 1999) haben ebenso im physikalischen Anfängerpraktikum in einer Vergleichsstudie zwei Versuche mit Modellbildung integriert und die Auswirkungen untersucht.

Die Ergebnisse der erstgenannten am systemischen Denken orientierten Studien ließen vermuten, dass mit solcher Software im Unterricht vernetztes Denken vermittelt werden kann, während in einer Felderprobung in unterschiedlichen Fächern (Klieme, Maichle, 1994) keine solche Effekte nachweisbar waren (Schecker, Klieme et al., 1999, S. 21). Hier soll darauf nicht weiter eingegangen werden, da hier die physikalischen Kompetenzen betrachtet werden sollen.

Das DFG-Projekt „Physiklernen mit Modellbildungssystemen“ fand in Physik-Leistungskursen (Jahrgangsstufe 11, Schuljahr 1996/97) an Gymnasien im Bundesland Bremen statt (Schecker, Klieme et al., 1999, S. 3; Schecker, 1998a, S. 230). Die Schüler hatten fünf Unterrichtswochenstunden Physik und beschäftigten sich ca. elf Wochen mit Kinematik und Dynamik (Schecker, Gerdes, 1998, S. 62), was deutlich mehr Zeit ist, als der bayerische Lehrplan (von 1992 für das neunjährige Gymnasium) dafür vorsieht (ca. 30 Unterrichtsstunden). In den beiden Versuchsgruppen wurde in einem Fünftel der Unterrichtszeit (d.h. ca. elf Unterrichtsstunden) mit dem Modellbildungssystem STELLA gearbeitet - überwiegend in Kleingruppen am Computer - und insgesamt fünf Modelle erstellt. In den beiden Leistungskursen der Kontrollgruppe fand dagegen kein Computereinsatz statt. Insgesamt nahmen nicht viele Schüler an der Untersuchung teil; die Versuchsgruppe 1 bestand nur aus fünf Schülern, die Versuchsgruppe 2 (19 Schüler) wurde etwas verspätet hinzugenommen, so dass von ihr keine Vortests vorliegen, um den Lernzuwachs ermitteln zu können.

Eine Hypothese war, dass Schüler, die mit Modellbildungssystemen gearbeitet haben, in erhöhtem Maße solche Stufen konzeptueller physikalischer Kompetenz erreichen, die durch eine Fähigkeit zur begrifflich-qualitativen bzw. halbquantitativen Analyse des betrachteten Vorgangs gekennzeichnet sind. Die Analysen der FCI-Tests führten hier zu uneinheitlichen Ergebnissen, so dass die Hypothese nicht bestätigt werden konnte (Schecker, Klieme et al., 1999, S. 11; Schecker, Gerdes, 1999, S. 87). Eine weitere Hypothese war, dass die Schüler, die im Bereich Mechanik mehrfach mit Modellbildung gearbeitet hatten, diese Problemlösestrategie häufiger und konsequenter in mechanischen Situationen ohne Modellbildung einsetzten. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden Experimentalinterviews durchgeführt. Die Versuchsgruppe war hier signifikant besser als die Kontrollgruppe (Schecker, Klieme et al., 1999, S. 12; Schecker, Gerdes, 1998, S. 73). D.h. in der Versuchsgruppe werden newtonsche Argumentationsmuster bei mechanischen Kräften stärker gefördert. Dieses Ergebnis deckt sich mit einer früheren Pilotstudie (Schecker, Niederer, 1991, S. 149). Allerdings zeigte sich bei der Abschlusserhebung am Ende der 11. Jahrgangsstufe beim Transfer auf Bewegungsvorgängen mit nicht-mechanischen Kräften (Unterrichtsgegenstand in 11/2) kein Vorteil der Versuchsgruppe (Schecker, Klieme et al., 1999, S. 12; Schecker, Gerdes, 1998, S. 71 + 73). Des Weiteren wird die Hypothese, dass Schüler der Versuchsgruppen bei neuen Aufgaben in mechanischen Kontexten auf bekannte Substrukturen zurückgreifen, von der Studie bestätigt (Schecker, Klieme et al., 1999, S. 13). Schließlich wird die Hypothese, dass die Schüler der Versuchsgruppe im Vergleich zu Schülern mit herkömmlichem Unterricht höhere Fähigkeiten beim systemischen Denken in dieser Domäne haben, zurückgewiesen. Die fünf Schüler der Versuchsgruppe 1 waren hier zwar besser, zeigten aber geringere Zuwächse im Vergleich zum Vortest. Die weiteren untersuchten Hypothesen sind für diese Arbeit wenig relevant.

Die DFG-Studie hat insgesamt ergeben, dass der Aufbau newtonscher Vorstellungen durch Unterricht mit dem Modellbildungssystem STELLA nicht in dem Maße gefördert wird, wie das vorher erwartet wurde. Es wurden halb-quantitative Fähigkeiten zur Beschreibung und Vorhersage von Bewegungsverläufen gefördert, aber beim Grundverständnis der zentralen Begriffe der newtonschen Mechanik und bei gleichungsorientierten, quantitativen Anforderungen konnten keine Unterschiede zu konventionellem Unterricht nachgewiesen werden (Schecker, Klieme et al., 1999, S. 25). Auch die Effekte für den Aufbau systemischen Denkens sind nach dieser Studie begrenzt und liegen ebenfalls im halb-quantitativen Bereich. Der weit reichende Anspruch, mit dem Einsatz von Modellbildungssystemen im Unterricht das systemische Denken zu fördern, kann also nicht eingelöst werden. SCHECKER, KLIEME ET AL. fassen zusammen: „*Modellbildungssysteme bewähren sich im gewählten Unterrichtskonzept als Methoden im engeren Bereich der Förderung physikalischen Verständnisses, nicht jedoch als Mittel zur Förderung übergreifender Kompetenzen*“ (1999, S. 25). Graphisch-orientierte Modellbildungssysteme fördern demnach eine Auseinandersetzung mit der Physik, während ein spezifischer Wissenszuwachs begrenzt bleibt (Sander et al., 2001, S. 151). Das Ergebnis, dass die Fähigkeit zu newtonschen Argumentation bei mechanischen Kräften durch Modellbildung stärker gefördert wird, spricht aber allein schon dafür, Modellbildung zur Förderung des Verständnisses der newtonschen Dynamik im Unterricht einzusetzen. Das Problem bei dieser inten-

siven Langzeitstudie ist die geringe Anzahl der teilnehmenden Schüler. Eine weitere Studie zu dieser Fragestellung mit einer größeren Probandenzahl durchzuführen, ist notwendig.

In der Studie von SANDER (Sander, Niedderer, 1998, und Sander, 2000) mit nur 13 Lehramtsstudenten wurde im Anfängerpraktikum (1. Semester) das Modellbildungssystem STELLA in Verbindung mit Realexperimenten in acht zweistündigen Praktikumsterminen eingesetzt. Während dem Arbeiten mit dem Modellbildungssystem wurde mehr theoriebezogenes Wissen geäußert als beim Experimentieren, allerdings noch mehr beim üblichen Gespräch mit dem Betreuer (Sander et al., 2001, S. 157; Sander et al., 1999, S. 362; Sander, 2000, S. 121). Eine begrifflich-qualitative Auseinandersetzung mit der Physik wurde gefördert (Sander, 2000, S. 215). Die Modellbildung eignete sich zur Festigung und Ausdifferenzierung von Wissen (intelligentes Üben), aber nicht zur Entwicklung neuen begrifflichen Wissens. Es wurden zwar individuelle Ideen und Wege verfolgt, aber das bewusste Formulieren von Hypothesen und Testen verschiedener Ansätze fand nur eingeschränkt statt. Die intensive Wechselwirkung zwischen Modellbildung und Experiment wurde entgegen den Hoffnungen nur unzureichend angeregt. SANDER (2000, S. 243) und SANDER ET AL. (2001, S. 160 f.) geben als Grund dafür an, dass aus softwaretechnischen Beschränkungen die Messwerte und Simulationsergebnisse nicht in einer gemeinsamen Programmumgebung übereinander gelegt werden konnten, was oberflächliche Vergleiche auf ungefähre Ähnlichkeit des Kurvenverlaufs begünstigte. Die Untersuchung von HUCKE und FISCHER (1999), bei der in der Versuchsgruppe sechs Studenten in zwei Versuchen u.a. mit dem Modellbildungssystem STELLA arbeiteten, zeigte ebenso, dass sich die Studenten bei der Modellbildung mehr mit physikalischen Zusammenhängen befassen (1999, S. 251), sich aber nur wenige Veränderungen in Concept Maps ergeben (1999, S. 252).

SANDER ET AL. (2001, S. 150) berichten auch von einer Studie des Amerikaners ROBERT F. TINKER (Tinker et al., 1990, Originalliteratur nicht ausleihbar), wobei u.a. deutlich wird, dass es auch eine Rolle spielt, welches Modellbildungssystem verwendet wird. TINKER setzte demnach das Modellbildungssystem STELLA bei Schülern ab 14 Jahren in der Mathematik ein, um grundlegende Konzepte der Differential- und Integralrechnung einzuführen. Er berichtet von Schwierigkeiten im Umgang mit den Begriffen Zustand und Rate und bei der Deutung der entstehenden Graphen, so dass er zu dem Schluss kommt, dass STELLA nicht zum Erlernen dieser Konzepte geeignet ist. Für die Physik befürchtet er Probleme mit den Zu- und Abflüssen, die über Ventile gesteuert werden, da sie in der Physik keine konkrete Bedeutung hätten, was SANDER ET AL. nicht bestätigen können (2001, S. 155). Damit listet TINKER Probleme von STELLA auf, die es in VisEdit/PAKMA nicht in dieser Form geben kann.

4.4 Ziele und Beschreibung des Unterrichts

4.4.1 Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Arbeit war, ein schlüssiges Gesamtkonzept zur Kinematik und Dynamik zu entwickeln, mit dem ein größerer Schüleranteil als im traditionellen Unterricht die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Größen versteht und sie anwenden kann. Aufgrund der oben dargelegten didaktischen Gründe und der bekannten Forschungsergebnisse schien es sinnvoll, auch eine

graphische Modellbildung zu integrieren. Allerdings ist es aufgrund der engen zeitlichen Vorgaben im bayerischen Lehrplan nicht möglich, so viel Unterrichtszeit dafür aufzuwenden, wie z.B. in der Bremer DFG-Studie. So war eine Fragestellung, ob auch mit einem kürzeren Einsatz von Modellbildung in z.B. sechs Unterrichtsstunden bei den Schülern etwas erreicht werden kann. Für diese Fragestellung wurde eine Interventionsstudie gewählt (siehe Tab. 4.2). In dieser Studie wurden im Schuljahr 2000/2001 in

drei Klassen an drei verschiedenen Schulen in zwei Bundesländern nach Abschluss des Themengebietes „Dynamik“ noch eine Unterrichtssequenz von jeweils sechs Stunden zur Kinematik und Dynamik mit dem Modellbil-

Zeitplanung	Aktivität
nach Abschluss der Dynamik, eine Stunde vorher	Einführung der Schüler in Concept Mapping, Vortest Concept Map
sechs Stunden	lehrgelenkter Unterricht mit graphischer Modellbildung in drei Klassen mit 66 Schülern
eine Stunde nachher	Nachtest Concept Map, Schülerfragebogen zum Unterricht, Diskussion mit den Schülern
drei Monate später	Langzeittest Concept Map

Tab. 4.2: Versuchsplan der Interventionsstudie

dungssystem VisEdit durch den selben Lehrer gehalten (Lehrer: WILHELM). Bei den teilnehmenden Klassen war also bereits die gesamte Kinematik und Dynamik unterrichtet, geübt und abgeschlossen, wobei in diesem Unterricht keine graphische Modellbildung eingesetzt wurde; nur in einer Klasse war bereits kurz das Prinzip der kleinen Schritte gleichungsorientiert vorgestellt worden. Die Anzahl der teilnehmenden Schüler (66 Schüler), von denen 55 an Vor- und Nachtest teilnahmen, war deutlich höher als in dem Bremer DFG-Projekt oder den Studien im Anfängerpraktikum (siehe Kapitel 4.3).

Ein weiterer Zweck der Studie war, die Unterrichtstauglichkeit der relativ neuen Software zu testen, Unterrichtserfahrungen zu sammeln und Unterrichtsvorschläge zu entwickeln. Schließlich unterscheidet sich die eingesetzte Software VisEdit/PAKMA erheblich von der Software, die in anderen Studien eingesetzt wurde. VisEdit wurde 1998 bis 1999 von CIMANDER (1999) und GEIBLER (1999) als Zulassungsarbeit am Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Universität Würzburg entwickelt. REUSCH (private Mitteilung) hat Unterrichtserfahrungen mit der zugrunde liegenden Symbolik gesammelt, indem er graphische Modelle mit diesen Symbolen an der Tafel, nicht am Computer mit der Klasse erstellte. Von JÄGER (1999) liegen Erfahrungen zum harmonischen Oszillator vor: Er hat mit einer Vorversion einen Unterricht in einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse (13 Schüler) auf gehobenem Niveau gehalten (ohne eine empirische Überprüfung des Lernfortschritts). Somit wurde erst in dieser Studie eine Endversion von VisEdit im größeren Stil zur Kinematik und Dynamik eingesetzt.

4.4.2 Die Modellbildung im Unterricht

Modellbildungssysteme werden manchmal in einer Art Projektunterricht eingesetzt, wo man gemeinsam oder arbeitsteilig mehrere Unterrichtsstunden beschäftigt ist, um einen sehr komplexen Vorgang zu modellieren. In dem hier durchgeführten Unterricht wurden nur einfachere Modelle erstellt, die in je ein oder zwei Stunden abgeschlossen werden konnten, und dafür mehr verschiede-

ne Modelle erstellt. So können die Schüler in mehreren Modellen erkennen, was die immer gleiche Grundstruktur ist.

Beim Einsatz eines Modellbildungssystems steht normalerweise die Erarbeitung des Modells im Vordergrund. Deshalb wurde in der Interventionsstudie kein fertiges Modell präsentiert, denn das zu entschlüsseln ist recht schwierig. Fertige Modelle können nur präsentiert werden, wenn aufgrund vorhergehender Übung zu erwarten ist, dass es dem Schüler nicht mehr schwer fällt, die dargestellten Wirkungszusammenhänge zu analysieren. Andererseits muss man nicht jedes Mal von vorne beginnen, sondern kann Teilstrukturen aus vorher behandelten Modellen übernehmen, was im Unterricht auch genutzt wurde.

Da es bei dieser Studie aus technischen Gründen in keiner Schule möglich war, dass die Schüler selbst einfache Modelle in Gruppenarbeit im Computerraum erstellten, wurden alle Modelle gemeinsam in Unterricht entwickelt, was durch großflächige Projektion mittels eines Beamers möglich war. Im Klassenunterricht wurde dabei vom Lehrer nur die Diskussion der Klasse über die Modellstruktur moderiert und angeregt sowie die Vorschläge der Klasse in den Computer eingegeben. Viele Schüler nahmen das Programm gerne mit nach Hause und experimentierten selbst damit. Eine intensivere Auseinandersetzung aller Schüler wäre sicher in einer Schülerübung am Computer besser zu erreichen. In dieser Studie wurde lediglich als Hausaufgabe die Erstellung eines Modells auf Papier verlangt.

Wichtig war eine offene Unterrichtsgestaltung. D.h. auch konkrete falsche Vorschläge wurden eingegeben, die Konsequenzen wurden am Ende dann sichtbar. Vorschläge von Schülern bezüglich anderer Startwerte oder anderen Beziehungen konnten verfolgt werden.

Als vorteilhaft erwiesen sich auch Arbeitsblätter, die mit Text und Bild die Situation darstellten und auf die die Schüler die Wirkungsgefüge zeichneten. Außerdem war es hilfreich, wenn die Schüler vor dem Simulationsstart eines erstellten Modells in ein Arbeitsblatt die Graphen, die sie erwarteten, hineinzeichneten, da man dann gut über die Unterschiede zum tatsächlichen Graphen diskutieren konnte.

4.4.3 Die thematisierten Problemstellungen

In den sechs Unterrichtsstunden der Interventionsstudie wurden ausschließlich Vorgänge thematisiert, die auch real vorgeführt werden konnten. Die einzelnen Themen und einige damit verbundenen Ziele können der Tab. 4.3 entnommen werden.

Unterrichtsstunde	einige Lehr- und Lernziele u.a.	Thema	Medien außer PC (außer: Wirkungsnetze, Ausgaben, Simulationen)
1. Stunde	Die Schüler verstehen das Grundprinzip der Modellbildung und bekommen Vertrauen in die Software.	Einführung in VisEdit, Kinematik: Modellierung $v \rightarrow x$ und $a \rightarrow v \rightarrow x$	Tafel, Arbeitsblatt
2. und 3. Stunde	Die Schüler erkennen, - dass alle Kräfte zusammen als Gesamtkraft die Beschleunigung gemäß $a = F_{ges} / m$ bestimmen - alle Kräfte insbesondere auch die Reibungskraft eine Richtung haben, die zu berücksichtigen ist.	Schiefe Ebene: 1. Nur Hangabtriebskraft (mit schriftlichen Vorhersagen) 2. Mit Reflexion (mit schriftlichen Vorhersagen) 3. Mit Reflexion und Reibung (mit schriftlichen Vorhersagen)	qualitativer Versuch: Wagen auf schiefer Ebene mit Feder am Ende; Tafel, 2 Arbeitsblätter

		evtl. 4. mit zusätzlicher Propellerkraft	
4. Stunde	Die Schüler erkennen, dass alle bewegten Massen zusammen die Beschleunigung gemäß $a = F_{ges} / m_{ges}$ bestimmen, und sehen ein Beispiel einer Bewegung, die analytisch nicht explizit lösbar ist.	Luftkissenfahrbahn: 1. Mit ziehender Masse (mit schriftlichen Vorhersagen) 2. Mit ziehender Kette (mit schriftlichen Vorhersagen) evtl. 3. Mit Kette und Reibung	2 Arbeitsblätter
5. Stunde	Die Schüler erkennen, warum sich bei Fahrzeugbewegungen trotz konstanter Antriebskraft eine konstante Endgeschwindigkeit einstellt	Fallbewegung mit Luftreibung	verschiedene Bahrdtsche Fallkegel, Arbeitsblatt, Tafel, Video, Folie
6. Stunde	Die Schüler erkennen, dass die unterschiedlichsten Bewegungen nach dem gleichen Grundschema modelliert werden.	Federschwingung	2 Arbeitsblätter

Tab. 4.3: Grobstruktur des Unterrichts

In der Kinematik gibt es noch nicht so viele Möglichkeiten für Modellbildung. In diesem Unterricht wurde zuerst immer aus einer Geschwindigkeit, die mit der Maus über einen Schieber eingegeben wurde, der Ort berechnet (siehe Abb. 4.8). Schon bevor man die Bewegungsfunktionen behandelt hat oder die Beschleunigung eingeführt ist, kann hier im Unterricht überlegt und nachgeprüft werden, was eine kleinere oder größere oder negative Geschwindigkeit bewirkt und insbesondere, was bei einer ständigen Zu- oder Abnahme dieser Geschwindigkeit durch kontinuierliches Verändern des Schiebers passiert (Alle in dieser Interventionsstudie verwendeten Materialien wie VisEdit-Dateien, PAKMA-Dateien und Arbeitsblätter finden sich zusammen mit Anregungen und Hinweisen unter <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/software/modell/inhalt.htm>).

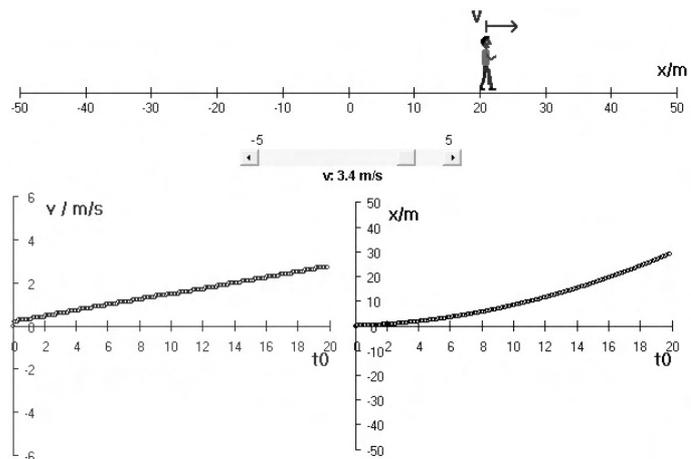


Abb. 4.8: Ausgabe Modellbildung Kinematik 1

Entsprechend kann man dann Geschwindigkeit und Ort aus einer veränderlich einstellbaren Beschleunigung berechnen (siehe Abb. 4.9) und weiteres Graphenverständnis üben. Nicht nur große, kleine, positive und negative Beschleunigung sondern auch eine linear zu- oder abnehmende Beschleunigung (durch kontinuierliches Verändern des Schiebers für die Beschleunigung) kann auf diese Art behandelt werden. Weitere Modelle zur Kinematik (z.B. ein Überholvorgang)

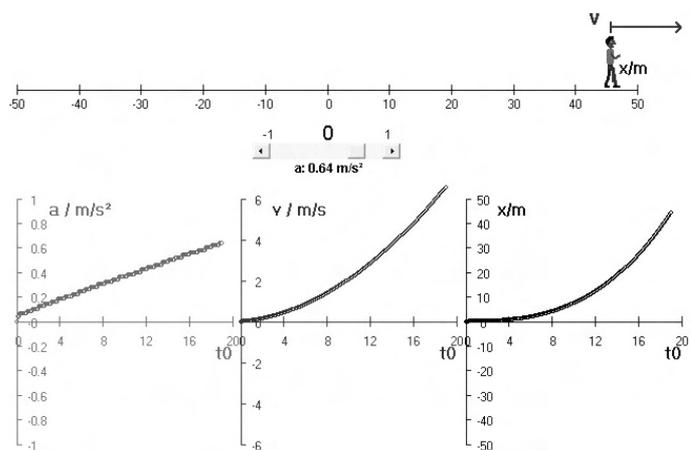


Abb. 4.9: Ausgabe Modellbildung Kinematik 2

sind für das Verständnis physikalischer Zusammenhänge wenig hilfreich. Eine Einführung in VisEdit und in die Modellbildung im Rahmen der Kinematik einschließlich dem Arbeiten mit den Simulationen ist so in einer Unterrichtsstunde möglich.

Bei der Anwendung des zweiten newtonschen Gesetzes gibt es zahlreiche Möglichkeiten für Modellbildung. Ein im Unterricht behandeltes Beispiel ist ein Wagen auf der schiefen Ebene. Der Vorteil dieses thematischen Bereichs liegt darin, dass hier sukzessive weitere Kräfte hinzugefügt werden können. Dass nur eine konstante Hangabtriebskraft wirkt, ist noch einfach. Interessanter wird es, wenn durch eine Feder am Fahrbahnde eine weitere Kraft ins Spiel kommt, die den Wagen wieder nach oben reflektiert, denn es handelt sich in diesem Falle um eine ortsabhängige Kraft. Da der Wagen in diesem Modell unrealistischerweise wieder die Ausgangshöhe erreicht, wünschen

sich die Schüler eine Berücksichtigung der Reibung, so dass eine dritte Kraft hinzukommt (siehe Abb. 4.10). Diese Rollreibungskraft ist zwar betragsmäßig konstant, aber von der Bewegungsrichtung, also der Geschwindigkeitsrichtung, abhängig. Die Vorteile dieser Modellbildung sind, dass der entsprechende reale Versuch immer wieder vorgeführt werden kann, die Schüler sich eine realistische Berechnung mit Berücksichtigung der Reibung wünschen und insgesamt ein komplexer Ablauf (mit komplexen Graphen, siehe Abb. 4.11) vorliegt, bei dessen Modellierung einige Fehlvorstellung auftreten, die diskutiert werden können. Hier wird das Grundprinzip deutlich, dass immer alle Kräfte berücksichtigt werden müssen und diese mit ihrer Richtung addiert die „Summe der angreifenden Kräfte“ ergeben, die die Beschleunigung bestimmt. Es ist sogar möglich, eine vierte Kraft zu berücksichtigen, wenn man annimmt, dass auf dem Wagen ein ferngesteuerter Propeller montiert ist. Da nicht nur das Modell gemeinsam erstellt wurde, sondern auch mit den entstandenen Simulationen gearbeitet wurde, indem die Schüler schriftlich Vorhersagen machen sollten, wurden dazu zwei Unterrichtsstunden benötigt. Wenn man noch mehr vorhersagen lässt und ausführlicher diskutiert, könnte man auch drei oder vier Unterrichtsstunden lang sinnvoll mit diesem Vorgang im Unterricht arbeiten. Sinnvoll ist z.B. ein Vergleich des Modells mit einer Realmessung.

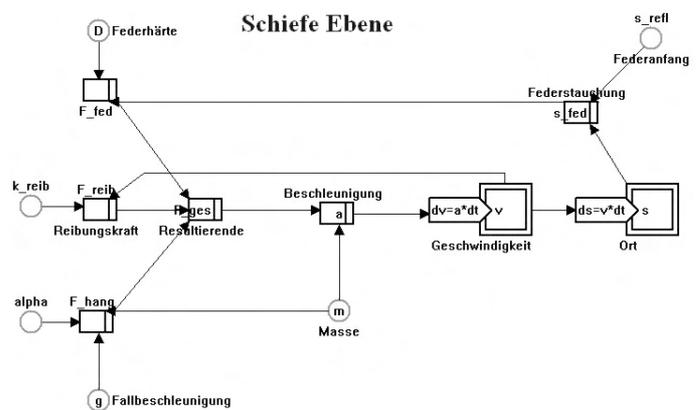


Abb. 4.10: Modell zur schiefen Ebene mit Reflexion und Reibung

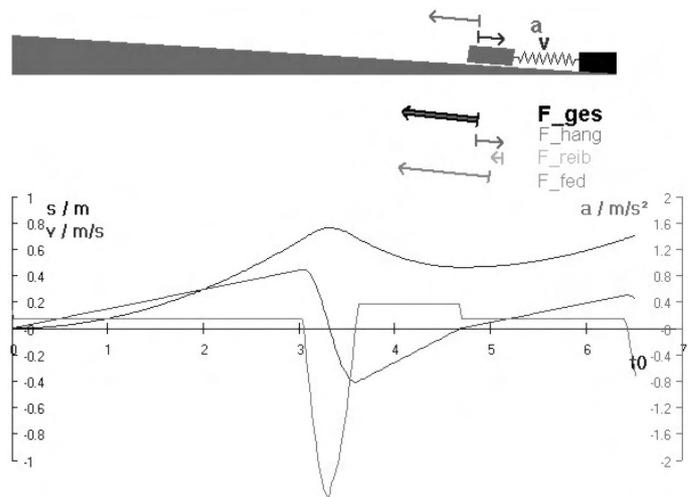


Abb. 4.11: Ausgabe zum Modell der schiefen Ebene

Die Schüler schriftlich Vorhersagen machen sollten, wurden dazu zwei Unterrichtsstunden benötigt. Wenn man noch mehr vorhersagen lässt und ausführlicher diskutiert, könnte man auch drei oder vier Unterrichtsstunden lang sinnvoll mit diesem Vorgang im Unterricht arbeiten. Sinnvoll ist z.B. ein Vergleich des Modells mit einer Realmessung.

Eine Alternative zur schiefen Ebene wäre ein Trampolinspringer, was abgesehen von einer anderen Reibungsart physikalisch äquivalent ist.

Nach diesem Thema waren die Schüler bereits in der Lage, als Hausaufgabe selbst Modelle auf dem Papier zu erstellen. Relativ einfach war es, ein Modell zu der Standardsituation zu entwerfen, dass eine Masse, die an einem Faden hängt, über ein Umlenkrad einen Gleiter auf der Luftkissenfahrbahn beschleunigt. Man muss dabei nur bedenken, dass zwar die Zugkraft nur von der Masse des Gleiters abhängt, aber die Beschleunigung von der gesamten bewegten Masse (Zugmasse und Gleitermasse). Eine Herausforderung für die guten Schüler bzw. eine Erweiterung der Hausaufgabe im Unterricht war das Modell, bei dem die Zugmasse durch eine Kette ersetzt ist, die sich durch die Bewegung verkürzt, so dass man nicht nur eine ortsabhängige Zugkraft, sondern auch eine ortsabhängige bewegte Masse erhält (siehe Abb. 4.12). Hier waren die Schüler sehr überrascht, dass man recht einfach Graphen erhält und andererseits der Lehrer keine explizite analytische Lösung angeben kann. Wichtig an beiden Beispielen ist das Grundprinzip, dass immer alle bewegten Massen berücksichtigt werden müssen und diese Gesamtmasse die Beschleunigung bestimmt.

Sehr wichtig war die Unterrichtsstunde zur Luftreibung. Für das Verständnis der newtonschen Dynamik sind Versuchssituationen mit geschwindigkeitsabhängigen Reibungskräften noch viel wichtiger als solche mit konstanten Reibungskräften, da diese für die Fehlvorstellung verantwortlich sind, dass sich ein Körper immer mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt, wenn eine konstante Kraft auf ihn einwirkt. Diese Vorstellungen entsprechen unseren Erfahrungen in einer Welt, in der es stets (geschwindigkeitsabhängige) Reibung gibt, treffen aber höchstens für den Gleichgewichtszustand nach einer Anfangsphase zu. Wegen der Übertragbarkeit auf Alltagssituationen sind Versuche mit im Verhältnis zur Antriebskraft großen Luftreibungskräften wünschenswert, beispielsweise mit Barthschen Fallkegeln (Wilhelm, 2000). Solche Fallkegel wurden im Unterricht fallen gelassen und anschließend wurde versucht, dies zu modellieren (siehe Abb. 4.13). Interessant ist dann auch, sich anzuschauen, was eine kleinere bzw. größere Reibung und eine kleinere bzw. größere Masse bewirkt. Auch hier half wieder das fertige Wirkungsgefüge zum Verstehen des Ablaufs und konnte als Diskussionsgrundlage verwendet werden. In dieser Stunde war das Interesse der Schüler besonders hoch, insbesondere bei der Diskussion der Auswirkungen im Alltag, wobei

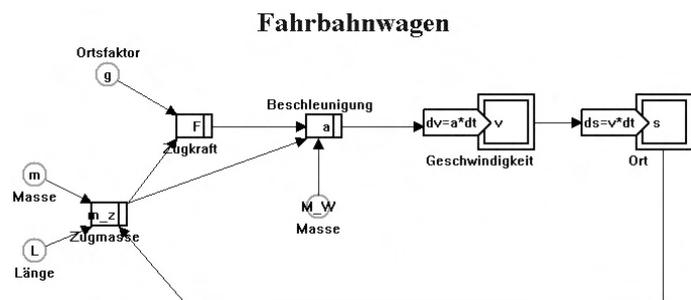


Abb. 4.12: Modell zum Wagen, der mit einer fallenden Kette beschleunigt wird

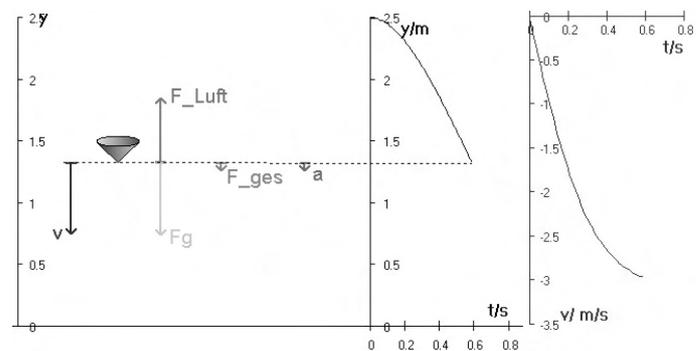


Abb. 4.13: Ausgabe zum Modell des mit Luftreibung fallenden Fallkegels

die Schüler besonders der ehemalige Weltrekord für Höchstgeschwindigkeit beim Fahrradfahren (226,1 km/h) faszinierte, bei dem ein Fahrradfahrer 1,2 km hinter einem Chevrolet mit aufmontiertem Windschutz fuhr (mittlerweile überboten).

Schließlich wurde auch noch eine Unterrichtsstunde zur Modellierung einer Federschwingung verwendet. Im traditionellen Unterricht wird meist erst begründet, dass man die Gewichtskraft nicht berücksichtigen muss und dass auch von der neuen Ruhelage aus das Hookesche Gesetz gilt, um dann den Vorgang mit nur einer Kraft beschreiben zu können. Hier konnte der Ablauf von der ungedehnten Feder aus (entsprechend dem in der achten Klasse gelernten Hookeschen Gesetz) unter Berücksichtigung beider Kräfte modelliert werden. Die Schüler sollten dann nach der Modellierung auch auf einem Arbeitsblatt für ausgewählte Zeitpunkte Größe und Richtung von Gewichtskraft, Federkraft und Summe der Kräfte qualitativ mit Pfeilen angeben.

4.5 Unterrichtserfahrungen

4.5.1 Beobachtungen im Unterricht

Eine qualitative Beobachtung der Schüler während dem Unterricht der Interventionsstudie konzentrierte sich auf die Schwierigkeiten, die die Schüler beim Erstellen der Modelle hatten. Insbesondere lag das Interesse dabei auf Fehlvorstellungen, die die Schüler nach dem traditionellen Kinematik-/Dynamikunterricht zeigten, die also im traditionellen Unterricht nicht verändert oder sogar erst erzeugt wurden.

Zuerst wurden die grundlegenden Definitionen $v = \Delta x / \Delta t$ und $a = \Delta v / \Delta t$ und das fundamentale Gesetz $F = m \cdot a$ als die Grundlage der Modellbildung wiederholt und insbesondere ausführlich veranschaulicht, wie der Computer durch Aufaddieren der Änderungen Δx bzw. Δv den Ort bzw. die Geschwindigkeit berechnet. Als in späteren Stunden wieder nach einem allgemeinen, immergültigen Zusammenhang zwischen s und v bzw. v und a gefragt wurde, kam immer sofort eine Bewegungsfunktion wie $s = v \cdot t$ oder $v = a \cdot t$ oder $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$ und es schien, als wäre es den Schülern neu, dass diese nur für die Spezialfälle konstanter Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung gelten. Die Frage nach der Definition von v oder a konnte in der Regel keiner beantworten. Nur gemeinsam und mit etwas Hilfe gelang es den Schülern dann zu reproduzieren, dass es auf die Änderungen dieser Größen ankommt, wie diese berechnet werden und dass diese aufaddiert werden. Dies ist nicht verwunderlich, denn die Definitionen, die am Anfang des Kinematikunterrichts einmal auftauchen, werden später nie wieder gebraucht. Man müsste also unbedingt mehr Aufgaben stellen, die mit den Definitionsgleichungen zu lösen sind.

Ein Modell für die schiefe Ebene nur mit Hangabtriebskraft war relativ einfach zu erstellen. In einer weiteren Modellbildung sollte dann die Feder berücksichtigt werden, die am Ende der Bahn angebracht war. Mit zwei Kräften (Hangabtriebskraft und Federkraft) waren die Schüler aber überfordert: In der Formel $F = m \theta a$ war für die Schüler F die eine wirkende Kraft und nun wussten sie nicht, welche Kraft denn nun F ist. Dass alle Kräfte berücksichtigt werden mussten, hatten sie zwar

gelernt, aber wahrscheinlich nicht hinreichend verstanden. Dass F für die Summe aller Kräfte steht, schien ihnen somit neu zu sein. Dies sollte im normalen Unterricht intensiver thematisiert werden.

Immer wieder zeigte sich auch, wie diffus die Vorstellungen der Schüler über physikalische Zusammenhänge waren. So sagte z.B. ein Schüler richtigerweise, die Federhärte beeinflusse die Beschleunigung, konnte dann aber doch nicht sagen, wie man das quantitativ angibt. Die Schüler merkten dabei, dass man erst Zwischenschritte, im Beispiel die Federkraft, angeben musste. Das Modellbildungssystem zwang also dazu, konkret und in kleinen Schritten Zusammenhänge zu überlegen.

Des Weiteren gaben die Schüler bei den Kräften oft das falsche Vorzeichen, also die falsche Richtung an. Beim Ablauf des Modells als Simulation wurde das an der Animation sofort deutlich. Da flog ein Fallkegel nach oben statt nach unten, ein Wagen fuhr die schiefe Ebene hinauf, eine Feder am Ende der Bahn beschleunigte einen Wagen weiter statt ihn abzubremsen. Die Schüler erkannten dabei immer sofort, wo der Fehler steckte. Die Animation war also sehr hilfreich, schnell und ohne Grapheninterpretation Fehler im Modell zu erkennen.

Eine Fehlvorstellung wurde auch bei der Rollreibung deutlich: Die Schüler gaben die Reibungskraft als konstant an, was fälschlicherweise bewirkt, dass der Wagen, der die schiefe Ebene hinabfuhr und dann von der Feder nach oben reflektiert wurde, wieder bis zum Ausgangspunkt fährt. Die Reibungskraft ändert aber in diesem Beispiel ihre Richtung; sie ist immer gegen die Geschwindigkeit gerichtet. Das wurde den Schülern hierbei recht deutlich. Es war also positiv, dass Fehler der Schüler nicht getadelt, sondern in das Modell eingegeben und die Konsequenzen betrachtet wurden.

Insgesamt schien sich der Einsatz von Modellbildung zu lohnen, da manche Fehlvorstellung aufgedeckt und besprochen werden konnte und einige Zusammenhänge deutlich und bewusst gemacht werden konnten. Das Erfassen eigener Fehlvorstellungen kann zu einer besseren Aneignung der physikalischen Vorstellungen führen (Demidow et al., 1997, S. 199).

4.5.2 Bewertung der Schüler

Nach dem Unterricht bewerteten die Schüler das Arbeiten mit dem Modellbildungssystem. Sie beurteilten, ob 15 verschiedene positive Aussagen über das Lernen mit VisEdit (siehe CD im Anhang) für sie zutreffen oder nicht („trifft ganz genau zu“, „größtenteils zu“, „etwas zu“, „eher nicht zu“ oder „trifft gar nicht zu“) (In zwei Fällen (Nr. 2 und 15) wurden negative Aussagen formuliert und die Ergebnisse bei der Auswertung invertiert). Insgesamt beantworteten 58 Schüler den Fragebogen. Da jeweils ordinal skalierte Daten vorliegen, wurde jeweils der Median M und die Spannweite S der auftretenden Antworten bestimmt. Da die Skala näherungsweise intervallskaliert ist, wurde diese qualitative Skala zusätzlich quantifiziert, indem der Skala die Zahlen 1 (trifft ganz genau zu) bis 5 (trifft gar nicht zu) zugeordnet wurden, und dann wie bei einer metrisch skalierten Größe Mittelwert μ und Standardabweichung σ bestimmt (siehe Abb. 4.14).

Bei den positiven Aussagen über das Modellieren wurde den folgenden Items am meisten zugestimmt ($M = 2 =$ trifft größtenteils zu):

- Nr. 4: „*Ich finde es gut, dass man durch dieses Programm viele verschiedene Situationen in kurzer Zeit analysieren kann.*“ ($\mu = 2.07$, $\sigma = 1.09$)

- Nr. 5: „Bei diesem Unterricht habe ich gesehen, welche unterschiedliche Vorgänge mit wenigen Formeln behandelt werden können.“ ($\mu = 2.09, \sigma = 1.00$)
- Nr. 9: „Die grafische Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen in dem Wirkungsgefüge finde ich hilfreich.“ ($\mu = 2.05, \sigma = 0.85$)
- Nr. 12: „Ich sehe das Erstellen von und das Arbeiten mit Rechenmodellen als hilfreich für mein Verständnis an.“ ($\mu = 2.05, \sigma = 0.99$)
- Nr. 13: „Ich fand es gut, dass man sich nur die physikalischen Zusammenhänge überlegen musste und der Computer das Rechnen übernahm.“ ($\mu = 2.03, \sigma = 0.94$)
- Nr. 16: „Ich fand es gut, dass realistische Situationen behandelt wurden und nicht wie sonst nur Idealfälle ohne Reibung.“ ($\mu = 2.03, \sigma = 0.90$)

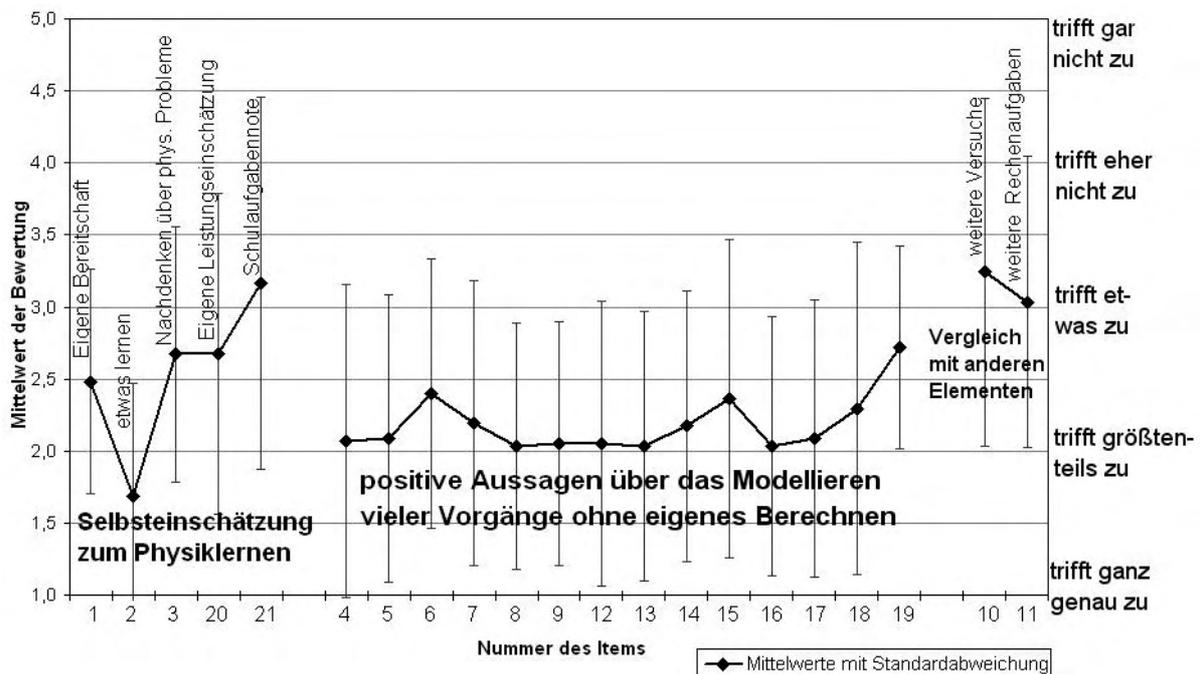


Abb. 4.14: Zustimmung der Schüler zu verschiedenen Items

Am wenigsten zugestimmt ($M = 3 =$ trifft etwas zu) haben die Schüler zwei Aussagen, die sich deutlich von den anderen abheben und bei denen es um den Vergleich mit anderen Unterrichtselementen geht. Die eine Aussage (Nr. 10, $\mu = 3.24, \sigma = 1.20$) hieß: „Ich halte das Erstellen von und das Arbeiten mit solchen Rechenmodellen für wichtiger als weitere zusätzliche Versuche.“ Die andere Aussage mit der geringeren Zustimmung (Nr. 11, $\mu = 3.03, \sigma = 1.01$) hieß: „Ich halte das Erstellen von und das Arbeiten mit solchen Rechenmodellen für wichtiger als das Rechnen weiterer Anwendungsaufgaben.“

Dass die Schüler der ersten Aussage zum Vergleich mit Versuchen nicht völlig zustimmen, kann man nachvollziehen. Denn Modellbildung soll kein Ersatz für Experimente sein. Versuche sind und bleiben sehr wichtig. Modellbildung soll nur helfen, die Vorgänge bei den Experimenten zu verstehen. Bei der zweiten Aussage zum Vergleich mit Rechenaufgaben wurde in der Diskussion mit der Klasse genauer nachgefragt. Manche Schüler meinten, das Arbeiten mit VisEdit ist sinnvoller als das Rechnen von Aufgaben, aber da in der Schulaufgabe nur das Aufgabenrechnen verlangt wird,

sollte das geübt werden. Ein weiteres Nachfragen ergab, dass die Physikschulaufgaben der Schüler nach ihrer Meinung immer nur aus reinen Rechenaufgaben bestanden und sie konnten sich gar nicht vorstellen, dass auch Verständnisfragen, Grapheninterpretation oder Beschreibungen von Experimenten oder physikalischen Abläufen in der Schulaufgabe verlangt werden. Wenn im Unterricht aber mehr Wert auf Verständnis gelegt wird und Modellbildungssysteme eingesetzt werden, dann muss sich das auch in den Schulaufgaben niederschlagen, die sich verändern müssen.

Einige Schüler meinten aber auch, die Schulaufgaben sollen weiterhin so bleiben. Denn bisher gebe es ein Schema, das man lernen kann und hätte so die Gewissheit, eine einigermaßen vernünftige Note zu bekommen. Wenn nun in der Schulaufgabe auch Verständnis abgefragt werden würde, dann müssten sie ja mehr lernen oder hätten schlechtere Noten.

In zwei Klassen wurde die Software für die Benutzung am eigenen PC zu Hause angeboten. 65 % bzw. 24 % der Schüler der jeweiligen Klasse gaben an, dass sie auch zu Hause VisEdit genutzt haben. Dabei ist zu bedenken, dass dies nicht verlangt war. Es wurden lediglich als Angebot wenige Disketten mit der Software zur Verfügung gestellt. Diese haben die Schüler untereinander weitergegeben und damit freiwillig am eigenen PC gearbeitet.

Die Betrachtung der Schülerantworten ergibt zusammenfassend ein Interesse und eine positive Einschätzung der Schüler. Dies spricht dafür, solche Modellbildung schon während der regulären Behandlung der Dynamik einzusetzen und nicht erst nach Abschluss der Dynamik.

Außer der Einschätzung von VisEdit wurde auch noch nach der allgemeinen Bereitschaft, sich im Physikunterricht zu beteiligen (Nr. 1), nach den Lernwillen (Nr. 2), nach der eigenen Physik-Leistungseinschätzung (Nr. 20), nach der letzten Physiknote (Nr. 21) und nach ähnlichen Parametern (Nr. 3, Nr. 19, Nr. 22) gefragt. Die Schüler wurden dann bezüglich jeder dieser Variablen in zwei Gruppen geteilt, so dass jeweils in jeder entstehenden Gruppe ungefähr gleich viele Schüler sind. Vergleicht man damit die Angaben der leistungswilligen, interessierten und guten Schüler mit den Angaben der weniger zur Beteiligung am Unterricht bereiten und schlechteren Schüler stellt man Unterschiede bei den Mittelwerten der Items zur Einschätzung des Modellbildungsunterrichts fest. Auf die Unterschiede, die signifikant (Unabhängiger t-Test bzw. Mann-Whitney-U-Test, Signifikantniveau 0,05, Software: SPSS) sind, soll hier kurz eingegangen werden (einschränkend ist zu bedenken, dass keine Hypothesen geprüft wurden, die vor dem Test schon aufgestellt wurden, sondern nach Testdurchführung erst Vergleiche stattfanden.).

Schüler mit einer ausgeprägten Bereitschaft, sich am Physikunterricht zu beteiligen, finden die graphische Darstellung der Zusammenhänge (Wirkungsgefüge) hilfreicher als die Schüler mit geringer Bereitschaft. Die Schüler, die im Physikunterricht etwas lernen wollen, überlegen sich auch lieber Zusammenhänge und finden folglich auch den Unterricht interessanter als lernunwillige Schüler.

Schüler, die sich für gut halten, überlegen sich lieber Zusammenhänge als die Schüler, die sich für schlecht halten; diese rechnen dagegen lieber Aufgaben und schätzen es weniger, dass der Computer das Rechnen übernahm. Dazu passt, dass die Schüler, die schlechte Noten haben, weniger der Aussage zustimmen, dass das Erstellen von Rechenmodellen wichtiger als das Rechnen weiterer Aufgaben ist. Das entspricht der oben zitierten Schüleräußerung bezüglich des Aufgabenrechnens. Andererseits schätzen diejenigen, die sich durch den Modellbildungsunterricht gefordert fühlten,

mehr als die (nach eigenen Angaben) Unterforderten, dass sie keine speziellen Bewegungsgleichungen brauchen, sondern mit wenigen Grundgleichungen auskommen.

Große Unterschiede gibt es zwischen den Schülern, die auch zu Hause mit VisEdit experimentierten, und denen, die es nicht taten. Die Softwarenutzer denken lieber über Zusammenhänge nach und finden diese Art von Unterricht interessanter. Das Erstellen von Modellen sehen sie als hilfreicher für ihr Verständnis an und halten es für wichtiger als weitere Anwendungsaufgaben zu rechnen. Sie haben auch mehr gesehen, welche unterschiedliche Vorgänge mit wenigen Formeln behandelt werden können. Dabei ist diese unterschiedliche Einschätzung sicher mit ein Grund, warum ein Teil das Programm zu Hause nutzte.

4.5.3 Veränderungen in Concept Maps

4.5.3.1 Allgemeines zu Concept Mapping

Ein Concept Map ist eine „Begriffs-Landkarte“, ein Netzwerk aus Begriffen und Verbindungen, deren Ursprung in Arbeiten der Gruppe um NOVAK liegt (Peuckert, 1999a, S. 47). *„Concept maps sind dazu bestimmt, bedeutungsvolle Beziehungen zwischen Begriffen in der Form von Propositionen darzustellen. Propositionen sind zwei oder mehr Begriffsbezeichnungen, die durch Worte in einer semantischen Einheit verbunden sind“* (Novak, Godwin, 1984, S. 15, Übersetzung T. W.). Dazu werden die Begriffe auf ein Blatt Papier geschrieben, eventuell zusätzlich eingerahmt oder eingekreist und mit Linien oder Pfeilen verbunden, an denen verbindende Wörter stehen sollten, wobei dieser Prozess Concept Mapping genannt wird. Dabei werden die Concept Maps entlang den Pfeilen in Pfeilrichtung (oder entlang den Linien von oben nach unten) gelesen. NOVAK und GODWIN (1984) forderten eine hierarchische Anordnung (mit evtl. Querverbindungen), bei der ein allgemeinerer, umfassenderer Begriff weiter oben, ein spezifischerer Begriff weiter unten steht, während man heute meistens (abhängig vom Inhalt) nicht-hierarchische Netze („Crosslink-Struktur“) bevorzugt.

Concept Mapping wird im englischsprachigen Raum hauptsächlich im instruktionellen Bereich eingesetzt. Im Unterricht können Concept Maps die Themen und Grundideen des Schuljahres, eines großen Kapitels oder eines Abschnittes zeigen („advance organizer“). Daran können die Schüler sehen, an welcher Stelle im Themenablauf des Schuljahres sie sind, wo sie waren und wo es hingehen wird. Sie können damit auch erkennen, was zentral wichtig ist und was nur am Rande steht, so dass der Unterricht nicht als lineare Abfolge gleichrangiger Themen erscheint. Weiterhin können mit Hilfe der Concept Maps Texte aus Büchern oder Zeitungsartikeln erschlossen und gegliedert werden, um sie besser zu verstehen. Auch bei der Planung eines Aufsatzes oder Referates kann es helfen, erst ein grobes Concept Map zu erstellen und dieses beim Schreiben mit zu verändern. *„Geschriebene oder gesprochene Botschaften sind notwendigerweise lineare Folgen von Begriffen und Sätzen. Im Gegensatz dazu ist das Wissen in unserem Gedächtnis in einer Art hierarchischen oder holographischen Struktur gespeichert“* (Novak et al., 1984, S. 53, Übersetzung T. W.).

Mit Concept Maps kann aber auch das strukturelle Wissen von Schülern erforscht und dargestellt werden, damit der Schüler und der Lehrer erkennt, was der Schüler bereits weiß. Der Schüler kann

sich dadurch seiner eigenen Vorstellungen bewusst werden und der Lehrer kann von diesem Ausgangspunkt aus unterrichten. Damit können auch „falsche“ Schülervorstellungen aufgespürt und dann thematisiert werden. Ausgehend von solchen Concept Maps kann über die Bedeutung der Begriffe diskutiert werden - Lehrer und Schüler miteinander oder Schüler untereinander. Hier können also die Concept Maps zum Erkennen und Thematisieren der Schülervorstellungen und als Gesprächsgrundlage benutzt werden. Erstellt der Schüler nach einigen Wochen oder Monaten Unterricht wieder zu diesem Thema ein Concept Map, kann er seinen Lernfortschritt sehen. Er wird merken, wie sich das Concept Map und sein Wissen entwickelt und verfeinert hat und dass es klarer oder umstrukturiert ist. So kann er sich seines Lernprozesses bewusst werden, was wiederum motivierend wirken kann (Selbstreflexion).

In der internationalen physikdidaktischen Forschung wird Concept Mapping häufig als Forschungsinstrument zur Diagnose von Schülervorstellungen verwendet, wobei es sowohl in der möglichen Gestaltung der Maps, beim Mapping durch die Lernenden als auch bei der Auswertung große Unterschiede zwischen den Forschergruppen gibt (Fischler et al., 1999, S. 335 und Fischler et al., 2000, S. 8 - 15). In der durchgeführten Interventionsstudie sollte außer durch die Einschätzungen der Schüler mit weiteren empirischen Daten ermittelt werden, ob sich und wie sich die qualitativen Vorstellungen der Schüler geändert haben. Deshalb sollten die Schüler vor und nach der Unterrichtseinheit in der Form eines Concept Maps ihre Vorstellungen darlegen, wie verschiedene Größen qualitativ zusammenhängen und welche Größe auf welche wirkt.

4.5.3.2 Vorgehen zur Gestaltung der Maps

Nachdem die Schülern auf Tafelanschriften in Form von Concept Maps in verschiedenen Schulfächern hingewiesen wurden, ein fertiges und witziges Concept Map zu einem nichtphysikalischen Thema gezeigt (aus Peuckert, Rothenhagen et al., 1999, S. 124; siehe CD im Anhang) und die Erstellung eines nichtphysikalischen Concept Maps gemeinsam geübt wurde, hatten die Schüler das Prinzip verstanden und konnten selbst Concept Maps erstellen. Da sowohl das den Schülern vorgestellte Beispiel als auch das als Übung gemeinsam erstellte nicht hierarchisch geordnet waren, waren auch die von den Schülern erzeugten Concept Maps nicht hierarchisch geordnet, was bei dem Thema auch nicht sinnvoll gewesen wäre.

SCHECKER, KLIEME ET AL. (1999, S. 22) sind der Meinung, dass Concept Mapping ohne Vorgabe eines bestimmten Bezugsphänomens ein wenig valides Verfahren zur Messung der physikalischen Kompetenz ist und Concept Maps zu bestimmten Bewegungsvorgängen aussagekräftiger sind. Hier wurde jedoch kein bestimmter Versuch oder Bewegungsvorgang vorgegeben, zu dem ein Concept Map zu erstellen ist, da erfragt werden sollte, welche Zusammenhänge zwischen den vorgegebenen Begriffen die Schüler allgemein für wichtig halten. Im Dynamikunterricht haben sie viele Bewegungsbeispiele kennen gelernt und nun ist die Frage, ob sie erkannt haben, welche Größen und Strukturen allgemein wichtig sind, nicht in einem speziellen Beispiel.

Die Begriffe für das erwartete Concept Map wurden vorgegeben (siehe CD im Anhang), da es darauf ankam, das Verständnis der Schüler zu genau diesen Begriffen zu erforschen. Die zwölf den Schülern vorgegebenen Begriffe waren Gegenstand des vorher durchgeführten konventionellen

Unterrichts und der Intervention. Von einer vorweg vorgegebenen Platzierung der Begriffe, die dann nur noch verbunden werden, musste abgesehen werden, da durch Platzierung schon gewisse Verbindungen und Strukturen nahe gelegt werden, was vermieden werden sollte. Die Schüler mussten also in einem ersten wichtigen Schritt die Begriffe sinnvoll so anordnen, dass Begriffe nebeneinander liegen, die etwas miteinander zu tun haben. Praktisch wurde das so gelöst, dass die Schüler die zwölf Begriffe auf Klebeetiketten (siehe CD im Anhang) erhielten. Die Schüler hatten keine Probleme damit, eine für sie zufrieden stellende Anordnung der Begriffe zu finden, wozu auch beitrug, dass sie die Klebeetiketten verschieben konnten, um sie erst nach einigem Probieren aufzukleben. Bei diesem Vorgehen zeigte sich auch gerade in der Weise, wie Schüler die Begriffe platzierten, ein Lernfortschritt.

Wenn die Begriffe geordnet und platziert sind, verbinden die Schüler sie nach ihren Vorstellungen und beschriften die Verbindungspfeile. Damit auch Schüler mit geringeren verbalen Fähigkeiten in der Lage sind, geeignete Formulierungen zu finden, wurden zehn Relationen vorgegeben. Außer den Aussagen „ist“ und „ist Beispiel für“ gaben alle Relationen (wie z.B. „bestimmt“, „wirkt auf“, „ändert“ „verursacht“ oder „wirkt entgegen“) eine Wirkungsrichtung an. Damit alle eigenen Schülerideen umsetzbar waren, wurde den Schülern zusätzlich erlaubt, auch eigene Formulierungen zu verwenden. Die Schüler sollten so viele Verbindungen herstellen, wie sie für sinnvoll hielten. Ein Zeitlimit wurde nicht vorgegeben; aber kein Schüler brauchte mehr als 30 Minuten.

4.5.3.3 Auswertung der Maps

Concept Maps können durch verschiedene quantitative und qualitative Verfahren ausgewertet werden (Fischler, Peuckert, 2000, S. 12 ff.). Eine Möglichkeit ist, die Anzahl der richtigen Propositionen zu zählen, wobei diese noch verschieden gewichtet werden können, z.B. indem Punkte vergeben werden (Novak, Godwin, 1984). Zu dieser analytischen Erfassung der inhaltlichen Güte kann auch noch eine holistische Güteeinschätzung hinzutreten (Schecker, Klieme, 2000, S. 34 ff.). Ein reines Bewerten richtiger Beziehungen greift allerdings zu kurz. In dieser Studie interessierte auch, welche falschen Relationen häufig gesetzt wurden, welche Begriffe eine zentrale Rolle spielen und zwischen welchen Begriffen engere Beziehungen gesehen werden. Es interessierte nicht der Vergleich mit einem „Expertenmap“, sondern die Schülervorstellungen im Vergleich zur physikalischen Sicht und ihre Veränderung durch die Intervention.

Ein anderes Verfahren orientiert sich an der Strukturiertheit, die durch unterschiedliche topologische Parameter (Strukturvariablen) erfasst wird. In Anlehnung an graphentheoretische Parameter kann hier betrachtet werden (Schecker, Klieme, 2000, S. 34): die Linkage (Verhältnis zwischen Zahl der Relationen und Zahl der Begriffe, auch Komplexität genannt), die Dichte (Verhältnis zwischen beobachteter und maximaler Anzahl der Relationen), der Durchmesser (Zahl der Kanten, denen man maximal von einem Begriff zu einem anderen folgen muss), die Zahl der unverbundenen Teile und der Typ des Modells. BEHRENDT ET AL. nennen 36 Variablen, um die Struktur, die Größe und den Inhalt der Netze und die Stimmigkeit der Propositionen zu ermitteln (Behrendt, Dahncke, Reiska, 2000, S. 124). Auf solche Parameter einzelner Netze soll hier nicht eingegangen werden.

Schließlich können die Relationen auch kategorisiert werden, um verschiedene Relationstypen zu unterscheiden (Peuckert, Fischler, 2000, S. 102). Da in dieser Untersuchung eingeschränkt-gültige Relationen und Negationen von Relationen nicht vorkamen, konnte man alle auftretenden Relationen in zwei Typen einteilen: Wirkungsrelationen (= Aktivitätsmerkmal wie „bewirkt“ und Funktionsmerkmal wie „bestimmt“, einschließlich „wirkt entgegen“), die den Hauptteil aller Verbindungen ausmachen, und Oberbegriffe („ist“ und „ist Beispiel für“). Vereinfachend wurde deshalb bei der Auswertung keine Unterscheidung der Verbindungen nach der Kantenbeschriftung getroffen. Nur die Richtung der Verbindungspfeile wurde berücksichtigt, da ihr meistens eine Wirkrichtung zugrunde lag. Dabei musste nur beachtet werden, dass die selten gewählte Formulierung „A ist abhängig von B“ wie „B bestimmt A“ behandelt werden musste. Damit wurde von der Kantenbeschriftung mehr berücksichtigt als in Untersuchungen, die nur eine Verbindung zwischen zwei Begriffen feststellen (binärer Zusammenhang, dichotome Codierung).

In dieser Untersuchung wurde eine Generalisierung der individuellen Maps vorgenommen, die dann zunächst qualitativ analysiert wurden. Die dabei entstandenen Modalmaps enthalten die durchschnittliche Zahl genannter Verbindungen und repräsentieren damit die am häufigsten vorkommenden Zusammenhänge (Peuckert, Fischler, 2000, S. 106). Dazu wird der Mittelwert m der pro Map vorkommenden Verbindungen ermittelt und dann bei n Schülern alle Verbindungen genommen, die n -fach, $(n-1)$ -fach, $(n-2)$ -fach usw. genannt wurden, bis man bei mindestens m Verbindungen angelangt ist (Man bekommt evtl. nicht genau m Propositionen, sondern etwas mehr). Damit erhält man eine sinnvolle Triggerschwelle für die Darstellung gewählter Verbindungen (ca. 29 % beim Vortest, ca. 38 % beim Nachtest). Bei der Darstellung der Modalmaps wurde zusätzlich noch angegeben, welcher Anteil der Schüler diese Proposition angab und dies durch die Dicke des Pfeils (drei verschiedene Dicken) repräsentiert. So bekommt man auch eine Information über die Stärke einer Verbindung innerhalb der Gruppe.

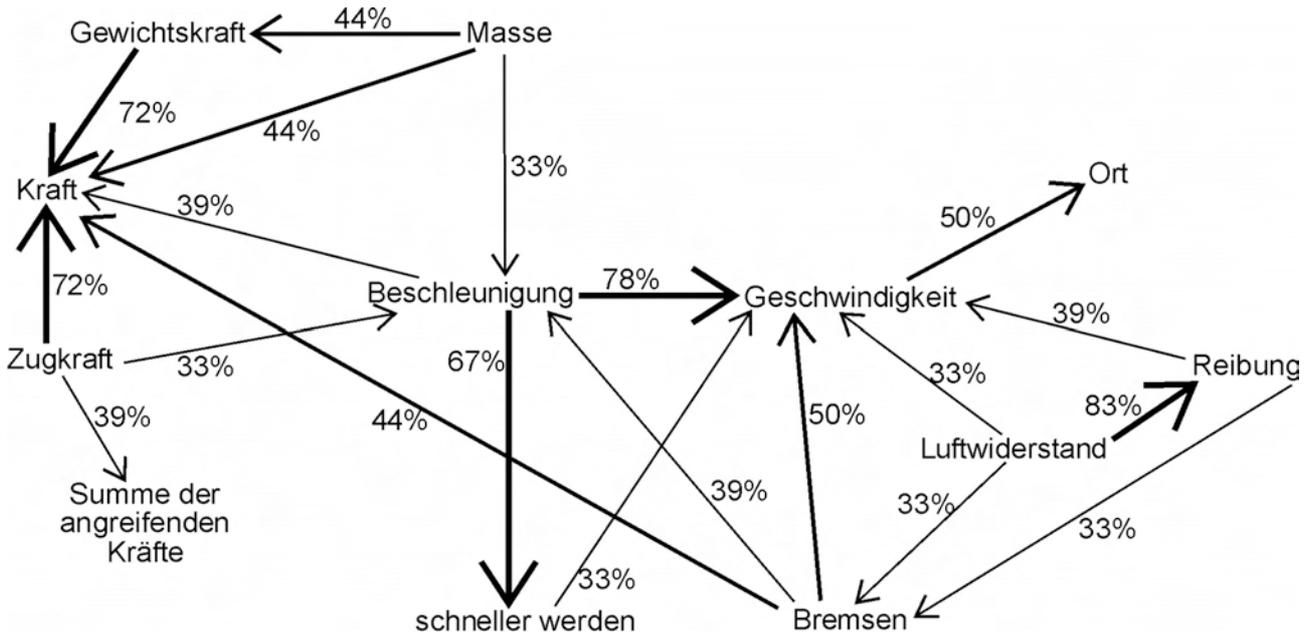


Abb. 4.15: Beispiel eines Modalmaps einer beteiligten Klasse nach dem Dynamikunterricht, vor der Intervention (Klasse Nr. 2)

Nachdem also ermittelt war, wie oft die Schüler welche Verbindung angaben, konnte aus den häufigsten Verbindungen für jede einzelne Klasse und für die Gesamtgruppe ein typisches Modalmap erstellt werden. Dabei wurden nur solche Schüler berücksichtigt, die sowohl am Vortest als auch am Nachtest teilnahmen. Beim Vortest wurden dabei Fehlvorstellungen aufgedeckt, die nur in einer Klasse vorkamen (Beispiel: „Bremsen ist Kraft“, siehe Abb. 4.15) und offensichtlich durch den Unterricht bedingt waren. Im Gesamtmodalmap von den drei Klassen (55 Schüler), das sich vor der Unterrichtssequenz ergab, haben solche Effekte einzelner Klassen keine Bedeutung mehr, so dass man vermuten kann, dass es in bestimmten Aspekten typisch für eine traditionell unterrichtete Klasse sein könnte (siehe Abb. 4.16). Dieses Gesamtmodalmap zeigt einige Fehlvorstellungen.

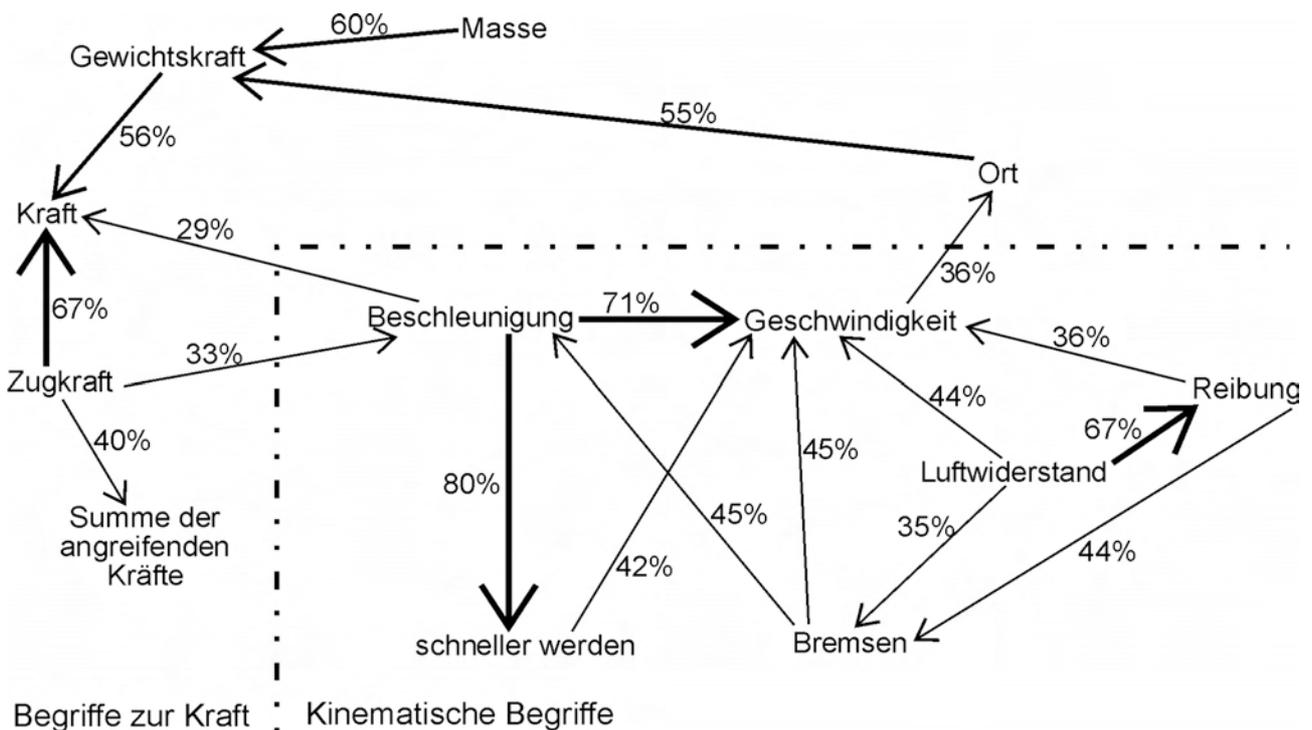


Abb. 4.16: Modalmap der drei Klassen vor der Unterrichtssequenz (Anordnung möglichst übersichtlich nach der Struktur des Maps)

Die Aussage, dass die Beschleunigung auf die Geschwindigkeit wirkt, ist im Vortest erfreulicherweise häufig vorhanden (71 %). Dass aber genauso die Geschwindigkeit auf den Ort des bewegten Körpers wirkt, ist leider nur schwach ausgeprägt (36 %). Sehr häufig wurde genannt, dass der Luftwiderstand eine Reibung ist (67 %). Luftwiderstand und Reibung werden aber anscheinend nicht als Kräfte angesehen. Aus graphentheoretischer Sicht kann man bemerken, dass die Kraftgrößen und die Bewegungsgrößen wenig miteinander vernetzt sind, wobei „Ort“ über „Ort bestimmt Gewichtskraft“ eher zu den Kräften gehört und „Luftwiderstand“ und „Reibung“ über „Luftwiderstand beeinflusst/wirkt entgegen Geschwindigkeit“ mit den kinematischen Größen in Verbindung steht. Mit dem Begriff „Summe aller angreifender Kräfte“ können die Schüler nichts anfangen, obwohl die Lehrer vorher sagten, dass dies unterrichtet wurde. Nur ein Drittel (33 %) gibt an, dass die Beschleunigung von der Zugkraft abhängt, und nur ein Fünftel (22 %), dass sie von der Masse abhängt. Nur bei wenigen Schülern hängt sie auch von Reibung (25 %), Kraft (18 %) und Luftwiderstand (25 %) ab. Die Aussage „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ (29 %) ist nicht richtig. Man kann

vermuten, dass die Schüler hier an das zweite newtonsche Gesetz in der Form $F = m \cdot a$ gedacht haben, da man sowohl „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ (29 %) als auch „Masse beeinflusst Kraft“ (27 %) findet. D.h. diese Schüler haben das zweite newtonsche Gesetz nicht verstanden, sondern nur eine Formel gelernt. Die zentralste Größe ist die Geschwindigkeit, während die Beschleunigung erst an zweiter Stelle kommt.

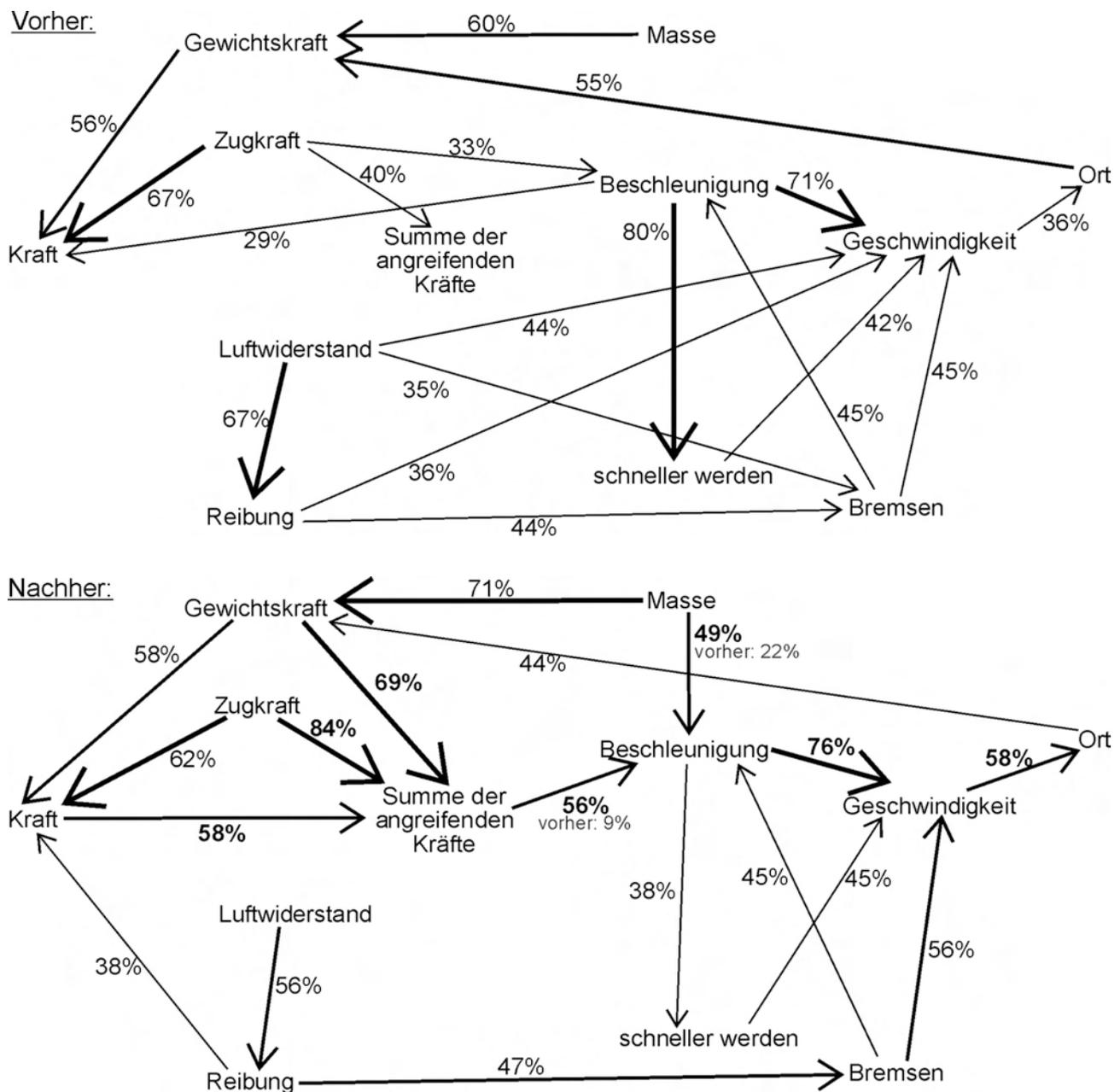


Abb. 4.17a: Modalmap der drei Klassen vor der Unterrichtssequenz (Anordnung der Begriffe wie beim Map nachher)

Abb. 4.17b: Modalmap der drei Klassen nach der Unterrichtssequenz (Anordnung möglichst übersichtlich nach der Struktur des Maps)

Das Modalmap nach den sechs Stunden Unterricht (siehe Abb. 4.17b) unterscheidet sich deutlich vom vorhergehenden. Zum besseren Vergleich wird das Map vor der Intervention nochmals mit der gleicher Anordnung der Begriffe wie beim Map nach der Unterrichtssequenz angegeben (siehe

Abb. 4.17a). Der Begriff „Summe aller angreifender Kräfte“ (kurz ΣF), mit dem die Klasse vorher nichts anfangen konnte, wurde nun zu einem wichtigen Begriff. Die aus Expertensicht wesentlichen Verbindungen kamen im Nachtest deutlich häufiger als im Vortest vor: „Summe aller angreifenden Kräfte beeinflusst Beschleunigung“, kurz $\Sigma F \rightarrow a$ (56 % statt 9 %), „Beschleunigung beeinflusst Geschwindigkeit“, kurz $a \rightarrow v$ (76% statt 71 %), „Geschwindigkeit beeinflusst Ort“, kurz $v \rightarrow x$ (58 % statt 36 %) und „Masse beeinflusst Beschleunigung“, kurz $m \rightarrow a$ (49 % statt 22%). Wie die Hake-Plots für die vier wesentlichen Verbindungen zeigen (siehe Abb. 4.18), ergibt dies einen mittleren relativen Zugewinn (= Verhältnis von absoluten Zugewinn zu maximal möglichem Zugewinn. Gleiche Werte im Hake-Plot auf fallenden Geraden). Auffällig ist, dass die Klasse 2, in der die Schüler sehr motiviert und interessiert waren, am meisten profitierte. Bei der Klasse 3 machte sich sicher bemerkbar, dass einige gute, motivierte Schüler während dieser Zeit auf Schüleraustausch in Frankreich waren.

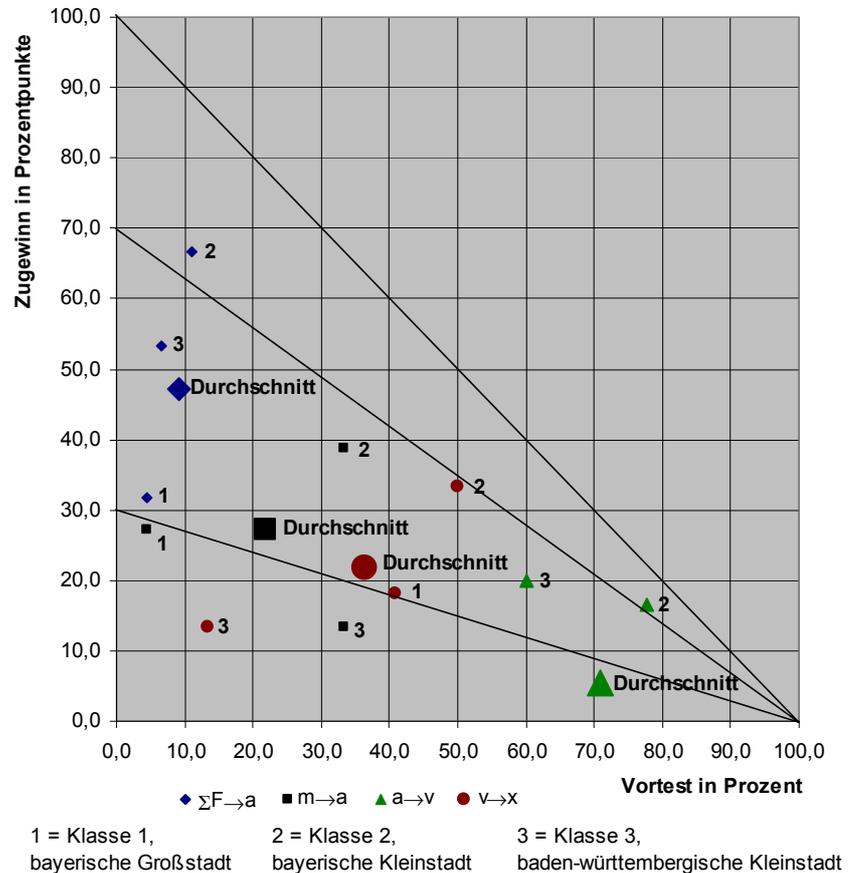


Abb. 4.18: Hake-Plot des Zugewinns der wesentlichen Verbindungen in der Interventionsstudie

Zusätzlich ist noch zu sagen, dass im Vortest von den möglichen Verbindungen sehr viele auch wirklich vorkamen (119 von 132 möglichen), es wurde also fast alles von irgendeinem Schüler einmal verbunden. Im Nachtest kamen weniger Verbindungen vor (109 von 132 möglichen), wobei hier viele nur von je einem oder zwei Schülern gewählt wurden. D.h. während beim Vortest in der Klasse noch etliche konfuse Vorstellungen bestanden, haben im Nachtest mehr Schüler dargelegt, was wichtige Zusammenhänge sind. Im Nachtest finden sich somit viele falsche Aussagen deutlich seltener als im Vortest, wie z.B. „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ (11 % statt 29 %), „Masse beeinflusst Kraft“ (13 % statt 27 %), „Kraft wirkt auf Masse“ (5 % statt 20 %) und „Bremsen ist Kraft“ (11 % statt 27 %). Das passt auch dazu, dass die durchschnittliche Anzahl von Pfeilen pro Schüler beim Nachtest (17,4) niedriger als im Vortest (18,2) liegt, da ihnen nun klarer ist, was wichtig ist. Die wichtigsten Veränderungen sind auch an einem Differenzmap (siehe Abb. 4.19) deutlich zu sehen. Hierbei wird nicht die Differenz der beiden Modalmaps gebildet, sondern ein Modalmap aus den Differenzen der Ergebnisse von Vor- und Nachtest (Peuckert, Fischler, 2000, S. 108). Hier wird

nochmals deutlich, dass die „Summe der angreifenden Kräfte“ und ihre Beziehungen an Bedeutung gewonnen hat. Interessanterweise kommt auch die streng genommen falsche Aussage „Beschleunigung ist schneller werden“ deutlich seltener vor.

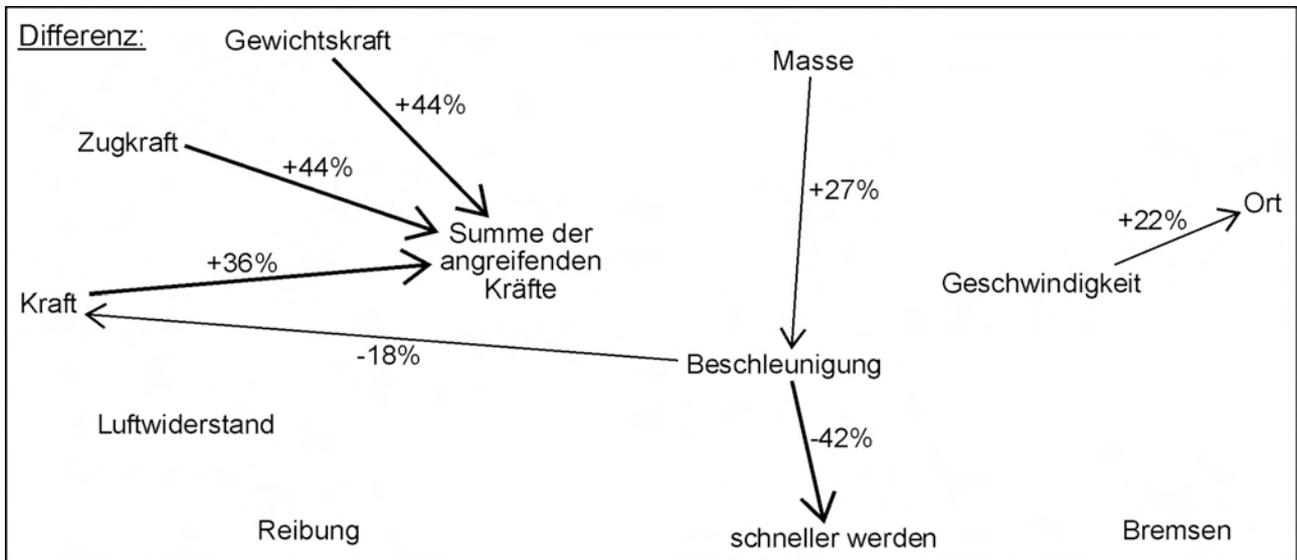


Abb. 4.19: Differenzmap der drei Klassen nach PEUCKERT, FISCHLER (2000)

Die Bedeutung eines Begriffes in einem Netz lässt sich auch daran erkennen, wie zentral der Begriff ist, d.h. wie stark er vernetzt ist (point-centrality, Behrendt et al., 2000, S. 130). Ein ganz einfacher quantitativer Wert für die Zentralität eines Begriffes wäre, die Anzahl der an- und abgehenden Pfeile im Verhältnis zu den insgesamt an allen Begriffen an- und abgehenden Pfeilen. (Die Anzahl der an- und abgehenden Pfeile wird auch der Grad eines Knotens genannt (Friege, Lind, 2000, S. 159)). Für die beiden Modalmaps kann dies leicht erstellt werden (siehe Tab. 4.4). Hier wird ebenso deutlich, dass die „Summe der angreifenden Kräfte“ an Bedeutung gewann, während „Luftwiderstand“ und „Geschwindigkeit“ an Bedeutung verloren haben.

	Vortest		Nachttest		Veränderung der Zentralität in Prozentpunkte
	Grad	Zentralität in %	Grad	Zentralität in %	
Gewicht	3	8,3	4	11,1	2,8
Zugkraft	3	8,3	2	5,6	-2,8
Reibung	3	8,3	3	8,3	0,0
Luftwider.	3	8,3	1	2,8	-5,6
Masse	1	2,8	2	5,6	2,8
Kraft	3	8,3	4	11,1	2,8
Summe F	1	2,8	4	11,1	8,3
a	5	13,9	5	13,9	0,0
v	6	16,7	4	11,1	-5,6
x	2	5,6	2	5,6	0,0
Bremsen	4	11,1	3	8,3	-2,8
schneller	2	5,6	2	5,6	0,0
Summe:	36	100	36	100	0

Tab. 4.4: Veränderung der Zentralität der Begriffe

In der Klasse Nr. 2 wurde drei Monate später dieser Test wiederholt (siehe Abb. 4.20). Die aus Expertensicht wesentlichen Verbindungen kamen im Langzeittest in dieser Klasse etwas seltener als im Nachttest dieser Klasse vor, aber noch deutlich häufiger als im Vortest (siehe Abb. 4.15): $\Sigma F \rightarrow a$ (44 % statt 79 % im Nachttest bzw. 11 % im Vortest), $a \rightarrow v$ (94 % statt 95 % bzw. 78 %), $v \rightarrow x$ (72% statt 84 % bzw. 50 %) und $m \rightarrow a$ (61 % statt 74 % bzw. 33 %). Dafür haben sich alle Verbindungen

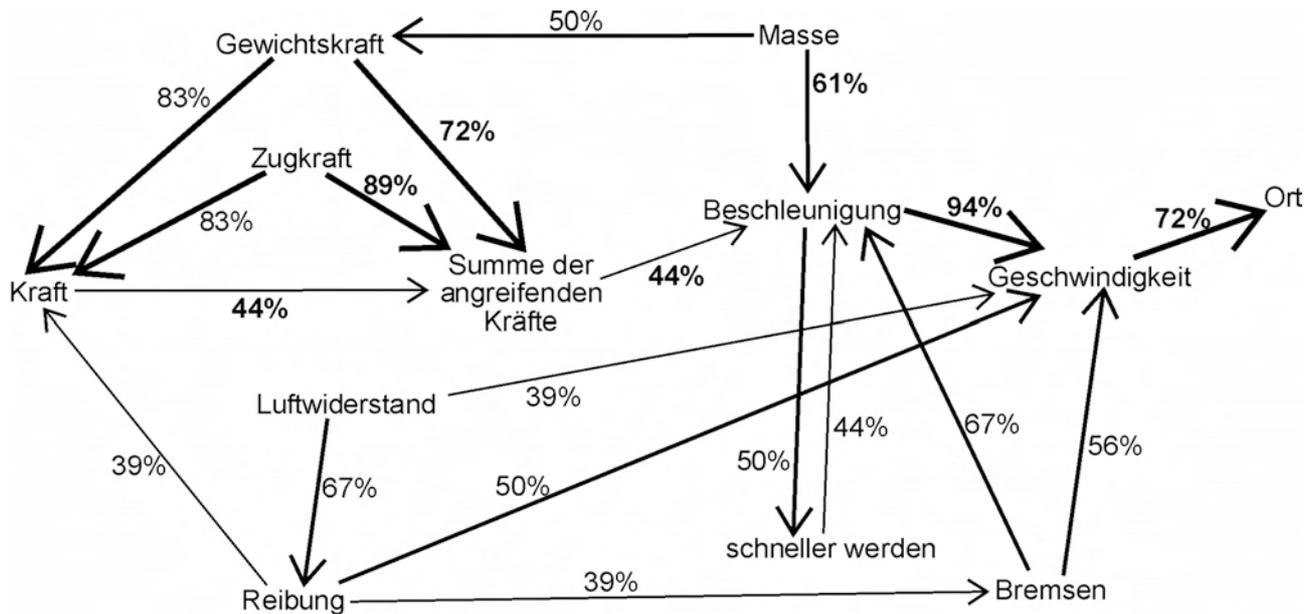


Abb. 4.20: Modalmap der Klasse 2 nach drei Monaten (Langzeittest)

von der Art „spezielle Kraft→Kraft“ oder „spezielle Kraft→Summe aller F^x “ (z.B. Gewichtskraft→ ΣF (72 % statt 68 % bzw. 28 %), Zugkraft→ ΣF (89 % statt 79 % bzw. 39 %) und andere) weiter leicht verbessert. Dabei ist zu bedenken, dass in der Zwischenzeit keine weitere Modellbildung durchgeführt wurde und keine dynamischen Vorgänge behandelt wurden. Auch die falschen Aussagen „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ (22 % statt 5 % im Nachtest bzw. 39 % im Vortest), „Masse beeinflusst Kraft“ (33 % statt 5 % bzw. 44 %) und „Bremsen ist Kraft“ (6 % statt 21 % bzw. 44 %) kommen im Langzeittest deutlich seltener als im Vortest vor. Insgesamt kann man daraus schließen, dass es sich nicht um ein kurzfristig angelehnertes Wissen handeln kann, sondern um ein Wissen, das Bestand hat.

In den Klassen, die nach dem Gesamtkonzept von Kapitel 5 unterrichtet wurden und bei der die Modellbildung schon während der Behandlung der Kinematik und Dynamik an geeigneten Stellen eingesetzt wurde, ergab sich ein ähnliches Ergebnis wie im oben erwähnten Nachtest (siehe Kapitel 6.5.3). Hier erschien es außerdem Lehrern so, als ob das Wissen um das Vorgehen beim Erstellen der Wirkungsgefüge den Schülern eine Hilfe beim Rechnen quantitativer Aufgaben war, d.h. sie haben das zugrunde liegende Problemlöseschema auch bei Aufgaben ohne Computer angewandt.

Offen bleibt allerdings noch, ob es sich bei dem Wissenszuwachs, der sich in den Modalmaps zeigte, um ein deklaratives Wissen, also Informationswissen, handelt oder um operatives Wissen und Verständnis, wie es die Schüler selbst behaupteten. FRIEGE und LIND haben gezeigt, dass in ihrer Studie aus Begriffsnetzen gewonnene Kennwerte für Wissen mit Faktenwissen korrelieren und Faktenwissen sehr hoch mit Problemlöseleistung korreliert, so dass ein indirekter, aber kein kausaler Zusammenhang zwischen Begriffsnetzen und Problemlöseleistung entsteht (Friege, Lind, 2004, S. 264).

Ungeklärt ist auch, inwieweit die Schüler bei qualitativen Verständnisfragen auf dieses Wissen zurückgreifen oder Alltagswissen benutzen bzw. aufgrund einer Wissenskompartimentalisierung auf Alltagswissen zurückgreifen. Aus Zeitgründen konnten hierzu keine weiteren Untersuchungen vor-

genommen werden. Nur ein nicht-repräsentativer Teil einer Klasse hatte vor und nach der Intervention drei ausgewählte Aufgaben des FCI-Testes lösen sollen, wobei aber kein signifikanter Unterschied festgestellt wurde. Allerdings konnten Schüler, die falsch geantwortet hatten, danach mit Hilfe eines der erarbeiteten Wirkungsgefüge, das ihnen erneut gezeigt wurde, die richtige Lösung erklären. Das passt zu dem Ergebnis des Bremer DFG-Projektes „Physiklernen mit Modellbildungssystemen“ (Schecker, Klieme et al., 1999), in dem sich beim FCI-Test keine Vorteile durch die Modellbildung ergaben, aber in Experimentalinterviews festgestellt wurde, dass Modellbildung die Fähigkeit zur halbquantitativen Beschreibung von Bewegungen unter Einfluss von Kräften fördert (Sander et al., 2001, S. 151). Auch in der Studie dieser Arbeit zum Gesamtunterrichtskonzept wurde ermittelt, dass sich die Mittelwerte der individuellen relativen Zugewinne der Schüler beim FCI-Test bei Klassen mit und ohne graphische Modellbildung nicht signifikant unterscheiden (unabhängiger t-Test, 5 %-Niveau) (siehe Kapitel 6.5.1.3).

FRIEGE und LIND meinen, dass es neben der auf Problemlösefähigkeit zielenden physikalischen Kompetenz noch eine Kompetenz zur Strukturierung eines Gebietes gibt, die mit Concept Maps gemessen werden kann und mit der Problemlösekompetenz indirekt zusammenhängt (Friege, Lind, 2004, S. 265). So unterscheiden sie zwei Arten des Verstehens: ein strukturelles Verständnis (Fähigkeit, ein Gebiet zu überblicken) und ein situatives Verständnis (anwendungsbezogen, Problemlösefähigkeit). Demnach wurde durch diese Interventionsstudie strukturelles Verständnis gefördert. Allerdings wurden hier bei den Concept Maps nicht wie bei FRIEGE und LIND verschiedenste Begriffe eines größeren Themenbereiches verwendet, sondern Begriffe eines engeren Themenbereiches, die man beim Lösen einer dynamischen Aufgabe gemäß $\vec{a} = (\Sigma \vec{F}) / m$ braucht.

Auch wenn weitere Untersuchungen zusätzlich zu den Concept Maps wünschenswert gewesen wären, kann man zusammenfassend aus den Concept Maps schließen, dass die Schüler dieser Interventionsstudie durch die Modellbildung zusätzliches wichtiges Wissen erwarben und dass dadurch die Begriffsbildung und das Verständnis der Schüler gefördert wurden und Fehlvorstellungen abgebaut wurden. Ob die Schüler dieses Wissen auch zum Problemlösen bei qualitativen Anwendungsaufgaben nutzen können, wurde nicht ermittelt und ist fraglich. Dennoch kann als Resümee festgehalten werden, dass ein Einsatz graphischer Modellbildung bei der Erarbeitung und Vertiefung der Dynamik sinnvoll ist.

5 Entwicklung eines Konzeptes zum Kinematik- und Dynamikunterricht

5.1 Ziele des Konzeptes

Das Hauptziel dieser Arbeit ist, ein Gesamtkonzept für einen veränderten Kinematik- und Dynamikunterricht ein- und zweidimensionaler Bewegungen in der Jahrgangsstufe 11 des Gymnasiums zu entwickeln, das möglichst vielen Schülern hilft, Fehlvorstellungen zur Mechanik zu verändern. Inhalt ist dabei der „Pflichtstoff“, der in allen Bundesländern unterrichtet werden muss, nicht um Themen, deren Behandlung aus verschiedenen Gründen zusätzlich sinnvoll erscheinen. Mit diesem Konzept sollen Anstöße zur Veränderung des konventionellen Kinematik- und Dynamikunterricht gegeben werden.

Dabei sollten zum einen die vielfältigen Erkenntnisse der didaktischen Forschung zum Mechaniklernen und zu den bestehenden Schülervorstellungen genutzt werden, also verschiedene Ansätze und Ideen verbunden werden. Zum anderen sollten neue methodische Möglichkeiten verwendet werden, die heute durch den Einsatz von Computern möglich sind. Insbesondere sollte die Darstellung physikalischer Größen und von physikalischen Strukturzusammenhängen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen genutzt werden. Es werden also verschiedene Elemente zu einer neuen Konzeption verbunden, um erfolgreiches Lernen zu ermöglichen.

Diese Darstellungsmöglichkeiten können sicher in unterschiedlichen Konzepten genutzt werden. So könnte man auch die Impulsstromstärke im Karlsruher Physikkurs (Evaluationsstudie zum Karlsruher Physikkurs in den Klassen 8 bis 10 siehe STARAUSCHEK (2001 und 2002)) durch Vektoren in Animationen dynamisch repräsentieren oder etwa die Stöße im Stoßratenkonzept von JUNG (1980b, S. 30 – 59). Zu bedenken ist aber, dass im bayerischen Lehrplan von 2003 für das neunjährige Gymnasium (tritt in der elften Jahrgangsstufe nie in Kraft) bzw. im bayerischen Lehrplan von 2004 für das achtjährige Gymnasium (Mechanik ab Schuljahr 2008/09 in der Jahrgangsstufe 10) der „Impuls“ in der Mechanik nicht mehr vorhanden ist, so dass nicht über den Impuls in die Dynamik eingestiegen werden kann (Impuls erst im folgenden Jahr bei der speziellen Relativitätstheorie).

Das Unterrichtskonzept sollte von durchschnittlichen Lehrern in verschiedenen Schulen eingesetzt werden. Es ist nicht an besondere Klassen wie Leistungskurse oder „Laptop-Klassen“, sondern an durchschnittliche Klassen gedacht (2 oder 3 Unterrichtsstunden pro Woche, in Bayern in der elften Jahrgangsstufe noch kein Kurssystem). Es sollte ein Konzept entwickelt werden, das mit dem augenblicklich gültigen bayerischen Lehrplan (in Kraft getreten am 1. August 1992) vereinbar ist, damit es von Lehrern akzeptiert wird. Zu beachten war auch, dass in Bayern im Vergleich zu manchem anderen Bundesland für die Kinematik und Dynamik relativ wenig Unterrichtszeit vorgesehen ist.

Grundlage der Dynamik sollte das von WILHELM (1994) ausgearbeitete Konzept sein, das zu ergänzen war. Die Kinematik sollte jedoch nicht traditionell mit eindimensionalen Bewegungen wie bei JÄGER (1996) behandelt werden, sondern aufbauend auf den Erfahrungen von REUSCH (siehe

Reusch, 1997; Reusch, Heuer, 1998, 1999a, 1999b, 2000 und Reusch et al., 2000a) sollte die Kinematik mit zweidimensionalen Bewegungen beginnen und alle kinematischen Begriffe anhand zweidimensionaler Bewegungen erarbeiten, was in Deutschland für die Oberstufe ein Novum darstellte³. Außerdem sollte in diesem Unterrichtskonzept die Möglichkeit gegeben werden, die Modellbildung sinnvoll zu integrieren. Um erfolgreiches Lernen zu ermöglichen, wurden also verschiedene didaktische und methodische Elemente zu einer neuen Konzeption verbunden. Dabei wurde als Randbedingung festgehalten, dass der gesamte Unterricht in dem sehr engen zeitlichen und inhaltlichen Rahmen des bayerischen Lehrplans durchführbar sein soll.

Bei den Vorarbeiten, auf denen diese Arbeit aufbaut (siehe Kapitel 5.2), sind stets nur die Prinzipien und Ideen beschrieben oder Experimente und Computerprogramme dokumentiert. Es gibt jedoch keine Beschreibung, wie der Lehrer in jeder einzelnen Stunde vorgehen könnte. Es fehlen passende Materialien wie Arbeitsblätter, Folien, passende Übungsaufgaben und entsprechende Prüfungsaufgaben. Man kann von den Lehrern nicht erwarten, dass sie all dies selbst entwickeln. Die meisten Lehrer sind deshalb nicht bereit oder (schon aus Zeitgründen) nicht in der Lage nach einem solchen Konzept zu unterrichten. HENSE, MANDL ET AL. (2002) ziehen aus den ersten Ergebnissen der Evaluation des Programms SEMIK („Systematische Einbeziehung von Medien, Informations- und Kommunikationstechnologien in Lehr- und Lernprozesse“) die grundlegende Konsequenz: *„Die Einführung neuer Medien hängt von der Bereitstellung neuer Lehr- und Lernkonzepte ab. Man kann von Lehrern nicht erwarten, dass sie neue Unterrichtsstunden und Projekte ohne Vorgabe als zusätzliche Leistung entwickeln. Dieses Defizit zu verringern, scheint eine wichtige Herausforderung für zukünftige Forschungsarbeiten zu sein“* (Hense et al., 2002, S. 785 unten). Deshalb war es neben einer Lehrerschulung eine Aufgabe, zu diesem Konzept vielfältige Materialien, die die Ideen schulpraktisch übersetzen, und ausführliche schriftliche Unterrichtsbeschreibungen vorzulegen, damit sich Lehrer vorstellen können, wie die einzelnen Stunden konkret ablaufen können und so wesentliche Ideen übernehmen können. Sowohl eine kurze Zusammenschau verschiedener empirischer Studien als auch eine neuere deutsche Studie bestätigen, dass für eine Transferwirkung von Lehrerfortbildungen in die Unterrichtspraxis hinein vielfältige Unterrichtsmaterialien sehr wichtig sind (Haenisch, 1994, S. 3 + S. 5). So wurde die Voraussetzung gelegt, dass viele verschiedene Lehrer danach unterrichten konnten und das Konzept unabhängig von der Lehrervariablen evaluiert werden konnte. Aufgezeigt werden soll damit auch nur das didaktische, weniger das methodische Vorgehen. Das bedeutet auch, dass das Konzept sowohl im lehrerzentrierten Unterricht als auch in schülerorientierter Gruppenarbeit umsetzbar ist.

Materialien, mit denen Schüler sich die Inhalte allein erarbeiten können, sind allerdings nicht vorgesehen. Da es sich um eine neue didaktische Konzeption handelt, sollten diese im lehrergeleiteten Unterricht in Unterrichtsgesprächen eingesetzt werden. In einem weiteren Schritt wäre es auch denkbar, hierzu multimediale Selbstlerneinheiten zu entwickeln (siehe Kapitel 7.1), was nicht das Thema dieser Arbeit ist.

³ WODZINSKI verwendete für die Erarbeitung des Geschwindigkeits- und Kraftbegriffes in der Mittelstufe auch zweidimensionale Bewegungen (Wodzinski, 1996; Wodzinski, Wiesner, 1994 a+b)

Grundlegende Prinzipien dieses Unterrichts sind die Einführung der kinematischen Begriffe anhand von zweidimensionalen Bewegungen, die Betrachtung der Änderungen $\Delta\vec{x}$ und $\Delta\vec{v}$ und die Nutzung dynamisch ikonischer Repräsentationen. Als wichtiger Schritt für eine aktive Auseinandersetzung werden Vorhersagen gefordert und qualitative Aufgaben verwendet. Eine wichtige Rolle spielen komplexe Experimente, in denen mehrere Kräfte und Reibung wirken, und der Einsatz graphischer Modellbildung.

5.2 Vorarbeiten in Würzburg

Im Jahr 1994 wurde in einer empirische Erhebung (Wilhelm, 1994) ermittelt, wieweit bayerische Gymnasiasten (10 Gymnasialklassen, 188 Gymnasiasten) und Fachoberschüler nach dem Dynamikunterricht bei Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen noch entsprechend den typischen Schülervorstellungen antworten und bei welcher Fragestellung eher „aristotelisch“ bzw. eher „newtonsch“ geantwortet wird (Wilhelm, 1994, S. 72 – 146; Heuer, Wilhelm, 1997). Außerdem wurde in dieser Arbeit ein neues Unterrichtskonzept für die Dynamik geradliniger Bewegungen vorgeschlagen und teilweise im Unterricht getestet (Wilhelm, 1994, S. 147 - 188). Grundideen dieses Vorschlages waren • die Nutzung verschiedener Darstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen, wie sie auch hier genutzt werden, • die Betonung des Gespräches mit den Schülern, die die Ergebnisse formulieren und beschreiben bzw. vorhersagen sollten und • die Nutzung von Versuchen, bei denen variable Kräfte, mehrere Kräfte gleichzeitig und Reibungskräfte wirken, sowie eine kontinuierliche Messung mit einem Messwerterfassungssystem. Dazu wurde ein Versuchsaufbau (Wilhelm, 1994, S. 155 - 172) entwickelt, bei dem man die Hangabtriebskraft, die auf einen Luftkissengleiter wirkt, ständig verändern kann und kontinuierlich erfasst und zusätzlich noch eine konstante Zugkraft, eine konstante Schubkraft durch einen Propeller, eine konstante Gleitreibungskraft oder eine geschwindigkeitsabhängige, bremsende Wirbelstromkraft wirken kann. Für die Kinematik, die nicht das Thema dieser Arbeit von WILHELM (1994) war, wurde dennoch bereits in dieser Arbeit vorgeschlagen, bei der Beschleunigung den Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ als Differenz der Geschwindigkeit vor und nach jedem Zeitintervall als Elementarisierung zu verwenden. Zu diesem Konzept wurden zwar einige Unterrichtserfahrungen gesammelt, aber kein kompletter Lehrgang unterrichtet. Außerdem wurde das Konzept, abgesehen von den Grundideen, nicht ausführlich und detailliert beschrieben und keine empirischen Untersuchungen zur Effektivität durchgeführt.

JÄGER hat in einer Staatsexamensarbeit dieses Dynamik-Konzept mit einem Konzept zur eindimensionalen Kinematik ergänzt und schulische Erfahrungen mit dem Gesamtkonzept im Schuljahr 1995/96 beschrieben (Jäger, 1996). Im Schuljahr 1996/97 wurde erneut eine weitere Klasse (11. Jahrgangsstufe) mit diesem mittlerweile leicht veränderten Konzept unterrichtet und von KOLLER in einer Staatsexamensarbeit mit verschiedenen empirischen Erhebungen begleitet (Koller, 1997). GALMBACHER hat in einer weiteren Examensarbeit zu diesem Unterricht - hauptsächlich zum Kinematikteil (eindimensional) - ein Lehrbuch für Schüler geschrieben (Galmbacher, 1997). ALBERT hat in einer Staatsexamensarbeit eine Fülle von Experimenten zum dritten newtonschen Gesetz mit Messwerterfassung entwickelt und damit dieses Unterrichtskonzept um ein weiteres Thema ergänzt.

Trotz dieser relevanten Vorarbeiten lagen bis 1999 damit kaum repräsentative empirische Daten vor.

BLASCHKE hat den Test von WILHELM zur Kinematik und Dynamik eindimensionaler Bewegungen verändert und als Nachtest von 21 konventionell unterrichteten Gymnasialklassen (433 Gymnasias-ten) bearbeiten lassen (Blaschke, 1999) (siehe Kapitel 6.4.2. und 6.5.2). Dabei hat er die Lehrer nach ihrem Unterricht befragt und daraufhin die Klassen nach den Angaben der Lehrer in sechs unterschiedliche methodische Kategorien eingeteilt. Problematisch ist, dass er bei den Testergebnissen nur Mittelwerte und keine Varianzen angibt, so dass ein Vergleich nur begrenzt möglich ist. Des Weiteren hat BLASCHKE vier Klassen nach dem Konzept von WILHELM und JÄGER zur eindimensionalen Kinematik und Dynamik selbst unterrichtet und ihren Lernerfolg mit Tests dokumentiert und mit den anderen Klassen verglichen (Blaschke, 1999) (siehe Kapitel 3.2.3).

KRAHMER und HEUER (1992, S. 168) haben bereits zweidimensionale Mausbewegungen auf dem Versuchstisch mit PAKMA für den Amiga und mit selbsterstellten DOS-Programmen aufgenommen. Das DOS-Programm „radial“ zur zweidimensionalen Bewegungen (downloadbar unter <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~pkrahmer/home/programm.html>) bietet zum einen vier vorgefertigte Simulationen mit der Darstellung von Bahnkurve, Geschwindigkeit- und Beschleunigungsvektoren und zum anderen die Möglichkeit, reale Mausbewegungen aufzunehmen, was allerdings nicht optimal funktioniert, da die Längeneinheit und die Abstände der Vektoren nicht flexibel eingestellt werden können. REUSCH (siehe Reusch, 1997; Reusch, Heuer, 1998, 1999a, 1999b, 2000 und Reusch et al., 2000a) hat ein Unterrichtskonzept für zweidimensionale Kinematik und Dynamik mit PAKMA (für den Windows-PC) entwickelt, das er selbst in der traditionellen Stoffreihenfolge nach der eindimensionalen Kinematik und Dynamik und nach den Erhaltungssätzen in mehreren Klassen einsetzte.

Eine weitere Vorarbeit für das Gesamtkonzept war die Interventionsstudie zur graphischen Modellbildung mit VisEdit, von der im letzten Kapitel berichtet wurde.

5.3 Zur Didaktik und Methodik des Unterrichts

5.3.1 Der Begriff „Geschwindigkeit“

Die Vorstellung der Schüler von der Geschwindigkeit entspricht der Schnelligkeit (= Geschwindigkeitsbetrag, siehe Kapitel 2.2.2). Diese Vorstellung der Schüler von der Geschwindigkeit als skalare Größe wird in dem Unterrichtskonzept nicht als falsch bezeichnet, sondern in „Schnelligkeit“ umgedeutet und begrifflich konkretisiert. Wie in Kapitel 2.2.2 dargestellt wurde, ist es wichtig, den vektoriellen Charakter der physikalischen Größe „Geschwindigkeit“ deutlich zu machen. Um bei einem Unterricht zu Beginn der Sek. II dies von Anfang an zu realisieren, ist es sinnvoll, schon bei der Einführung der Geschwindigkeit von einer zweidimensionalen Bewegung auszugehen. Sowohl die Reduktion auf eindimensionale Betrachtungen, als auch im herkömmlichen Unterricht noch die Reduktion des Vektorcharakters nur auf das Vorzeichen ist nicht zur Überwindung von Fehlvorstellungen geeignet. Auch wenn es gelingt, das Vorzeichen als Richtungsangabe bei linearen Bewe-

gungen zu vermitteln, bleibt es doch oft ein Zusatz zur eigentlichen Geschwindigkeit wie die Aussage „nach links“ bzw. „nach rechts“.

Zum Einstieg in zweidimensionale Bewegungen eignet sich die Betrachtung einer Fahrradfahrt. Lässt man einen Schüler mit einem Fahrrad im Gang des Schulgebäudes fahren und sendet die Impulse des Dynamos über ein recht langes Kabel (Wilhelm, Heuer, Phan-Gia, 1997, S. 2 f.) oder eleganter per Funk an eine umgebaute PC-Maus (Heuer, Voß, Geßner, 2002, S. 15 f.), kann man am PC im Klassenzimmer den zurückgelegten Weg und die augenblickliche „Schnelligkeit“ wie bei einem Tachometer mit sehr guter Auflösung darstellen und dokumentieren. Dabei wird deutlich, dass diese Angaben trotzdem nicht reichen, um zu wissen, wo sich der Mitschüler gerade befindet. Die Schüler erkennen, dass eine Richtungsangabe bei der Bewegung bzw. eine Ortsangabe fehlt. Im Unterricht schlugen sie als Lösung u.a. GPS vor (siehe 5.3.3.3). Man braucht also ein Bezugssystem. Natürlich kann man auch ohne diese Hardware zum Impulssenden auf andere Weise deutlich machen, dass die Tachoangabe zur Beschreibung einer Bewegung nicht ausreicht und Bewegungen im Allgemeinen dreidimensional, häufig jedoch näherungsweise zweidimensional sind. Beispielsweise könnte der Schüler auf dem Fahrrad die augenblickliche Tachoanzeige permanent über ein Handy an die Klasse im Klassenzimmer übermitteln (Gröber, Poth, Wilhelm, 2006).

Genauer lassen sich Bewegungen dokumentieren und analysieren, die mit der PC-Maus auf dem Versuchstisch durchgeführt werden. Entsprechend der Bewegung der Maus erhält man auf dem Bildschirm eine Bahnkurve, die noch keine Informationen über die benötigte Zeit enthält. Um auch Ort und Zeit in der Bahnkurve zu identifizieren, um dadurch einen Eindruck von der Schnelligkeit zu bekommen, können an die Bahnkurve z.B. alle 0,1s eine Zeit-Ort-Marke oder ein Ortsvektor \vec{x} vom Bezugspunkt zu der Marke (siehe Abb. 5.1) gezeichnet werden⁴. Diese Zeit-Ort-Marken wer-

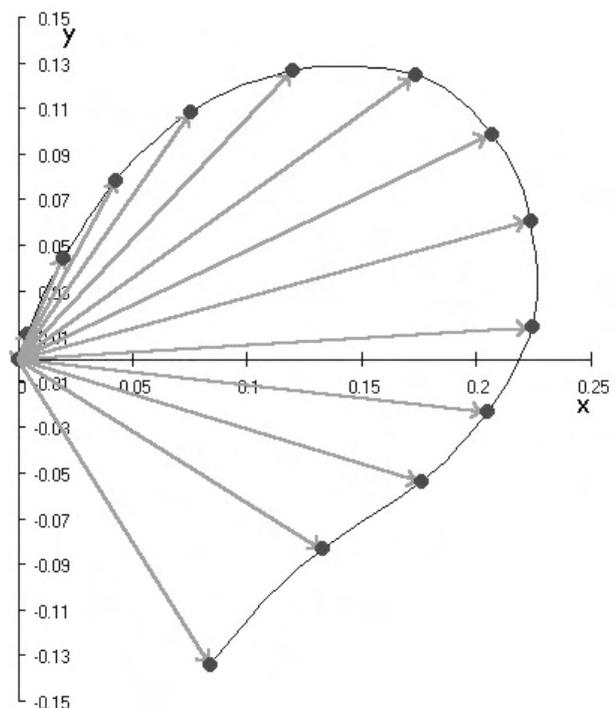


Abb. 5.1: Bahnkurve einer Computermaus mit Zeitmarken (alle $\Delta t = 0,15$ s) und Ortsvektoren

⁴ In der Physik ist es üblich, den Ortsvektor kurz $\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ mit den Komponenten x und y zu nennen. Dann müssten die Schüler damit zurechtkommen, dass beim Wechsel vom Zwei- auf Eindimensionale in allen Formeln von r auf x gewechselt wird. In der Mathematik würde man eher $\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ mit den Komponenten x_1 und x_2 verwenden. Dann müssten die Schüler aber bei der Beschriftung des Koordinatensystems umlernen, da sie aus dem Mathematikunterricht x und y gewohnt sind. Um jegliches Umlernen zu vermeiden, wurde hier der Ortsvektor mit $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ mit den Komponenten x und y bezeichnet, x hat also zwei verschiedene Bedeutungen. Der zurückgelegte Weg, also die Länge der Bahnkurve, wird wie üblich mit s bezeichnet. Üblicherweise werden in Lehrbüchern vektorielle Größen im Gegensatz zu skalaren Größen fett gedruckt. Da dies im Heft und auf der Tafel nicht möglich

den im Folgenden kurz als Zeitmarken bezeichnet. Hier wird deutlich, dass „Ort“ einen Punkt im Bezugssystem meint, während „Weglänge“ für die Länge der Bahnkurve steht.

Die Änderung des Ortes in einem Zeitintervall Δt kann nun mit einem zusätzlichen Ortsänderungsvektor $\Delta \vec{x}$ visualisiert werden, der die Bewegungsrichtung angibt und auch als „Verschiebungsvektor“ bezeichnet werden könnte (siehe Abb. 5.2). Da die Schüler der elften Jahrgangsstufe mit der Vektoraddition bereits vertraut sind, erkennen sie auch, dass $\vec{x}_{alt} + \Delta \vec{x} = \vec{x}_{neu}$ oder $\Delta \vec{x} = \vec{x}_{neu} - \vec{x}_{alt}$ gilt. Die Länge dieses Vektors hängt aber nicht nur von der Schnelligkeit, sondern auch vom gewählten Zeitintervall Δt ab. Dividiert man

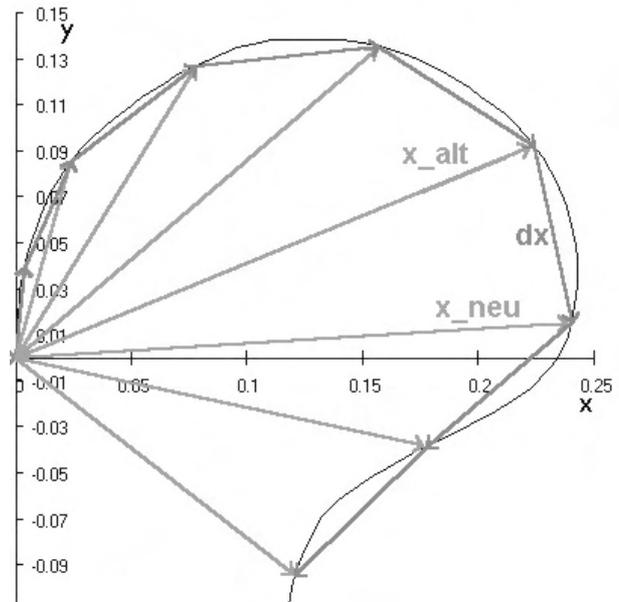


Abb. 5.2: Entstehung des Ortsänderungsvektors ($\Delta t = 0,25$ s)

den Ortsänderungsvektor durch das Zeitintervall, erhält man einen Vektor, dessen Länge die durchschnittliche Schnelligkeit in diesem Intervall und dessen Richtung die Bewegungsrichtung angibt. Das ist der Vektor der Durchschnittsgeschwindigkeit $\vec{v} = \Delta \vec{x} / \Delta t$ in dem Intervall Δt . Einen Vektor für die Momentangeschwindigkeit erhält man näherungsweise für kleine Δt . Bei einer eindimensionalen Bewegung kann der Geschwindigkeitsvektor nur zwei Richtungen haben, da er nur in positive oder negative Richtung des Koordinatensystems zeigen kann. Dies kann nun mit einem Vorzeichen vor dem Zahlenwert deutlich gemacht werden.

Auf die Besonderheiten der Durchschnittsgeschwindigkeit soll dabei nicht eingegangen werden. Nur für Lehrer wurden Hintergrundinformationen bereitgestellt, da hier Schwierigkeiten für große Δt auftauchten.⁵ Diese Schwierigkeiten können umgangen werden, wenn nur „kleine“ Zeitintervalle

ist und um stets den Vektorcharakter der Größen zu verdeutlichen, wird immer ein Pfeil auf die Größen gesetzt. Diese Schreibweise wird in dieser Arbeit durchgängig beibehalten.

⁵ Einigkeit besteht über die Definition der Momentangeschwindigkeit $\vec{v} := \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{d\vec{x}}{dt} = \dot{\vec{x}}$ und über die momentane

Schnelligkeit (= Tempo) $|\vec{v}| := \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \right| = \left| \frac{d\vec{x}}{dt} \right| = |\dot{\vec{x}}|$. Die Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeitintervall Δt ist sinnvoll-

erweise als $\vec{v}_{mittel} := \frac{\int \vec{v} dt}{\Delta t} = \left(\int v_x dt \right) \cdot \frac{1}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$ zu definieren. Das hat Konsequenzen: Ein Auto,

das mit konstanter Schnelligkeit von 10 m/s einmal im Kreis herum fährt, hat für die Umlaufdauer die Durchschnittsgeschwindigkeit Null. Ein Auto, das eindimensional 1 min mit $v = 30$ m/s und dann 1 min mit $v = -30$ m/s fährt, hat die Durchschnittsgeschwindigkeit Null. Das ist so sinnvoll; schließlich ist es insgesamt ja nicht weiter gekommen. Für die Ortsänderung gilt damit $\Delta \vec{x} = \vec{v}_{mittel} \cdot \Delta t$. Man muss also die Durchschnittsgeschwindigkeit von der Durch-

schnittschnelligkeit (= Durchschnittstempo) im Zeitintervall Δt unterscheiden: $|\vec{v}|_{mittel} := \frac{\int |\vec{v}| dt}{\Delta t}$. Das Auto, das mit

konstanter Schnelligkeit von 10 m/s einmal im Kreis herum fährt, hat auch als Durchschnittsschnelligkeit während eines Umlaufs 10 m/s. Ein Auto, das eindimensional 1 min mit $v = 30$ m/s und dann 1 min mit $v = -30$ m/s fährt, hat

Δt betrachtet werden, weil dann die Durchschnittsgeschwindigkeit fast gleich der Momentangeschwindigkeit ist. Der Übergang von Momentangeschwindigkeit zu Durchschnittsgeschwindigkeit soll dabei nicht ausführlich thematisiert werden. Nur nebenbei sei bemerkt, dass tatsächlich die Messzeit Δt verkürzt werden kann (wenn auch nicht kleiner als 25 ms), während bei einer Messung mit Lichtschranken eigentlich Δx verkleinert wird.

Dem hier beschriebenen Vorgehen über den Ortsänderungsvektor liegt folgende didaktische Überlegungen zugrunde: Zur Ermittlung der Geschwindigkeit wird eine anschauliche und leicht nachvollziehbare Konstruktion mit Pfeilen verwendet, die auch dynamisch vom Computer dargestellt werden kann und die Physik wird nicht durch Rechnungen überlagert oder gar verdeckt. Auch die Schüler selbst können zeichnerisch bei einer vorgegebenen Bahnkurve mit Zeitmarken Ortsänderungsvektoren bzw. Geschwindigkeitsvektoren zeichnerisch erstellen. Das hier noch als sehr leicht empfundene Vorgehen gewinnt erst an Bedeutung, wenn später bei der Erarbeitung des schwierigeren Beschleunigungsbegriffes ein Transfer durchgeführt wird und äquivalent aus Geschwindigkeitsvektoren über den Geschwindigkeitsänderungsvektor der Beschleunigungsvektor entsteht. Dieses Vorgehen ist aber auch vorher direkt nützlich. Wenn man sich fragt, wie die Richtung der Momentangeschwindigkeit bei einer Kreisbewegung aussieht, betrachtet man $\Delta \vec{x}$ für kleine Δt . Da $\Delta \vec{x}$ ein Vektor ist, muss es auch \vec{v} sein; ein gebogener Pfeil kommt nicht in Frage. Außerdem sieht man, dass der Vektor tangential gerichtet ist.

Durch das beschriebene Vorgehen war es den Schülern im Unterricht klar, dass Geschwindigkeit eine Richtung hat und dass diese bei eindimensionaler Bewegung bei festgelegtem Koordinatensystem durch ein Vorzeichen angegeben werden kann, obwohl es ihnen gefühlsmäßig weiterhin widerstrebt zu sagen, etwas bewege sich bezogen auf ein Koordinatensystem mit der Geschwindigkeit -10 m/s. Eine derartige Aussage verlangt ja noch eine genaue Beschreibung des Umfeldes, nämlich die Festlegung/Kennntnis der Richtung der positiven Koordinatenachse. Deshalb bevorzugten die Schüler in Unterrichtsdiskussionen den Begriff der „Schnelligkeit“, der für sie anschaulicher ist als der äquivalente Begriff „Geschwindigkeitsbetrag“.

5.3.2 Der Begriff „Beschleunigung“

Da der physikalische Beschleunigungsbegriff $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ abstrakt und komplex ist, ist es

sinnvoll zunächst eine Elementarisierung vorzunehmen. Im konventionellen Unterricht wird deshalb häufig als Elementarisierung nur die Beschleunigung bei eindimensionalen Bewegungen in

positive Richtung betrachtet $a = \frac{dv}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$, so dass Beschleunigung Schnellerwerden und negative Beschleunigung Langsamerwerden bedeutet und Fehlvorstellungen entstehen. Diese Elementarisierung erfüllt aber nicht die Forderung nach „Erweiterbarkeit“ (Kircher et al., 2000, S. 101): Bei

die Durchschnittsschnelligkeit 30 m/s. Für die im Zeitintervall zurückgelegte Weglänge s gilt: $s = |\vec{v}|_{\text{mittel}} \cdot \Delta t$, wobei s

das Wegintegral $s := \int_{\text{Startort}}^{\text{Zielort}} ds = \int_{\text{Startort}}^{\text{Zielort}} d|\vec{x}|$ längs des Weges ist.

der Behandlung der Beschleunigung beim waagrechten Wurf oder der Kreisbewegung kommt es zum Bruch. In dem hier vorgestellten Konzept wird dagegen als Elementarisierung die Geschwindigkeitsänderung betrachtet, was fachlich erweiterbar ist. Außerdem werden hier Grenzprozesse nicht betont und zunächst eine Darstellung vektorieller Größen mit Pfeilen benutzt (Kircher et al., 2000, S. 114).

Um unter anderem Schüler beim einführenden Unterricht über Kinematik/Dynamik nicht durch Begriffe und Vorstellungen aus der Statik zu belasten, hat WODZINSKI (1996) in ihrer Dissertation einen Mechanikkurs für die Sekundarstufe I mit Zugang über die Dynamik konzipiert und in kleinem Rahmen in einer Klasse erprobt. Ein wichtiges Ziel war auch hier, bei den Schülern qualitative Vorstellungen über den vektoriellen Zusammenhang von Kraft \vec{F} und Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ aufzubauen. Dazu wurde einführend der senkrechte bzw. seitliche Stoß auf eine rollende Kugel analysiert und über Plausibilitätsbetrachtungen die newtonsche Bewegungsgleichung in der Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$ erarbeitet. Dadurch konnte auf den sonst zentralen Beschleunigungsbegriff verzichtet und stattdessen mit der Geschwindigkeitsänderung gearbeitet werden, auf die die Schüler über den sich ändernden Geschwindigkeitspfeil einen recht direkten Zugang hatten, da der Geschwindigkeitspfeil längs der Bewegung für charakteristische Situationen per Hand mit eingezeichnet wurde. Dieses Konzept geht auf einen Vorschlag von JUNG zurück (Jung, 1980b, S. 30 – 59). Dort wird zuerst mit der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, die in der Ebene in eine andere Richtung als \vec{v} gehen kann, die Größe $\overrightarrow{\text{Stoß}} = m \cdot \Delta\vec{v}$ eingeführt und dann die Stoßrate (= Kraft) definiert: $\vec{F} = \frac{m \cdot \Delta\vec{v}}{\Delta t}$. Die Einführung von Stoß und Stoßrate erwies sich im Unterricht als umständlich und für Schüler nur schwer nachvollziehbar. WIESNER ging dann einige Jahre später dazu über, die newtonsche Bewegungsgleichung in der Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$ über Plausibilitätserklärungen einzuführen (Spill, Wiesner, 1988, S. 414). Wie WODZINSKI zeigte, ist dies ein geeignetes Vorgehen für den Anfangsunterricht in der Sekundarstufe I (Wodzinski, 1996).

In einem Kinematikunterricht in der Sek. II will man aber sicher nicht auf die Behandlung des Beschleunigungsbegriffes verzichten. Schon bei der Einführung der Beschleunigung ist es hier wie bei der Geschwindigkeit sinnvoll, von einer allgemeinen zweidimensionalen Bewegung auszugehen, um den Vektorcharakter immer wieder überzeugend darstellen zu können. Die eindimensionale beschleunigte Bewegung wird dann später als Spezialfall behandelt. Die Betrachtung läuft dabei analog zur Einführung des Geschwindigkeitsvektors: Die Änderung des Geschwindigkeitsvektors in einem Zeitintervall Δt wird nun mit einem zusätzlichen Ge-

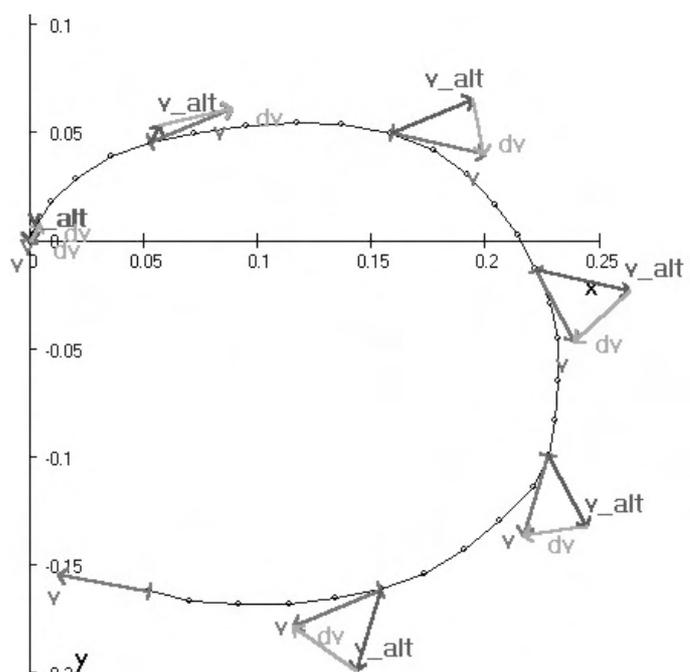


Abb. 5.3: Entstehung des Geschwindigkeitsänderungsvektors

schwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ deutlich gemacht, der angibt, was an Geschwindigkeit „dazukam“ (siehe Abb. 5.3). Es gilt also $\vec{v}_{alt} + \Delta\vec{v} = \vec{v}_{neu}$ oder $\Delta\vec{v} = \vec{v}_{neu} - \vec{v}_{alt}$. Die Länge dieses Vektors hängt wieder vom gewählten Zeitintervall Δt ab. Dividiert man den Geschwindigkeitsänderungsvektor durch das Zeitintervall, erhält man einen Vektor, der unabhängig von Δt etwas über die Änderung des Geschwindigkeitsvektors aussagt. (Man könnte, um die Analogie zur Einführung der Geschwindigkeit als Ortsänderung deutlich zu machen, von der „Änderungsgeschwindigkeit des Geschwindigkeitsvektors“ sprechen (Bambey et al., 1980, S. MD 9).) Das Ergebnis ist der Vektor der Durchschnittsbeschleunigung $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ (siehe Abb. 5.4). Einen Vektor für die Momentanbeschleunigung erhält man näherungsweise für kleine Δt .

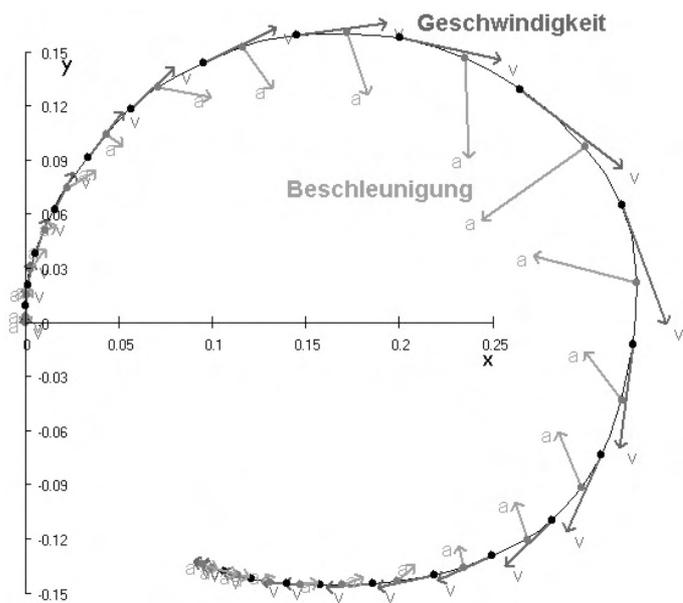


Abb. 5.4: Geschwindigkeit und Beschleunigung bei einer Bewegung, die erst schneller, dann langsamer wird

Einen Vektor für die Momentanbeschleunigung erhält man näherungsweise für kleine Δt .

Dieses Vorgehen, \vec{a} zu bestimmen, ist natürlich nichts weiter als die Umsetzung der Definition des Beschleunigungsvektors in Operations- bzw. Konstruktionsschritte.⁶ Wie wichtig diese Fähigkeit für das Verständnis des Beschleunigungsbegriffes ist, haben LABUDDE, REIF und QUINN (1988) gezeigt: Nachdem mit sechs Studenten nach dem normalen Physikvorlesung im kurzen Individualunterricht (20 – 25 Minuten) die zum Beschleunigungskonzept gehörigen Prozeduren erarbeitet wurden, konnten die Studenten auch nach ein paar Tagen Problemsituationen, wie sie sich z.B. aus Bewegungen in Abb. 5.7 ergeben, fast immer (95 %) korrekt lösen (im Vortest 40 %). Das Langzeitverhalten wurde in dieser Studie nicht weiter untersucht.

Die Schritte zur Konstruktion von \vec{v} bzw. \vec{a} sollen nicht nur vom Lehrer und Computer durchgeführt werden, sondern die Schüler sollen selbst solche Konstruktionen durchführen, um graphisch die Pfeile zu erhalten (siehe Arbeitsblätter auf CD im Anhang oder Wilhelm, Koch, 2004, S. 34 f.) (andere Aufgaben: Wodzinski, Wiesner, 1994b, S. 204). Darüber hinaus sollten die Schüler auch einmal aus den Ortsdaten (einer ein- bzw. zweidimensionalen Bewegung) die Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte gemäß $x \rightarrow \Delta x \rightarrow v \rightarrow \Delta v \rightarrow a$ berechnen (siehe Arbeitsblätter auf CD im Anhang).

Betrachtet man nun auf diese Weise eine eindimensionale Bewegung, stellt man fest, dass die Vektoren \vec{v} und \vec{a} genau dann die gleiche Richtung haben, wenn die Bewegung schneller wird, und entgegengesetzt gerichtet sind, wenn die Bewegung langsamer wird (siehe Abb. 5.5). Ist ein Koordinatensystem gegeben, ergibt sich daraus, dass \vec{v} und \vec{a} genau dann das gleiche Vorzeichen ha-

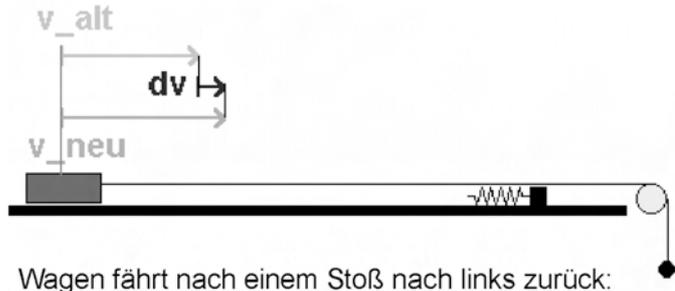
⁶ Entsprechende Konstruktionsprozeduren setzt REIF anhand von Zeichnungen auch in Lehrbüchern zur Mechanik (Reif, 1995, S. 31) ein (siehe auch Reif, 1985, S. 137).

ben, wenn die Bewegung schneller wird, und verschiedene Vorzeichen haben, wenn die Bewegung langsamer wird (siehe Abb. 5.6) (Wilhelm, 1994, S. 177 ff.). Des Weiteren stellt man fest, dass dann, wenn \vec{v} und \vec{a} immer senkrecht zueinander sind, die Bewegung auf einem Kreis mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag bzw. konstanter Schnelligkeit stattfindet.

Fährt man nun mit der PC-Maus beliebig auf dem Versuchstisch umher, sieht man, dass \vec{v} und \vec{a} weder in gleiche oder in entgegengesetzte Richtung weisen noch senkrecht zueinander sind (Abb. 5.4). Jedoch kann man den Beschleunigungsvektor \vec{a} in einen senkrechten Anteil \vec{a}_n (Normalbeschleunigung) und einen tangentialen Anteil \vec{a}_t (Tangentialbeschleunigung) zerlegen und es ist den Schülern schnell klar, dass der senkrechte Anteil \vec{a}_n für die Richtungsänderung und somit die Kurvenfahrt verantwortlich ist, während der tangential Anteil \vec{a}_t die Änderung der Schnelligkeit bewirkt.

Das hier beschriebene Vorgehen zur Erarbeitung des Beschleunigungsbegriffes, das analog zur Erarbeitung des Geschwindigkeitsbegriffes läuft, ist eine anschauliche Konstruktion. Entscheidend dabei ist, dass ein Teilschritt der Konstruktion schon wichtige Informationen erhält: Der Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ enthält schon die Richtung des Beschleunigungsvektors \vec{a} und die Längen dieser Vektoren sind bei festem Zeitintervall Δt proportional. Für viele konkrete Aufgaben bedeutet das, dass es bei der Ermittlung der Beschleunigungsrichtung genügt, sich zu überlegen, wie die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ aussieht. Dazu genügt es ein \vec{v}_{alt} und ein \vec{v}_{neu} zu zeichnen und man erhält so den $\Delta\vec{v}$ -Vektor und damit die Beschleunigungsrichtung (Beispiel: Ein Wagen fährt eine schiefe Ebene hinauf. Der nach links gerichtete \vec{v} -Vektor wird kürzer, $\Delta\vec{v}$ ist nach rechts gerichtet und damit auch die Beschleunigung. Das Vorzeichen der Beschleunigung hängt von der Wahl des Koordinatensystems ab). Ableitungen bzw. Ratengrößen wie dx/dt und dv/dt sind dagegen für Schüler schwer zu verstehen, da sie recht abstrakt sind. Im konventionellen Vorgehen wird für Schüler nicht deutlich, warum der Alltagsbegriff „Beschleunigung“ im Sinne von „Schnellerwerden“ auch auf sein Gegenteil „Langsamerwerden“

Wagen wird nach rechts gezogen:



Wagen fährt nach einem Stoß nach links zurück:

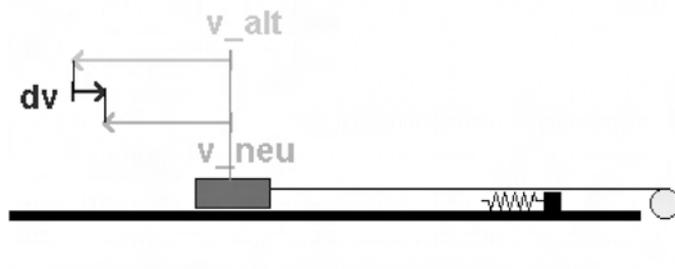


Abb. 5.5: Lage von \vec{v} und $d\vec{v} = \vec{a} \cdot dt$ zueinander beim Schneller- und Langsamerwerden

Das Vorzeichen von v und a :

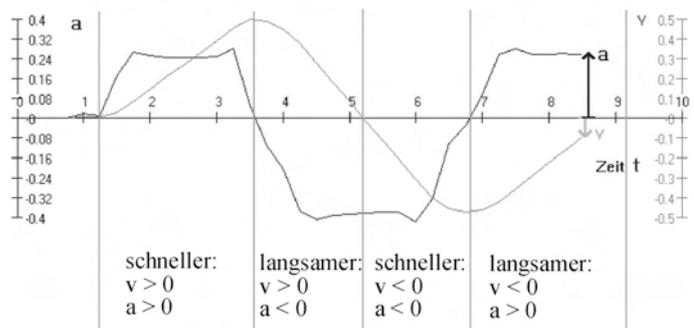


Abb. 5.6: Vorzeichen von v und a

den“ erweitert wird. Die hier durchgeführte Erweiterung auf „Geschwindigkeitsänderung pro Zeit“ ist dagegen allgemeiner und leichter einzusehen.

Die folgende Frage ist bei der Erstellung der PAKMA-„Projekte“ bezüglich der richtigen örtlichen Zuordnung von Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor zu klären: Möchte man die Konstruktion betonen oder immer zum gleichen Zeitpunkt am momentanen Ort alle Größen als Pfeile sehen? Liegt zu einem Zeitpunkt t_1 der Ortsvektor \vec{x}_1 und nach dem Zeitintervall Δt zum Zeitpunkt t_2 der Ortsvektor \vec{x}_2 vor, kann man daraus den Ortsänderungsvektor und den (mittleren) Geschwindigkeitsvektor berechnen, der zu diesem Zeitintervall Δt gehört. Sinnvollerweise zeichnet man ihn an die Bahnkurve und zwar ungefähr in die Mitte des Zeitintervalls zwischen \vec{x}_1 und \vec{x}_2 . Hat man außer diesem Geschwindigkeitsvektor noch denjenigen aus dem vorherigen Intervall, kann man daraus den Geschwindigkeitsänderungsvektor und damit den Beschleunigungsvektor berechnen. Sinnvollerweise zeichnet man ihn an die Bahnkurve und zwar ungefähr in die Mitte zwischen die beiden Geschwindigkeitsvektoren, also bei \vec{x}_1 . Damit sind die drei ermittelten Vektoren \vec{x} , \vec{v} , und \vec{a} gegeneinander verschoben (siehe Abb. 5.4). Möchte man aber im anderen Fall zu jedem betrachteten Zeitpunkt zwei Größen (\vec{x} und \vec{v} bzw. \vec{v} und \vec{a}) oder alle drei Größen als Pfeile sehen, muss man im PAKMA-Kernprogramm jeweils die betrachteten Intervalle unterschiedlich und richtig wählen. Welche der beiden Varianten man wählt, hängt vom Ziel ab, das man mit der Darstellung verfolgt. Die Problematik wird im Unterricht jedoch nicht thematisiert, sollte aber dem Lehrer bewusst sein, damit er angemessen reagiert, wenn sehr gute Schüler darauf aufmerksam werden.

In dem Unterrichtsgang wird also von Anfang an das Allgemeingültige in den Vordergrund gestellt und behandelt und erst später Spezialfälle betrachtet. Durch dieses Vorgehen werden die Definitionsgleichungen $\vec{v} = \Delta\vec{x} / \Delta t$ und $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ betont, die bei herkömmlichem Vorgehen nur wenig Beachtung finden. Schon aus Zeitgründen wird dagegen das Rechnen mit den Bewegungsfunktionen⁷, die nur für Spezialfälle gelten, nicht in den Vordergrund gestellt.

Wie unter 4.2.2 bereits erläutert, ist die häufige Überbetonung von Rechen- und Einsetzaufgaben nicht sinnvoll. Qualitative Aufgaben sind entscheidend für das Verständnis; letzteres ist wichtiger als die Fähigkeit, physikalische Formeln zu kombinieren. Mit solchen qualitativen Aufgaben können auch Alltagsvorstellungen bewusst aufgegriffen und physikalisch hinterfragt werden. Das hier be-

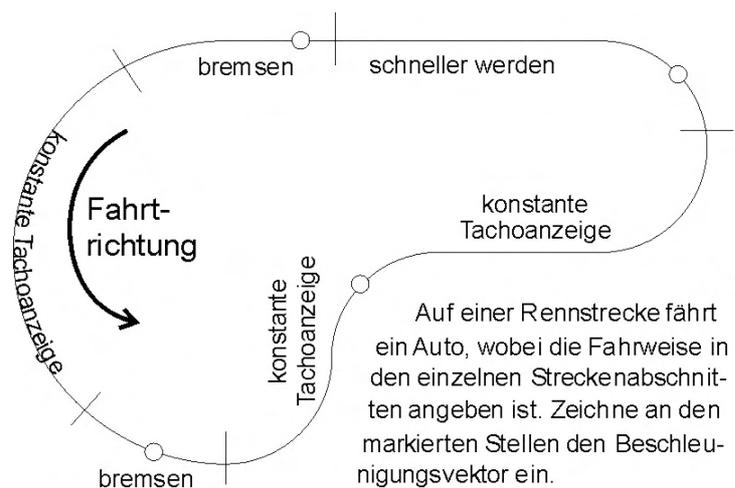


Abb. 5.7: Eine qualitative Aufgabe zum Beschleunigungsvektor

⁷ Der nicht eindeutige Begriff „Bewegungsgleichung“ wird vermieden, da er sowohl für die Bewegungsdifferentialgleichungen als auch für deren Lösung benutzt wird. Die Lösungen der Bewegungsdifferentialgleichungen werden deshalb hier „Bewegungsfunktionen“ genannt.

beschriebene Vorgehen ermöglicht diverse qualitative Aufgaben. Eine solche qualitative Aufgabe zum Beschleunigungsbegriff ist in Abb. 5.7 zu sehen, bei der die Richtung des Beschleunigungsvektors angegeben werden soll. Umgekehrt kann man auch die Bewegungsrichtung und Beschleunigungsvektoren vorgegeben und eine Beschreibung der Bewegung verlangen (siehe Abb. 5.8).

Bei einem Rundkurs siehst du die Beschleunigung des Autos an drei markierten Punkten. Beschreibe die Fahrweise an diesen Punkten.

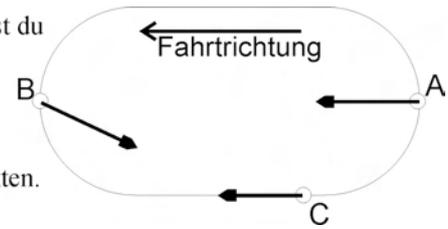


Abb. 5.8: Eine weitere qualitative Aufgabe

In dem hier entworfenen Konzept wird die Beschleunigung erst qualitativ an einer zweidimensionalen Bewegung eingeführt und analysiert. Dann werden diverse qualitative Aufgaben zur Beschleunigung behandelt, die auf Kosten quantitativer Aufgaben durchgeführt werden. Erst jetzt nach der Festigung des Begriffs werden die Bewegungsfunktionen für den Spezialfall einer geradlinigen Bewegung mit konstanter Beschleunigung behandelt und einige quantitative Aufgaben dazu gelöst. Bei diesen Aufgaben sollte - wo immer möglich - die zurückgelegte Weglänge bzw. der Ort als Fläche unter dem t - v -Graphen berechnet werden. Das ist ein einfaches und vor allem allgemeingültiges Verfahren, während die Bewegungsfunktionen nur für besondere Spezialfälle gelten. Die ausführliche, quantitative Behandlung vieler anspruchsvoller Aufgaben zum Überholvorgang ist in diesem Unterrichtskonzept nicht vorgesehen, da die Unterrichtszeit zum Aufbau qualitativen Verständnisses gebraucht wird. Aufgrund der verkehrserzieherischen Relevanz wird ein einfaches Beispiel behandelt.

Da die Vorstellungen der Schüler den physikalischen Vorstellungen i.A. widersprechen, genügt es nicht, sich nur anzuhören, wie es die Physik sieht. Man muss sich intensiv damit auseinandersetzen und Erfahrungen damit sammeln. Deshalb sind hier Schülerübungen besonders hilfreich. Der in diesem Kapitel beschriebene Unterrichtsgang ist zwar im normalen Klassenunterricht möglich. Noch effizienter ist es aber, wenn die Schüler im Computerraum selbst Experimente mit der Maus zur zweidimensionalen Bewegung durchführen, was leicht realisierbar ist (Reusch, Gößwein, Kahmann, Heuer, 2000a, S. 270 f.). Dabei können alle zur Erarbeitung der Begriffe und Zusammenhänge genutzten Messprogramme (z.B. Abb. 5.1 bis 5.4) von den Schülern erneut verwendet werden. Außerdem stehen noch zwei PAKMA-Simulationen zur Verfügung, die bewusst auf die Spielbegeisterung (Computerspiele mit Wettbewerbscharakter) der Schüler bauen, um auf diese Weise eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema zu erreichen. Man wird bei diesen Beispielen nämlich feststellen, dass Probieren nicht zum Ziel führt, sondern dass man sich von der Physik her Problemlösestrategien überlegen muss. Im einen Simulationsprogramm geht es noch einmal um das Verständnis der Beschleunigung. Eine Rakete soll innerhalb von 60 Sekunden auf der Mondoberfläche mit einem Geschwindigkeitsbetrag von weniger als 10 m/s landen und zur Veränderung der Geschwindigkeit steht im Simulationsprogramm der Schieber „Beschleunigung“ zur Verfügung. Hier wird sehr schnell deutlich, ob die Schüler meinen, über den Schieber „Beschleunigung“ direkt die Geschwindigkeit vorgeben zu können oder ob ihnen die Bedeutung der Beschleunigung als Geschwindigkeitsänderung klar ist. Intuitiv wird häufig als erstes der Schieber „Beschleunigung“ wie

ein Geschwindigkeits-Schieber verwendet, was eindrücklich zur Bruchlandung der Rakete auf der Mondoberfläche führt. Mit einer guten Strategie kann der angegebene Landerekord leicht verbessert werden. In dem zweiten Beispiel zum Überholen wird ebenfalls ein Verständnis der Beschleunigung verlangt und außerdem etwas zur Verkehrserziehung unternommen. Das Simulationsprogramm ist so eingestellt, dass ohne eine Veränderung der Startwerte und ohne Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h ein Überholvorgang nicht möglich ist.

Häufig wird in der Kinematik auch der freie Fall behandelt, da man hier eines der wenigen Beispiele hat, bei dem wirklich eine eindimensionale Bewegung mit konstanter Beschleunigung auftritt. Es ist aber nicht sinnvoll hier nur den idealisierten Vorgang zu behandeln. Schüler wissen, dass nicht alle Körper gleich fallen, sondern schwere Dinge bei sonst gleichen Eigenschaften schneller fallen als leichte. Sie interessieren sich nicht für Bewegungen in evakuierten Fallröhren bzw. auf dem Mond, sondern für reale Fallbewegungen mit Luftwiderstand, die erst bei der Dynamik behandelt werden können. Deshalb ist es sinnvoll, alle Fallbewegungen einschließlich des freien Falls erst als Anwendung der newtonschen Gesetze zu behandeln.

Stunde	Inhalt, Thema:
1 - 3	Unterschied Weg - Ort (Fahrradbewegung mit Tachometer), Maus als zweidimensionaler Sensor, Bezugssystem, Bahnkurve, Zeitmarken, Ortsvektor (2-dimensional) , Einschub: Wiederholung Vektorrechnung, Ortsänderungsvektor (2-dimensional) , Geschwindigkeitsvektor (2-dimensional) , Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit, 1-dimensional mit Sonarmeter: Orts-, Ortsveränderungs- und Geschwindigkeitsvektor
4	Zeit-Ort-Funktion für Spezialfälle konstanter Geschwindigkeit (1-dimensional)
5	Übung, Geschwindigkeitsänderungsvektoren (2-dimensional)
Additum 1	Schülerübung im Computerraum
6	Der Begriff des Beschleunigungsvektors (2-dimensional und 1-dimensional)
7	Lage von \vec{v} und \vec{a} zueinander (schneller, langsamer, Kreis), Normal- und Tangentialbeschleunigung
8	Übung
Lernzielkontrolle	1. Stegreifaufgabe zur Beschleunigung und Verbesserung
9	Einführung in Modellbildung, Modellbildung zur Kinematik mit Graphenvorhersage
10	Zeit-Geschwindigkeits-Funktion für 1-dimensionale Bewegungen, Ort im Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm, Bewegungsfunktionen ohne Anfangsgeschwindigkeit,
11	Übung, Bewegungsfunktionen und Bewegungsdiagramme mit Anfangsgeschwindigkeit
12	Übung
13	Übung, Reaktions- und Bremsweg
14	Überholvorgänge, Verhalten im Straßenverkehr
Additum 2	Schülerübung im Computerraum

Tab. 5.1: Grobstruktur des Kinematikunterrichts

Das hier beschriebene Unterrichtskonzept, bei dem der Kinematikunterricht mit der zweidimensionalen Bewegung begann, wurde im Schuljahr 2001/2002 vom Autor in einer Klasse getestet. Eine knappe Übersicht über die Grobstruktur des Unterrichts gibt Tab. 5.1. Eine Angabe von Lernzielen oder Medien ist aus Platzgründen nicht möglich. Für die Einführung und Diskussion der Begriffe nach dem hier dargestellten Vorgehen sowie der Behandlung qualitativer Aufgaben wurden acht

Unterrichtsstunden benötigt. Für die anschließende Herleitung der eindimensionalen Bewegungsfunktionen, für das quantitative Rechnen damit und für eine Verkehrserziehung durch Behandlung von Bremswegen und Überholvorgängen wurden nochmals fünf Unterrichtsstunden verwendet.

5.3.3 Verschiedene Realisierungsmöglichkeiten zur Kinematik

Bei der Analyse von zweidimensionalen Bewegungen wird man sicher nicht damit zufrieden sein, nur erfundene und auf Tafel oder Papier gezeichnete zweidimensionale Bewegungen zu betrachten. Man möchte im Physikunterricht auch reale zweidimensionale Bewegungen messen und untersuchen können. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten.

5.3.3.1 Messung mit Maus oder Graphiktableau

Eine normale PC-Maus ist ein leistungsfähiges, präzises und günstiges Messgerät zur Erfassung zweidimensionaler Bewegungen. In PAKMA gibt es zwei Realisierungsmöglichkeiten: 1. Die von einer von Windows erkannten Maus gesendeten Daten werden vom Windows-Maustreiber bearbeitet und von PAKMA übernommen (siehe Anhang Kapitel 11.1.1.1). 2. Eine in der Systemsteuerung abgemeldete oder erst nach Systemstart angemeldete serielle Maus kann von PAKMA als serielles Messgerät ausgelesen werden (siehe Anhang Kapitel 11.1.1.3). Im Unterricht wurde stets die erste Variante gewählt, da man nur eine Maus zur Bedienung und zur Messung braucht (Beispiele siehe Abb. 5.1 – 5.4).

Statt einer PC-Maus kann auch ein Graphiktableau verwendet werden (Wilhelm, Koch, 2004, S. 36). Während man bei der Maus darauf achten muss, dass sie nicht verdreht wird, also immer in die gleiche Richtung ausgerichtet ist, hat man beim Graphiktableau nicht dieses Problem (siehe Anhang Kapitel 11.1.1.2).

Wenn die Bewegung von einer geeigneten Software, z.B. mit PAKMA 2002, aufgenommen wird sowie alle gewünschten Vektoren sofort konstruiert und dargestellt werden (siehe Abb. 5.4), spart man Zeit, die man für weitere Versuche nutzen kann. Für eine schriftliche Übung kann man aber auch nur die Bahnkurve mit Zeitmarken erstellen und ausdrucken, so dass die Schüler selbst die Vektoren konstruieren müssen.

Mit allen drei Varianten sind nicht nur Demonstrationsexperimente, sondern auch Schülerübungen im Computerraum möglich (Reusch, Gößwein, Kahmann, Heuer, 2000a, S. 270 f.). Die Messung mit Maus oder Graphiktableau hat entscheidende Vorteile gegenüber den anderen Varianten (Kapitel 5.3.3.2 bis 5.3.3.4): Die Schüler können - falls gewünscht - die Geschwindigkeits- und insbesondere Beschleunigungspfeile sofort gleichzeitig mit der Bewegung der eigenen Hand sehen und Zusammenhänge zwischen der Bewegung und der Darstellung herstellen. Es kann versucht werden, bestimmte Bewegungen zu erzeugen und wenn das Ergebnis nicht dem Wunsch entspricht, kann die Messung sofort wiederholt werden. Man gewinnt dadurch Unterrichtszeit, dass man nicht jedes Mal selbst die Geschwindigkeits- und insbesondere Beschleunigungspfeile zeichnen muss, sondern dies von der Software übernommen wird.

5.3.3.2 Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen

Eine experimentelle Alternative zum Messen zweidimensionaler Bewegungen und zum Festhalten der Zeitmarken und Betrachten der Ortsänderungen (ohne ein Messwerterfassungssystem wie PAKMA) ist die Aufnahme einer zweidimensionalen Bewegung mit einer Videokamera. Die Bilder eines Videos sind stets zweidimensional und haben feste Zeitabstände (bei Videokameras 0,04 s). So können interessante Bewegungen aus der Alltagswelt, z.B. aus dem Bereich Sport (Wilhelm et al., 2003) betrachtet werden, die anders nur schwierig zu messen sind. Zu beachten ist, dass eine Videokamera normalerweise in einer Sekunde nicht 25 ganze Frames aufnimmt, sondern jedes Bild wird in zwei Halbbilder aufgeteilt, die in Abständen von $1/50$ s abwechselnd aufgenommen werden (Zeilensprungverfahren). Bei einer schnellen Bewegung ergibt sich damit das Problem, dass sich das Objekt in diesen 0,02 s merklich weiterbewegt und somit bei den geraden Zeilen an einer anderen Stelle als bei den ungeraden Zeilen ist (Kammeffekt). Günstig ist, wenn die Kamera einen Modus für Vollbilder hat (Bezeichnung z.B. „Progressiv Mode“, 12,5 Frames pro Sekunde in 0,08 s Zeitabstand). Damit das Objekt nicht unscharf wird, ist evtl. zusätzlich noch eine kurze Belichtungszeit für die einzelnen Frames zu wählen.

Am einfachsten erhält man die Zeit-Ort-Marken mit einer auf dem Bildschirm gelegten Folie, auf der man dann auch alle Vektoren konstruieren kann. Alternativ kann am Computer mit einem Videoanalyseprogramm zu jedem Bild der Ort ermittelt werden. So ergeben sich Zeitmarken, die zu einer Bahnkurve verbunden werden können. Es gibt mehrere deutschsprachige Programme, die für den Unterricht erstellt wurden. Einfache Programme, die lediglich eine Auswertung des Videos per Hand erlauben, sind DiVA (Dziarstek, Hilscher, 1998), David (Seifert et al., 1997), Galileo (Krahmer et al., 1997), Viana (Nordmeier, 2002) und ViMPS (May, Kayser, 2003). Eine Videoanalyse und ein Vergleich mit Messdaten oder den Daten einer Modellbildung bietet Coach 5. Eine automatische Videoanalyse ist mit AVA (Suleder et al., 2002; Wilhelm et al., 2003) möglich (bei Viana nur bei sehr großen Farbkontrasten). Das Softwareprogramm AVA verfolgt das bewegte Objekt nach einer einmaligen Markierung des Objektes, wobei es zu 100 Frames (= Bilder) nicht mehr als etwa 20 Sekunden braucht. Damit entfällt die Markierung des Objektes von Hand in jedem einzelnen Frame wie in herkömmlichen Videoanalyseprogrammen. Beim Videofilmen sollte jedoch der Hintergrund weitgehend unbewegt sein und ein hoher Helligkeits- und/oder Farbkontrast des Objekts gegenüber dem Hintergrund ist wünschenswert.

Alle Videoanalyseprogramme zeichnen über das Video die Zeitmarken und sind in der Lage einen x - y -Graphen mit den Messpunkten, also eine Bahnkurve, zu zeichnen. Man kann nun einen Screenshot des Videos mit Zeitmarken oder den x - y -Graphen mit den Messpunkten auf Papier ausdrucken und darauf Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren konstruieren (Gröber, Poth, Wilhelm, 2006).

Wünschenswert wäre aber, wenn das Konstruieren der Vektoren vom PC übernommen werden würde und eine Anzeige zusammen mit dem Video möglich wäre. In PAKMA kann man das Video (als avi-Datei) und die Analysedaten des Videoanalyseprogramms (als Textdatei) laden und von PAKMA können aus den Ortsdaten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet werden. Im Hintergrund werden nacheinander die einzelnen Frames des Videos gezeigt und davor kann das

bewegte Objekt auf dem Video seine Bahnkurve, d.h. den x - y -Graphen, aufzeichnen und seinen Ort in festen Zeitabständen stempeln. An das bewegte Objekt des Videos kann man Vektoren für die Darstellung seiner augenblicklichen Geschwindigkeit oder für seine augenblickliche Beschleunigung anheften (siehe Abb. 5.9), die sich mitbewegen und gestempelt werden können. PAKMA zeichnet also einen Vektor mit dem Anfangspunkt an den Ort, der aus der Videoanalyse ermittelt wurde mit der berechneten Länge und Richtung. Voraussetzung ist, dass der Graph richtig skaliert und an die richtige Stelle gesetzt wurde. Dies ist allerdings zu aufwändig, als dass es in der Unterrichtsstunde oder von Schülern gemacht werden kann. Einfacher, aber weniger anschaulich ist es, wenn man nur die Videoanalysedaten lädt und darstellt und auf die Darstellung des Videos verzichtet. Wünschenswert wäre ein Videoanalyseprogramm, das automatisch Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeile gemäß den Messdaten erzeugt.

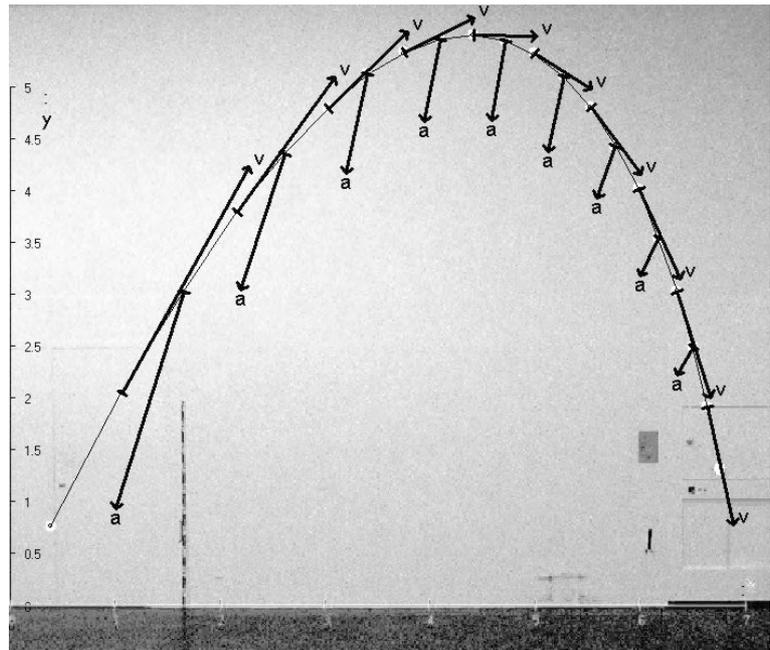


Abb. 5.9: Video eines Federballfluges in PAKMA mit Vektorpfeilen entsprechend den Daten der Videoanalyse

Als Beispiel wurde hier die Bewegung eines Federballs im Hörsaal gefilmt und mit AVA und PAKMA ausgewertet. Man sieht, dass hier die Beschleunigung nicht konstant ist und so kein Spezialfall vorliegt. Während Ort und Geschwindigkeit bei der Videoanalyse noch recht gut bestimmt werden, zeigen sich bei der Beschleunigung als zweite Ableitung des Ortes die Grenzen dieser Vorgehensweise in der großen Messgenauigkeit der ermittelten Beschleunigung.

5.3.3.3 Messung mit einem GPS-Empfänger

Im Unterricht nach dem hier dargestellten Konzept hat ein Schüler vorgeschlagen, zweidimensionale Bewegungen mittels GPS aufzuzeichnen (siehe Kapitel 5.3.1), was im Jahr 2001 allerdings noch sehr teuer gewesen wäre. Mittlerweile gibt es aber für den Sport- und Freizeitbereich GPS-Empfänger, die kostengünstig sind, am Handgelenk befestigt werden und die zurückgelegte Bahnkurve mit Zeitinformationen aufzeichnen können, was am PC ausgelesen werden kann (Backhaus, 2005). Für die hier aufgezeichneten Bewegungen wurde der GPS-Empfänger „Garmin Foretrex 101“ verwendet, der eine Ortsauflösung von meist unter 10 m und eine Zeitauflösung von 1 s hat sowie bis zu 10.000 Bahnpunkte speichern kann. Nachdem man ein sinnvolles Kartengitter („Grid“), am Besten „Gauss-Krüger“, das metrische System sowie eine Aufzeichnung in gleichen kleinen Zeitintervallen eingestellt hat, kann man Bahnkurven aufzeichnen.

Zu Fuß oder mit einem Fahrrad kann man nun auf einem großen Platz Kreisbögen oder Schlangenlinien zurücklegen und speichert die Bahnkurve ab. Dabei ist darauf zu achten, dass große Bahn-

kurven mit großem Krümmungsradius ($> 20 \text{ m}$) verwendet werden. Mit der Freeware-Software „GPS Utility“ können die Daten anschließend als Textdatei vom GPS-Empfänger heruntergeladen werden. In Excel werden die interessanten Daten ausgewählt (x-Koordinate, y-Koordinate, Zeit in Sekunden). Um sechs- bzw. siebenstellige Ortskoordinaten zu vermeiden, ist es sinnvoll, die Differenz zu einem willkürlich festgelegten Punkt zu bilden. Diese Daten werden als csv-Datei gespeichert und in PAKMA eingelesen. Hier können nun je nach Wunsch Ortsänderungs-, Geschwindigkeits-, Geschwindigkeitsänderungs- oder Beschleunigungsvektoren an die Bahnkurve gezeichnet werden (siehe Abb. 5.10).

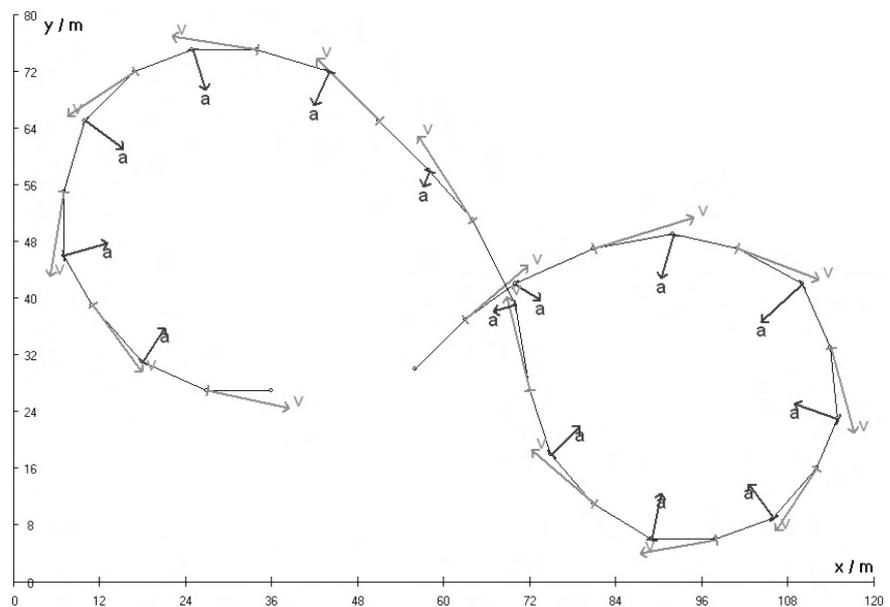


Abb. 5.10: Bahnkurve einer Fahrradfahrt mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren (Vektoren alle 10 Sekunden eingezeichnet)

Benutzt man ein vorgefertigtes „PAKMA-Projekt“ ist das Datenaufarbeiten und -darstellen bei geübten Benutzern in einigen Minuten möglich, aber doch aufwendiger als die Messung mit der Maus (Kapitel 5.3.3.1), bei der eine Darstellung in Echtzeit möglich ist. Es wird damit aber ein weiterer Messbereich erschlossen: Während man bei der Messung mit der Maus oder dem Graphiktableau Bewegungen im Dezimeterbereich und bei der Videoanalyse Bahnkurven im Meterbereich aufnimmt, haben die Bahnkurven bei der GPS-Messung eine Länge von über hundert Metern. Während also die Mausmessung wegen ihrer Einfachheit für die Erarbeitung der kinematischen Begriffe sowohl für Demonstrations- als auch Schülerexperimente das geeignetste Mittel ist, ist die Videoanalyse und die GPS-Messung als Ergänzung und für Projekte attraktiv, da reale Alltagsbewegungen außerhalb der Schule betrachtet werden können.

5.3.3.4 Die Spurenplatte

Schon bevor elektronische Uhren für die Schule erschwinglich waren, wurden Fahrbahnversuche gemacht und kurze Zeiten mit einfachen Tricks gemessen. Ein historisches Beispiel ist die nicht mehr lieferbare Schwefelbahn der Firma Kröncke (Groeneveld, 1968), bei der auf eine schwarze Bahn gelber Schwefelstaub gestreut wird. Der Schwefel wird beim Verteilen mit dem Pinsel und durch ein Metallstück am Wagen durch Reibung negativ aufgeladen (Bergmann, 1952, S. 7). Legt man an die Fahrbahn über einen $1 \text{ M}\Omega$ -Widerstand oder einen Sicherheitstransformator die Phase des 50 Hz-Wechselstromnetzes, wird dieser Staub vom Metallstück bzw. der Fahrbahn abwechselnd angezogen und abgestoßen und es entstehen gelbe und schwarze Streifen, die für je 0,01 s stehen. Auf dieser Fahrbahn lassen sich dann die gleichmäßig beschleunigte Bewegung, das Grundgesetz der Mechanik (Newton 2), die Umwandlung von potentieller in kinetische Energie, der Im-

pulssatz, der elastische und unelastische Stoß und andere Themen behandeln (Groeneveld, 1968). Die gleichen Versuche mit eindimensionalen Bewegungen nach prinzipiell gleichem Prinzip sind mit den Zeit-Registriergerät von Phywe oder dem „Zeit-Registriergerät mit Klemmreiter“ der Firma Leybold möglich, bei dem der Wagen einen Streifen Thermopapier mitzieht und ein Taktgeber 50 Punkte pro Sekunde auf das Papier zeichnet.

Die Idee mit den Schwefelstaubfiguren hatte früher den Vorteil, dass damit auch kleine Zeiten bei Bewegungen gemessen werden konnten, die nicht auf der Fahrbahn stattfinden. Dazu gab es von Kröncke (nun bei Elwe oder identisch bei Kronas) eine eloxierte Metallplatte, genannt Spurenplatte, und einen Handschreiber. Über je einen 1 M Ω -Widerstand wurden früher beide an die zwei Pole der Netzspannung angeschlossen. Der heute kaufbare „Taktgeber und Transformator“ hat zusätzlich einen Sicherheitstrenntrafo gemäß VDE. Schließt man Spurenplatte und Handschreiber kurz, können keine Spuren aufgezeichnet werden. Zieht man den Handschreiber über die bestaubte Platte, entstehen Spuren so lange, wie der Kurzschluss nicht besteht. Die kurze Zeitdauer ohne Kurzschluss kann durch Auszählen der Streifen ermittelt werden. Mit Hilfe eines Fallgerätes konnte daraus z.B. die Fallbeschleunigung ermittelt werden. Mit weiteren Schaltungen und einem Doppelschreiber ist es sogar möglich, die Frequenzen akustischer und elektrischer Schwingungen aus den Streifen auf der Platte zu ermitteln (Groeneveld, 1968). Wie vielfältig die Einsatzmöglichkeiten dieses alten Messsystems waren, sieht man daran, dass GROENEVELD von 1952 bis 1967 allein in der Praxis der Naturwissenschaften 39 Beiträge dazu veröffentlichte.

Diese Spurenplatte (technische Realisierung siehe Anhang 11.1.2) wird hier nach einer Idee von KOCH nicht für die quantitative Ermittlung einzelner Werte, sondern für eine qualitative Schülerübung genutzt (Willhelm, Koch, 2004). Man zeichnet mit einem trockenen Finger zweidimensionale Bahnkurven in den Schwefelstaub und nutzt nicht nur die Zeitinformation, sondern auch die Ortsinformation. Wenn der Finger positiv geladen ist, zieht er den Staub an, die Platte stößt ihn ab. 1/100 s später ist der Finger negativ, die Platte positiv - der Staub wird abgestoßen und bleibt liegen. Dadurch entstehen die Spuren, die als ästhetisch ansprechend empfunden werden (siehe Abb. 5.11). Es geht dann nicht darum, welchen Wert, sondern welche Richtung die Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung haben.

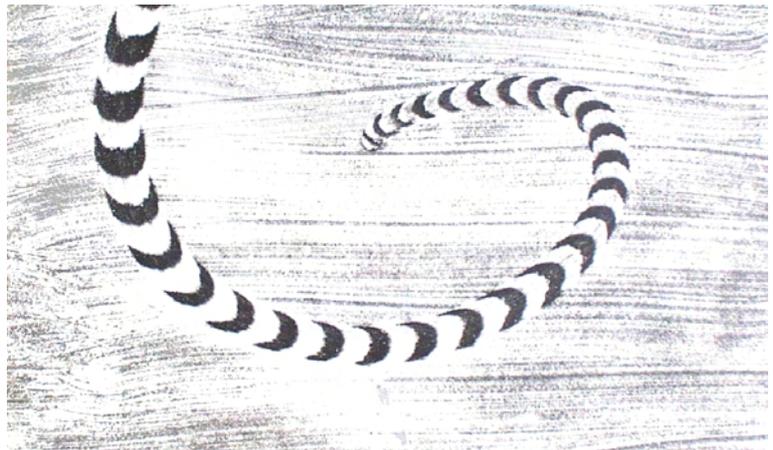


Abb. 5.11: Foto einer Spur auf der Schwefelplatte

Da die Streifen recht eng beieinander liegen, zählt man von einem Startpunkt aus immer zehn Streifen ab und zeichnet mit der Pinselrückseite eine Zeitmarke, womit die Zeitmarken dann jeweils einen Abstand von 0,1 s haben. Auch hier wird deutlich, dass „Ort“ einen Punkt auf der Bahnkurve meint, während „Weg“ für die Länge der Bahnkurve steht. Die Änderung des Ortes in den 0,1 s macht man nun mit einem Ortsänderungsvektor $\Delta\vec{x}$ oder $\Delta\vec{r}$ deutlich. Dieser Vektor gibt die Be-

wegungsrichtung an und seine Länge hängt von der durchschnittlichen Schnelligkeit in dem Zeitintervall ab. Um einen von Δt unabhängigen Geschwindigkeitsvektor zu erhalten, müsste man den Vektor durch das Zeitintervall $\Delta t = 0,1$ s dividieren. Die Länge des Ortsänderungsvektors wird aber hier nicht durch 0,1 dividiert, da die Vektoren damit zu lange werden. Man erklärt, dass für die Geschwindigkeitsvektoren ein solcher Maßstab gelten soll, dass sie die gleiche Länge wie die Ortsänderungsvektoren haben. Der Ortsänderungsvektor wird quasi einfach als Geschwindigkeitsvektor \vec{v} an die Bahnkurve ungefähr in der Mitte des betrachteten Intervalls gezeichnet (siehe Abb. 5.12). Den Betrag einer Größe erhält man stets aus der Länge des Vektors zusammen mit dem entsprechenden Maßstab.

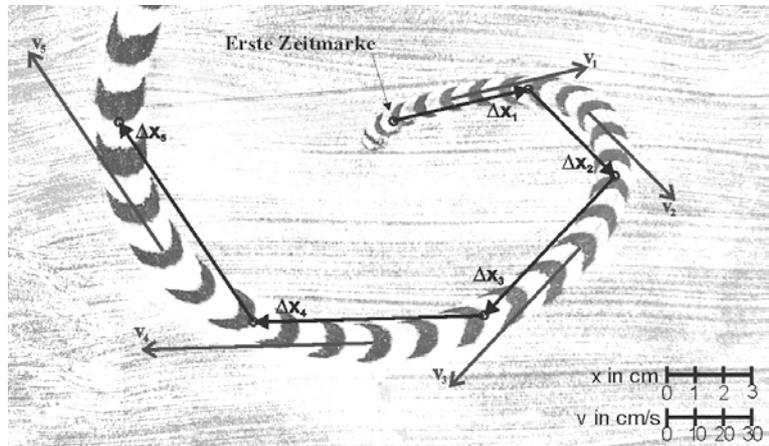


Abb. 5.12: Auswertung der Bewegung mit Ortsänderungsvektoren und Geschwindigkeitsvektoren

Etwas mehr zu tun ist, wenn man die Beschleunigungsvektoren ermitteln will. Man verschiebt einen Geschwindigkeitsvektor parallel an den „Fuß“ des nächsten Geschwindigkeitsvektors, um so den Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ zu erhalten. Er gibt an, was in dem Zeitintervall an Geschwindigkeit „dazukam“. Um einen von Δt unabhängigen Beschleunigungsvektor zu erhalten, müsste man wieder den Vektor durch das Zeitintervall $\Delta t = 0,1$ s dividieren. Das Dividieren der

Länge des Geschwindigkeitsänderungsvektors durch 0,1 entfällt wie oben. Der Geschwindigkeitsänderungsvektor wird als Beschleunigungsvektor \vec{a} an die Bahnkurve ungefähr in der Mitte des Intervalls zwischen den beiden Geschwindigkeitsvektoren gezeichnet (siehe Abb. 5.13). Hier wird nun deutlich, dass der Beschleunigungsvektor eine Richtung hat, während im traditionellen Unterricht den Schülern Beschleunigung als Änderung des Geschwindigkeitsbetrages $a = \Delta|\vec{v}|/\Delta t$ nur als eine Zahl erscheint, bei der positives Vorzeichen Schnellerwerden und negatives Vorzeichen Langsamerwerden bedeutet. Man erkennt an den gezeichneten Vektoren, dass die Beschleunigung bei einer Kurvenfahrt nach innen zeigt, beim Schnellerwerden einen Anteil nach vorne und beim Langsamerwerden einen Anteil nach hinten hat.

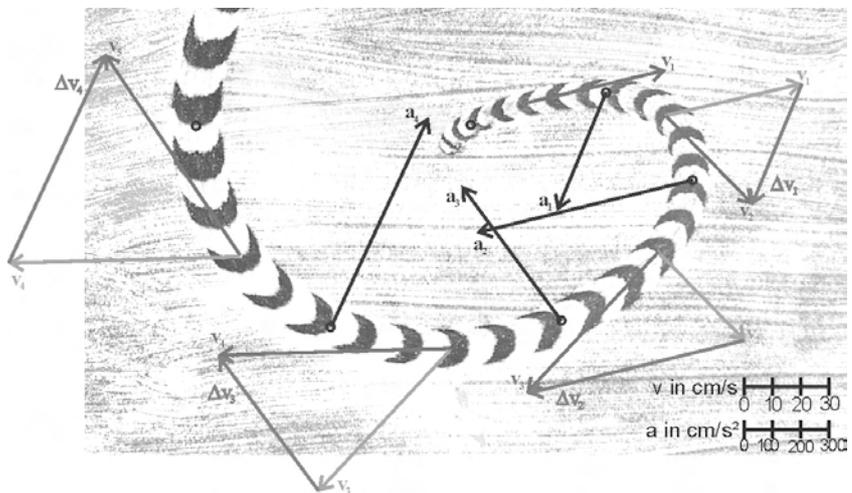


Abb. 5.13: Auswertung der Bewegung mit Geschwindigkeitsänderungsvektoren und Beschleunigungsvektoren

Man erkennt an den gezeichneten Vektoren, dass die Beschleunigung bei einer Kurvenfahrt nach innen zeigt, beim Schnellerwerden einen Anteil nach vorne und beim Langsamerwerden einen Anteil nach hinten hat.

Die Vektoren direkt in den Schwefel auf die Spurenplatte zu zeichnen, ist eine Möglichkeit. Eine andere Möglichkeit ist, ein Foto mit einer Digitalkamera zu machen und auf dem Ausdruck zu zeichnen. So können auch Arbeitsblätter für Übungen und Prüfungsaufgaben erstellt werden (siehe Wilhelm, Koch, 2004).

Von der Firma Kröncke gab es auch Kugeln an einer langen Kette mit einem in der Höhe verschiebbaren Schreibstift, um damit z.B. mit der Spurenplatte den Impulssatz vektoriell oder den Keplerschen Flächensatz zu zeigen. Wo diese Kugel noch vorhanden ist oder ein entsprechender Pendelkörper angeschafft wird, kann damit gut die Zentripetalbeschleunigung gezeigt werden. Man gibt dem ausgelenkten, hängenden Körper so eine Anfangsgeschwindigkeit, dass sie sich auf einer Kreisbahn bzw. wegen der Reibung auf einer Spirale bewegt und mit dem Metallstift eine Spur zeichnet. Die gezeichneten Beschleunigungsvektoren weisen dann stets ungefähr zur Mitte. Im allgemeineren Fall einer Ellipse bzw. elliptischen Spirale haben die Beschleunigungsvektoren auch eine Komponente in Bewegungsrichtung, die auch das Tempo ändert.

5.3.3.5 Das Spiel „Autorennen“

Letztlich sei noch als interessante Alternative das Spiel „Autorennen“ genannt, das national und international mehr oder weniger bekannt ist (siehe z.B. Treitz, 2003, S. 46). Dieses Spiel wird von manchen Lehrern schon ab der fünften Klasse in Vertretungsstunden eingesetzt, wobei keine physikalische Interpretation der vorkommenden Vektoren erfolgt. Im Rahmen des Kinematikunterrichts können dagegen diese Vektoren interpretiert und die Erfahrungen beim Spielen diskutiert werden.

Es spielen immer zwei (evtl. auch drei oder vier) Schüler gegeneinander. Sie haben einen DIN A4-Bogen kariertes Papier (Gitterabstand 0,5 cm), auf das sie eine Rennstrecke zeichnen, die ca. vier bis sieben Kästchen breit ist (siehe Abb. 5.14) und eine Start und Ziellinie hat. Jeder Spieler befindet sich am Anfang an einer anderen Position auf der Startlinie und auf einem Gitterkreuzungspunkt und benutzt einen Stift unterschiedlicher Farbe. Die Schüler sind nun abwechselnd an der Reihe mit ihrem virtuellen Auto ein Stück zu fahren, was als Verschiebungspfeil eingezeichnet wird. Sie dürfen dabei entweder genauso weit fahren wie im vorhergehenden Zug oder den Verschiebungspfeil in x - und y -Richtung um ein Kästchen vergrößern oder verkleinern (am Anfang wird mit dem Nullvektor begonnen). Somit haben sie bei jedem Zug nur neun Möglichkeiten, auf welches Gitterkreuz sie ziehen. Es ist sowohl erlaubt, die Bahnkurve der anderen Spieler zu schneiden, als auch, auf dem gleichen Punkt zu enden. Wer als erstes an der Ziellinie ist, hat gewonnen. Gerät jemand außerhalb der Rennstrecke wird er dafür bestraft. Wieder von der Startlinie beginnen zu müssen, ist eine zu harte Strafe. Stattdessen wird vereinbart, dass er wieder

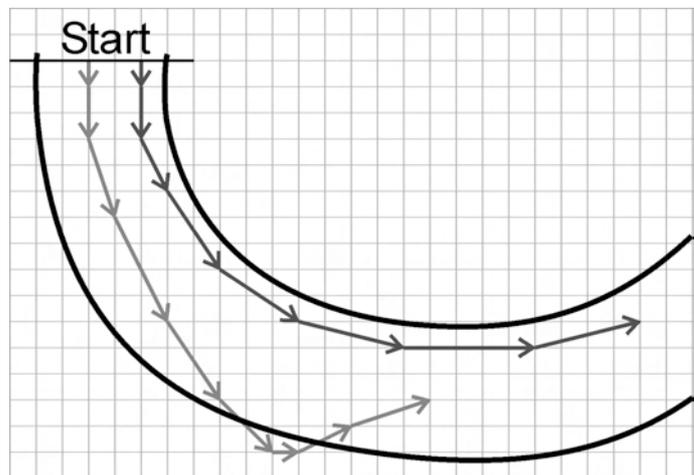


Abb. 5.14: Beispiel für das Spiel "Autorennen", eigene Erstellung (auch für das Schulbuch GEIPEL, REUSCH (2005, S. 61) zur Verfügung gestellt)

Gerät jemand außerhalb der Rennstrecke wird er dafür bestraft. Wieder von der Startlinie beginnen zu müssen, ist eine zu harte Strafe. Stattdessen wird vereinbart, dass er wieder

wie am Anfang mit dem Nullvektor beginnen muss. Zusätzlich kann man noch vereinbaren, dass sein Verschiebungspfeil außerhalb der Rennstrecke, auf dem Rasen, nicht länger als ein Kästchen sein darf, bis er wieder auf der Rennstrecke ist. Das Spiel wird interessanter und schwerer, wenn die Fahrbahn teilweise recht verengt wird (bis auf ein oder zwei Kästchen breit) und scharfe Kurven (d.h. kleiner Kurvenradius) enthält.

Entscheidend ist nun die physikalische Interpretation: Jede Runde entspricht einem Zeitintervall Δt . Der jeweilige Verschiebungspfeil ist ein zweidimensionaler Ortsänderungsvektor (angegeben in Kästchen). Da das Zeitintervall Δt als konstant betrachtet wird, entspricht dieser Vektor auch dem Geschwindigkeitsvektor (angegeben in Kästchen); eine Längenänderung durch ein $\Delta t \neq 1$ wird wie bei der Spurenplatte nicht berücksichtigt. Die Schüler zeichnen also Geschwindigkeitsvektoren. Das Entscheidende ist nun, dass der Geschwindigkeitsänderungsvektor, der dem Beschleunigungsvektor entspricht, in jedem Zeitintervall beschränkt ist (nämlich nur ein Kästchen pro Komponente groß sein darf) und außerdem die Rennbahn nicht verlassen werden darf, was durch Stillstand bestraft wird, so dass man vorplanen muss. Zusätzlich kann man vereinbaren, dass nicht nur der jeweilige Geschwindigkeitsvektor, sondern auch der jeweilige Beschleunigungsvektor eingezeichnet werden muss.

Beim Erklären des Spiels und beim Diskutieren über das Spiel werden also gleich die physikalischen Begriffe verwendet. Man erlebt, dass ein „Auto“ bei zu großer Schnelligkeit „aus der Kurve hinausfliegt“, weil die Beschleunigung für die gewünschte Kurve nicht groß genug sein kann. Theoretisch wäre es auch möglich, dass die Schüler jeweils die Koordinaten des Geschwindigkeitsvektors und/oder des Beschleunigungsvektor auf dem Spielplan notieren.

5.3.4 Die Behandlung des zweiten newtonschen Gesetzes

5.3.4.1 Grundlegende Vorbemerkungen

Der englische Physiker, Mathematiker und Astronom Sir ISAAC NEWTON (1643 bis 1727) veröffentlichte im Jahre 1687 seine Schrift „Philosophiae naturalis principia mathematica“ (Mathematische Prinzipien der Naturlehre) (deutsche Übersetzung: Newton, 1963), in der sich unter anderem die drei berühmten newtonschen Axiome befinden (Die Formulierungen von NEWTON finden sich bei NEWTON, 1963, S. 32, und bei SAMBURSKY, 1975, S. 392 und 393). Hier werden sie in moderner Schreibweise und heutiger Interpretation angegeben, wobei statt von einer Kraft von der Summe der Kräfte geredet wird: Das erste Axiom, auch Trägheitsgesetz oder Beharrungsprinzip genannt, besagt: Jeder Körper behält seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung bei, wenn die Summe aller von außen an dem Körper angreifender Kräfte Null ist. Das zweite Axiom, auch Grundgesetz der Mechanik genannt, lautet: Die zeitliche Änderung der Bewegungsgröße, des Impulses $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$,

ist gleich der Summe aller von außen an dem Körper angreifender Kräfte: $\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}(m \cdot \vec{v})$. Bei

konstanter Masse folgt daraus $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Das dritte Axiom, auch Wechselwirkungsgesetz genannt, besagt: Wenn ein Körper 1 auf einen Körper 2 mit der Kraft \vec{F}_{12} wirkt, so wirkt der Körper 2

auf den Körper 1 mit der Kraft \vec{F}_{21} ; beide Kräfte haben den gleichen Betrag, aber entgegengesetzte Richtungen. Dies wird häufig kurz mit dem missverständlichen Ausdruck „actio = reactio“ beschrieben.

Die „Principia“ beginnt mit acht Definitionen (Newton, 1963, S. 21 – 24), die heute als Erklärungen oder Sprachregelungen zu verstehen sind, und enthält dann die Behauptung eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit (Kuhn, 2001, S. 216). Dann folgen die drei - wie NEWTON es nennt - Gesetze sowie mehrere Zusätze. Wichtig ist, dass die Principia auch eine Theorie der Gravitation (invers-quadratisches Abstandsgesetz) und der Planetenbewegung enthält. NEWTON ist mit diesem Werk der endgültige Durchbruch in der Dynamik gelungen; es ist ein geniales Werk trotz Mängel im Detail (Dijksterhuis, 1983) und trotz wichtiger Vorarbeiten anderer. Der Kraftbegriff beruht dabei auf dem Entschluss, alle Bewegungsänderungen auf das Wirken von Kräften zurückzuführen. „Kraft“ wird als mathematische Relationsgröße dem Prozess der Einwirkung zugeordnet, nicht als physikalische Erhaltungs- und Austauschgröße den Körpern als Fähigkeit zur Einwirkung. „Natürlich“ im Sinne unserer irdischen Erfahrung ist eigentlich, dass jede Bewegung irgendwann zur Ruhe kommt. So musste man für Aristoteles und auch für die Impetustheoretiker (Eine kurze Darstellung findet sich in WILHELM (1994), eine ausführliche Darstellung bei WOLFF (1978).) nicht diesen „natürlichen“ Vorgang, eine selbstverständliche Tatsache, genauer betrachten und erklären, sondern der Frage nachgehen, warum sich ein Körper bewegt. In NEWTONS Dynamik ist es nun umgekehrt. Die geradlinige gleichförmige Bewegung ist das „Natürliche“ und wird zum Ausgangspunkt der Dynamik; ein Zur-Ruhe-Kommen muss dagegen erklärt werden. Das Trägheitsprinzip geht zwar auf GALILEI zurück, aber dieser ist noch von einem zirkularen Trägheitsprinzip ausgegangen (Dijksterhuis, 1983, S. 389 ff.; Schecker, 1985, S. 448). Das lineare Trägheitsprinzip findet man erstmals bei GASSENDI und bei DESCARTES (Crombie, 1959, S. 391 f.), aber erst NEWTON formulierte damit ein Kraftkonzept. Es sei betont, dass es eine beachtliche Entscheidung von NEWTON war, dies so zu sehen, weil es so nicht aus der Wirklichkeit direkt ableitbar war (Segrè, 2002, S. 90). NEWTON befasste sich selbstverständlich nicht nur mit idealisierten Vorgängen. Seine Theorie deckt alle realen Bewegungen ab und im zweiten Buch der Principia (Newton, 1963, S. 230 ff.) widmet er sich eingehend Bewegungen unter Reibungseinflüssen, wobei er Reibungskräfte annimmt, die linear oder quadratisch von der Geschwindigkeit abhängen. Damit erklärte er alle Bewegungen der realen Welt. Eine gleichförmig geradlinige Bewegung, zu deren Erhalt eine konstante Kraft benötigt wird, ist somit durchaus möglich, lediglich die resultierende Kraft ist hier Null. Insgesamt liefert NEWTON eine Möglichkeit zur Beschreibung und Analyse von Bewegungen mit Hilfe der Mathematik. Aber *„Newton lehnt es ab, sich mit möglichen Ursachen der Kräfte zu beschäftigen“* (Schecker, 1985, S. 450). Er beschäftigt sich also im Gegensatz zu anderen und früheren Naturwissenschaften nur mit dem „Wie“, nicht mit dem „Warum“ der Phänomene. So gibt er auch nur an, wie sich zwei Massen anziehen (newtonsche Gravitationsgesetz), aber nicht warum: *„Ich habe noch nicht dahin gelangen können, aus den Erscheinungen den Grund dieser Eigenschaften der Schwere abzuleiten, und Hypothesen erdenke ich nicht“* (Newton, 1963, S. 511).

Die drei newtonschen Axiome sind keine Axiome im mathematischen Sinn (Kuhn, 2001, S. 219), da man damals eine andere Vorstellung von Axiomatisierung hatte (Dijksterhuis, 1983, S. 518),

sondern stellen ein verwobenes Geflecht von Ideen dar. Um ein Bezugssystem zu finden, in dem das erste Axiom gilt, braucht man z.B. eine Definition von Kräftefreiheit, die man durch das zweite Axiom bekommt (Wodzinski, 1996, S. 36). Aus dem zweiten Axiom lässt sich aus unserer heutigen Sicht das erste Axiom ableiten, so dass man nach dem Sinn des ersten Axioms fragen kann (siehe z.B. Mach, 1921, und Dijksterhuis, 1983, S. 522). Für NEWTON (nicht für uns) sagt das zweite Axiom, dass für eine Impulsänderung die Wirkung einer Kraft hinreichend ist (die Folge einer Kraftwirkung ist Impulsänderung), während das erste Axiom feststellt, dass sie auch notwendig ist (von Impulsänderung kann man auf Kraft schließen), d.h. der Impuls nicht von selbst abnehmen kann (Kuhn, 2001, S. 220; Dijksterhuis, 1983, S. 529). NEWTON setzte Kraft und Impulsänderung auch nicht gleich, sondern erst LEIBNIZ forderte, dass Ursache und Wirkung zahlenmäßig und dem Wesen nach gleich sein sollen (Treitz, 2003, S. 100). Heute wird es aufgrund unseres heutigen Wissens über Raum und Zeit und aufgrund einer Auffassung vom zweiten Axiom als Definition häufig so gesehen, dass das erste Axiom für uns nur die Aufgabe hat, ein Inertialsystem zu finden, in dem dann das zweite Axiom gilt; das erste Axiom ist also heute eine Umschreibung der Definition der Inertialsysteme (einen Überblick über mögliche Interpretationen des ersten newtonschen Gesetzes gibt STEGMÜLLER (1970, S. 118 - 129)). Da Bezugssysteme in diesem Konzept aber kaum explizit behandelt und insbesondere Inertialsysteme nicht behandelt werden, macht es keinen Sinn, erst das erste Axiom zu unterrichten. Es wurde entschieden, dass erste Axiom als Spezialfall des zweiten zu behandeln (Stegmüller, 1970, S. 138).

Eine andere Frage ist, ob es sich bei den drei Aussagen - speziell der zweiten - um Axiome, Definitionen oder beweisbare Gesetze handelt bzw. wie sie im Unterricht eingeführt werden sollen. Zu NEWTONS Zeiten wurde in der physikalischen Begriffsbildung noch nicht klar zwischen beweisbaren Gesetzen und nicht beweisbaren Definitionen unterschieden (Westphal, 1967, S. 561) und auch NEWTON hat sich nicht klar geäußert, ob die Grundgleichung der Mechanik als ein Axiom, Gesetz oder eine Definition verstanden werden soll (Kuhn, 2001, S. 219). Da in NEWTONS vorausgehenden Definitionen und in den Axiomen, die er Gesetze nennt, aus der heutigen Sicht (nicht aus NEWTONS Sicht) z.T. ein und dieselbe Eigenschaft mechanischer Vorgänge mehrmals formuliert - in den Definitionen und den Gesetzen - erscheint (Mach, 1921, S. 237 - 243; Dijksterhuis, 1983, S. 522; Kuhn, 2001, S. 220), sagt es für uns wenig aus, wenn NEWTON von Gesetzen spricht. In der Forschergemeinschaft der damaligen Zeit war „Kraft“ noch ein Clusterbegriff, während NEWTON einen bestimmten Aspekt dieses Clusters verwendete statt besser einen neuen Begriff zu erfinden (Dijksterhuis, 1983, S. 520 f.). Das newtonsche Konzept wurde als mathematischer Formalismus von der Forschergemeinschaft zwar anerkannt, aber die Suche nach einem adäquaten physikalischen Kraftbegriff ging weiter (Schecker, 1985, S. 468). Erst durch die Quantifizierung des Energiebegriffs und der Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents in der Mitte des 19. Jahrhunderts kam es zu einer bewussten Trennung zwischen den Begriffen „Kraft“ und „Energie“. *„Der abstrakte 'mathematische' Relationsbegriff Newtons ist zum physikalischen Kraftbegriff der klassischen Physik geworden. Die Suche nach der 'physikalischen' Kraft führte zum Energiebegriff“* (Schecker, 1987, S. 473). Historisch gesehen hat also NEWTON mit seinen drei Axiomen festgelegt, was wir heute unter „Kraft“ verstehen. Aus heutiger Sicht ist das zweite Axiom weder ein Axiom

im mathematischen Sinn noch ein Gesetz, also auch nicht verifizierbar (Kuhn, 2001, S. 219). Wenn man annimmt, dass „Masse“ bereits definiert ist (NEWTON definierte sie atomistisch (Stegmüller, 1970, S. 135).), dann definiert das zweite newtonsche Axiom, was „Kraft“ ist – zunächst ohne Bezug zu irgendwelchen Naturphänomenen. Der Sinn dieser Definition muss sich dann in Anwendungen zeigen. Auch ATKINS (1986, S. 88 f.) sieht das zweite newtonsche Bewegungsgesetz nur als präzise Definition des Begriffes „Kraft“, d.h. als anderen Namen für das Produkt aus Masse und Beschleunigung (Für NEWTON dagegen waren Kräfte physikalische Realität). Diese „leere Hülse“ füllt sich erst durch Hinzunahme von speziellen Kraftgesetzen mit wertvollem Inhalt (Kuhn, 2001, S. 219). DIJKSTERHUIS nennt diese moderne Auffassung „nominalistisch“ im Gegensatz zur „realistischen“ Auffassung NEWTONS (Dijksterhuis, 1983, S. 530). Es wurde versucht, die logischen Unzulänglichkeiten der newtonschen Axiomatik zu beheben. WESTPHAL (1967, S. 558 f.) unterscheidet dazu zwei Möglichkeiten, die Dynamik aufzubauen: Beim induktiven Aufbau steht das Wechselwirkungsgesetz $m_1 \cdot \vec{a}_1 = -m_2 \cdot \vec{a}_2$ als Naturgesetz am Anfang, worüber die Masse definiert wird, und Kraft wird als Produkt von Masse und Beschleunigung definiert. Beim deduktiven Aufbau steht $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ als Axiom am Anfang, wobei man sich noch Gedanken über die Additivität von Massen und Kräften machen muss. In beiden Fällen ist $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ nicht beweisbar und kein Gesetz.

Eine genauere wissenschaftstheoretische Untersuchung der drei newtonschen Gesetze findet sich bei STEGMÜLLER (1970, S. 110 - 138), der der Frage nachgeht, ob es sich bei den drei Gesetzen um Tatsachenbehauptungen oder um Festsetzungen handelt. STEGMÜLLER fasst zusammen: *„In allen wichtigeren und interessanteren Theorien sind die Rollen von Festsetzungen und hypothetischen Annahmen weitgehend vertauschbar. [...] die endlosen Diskussionen über Fragen wie die, ob das zweite Newtonsche Bewegungsgesetz auf eine Nominaldefinition des Begriffes der Kraft hinauslaufe oder ob es sich dabei um eine theoretische Hypothese handle, [sind] unfruchtbar [...], weil diese Frage überhaupt nicht eindeutig beantwortet werden kann.“* (S. 111). Eine Deutung eines Gesetzes als Definition/Konvention ist demnach möglich, wenn andere, als Konvention geltende Sätze eine empirische Deutung bekommen, also andere empirische oder theoretische Tatsachenhypothesen vorausgesetzt werden.

In der Mittelstufe wird heute „Kraft“ sinnvollerweise nicht mehr über die Statik, sondern dynamisch eingeführt. Entsprechend dem zweiten newtonschen Axiom wird in den meisten Schulbüchern definiert, dass jede Einwirkung auf einen Körper, die dessen Geschwindigkeit oder Bewegungsrichtung ändert, als „Kraft“ bezeichnet wird (Eigentlich ist es immer ein anderer Körper der einwirkt, Kraft ist nur ein Maß für die Stärke der Einwirkung). Anschließend wird ungeschickterweise ausführlich die Statik behandelt, was Fehlvorstellungen festigt (eine Übersicht der dadurch bedingten Fehlvorstellungen gibt WODZINSKI (1996, S. 53 f.)). Schließlich werden auch Reibungskräfte behandelt. Den Schülern bleibt sicher eher in Erinnerung, dass Kraft mit einem Federkraftmesser gemessen wird als die dynamische Definition über die Beschleunigung. In der elften Klasse wird Kraft dann im traditionellen Vorgehen als etwas Bekanntes angenommen und der Zusammenhang mit der Beschleunigung aufgezeigt. Als Ergebnis erhält man ein Gesetz. Dies wird heute kritisiert und gefor-

dert, die Versuche nur als Veranschaulichung der Grundgleichung der Mechanik vorzustellen (Kuhn, 2001, S. 219).

Perfekte logische Sauberkeit und ein streng logischer Aufbau ist im Physikunterricht nicht von höchster Wichtigkeit. So wie NEWTON von Kraft als physikalische Realität ausgeht, werden deshalb auch in diesem Konzept für die elfte Klasse zunächst (ohne auf eine Definition einzugehen) Kräfte als bekannte, physikalische Realitäten, die mit Kraftmessern gemessen werden, angenommen und der Zusammenhang mit der Beschleunigung entdeckt. Später wird den Schülern dann mitgeteilt, dass die Gleichung $m \cdot \vec{a} = \Sigma \vec{F}$ in der Physik als Definition von Kraft verwendet wird und genau das als Kraft bezeichnet wird, was auf der rechten Seite berücksichtigt werden muss – aber nichts anderes. Damit ist klar, dass sich die Definition in Übereinstimmung zumindest mit dem Kraftbegriff der Statik und dem bisher im Physikunterricht verwendeten Kraftbegriff befindet. Es wird darauf hingewiesen, dass Kraft so in der achten Klasse definiert wurde und deshalb kein experimentell beweisbares Gesetz vorliegt, wobei aber die Frage nach Definition oder Gesetz Schüler kaum interessiert. Zu bedenken ist, dass es für Schüler viel motivierender ist, einen Zusammenhang im Experiment zu entdecken als sich nur Beispiele zu einer Definitionsgleichung anzuschauen. Schließlich ist es auch einfacher, Lehrer zum Unterrichten nach diesem Konzept zu überzeugen, wenn sie in diesem eigentlich unwichtigen Punkt nicht völlig umdenken müssen.

5.3.4.2 Erarbeitung des zweiten newtonschen Gesetzes

Experimente spielen im Physikunterricht seit langem eine bedeutende Rolle. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass Schüler viele konkrete Situationen kennen lernen sollen, in denen wichtige physikalische Konzepte verdeutlicht, wieder erkannt, zur Erklärung angewandt oder sogar erschlossen werden können. Dazu ist es nötig, eine größere Anzahl von Experimenten zu unterschiedlichen Situationen durchzuführen. Dabei sehen Schüler außerdem die Tragfähigkeit und die Reichweite von Konzepten und Gesetzmäßigkeiten, was eine Basis schafft, evtl. auch inadäquate Vorstellungen zu ändern. Die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse in immer wieder neuen Situationen hilft dem Schüler, selbst ein angemessenes mentales Modell zu entwickeln und nicht beim Lernen einzelner Wissens Elemente oder sogar nur bei Formeln stehen zu bleiben. Natürlich kostet es Zeit, viele Experimente quantitativ mit herkömmlicher Messtechnik durchzuführen. Deshalb ist es sinnvoll, nachdem Schüler die Bedeutung des Messens, Auswertens und Zeichnens durch eigenes Tun erfahren haben, diese Arbeiten durch den Einsatz des Rechners zu automatisieren. Dann ist es möglich, die aufbereiteten Messergebnisse von Versuchsvarianten sofort zur Verfügung zu haben, um ihre Aufbereitung unmittelbar zu diskutieren und zu interpretieren sowie auch spontan auf Schülervorschläge für Versuchsänderungen eingehen zu können.

Zur experimentellen Bestätigung der Aussage, dass die äußere Kraft \vec{F} , die an einem Körper angreift, eine zu \vec{F} proportionale Beschleunigung \vec{a} bewirkt, werden herkömmlicherweise eindimensionale Beschleunigungsversuche mit konstanten äußeren Kräften durchgeführt, in denen aus Zeit-Weg- oder Zeit-Geschwindigkeits-Messung die Beschleunigung berechnet wird. Mit dem Computer kann man statt vieler Einzelmessungen in einem einzigen Versuchsablauf viele Messdaten erheben

und auswerten und dadurch die Arbeit erleichtern. Wie im traditionellen Vorgehen ist auch in dem hier dargelegten Konzept vorgesehen, zunächst kurz zu zeigen, dass bei konstanter Gesamtmasse die Beschleunigung in unterschiedlichen Versuchen direkt proportional zur jeweiligen (während des Ablaufs konstanten) Zugkraft ist und dass bei konstanter Zugkraft die Beschleunigung in unterschiedlichen Versuchen direkt proportional zur jeweiligen Gesamtmasse ist. An einem Faden hängende Gewichtsstücke ziehen dabei über eine Umlenkrolle an einem Gleiter auf einer Luftkissenfahrbahn. Entgegen dem Standardvorgehen soll hier nicht nur die schneller werdende Bewegung bis zur am Ende der Fahrbahn angebrachten Feder betrachtet werden, sondern auch die langsamer werdende Rückwärtsbewegung soll mit aufgenommen werden, denn auf Grund des Kinematikurses sollten die Schüler hier keine Probleme haben, auch dies als positive Beschleunigung zu akzeptieren. Das hat drei Vorteile: 1. Die Versuchsauswertung umfasst eine längere Messzeit. 2. Es wird deutlich, dass es im Federrückstoß noch andere Einflüsse gibt, von denen nun abgesehen wird. 3. Der Einfluss der noch vorhandenen Reibung wird eliminiert, indem bei der Beschleunigung zwischen Hin- und Rückbewegung gemittelt wird. Auf Wunsch kann aber über einen Schalter die Rückwärtsbewegung in der Darstellung unterdrückt werden. So erhält man zunächst das Gesetz $a = F / m$.

Man sollte dieses Gesetz gemäß dem Ursache-Wirkungskonzept in der Form $a = F / m$ schreiben, da sich aus wirkender Kraft und bewegter Masse eine Beschleunigung ergibt. Die Formulierung $F = m \cdot a$, die sich aus der newtonschen Definition ergibt, betont nicht den Wirkungszusammenhang und verführt Schüler, dies so zu interpretieren, dass die Masse und die Beschleunigung eine Kraft „ergibt“. Diese kleine Umformung der Standardgleichung hilft den Schülern zum Verständnis des Zusammenhangs zwischen Kraft und Beschleunigung.

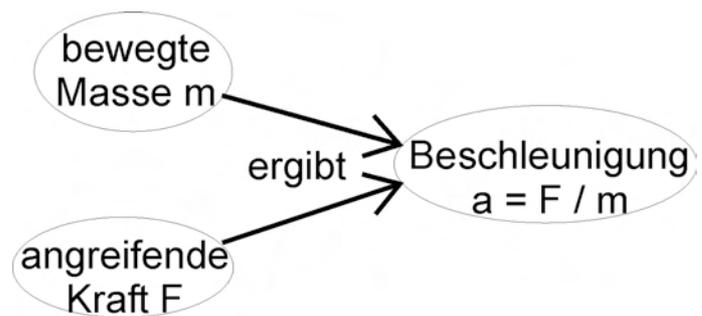


Abb. 5.15: Wirkungszusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung

Zusätzlich sollte man den Zusammenhang noch symbolisch wie in Abb. 5.15 darstellen. Genauso wäre es sinnvoll zu formulieren, dass bei ohmschen Widerständen ($R = U / I = \text{konstant}$) der Wirkungszusammenhang $I = U / R$ (mit R konstant) gilt, da sich aus angelegter Spannung U und vorhandenem konstantem Widerstand R eine bestimmte Stromstärke I ergibt.

Analog zur Kinematik hätte man natürlich auch hier mit zweidimensionalen Bewegungen beginnen können. Es gibt aber wenig überzeugende zweidimensionale Experimente, bei denen die wirkenden Kräfte bekannt sind, damit der Zusammenhang zu der gemessenen Beschleunigung gezeigt werden kann (sei es als Bestätigung eines „Gesetzes“ oder als Veranschaulichung einer Definition). Da in diesem Lehrgang auch gezeigt werden soll, dass das zweite newtonsche Gesetz auch bei veränderlichen Kräften, mehreren Kräften und Reibung gilt, wurde mit eindimensionalen Bewegungen begonnen und später auf zweidimensionale erweitert.

Obige Ergebnisse lassen noch den Eindruck zu, die Gleichung gelte nur für konstante Kräfte oder bei nicht konstanten Kräften nur im Mittel. Dass die Proportionalität von \vec{F} und \vec{a} in jedem Augenblick gilt, kann man für den eindimensionalen Fall direkt aufzuzeigen, wenn man die Größe der Kraft \vec{F} während eines Versuchsablaufs beliebig ändern kann und dabei \vec{a} und \vec{F} quasi kontinuierlich misst. Dazu wurde in einem von WILHELM (1994, S. 156) entwickelten Versuch als Kraft die Hangabtriebskraft genutzt, die auf einer kippbaren Luftkissenbahn auf einen Gleiter wirkt. Die Hangabtriebskraft ist zum einen aus der Mittelstufe bekannt und wird intuitiv hangabwärts angenommen und kann zum anderen über die Fahrbahn-Neigung leicht variiert und gemessen werden (siehe auch Wilhelm, Heuer, 1995, S. 164 - 165 und Heuer, 1996a, S. 15). Dazu wird in jedem Moment des Versuchs die Strecke bestimmt, die ein Fahrbahnende über die Horizontale angehoben bzw. gesenkt wird, woraus man \vec{F} berechnen kann. Die Bewegung wird wieder über ein Präzisionslaufrad (Heuer, 1992a) gemessen, das über einen umlaufenden Faden über zwei Umlenkrollen mit dem Gleiter verbunden ist (siehe Abb. 5.16), und daraus die Beschleunigung \vec{a} ermittelt. Die Hubhöhe wird über ein zweites Laufrad erfasst (technische Details sowie Vor- und Nachteile siehe Wilhelm, 1994, S. 157 ff.). Wenn die Fahrbahn nach oben oder unten beschleunigt wird, tritt zwar eine weitere Kraft auf den Gleiter auf, die aber aufgrund der kleinen Neigungswinkel und den geringen Beschleunigungen völlig vernachlässigt werden kann.

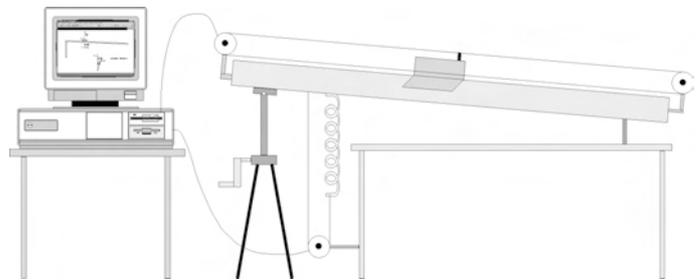


Abb. 5.16: Versuchsaufbau für den Schlüsselversuch zu $\vec{a} \sim \vec{F}$

Mit dynamisch ikonischen Darstellungen kann nun die Proportionalität von \vec{a} und \vec{F} anschaulich deutlich werden: Während eines Versuchsdurchgangs sieht man nun in Echtzeit in einer Animation, wie die Luftkissenbahn gekippt wird und sich der Gleiter bewegt (siehe Abb. 5.17 oben oder Abb. 3.9a). Gemessene Geschwindigkeit, die aus den Messdaten ermittelte Beschleunigung sowie die wirkende Hangabtriebskraft können dann als Pfeile an den Gleiter angezeichnet werden und auch ortsfest gezeigt werden (siehe Abb. 5.17 unten oder Abb. 3.9b). Bei der ortsfesten Darstellung sieht man, dass die Endpunkte der parallelen Pfeile \vec{F} und \vec{a} stets auf einem Strahl liegen, der sich um seinen Ursprung dreht. \vec{F} und \vec{a} gehen also durch zentrische Streckung auseinander hervor, daher ist $\vec{a} \sim \vec{F}$ und zwar völlig unabhängig von der momentanen Geschwindigkeit \vec{v} . Bei diesem Versuch muss nur darauf geachtet werden, dass der Gleiter nicht am Fahrbahnende anstößt, da sonst zusätzliche Kräfte wirken, die

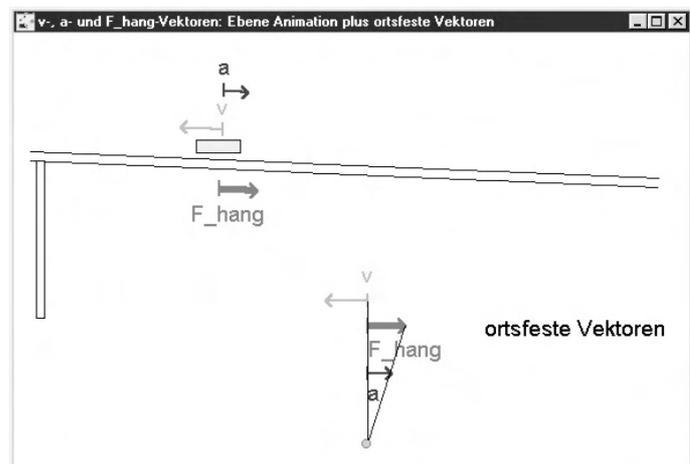


Abb. 5.17: Ein Momentbild der dynamisch ikonischen Darstellung des Versuchsablaufs

Bei der ortsfesten Darstellung sieht man, dass die Endpunkte der parallelen Pfeile \vec{F} und \vec{a} stets auf einem Strahl liegen, der sich um seinen Ursprung dreht. \vec{F} und \vec{a} gehen also durch zentrische Streckung auseinander hervor, daher ist $\vec{a} \sim \vec{F}$ und zwar völlig unabhängig von der momentanen Geschwindigkeit \vec{v} . Bei diesem Versuch muss nur darauf geachtet werden, dass der Gleiter nicht am Fahrbahnende anstößt, da sonst zusätzliche Kräfte wirken, die

nicht erfasst werden. Mit dieser Darstellung vermeidet man, dass der Eindruck erweckt wird, die Proportionalität von \vec{a} und \vec{F} gelte womöglich nur im Durchschnitt eines Zeitintervalls, da deutlich wird, dass sie in jedem Zeitpunkt gilt (siehe Abb. 3.9c und d). Dieser Versuch kann also ein Schlüsselversuch sein, um das grundlegende zweite newtonsche Gesetz zu erschließen und zu verdeutlichen.

In der Vorstellung der Schüler reduziert sich die Aussage des Grundgesetzes der Mechanik in der Regel auf das Wirken *einer* Kraft, was auch durch einen Unterricht mitverursacht sein kann, in dem nur die typischen Beschleunigungsversuche mit nur einer Zugkraft durchgeführt werden. Der oben aufgeführte Versuch mit der Hangabtriebskraft lässt sich so erweitern, dass man in einem weiteren Versuchsdurchlauf die Wirkung mehrerer äußerer Kräfte auf den Luftkissengleiter zeigen kann. Als zusätzliche Kraft zur variablen Hangabtriebskraft kann man sowohl die Kraft eines kleinen Zuggewichts, das über Faden und Rolle auf den Gleiter wirkt, als auch die Schubkraft verwenden, die ein Propeller ausübt, der auf dem Gleiter befestigt ist (siehe Abb. 5.18), was erstmals von WILHELM (1994, S. 165 f.) genutzt wurde (siehe auch Heuer, 1996a, S. 16). In den Unterrichtsmaterialien wurden zu dem Versuch mit dem Propeller ein Video und eine PAKMA-Datei mit Messdaten zur Verfügung gestellt, da diese Variante attraktiver ist (technische Details siehe Wilhelm, 1994, S. 165 f.).

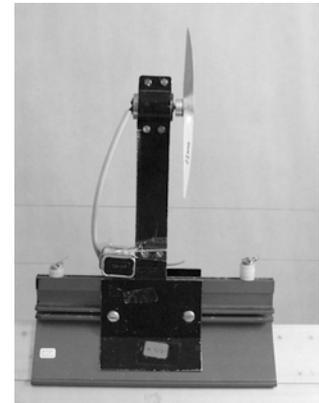


Abb. 5.18: Propeller auf Luftkissengleiter

Die Schüler können bei der Versuchsdurchführung die jetzt auftretenden Beschleunigungen, die nun nicht mehr zur Hangabtriebskraft \vec{F}_H proportional sind, sondern zeitweise größer bzw. kleiner sind, nicht aus der Summe von \vec{F}_H und \vec{F}_{Zusatz} erklären. Offensichtlich denken die Schüler bei der Summe der Kräfte zuerst nur an die der Beträge. Dass hier die Vektorsumme zu bilden ist, kommt vielen Schülern erst in den Blick, wenn die dynamisch ikonische Darstellung schrittweise bei Reproduktion des Versuchs analysiert wird.

Um während eines neuen Versuchs oder bei der Reproduktion eines bereits durchgeführten die Idee der Vektorsumme der Kräfte auch graphisch sichtbar zu machen, wird die fehlende Kraft \vec{F}_{Zusatz} als Pfeil dynamisch mit in das Vektordiagramm wie in Abb. 5.19 eingezeichnet, um dann die Proportionalität $\vec{a} \sim (\vec{F}_H + \vec{F}_{Zusatz})$ als wichtige neue Aussage zu visualisieren (mehrere Screenshots in Abb. 5.20). Möglich ist, während des Programmlaufs auf Tastendruck eine momentane Anpassung vorzunehmen - aus dem gemessenen \vec{a} wird \vec{F}_{Zusatz} berechnet -, um

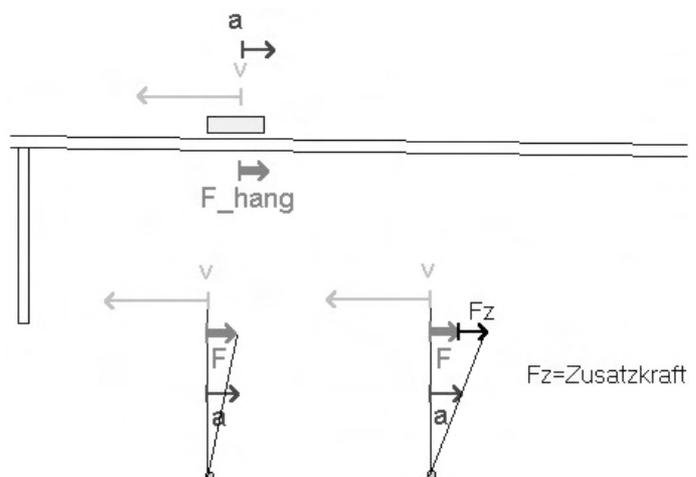


Abb. 5.19: Ein Momentbild der dynamisch ikonischen Darstellung des Versuchsablaufs mit einer Zusatzkraft, um $\vec{a} \sim \Sigma \vec{F}$ aufzuzeigen (die Darstellung rechts unten ist an- und abwählbar)

dann zu sehen, ob diese Anpassung für den Rest des Versuchs gültig bleibt (Wilhelm, 1994, S. 183). Für die erstellten Unterrichtsmaterialien wurde die Kraft gemessen und im Programm eingegeben. Bei einer Reproduktion der Messung in PAKMA kann sie dann auf einer anderen Ebene mit als Pfeil dargestellt werden (siehe Abb. 5.20 unten).

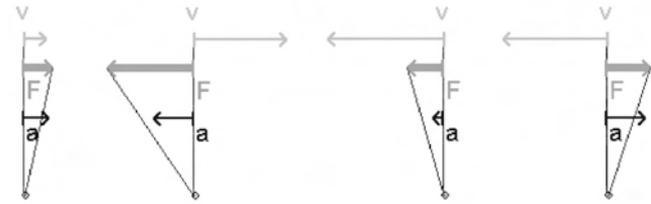
Begriffe wie „resultierende Kraft“, „Ersatzkraft“ oder „beschleunigende Kraft“ (Alle Kräfte sind beschleunigend!) verleiten Schüler zu der Fehlvorstellung, dass es sich dabei

um eine weitere, der Hangabtriebskraft gleichberechtigten Kraft handelt. Deshalb empfiehlt es sich, von der „Gesamtkraft“ oder besser von der „Summe der Kräfte“ zu sprechen und das zweite newtonsche Gesetz in der Form $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ zu schreiben. Um zu vermeiden, dass die Schüler dies so interpretieren, dass die Masse und die Beschleunigung die Gesamtkraft ergibt, ist es gemäß dem Ursache-Wirkungskonzept, das sich in Gleichungen mit ausdrückt, besser $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ zu formulieren (siehe Kapitel 4.5.3).

Reibungskräfte werden in Schülervorstellungen nur als Widerstände gegen die Bewegung angesehen, aber nicht als wirkliche Kräfte (siehe Kapitel 2.2.4.2). Deshalb ist es sehr wichtig, auch Bewegungen mit Reibungskräften zu behandeln. Die Grundidee, mit der die Proportionalität von \vec{a} und $\Sigma \vec{F}$ aufgezeigt wurde, beruht darauf, aus der gemessenen Beschleunigung \vec{a} auf die Summe aller äußeren Kräfte zu schließen. Falls sich in einer neuen Versuchsanordnung mit den bekannten Kräften keine Proportionalität zu \vec{a} ergibt, muss die fehlende Kraft bzw. müssen die fehlenden Kräfte gesucht werden. Dieses „Detektivspiel“ besteht aus zwei Teilen: Zuerst müssen die Eigenschaften der fehlenden Kräfte aus den Versuchen ermittelt werden und anschließend sind die Ursachen der anfänglich nicht erkannten Kräfte zu identifizieren (Heuer, 1996a, S. 16).

Bringt man an einem Gleiter auf der den Schülern abgewandten Seite einen weichen Federstahlbügel mit Schaumstoffpolster so an, dass dieser die Gleitschiene leicht berührt, so wirkt auf den sich bewegenden Gleiter eine kleine Gleitreibungskraft \vec{F}_{reib} , deren Betrag recht konstant ist (Wilhelm, 1994, S. 166 ff.). Den Schülern teilt man von dieser Veränderung nur mit, dass für die kommenden Versuche mit einem leicht abgeänderten Gleiter gearbeitet wird. So müssen sie mit Hilfe der Pfeildarstellung herauszufinden, ob die Veränderung am Gleiter entsprechend dem letzten Abschnitt eine zusätzliche Kraft bewirkt und welche Eigenschaften diese hat. Durch gezielte Fragen des Lehrers erkennen die Schüler bei der wiederholten Reproduktion des Versuches, dass die unbekannte Kraft während der Bewegung etwa eine konstante Größe hat, aber mehrfach ihre Richtung ändert (mehrere Screenshots in Abb. 5.21). Auch sehr gute Schüler haben zunächst Schwierigkeiten, die beobachtete wiederholte Richtungsumkehr zu erklären, bis es dann fast zu einem Aha-Erlebnis

Zuerst Darstellung ohne Zusatzkraft:



Daraus wird die Zusatzkraft erschlossen:

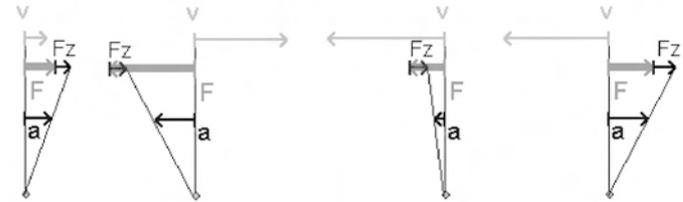


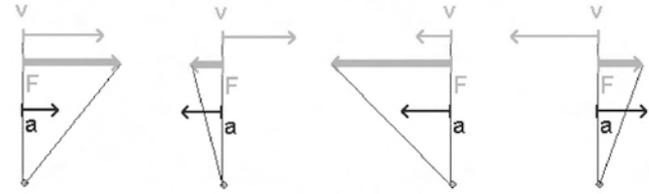
Abb. 5.20: Mehrere Screenshots des Ablaufs mit zusätzlicher Kraft

kommt: Mit der Bewegungsrichtung kehrt sich auch die Krafrichtung um, die Kraft ist immer gegen die Bewegungsrichtung gerichtet und es handelt sich um eine Reibungskraft. Dass die Gleitreibungskraft mit einem Richtungswechsel auch ihre Richtung ändert, war den Schülern bisher offensichtlich nicht klar. Der eigentlich falsche Lehrsatz aus der Mittelstufe, dass die Reibungskraft von der Geschwindigkeit (statt von der Schnelligkeit) unabhängig ist, ist anscheinend tief verankert. Auch hier helfen die eingezeichneten dynamischen Vektoren mit ihren Richtungen, die Versuchssituation zu klären und die wichtige Aussage für jeden deutlich zu visualisieren und dadurch leichter erschließbar zu machen.

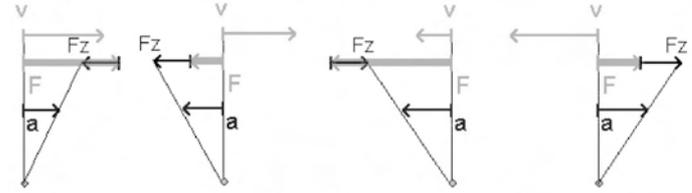
Für das Verständnis der newtonschen Dynamik sind Versuchssituationen mit geschwindigkeitsabhängigen Reibungskräften noch viel wichtiger als solche mit konstanten Reibungskräften, da diese für die Fehlvorstellung verantwortlich sind, dass die Geschwindigkeit \vec{v} eines Körpers proportional zur wirkenden äußeren Kraft ist. Wegen der Übertragbarkeit auf Alltagssituationen sind Versuche mit im Verhältnis zur Antriebskraft großen Luftreibungskräften wünschenswert, beispielsweise mit BARTHSchen Fallkegeln (Wilhelm, 2000). Zwar wäre hierzu ein Versuch mit Wirbelstrom möglich (Wilhelm, 1994, S. 168 ff., und Wilhelm, Heuer, 2002b, S. 7), da aber in Zusammenhang mit Fallbewegungen auf jeden Fall auf die Luftreibung eingegangen werden muss, sollte dies auch erst dann thematisiert werden. Hierfür eignet sich besonders gut eine Modellbildung.

Die allgemeine Form des zweiten newtonschen Gesetzes $\vec{F} = \dot{\vec{p}}$ wird hier - wie in der elften Klasse üblich - nicht behandelt, sondern nur Körper mit konstanter Masse betrachtet, was im traditionellen Unterricht zu der Gleichung $F = m \cdot a$ führt, die aber dort meist nur als Gleichung skalarer Größen betrachtet wird. WIESNER (Spill, Wiesner, 1988) führte mit $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ eine weitere Elementarisierung für den Anfangsunterricht durch, indem er nur Zeitintervalle und keine Zeitpunkte betrachtete und auf die Größe Beschleunigung verzichtete (siehe auch: Wiesner, 1994, S. 126 und Wodzinski, Wiesner 1994a + 1994b sowie Wodzinski, 1996). Im Konzept dieser Arbeit wird die Beschleunigung über $\vec{a} = \Delta \vec{v} / \Delta t$ explizit behandelt und das zweite newtonsche Gesetz in der Form $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ verwendet, so dass man dies auch als Erweiterung des WIESNERSchen Vorgehens für die Sekundarstufe II auffassen kann. In beiden Konzepten wird mit zweidimensionalen Bewegungen begonnen und die Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ in einem Zeitintervall Δt betont.

Zuerst Darstellung ohne Zusatzkraft:



Daraus wird die Zusatzkraft erschlossen:



Zeitgraphen der Zusatzkraft und der Geschwindigkeit:



Abb. 5.21: Mehrere Screenshots des Ablaufs mit Reibungskraft (Graph nicht im Unterricht gezeigt)

5.3.4.3 Anwendungen des zweiten newtonschen Gesetzes

Heute wird in der Physik das zweite newtonsche Axiom als eine Definition der Größe „Kraft“ angesehen (siehe 5.3.4.1). Das erste newtonsche Gesetz ist demnach für uns heute (nicht für NEWTON) nur noch ein Spezialfall des zweiten newtonschen Gesetzes und so soll es in diesem Konzept auch dargestellt werden. Deshalb wird es nach dem zweiten newtonschen Gesetz als eine erste Anwendung behandelt. Die Schüler kennen dieses Gesetz normalerweise aus der achten Klasse unter dem Namen „Trägheitssatz“. Dieser Begriff soll hier aber nicht verwendet werden, da er sehr missverständlich ist (Demidow et al., 1997, S. 197). Der physikalische Begriff „Trägheit“ meint, dass eine Masse ihren „Bewegungszustand“ nicht ändern will, während „Trägheit“ in der Alltagssprache etwas anderes bedeutet: Wenn jemand träge ist, will er sich nicht bewegen, sondern zur Ruhe kommen. Ein träger Körper bleibt aber in Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt. In dem Konzept wird deshalb ausschließlich vom „ersten newtonschen Gesetz“ gesprochen, obwohl auch der Begriff „Beharrungsprinzip“ akzeptabel ist.

Die Aussage des ersten newtonschen Gesetzes steht allerdings im Widerspruch zu Erfahrungen, die wir täglich in beschleunigten Bezugssystemen machen - vor allem in Fahrzeugen, die anfahren, anhalten oder in Kurven fahren. Die hier erlebten Kräfte werden von Schülern auch explizit angesprochen (Galili, Kaplan, 2002, S. 2). Deshalb müssen solche Situationen und diese Erfahrungen auch besprochen werden. Andererseits ist es nicht nötig, die Begriffe „Bezugssystem“, „Inertialsystem“ und „Trägheitskraft“ einzuführen. Stattdessen wird deutlich gemacht, dass zwar die mitbewegte Person eine Kraft auf sich zu spüren glaubt, aber wir als außen stehende Beobachter wissen, dass eigentlich zunächst nur auf das Fahrzeug eine Kraft wirkt und die Person zunächst ihren wirklichen Bewegungszustand beibehält. Viele faszinierende Freihandversuche können gezeigt und jeweils diskutiert werden, welche Kraft auf das Fahrzeug wirkt und welche der Insasse annimmt, wobei auch schon die Kurvenfahrt diskutiert werden soll. Da Trägheitskräfte nicht explizit eingeführt werden, sollen sie auch nicht zur Lösung von Aufgaben verwendet werden. Es wird also nicht für sinnvoll gehalten, Trägheitskräfte als eine neue Art von Kraft (Galili, Kaplan, 2002, S. 10) zu behandeln.

Im Unterricht wurde zunächst gezeigt, dass bei einer eindimensionalen Bewegung die Geschwindigkeit ungleich Null beibehalten wird. Anschließend wurde behandelt, dass die Ruhe beibehalten wird, und schließlich wird auch die Richtung beibehalten. Für den ersten Fall eignet sich ein kleiner Wagen auf einem großen Wagen, die sich gemeinsam bewegen. Wird der untere Wagen (idealerweise zunächst abgedeckt) gestoppt, fährt der obere weiter. Begeistert sind die Schüler von dem Modell eines nicht angeschnallten Autofahrers: Eine Schachtel mit einem rohen Ei wird gegen ein gut befestigtes Stativ geschoben, so dass das Ei herausfliegt. Der angeschnallte Fahrer wird durch ein rohes Ei in einer Eierschachtel dargestellt. Ergänzend können auch Videos von Crashversuchen eingesetzt werden. Wird im obigen Versuch der große Wagen dagegen aus der Ruhe kräftig beschleunigt, bleibt der auf ihm stehende kleine Wagen in Ruhe. Ein Holzbrett, das auf dem Wagen steht, zeigt eine Person, die in einer anfahrenden Straßenbahn steht.

Schüler glauben auch, dass ein Körper, der sich auf einer Kreisbahn bewegt, sich auf einem Bogen statt tangential weiter bewegt, wenn er sich frei ohne Einwirkungen weiter bewegt. Der Versuch mit

einem Gummistopfen, der an einer Schnur kreist, bis er losgelassen wird, überzeugt nicht. Die Bahnkurve ist nicht so leicht zu erfassen, da sie zu schnell durchlaufen wird. Deshalb wird mit einem Video, gezeigt, wie der Gummistopfen nach dem Abschneiden weiter fliegt. Als günstig erwies sich außerdem ein Bild eines LKWs auf einer Drehfolie mit einer Ladung auf einer Schiebefolie. Während in dieser „Simulation“ der LKW eine Linkskurve fährt, „fliegt“ die Ladung geradeaus; aus Sicht des LKW-Fahrers flog sie nach rechts hinaus.

Auch hier sollte Reibung als Kraft diskutiert werden und die Schüler gefragt werden, ob es nicht ein Widerspruch zum Gelernten ist, dass beim Fahrradfahren bei konstanter Kraft die Geschwindigkeit konstant bleibt. Die Schüler sollen erkennen, dass die Summe aller Kräfte hier Null ist. Das erste newtonsche Gesetz wird dann auch mit der Summe der Kräfte formuliert. Anschließend sollte gleich das dritte newtonsche Gesetz behandelt werden.

Schließlich müssen noch weitere Anwendungen des zweiten newtonschen Gesetzes behandelt werden. Dabei konzentriert man sich in der Regel auf einen Körper, wobei aber auch immer wieder der zweite beteiligte Körper beachtet werden sollte. Es ist sinnvoll, zuerst mit Modellbildung das qualitative Verständnis zu vertiefen und danach das quantitative Rechnen zu üben. Als ein erstes Modell eignet sich die schiefe Ebene, da hier nochmals deutlich wird, dass die einzelnen Kräfte eine Gesamtkraft ergeben, die die Beschleunigung bestimmt (siehe Kapitel 4.4.3). Außerdem ist das Modell der fallenden Kette (als Fortsetzung des Modells einer ziehenden Masse) sinnvoll, da hier betont wird, dass alle bewegten Massen in $a = \Sigma F / m$ berücksichtigt werden müssen und außerdem ein Beispiel gezeigt werden kann, das analytisch in der Schule nicht lösbar ist (siehe Kapitel 4.4.3). Bei beiden Modellen kann auch intensiv mit Vorhersagen mit der Simulation gearbeitet werden und so Fehlvorstellungen aufgearbeitet werden, wobei die Darstellung der Größen mit Pfeilen entscheidend ist. Ebenso können dabei Graphen interpretiert werden. In neusprachlichen Klassen, bei denen Lehrer mit der knappen Unterrichtszeit konfrontiert sind und deshalb nur wenig Modellbildung machen wollen, wurde empfohlen, hier bereits den Fall mit Luftreibung zu modellieren, der ansonsten erst bei den Fallbewegungen vorgesehen ist.

Auch das Lösen von Rechenaufgaben zum Grundgesetz der Mechanik $\vec{a} = \Sigma \vec{F}_{\text{angreifend}} / m$ muss geübt werden, auch wenn es immer nach dem gleichen Prinzip geht. Dabei stellt sich allerdings die Frage, was mit F gemeint ist: Wenn F der Betrag der Kraft \vec{F} , also $|\vec{F}|$, d.h. die Länge des Vektors \vec{F} , ist und somit immer positiv ist (wie in Schulbüchern der Mittelstufe, z.B. FEUERLEIN, NÄPFEL (1992)), dann wird die Richtung bei eindimensionalen Bewegungen evtl. durch ein Minuszeichen angegeben. Wenn dagegen physikalisch sinnvoller F die Komponente des (eindimensionalen) Vektors \vec{F} , d.h. ein Wert mit Vorzeichen, ist (wie in Oberstufenschulbüchern, z.B. GAITZSCH ET AL., 1996), dann kann es sowohl positiv als auch negativ sein. Die Schüler bevorzugen erfahrungsgemäß die erste Variante. Die zweite Variante ist aber die physikalisch sinnvollere. Schließlich hat man es ja bei den Größen a und v auch so gehandhabt, dass sie negativ sein können. Man muss sich also einmal entscheiden und es konsequent durchziehen. In den Unterrichtsmaterialien des Konzeptes wurde die zweite Variante gewählt. Bei den Schülern sollte man hier aber sehr großzügig sein.

Bei allen Rechenaufgaben wird immer genauso vorgegangen. Dabei spielen die Erfahrungen mit der Modellbildung und speziell ihrer Simulation eine Rolle:

1. Es wird eine Skizze angefertigt und eingezeichnet, welche Kräfte in welche Richtung wirken.
2. In die Skizze wird eingezeichnet, in welche Richtung sich der Körper bewegt.
3. Die Richtung des Koordinatensystems wird in die Skizze eingezeichnet (am Besten in Bewegungsrichtung).
4. Es wird der Standardansatz hingeschrieben: $m \cdot a = \dots$
5. Die Gleichung wird nach der gesuchten Größe aufgelöst.

Dabei sollten vor allem Aufgaben mit mehreren Kräften und Aufgaben mit Reibung, bei denen sich die Schüler die Richtung der Reibungskraft überlegen müssen, verwendet werden.

Ein weiteres Beispiel für Rechenaufgaben zum Grundgesetz der Mechanik $m \cdot \vec{a} = \Sigma \vec{F}_{\text{angreifend}}$ ist die Atwoodsche Fallmaschine, bei der sich nicht nur **eine** Masse bewegt (wie auch bei dem Standardbeispiel des durch ein Zuggewicht beschleunigten Gleiters auf der Luftkissenfahrbahn). Genau genommen muss das Grundgesetz der Mechanik nämlich $m_{\text{gesamt}} \cdot \vec{a} = \Sigma \vec{F}_{\text{angreifend}}$ heißen. Früher als man noch nicht über verschiedene elektronische Messmöglichkeiten bzw. über Kurzzeitmesser verfügte, konnte man eine Bewegung mit großer konstanter Beschleunigung, wie beim freien Fall, nicht messen und analysieren und man musste nach Bewegungen mit kleinerer konstanter Beschleunigung suchen. GALILEO GALILEI verringerte die Fallbeschleunigung, indem er Kugeln eine schiefe Rinne herunterrollen ließ (Das Zeitmaß war die aus einem Eimer ausgeflossene Wassermenge). ATWOOD (1745 - 1807, engl. Physiker) verringerte die Fallbeschleunigung durch ein Gegengewicht. Das waren lange die einzigen Möglichkeiten, den freien Fall zu untersuchen und g zu bestimmen. Hier wird die Atwoodsche Fallmaschine jedoch nicht aus diesen historischen Gründen eingesetzt, sondern weil hier beschleunigende und beschleunigte Masse unterschiedlich sind. Durch die Zwangskräfte in der Umlenkrolle, die nicht betrachtet werden, ist es möglich, den Gesamtkörper, der aus den beiden Massen und der masselosen Schnur besteht, als einen Körper anzusehen, an dem zwei Kräfte angreifen (als hätte die Schnur die Länge null). Die alternative, aber weit schwierigere Herleitung wäre jeden Teilkörper (mit betragsgleichen Beschleunigungen) einzeln zu betrachten, an dem jeweils neben der Gewichtskraft eine (betragsgleiche) Fadenkraft angreift.

Eine weitere wichtige Anwendung des Grundgesetzes der Mechanik sind Fallbewegungen unterschiedlicher Art. So wird der freie Fall ohne Luftreibung behandelt, die Fallbeschleunigung experimentell bestimmt, der senkrechte Wurf nach oben betrachtet und der Fall eines BARTHSchen Fallkegels (Wilhelm, 2000) mit Luftreibung modelliert und in der Simulation das Verhalten der einzelnen Größen durch Betrachten der sie darstellenden Pfeile beobachtet und diskutiert. Schließlich folgt noch der waagrechte Wurf, der hier eine andere Bedeutung als im traditionellen Vorgehen hat. In einem traditionellen Unterricht ist dieses Thema außer der Kreisbewegung das einzige zur zweidimensionalen Bewegung. Für ein Verständnis des Vektorcharakters von Geschwindigkeit und Beschleunigung reicht das wohl kaum aus. In dem hier erstellten Konzept geht es beim waagrechten Wurf nur darum zu zeigen, dass die bereits verstandenen zweidimensionalen Größen in zwei eindi-

mensionale zerlegt werden können. Dass die horizontale und vertikale Bewegung beim waagrecht Wurf unabhängig voneinander sind, gilt aber nur, wenn keine Luftreibung wirkt.

Passend zur Simulation des Modells zum Fall mit Luftreibung kann eine qualitative Prüfungsaufgabe gestellt werden. Beim Fall einer Kugel in Öl wirkt eine geschwindigkeitsabhängige Reibung proportional zur Geschwindigkeit, die die Schüler noch nicht kennen. Das Verständnis für den ähnlichen Ablauf kann durch das Zeichnen von Pfeilen für die einzelnen Kräfte und die kinematischen Größen abgeprüft werden (siehe Abb. 5.22).

Wenn die Schüler erst einmal daran gewohnt sind, physikalische Aussagen in ikonischen Darstellungen auszudrücken, dann können ihre Fähigkeiten auch in Testaufgaben mit ikonischen Darstellungen geprüft werden. Dadurch sind qualitative, Verständnis verlangende Aufgaben zu Vorgängen möglich, die quantitativ nicht bearbeitet werden können. Die Art der Leistungsbewertung und die Art der Prüfungsaufgaben sind natürlich entscheidend dafür, wie Schüler lernen. Wenn primär fakten- oder algorithmenorientiert geprüft wird, gibt es keine Notwendigkeit, das Thema so zu durchdenken, dass ein Verständnis erreicht wird (Renkl, 2002, S. 595 + S. 598). Deshalb sind qualitative, Verständnis voraussetzende Aufgaben nötig. Weitere Beispielaufgaben aus einer Schulaufgabe, in denen ebenfalls die Größen durch Pfeile darzustellen sind, betreffen den senkrechten Wurf und eine Transferaufgabe, in der - obwohl das Grundgesetz der Mechanik $F = m \cdot a$ erst im eindimensionalen Fall behandelt war - nach der wirkenden Kraft auf eine Kugel gefragt wurde, die von einer Person an einem Faden auf einem Kreis herumgeschleudert wurde.

Bei der Behandlung der Kreisbewegung kann man nun darauf bauen, dass die Schüler bereits wissen, dass die Beschleunigung nach innen weist. An einer Simulation kann man außerdem $a \sim 1/r$ und $a \sim v^2$ vermuten. Eine deduktive Herleitung der Zentripetalbeschleunigung $a = v^2/r$ wird aus Zeitgründen und wegen geringem Nutzen der mathematischen Umformungen nicht empfohlen. Wenn man die Gleichung begründen will, ist deshalb eine kurze qualitative Begründung sinnvoller: Bei doppelter Schnelligkeit ist auch der im Zeitintervall Δt überstrichene Winkel doppelt so groß, was bei kleinen Δt näherungsweise zur vierfachen Geschwindigkeitsänderung führt (siehe Abb. 5.23) (Dorn, Bader, 1975, S. 119; Heuer, 1980, S. 73). Trotz dieses Wissens über die Beschleunigung gehen die Schüler in der Regel von einer Kraft nach außen aus. Hier ist nun auch nochmals an die Versuche anzuknüpfen, die bereits beim ersten newtonschen Gesetz diskutiert wurde. Außerdem stellen sich alle Schüler an einem aufgezeichneten Kreis auf und versuchen durch Schläge oder Tritte auf ein geradeaus fahrendes, batteriebetriebenes Fahrzeug dieses auf die Kreisbahn zu zwingen (Labudde, 2002, S. 281). Anhand der einfachen Versuche, sehen die Schüler, dass auf das Fahrzeug eine Kraft nach innen auszuüben ist und der Mitfahrer im Vergleich zum Fahrzeug von einer Kraft nach außen ausgeht, die objektiv nicht vorhanden ist und als Scheinkraft bezeichnet wird. Das Ge-

Eine Kugel der Masse $m = 5,0 \text{ g}$ wird in einer Flüssigkeit mit hoher geschwindigkeitsabhängiger Reibung $F_{\text{Reib}} = k \cdot v$ mit $k = 0,14 \text{ Ns/m}$ fallengelassen. Zeichne neben die Kugel Pfeile für die Gewichtskraft, Reibungskraft, Gesamtkraft, die Beschleunigung und die Geschwindigkeit für folgende Fälle: 1. kurz nachdem die Kugel fallen gelassen wurde, 2. nach längerer Fallzeit, bei der sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Wie groß ist diese Geschwindigkeit?

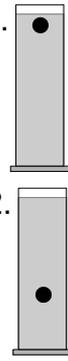


Abb. 5.22: Beispiel einer Testaufgabe, bei der ikonische Darstellungen verlangt sind.

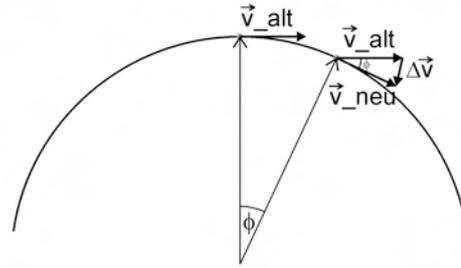
sprach darüber ist sehr wichtig, da es in der Alltagssichtweise natürlich ist, dass ein Auto auf der Straße eine Kurve fährt, wozu keine Kraft nötig ist, während mit Kräften der unnatürliche Vorgang erklärt werden muss, dass ein Auto geradeaus aus einer Kurve hinausfährt. In der physikalischen Sicht ist genau umgekehrt das Geradeausfahren der natürliche Vorgang, während zum Kurve Fahren eine Kraft nötig ist. Um die Gleichung für die Zentripetalkraft, die aus $F = m \cdot a$ folgt, noch zu überprüfen, dient ein Versuch mit dem Zentralkraftgerät der Firma Phywe, mit einem elektronischen Kraftmesser und mit PAKMA, wobei man mit einer Messung einen Graph „Zentripetalkraft über Geschwindigkeit“ (und „Zentripetalkraft über Geschwindigkeitsquadrat“) hat, da die Bewegung von alleine langsamer wird.

Früher wurden auch in der Schule viele Situationen aus der Sicht des mitbewegten Beobachters betrachtet und Aufgaben in diesem Bezugssystem gelöst. Wenn in der objektiven Sichtweise des ruhenden Beobachters die grundlegende Gleichung $m \cdot \vec{a} = \sum_i \vec{F}_i$ ist, ergibt sich nach dem Prinzip

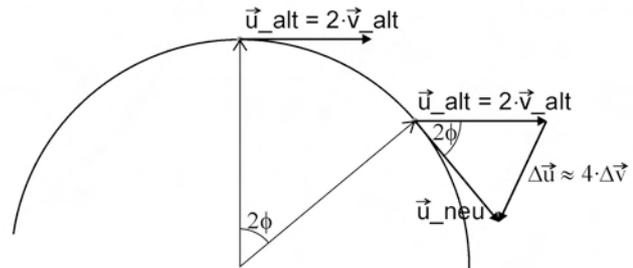
VON D'ALEMBERT mit der Trägheitskraft $\vec{F}_{Träg} = -m \cdot \vec{a}$ als grundlegende Gleichung $\vec{F}_{Träg} + \sum_i \vec{F}_i = 0$, was formal einem Kräftegleichgewicht der Statik entspricht. Mit dem Prinzip von

D'ALEMBERT können Probleme der Dynamik formal in Probleme der Statik, die leichter als die Dynamik zu verstehen ist, umgewandelt werden. Es ist somit verständlich, dass früher in der Schule viele Aufgaben und Probleme aus der Sicht des mitbewegten Beobachters behandelt wurden (Siehe z.B. Motorrad/Flugzeug bei Kurvenfahrt. Aus „Kraft nach innen gleich Zentrifugalkraft nach außen“ folgt: $\tan \alpha = \text{Zentrifugalkraft} / \text{Gewichtskraft}$). Problematisch wird es dann, wenn sich die Schüler nicht mehr bewusst sind, dass sie subjektiv aus der Sicht des mitbewegten Beobachters argumentieren und über Scheinkräfte reden, d.h. wenn sie zur objektiven Sicht nach dem zweiten newtonschen Axiom nicht mehr fähig sind (Auf das Motorrad wirkt keine Zentrifugalkraft, sondern eine Zentripetalkraft durch die Bodenreibung). Da es in diesem Konzept nicht darum geht, dass die Schüler viele Aufgaben schnell lösen können, sondern dass sie die newtonsche Dynamik verstehen, soll nicht nur bei der Erarbeitung sondern auch bei allen Anwendungsaufgaben immer aus der Sicht des ruhenden Beobachters argumentiert werden (Die notwendige Zentripetalkraft kommt von einer bestimmten Kraft nach innen) (wie dies bereits WARREN (1979) forderte). Dies wird bei der Kurvenfahrt eines Autos und eines Motorrades angewandt.

a) Kreisbewegung mit konstanter Schnelligkeit:



b) Kreisbewegung mit doppelter Schnelligkeit bei gleichem Delta t:



Vergleich von a) und b):

Schnelligkeit:	ist doppelt so groß,
Winkel in Δt :	ist doppelt so groß,
Geschwindigkeitsänderung:	ist viermal so groß (näherungsweise),
Beschleunigung:	ist viermal so groß.

Abb. 5.23: Qualitative Begründung für $a_{Zentri} \sim v^2$

5.3.4.4 Grobstruktur des Dynamikunterrichts

Das hier beschriebene Unterrichtskonzept wurde im Schuljahr 2001/2002 vom Autor in einer Klasse getestet und daraufhin für die an der Evaluation teilnehmenden Lehrer ein knappe Übersicht über die Grobstruktur des Unterrichts mit verschiedenen Hinweisen erstellt (siehe Tab. 5.2). Eine Angabe von Lernzielen oder Medien ist hier aus Platzgründen nicht möglich. Auf der CD mit den Lehrermaterialien (siehe Anhang) befinden sich als Vorschläge außer dieser Grobstruktur auch detaillierte Beschreibungen jeder einzelnen Stunde. Die Medien, die in digitaler Form vorliegen (PAK-MA-„Projekte“, Videos, Folien, Arbeitsblätter etc.) wurden auf der CD zusätzlich in einer Materialienliste zusammengestellt. Wenn man diesem Vorschlag folgt, kann die ein- und zweidimensionale Dynamik einschließlich Wurfbewegungen (aber ohne Schwingungen und ohne Erhaltungsgrößen) in 20 Unterrichtsstunden behandelt werden, wenn Lernzielkontrollen nicht mitgezählt und nur zwei der fünf vorgeschlagenen Unterrichtsstunden zur Modellbildung eingesetzt werden.

Stunde	Thema
Newtonsche Gesetze:	
1	Vorhersagen zur realen Fahrradbewegung, idealer Versuch zum zweiten Newtonschen Gesetz (Masse konstant)
2	Idealer Versuch zum zweiten Newtonschen Gesetz (Kraft konstant), Versuch mit variabler Hangabtriebskraft (<i>wichtig!</i>) (Bei großer Zeitnot können die idealen Versuche auch entfallen und $a = F / m$ mitgeteilt werden. Diese Zeit kann dann für komplexe Versuche und Modellbildung verwendet werden.)
3	Versuch mit zusätzlichem Propeller, Verallgemeinerung des 2. Newtonschen Gesetzes, Versuch Gleitreibungskraft (<i>wichtig!</i>)
4	Der Kraftbegriff in der Alltagssprache, das erste Newtonsche Gesetz
5	Das dritte Newtonsche Gesetz (Wechselwirkungssatz)
6	Beispiele/Anwendungen zum dritten Newtonschen Gesetz, Unterscheidung Kräftegleichgewicht - 3. Newtonsches Gesetz
Anwendung bei eindimensionalen Bewegungen:	
7	Anwendung: Kräfte bei der schiefen Ebene (Auflagekraft, Zerlegung der Gewichtskraft)
<i>Bemerkung</i>	<i>In NG hier schon die Luftreibung (1 Std.), aber keine schiefe Ebene. In MNG hier erst zusätzlich schiefe Ebene, später dann Luftreibung.</i>
Additum 1	Modellbildung Schiefe Ebene (wenn genügend Zeit ist) (wenn Zeit knapp, besser Modellbildung zur Luftreibung statt zur schiefen Ebene !!)
Additum 2	Fortsetzung Modellbildung Schiefe Ebene
8	Modellbildung konstante Zugmasse und Kette (HA)
Additum 3	Evtl. Ergänzungen zur Modellbildung Schiefe Ebene
Lernzielkontrolle	2. Stegreifaufgabe zur Modellbildung und Verbesserung
<i>Bemerkung</i>	<i>hier in MNG auch sinnvoll: Modellbildung Schwingung</i>
9	Anwendung: Bewegung mit mehreren Kräften mit Reibungskraft, Übung von Rechenaufgaben
10	Atwoodsche Fallmaschine mit Experiment und mit Messung
11	Der freie Fall
12	Messung der Fallbeschleunigung, Senkrechter Wurf nach oben und Übungsaufgaben
13	Die Fallbewegung mit Reibung: Modellbildung Luftreibung (<i>wichtig!</i>)
14	Fragestunde, Übung, Wiederholung
Lernzielkontrolle	Schulaufgabe
Verbesserung	Verbesserung der Schulaufgabe
15	Waagrechter Wurf
16	Übung zum waagrechten Wurf

Anwendung bei zweidimensionalen Bewegungen:	
17	Kreisbewegung
18	Zentripetalkraft
19	Übung Zentripetalkraft
20	Fahrzeuge in Kurven

Tab. 5.2: Grobstruktur des Dynamikunterrichts

5.3.5 Die Behandlung des dritten newtonschen Gesetzes

Die im Unterricht häufig gewählten Formulierungen „actio gleich reactio“ bzw. „Kraft gleich Gegenkraft“ verstärken die in Kapitel 2.2.4.2 beschriebene falsche Einteilung in eine aktive Ursache und in eine passive Wirkung. In der newtonschen Sichtweise sind jedoch beides völlig gleichberechtigte Kräfte. Deshalb ist hier nicht von „actio und reactio“ oder „Kraft und Gegenkraft“ die Rede, sondern vom „dritten newtonschen Gesetz“ bzw. vom „Wechselwirkungssatz“.

Ein beim dritten newtonschen Gesetz häufig dargestellter Versuch ist der Versuch, der auf NEWTON selbst zurückgeht, bei dem ein Magnet und ein Eisenstück auf Korkstücken (oder Styropor) liegen, die wiederum auf Wasser schwimmen (Grehn et al., 1998, S. 50; Gaitzsch et al., 1996, S. 35; Feuerlein et al., 1993, S. 41). Dieser Versuch ist durch die kleine Anziehungskraft nicht überzeugend realisierbar, da die Korkstücke schwanken und sie durch die Oberflächenspannung nicht nur gegenseitig, sondern auch vom Gefäßrand angezogen werden. Selbst bei einem guten Aufbau ist aber aufgrund der geringen Reichweite des Magnetfeldes eine Beobachtung nur über eine kurze Strecke (ca. 10 cm) bzw. kurze Zeit (ca. 5 s) möglich. Mehr, als dass sich beide irgendwie aufeinander zu bewegen, kann man kaum aussagen.

Deshalb wurde zunächst der Versuch mit zwei gleich schweren Schülern auf zwei Skateboards (Bader et al., 1998, S. 34; Gaitzsch et al., 1996, S. 35; Feuerlein et al., 1993, S. 41) eingesetzt. Ein Schüler bekommt den Auftrag, den anderen aktiv zu sich herzuziehen, während dieser den Auftrag bekommt, nur passiv das Seil festzuhalten – ohne den anderen herzuziehen. Man findet sicher auch zwei annähernd gleich schwere Schüler, die etwas Erfahrung mit Skateboards haben. Das Problem ist, das man in der Regel keine zwei Skateboards mit gleicher Reibung zur Verfügung hat, so dass sich keine gleichen Geschwindigkeiten einstellen und die Schüler sich nicht in der Mitte treffen.

In allen in Schulbüchern aufgeführten Versuchen werden stets nur die Geschwindigkeiten verglichen, die zwei Körper nach einer Beschleunigungsphase haben (Wilhelm, Heuer, 2004, S. 17 f.). Will man wirklich die Gleichheit beider Kräfte zeigen, muss man aber zwei Beschleunigungen messen. Dies ist mit einer kontinuierlichen Messung mit einem Messwerterfassungssystem möglich, was nur von wenigen Lehrbüchern eingesetzt wird – allerdings auch nur zur Geschwindigkeitsmessung.

Für eine genaue kontinuierliche Messung wurde der Standardversuch mit den zwei Skateboardfahrern auf der Luftkissenfahrbahn nachgebaut, so dass nach einer qualitativen Durchführung des Skateboardversuchs damit eine quantitative Behandlung zur Erarbeitung des dritten newtonschen Gesetzes möglich ist (Albert, 1997). Auf der horizontalen Luftkissenfahrbahn stehen zwei Luftkissengleiter. Auf einem wird eine kleine Holzplatte befestigt, auf der ein reibungsarmer Kleinmotor ($F \approx 0,02 \text{ N}$, Dauermagnet-Motor, Außenpolmotor, Firma Faulhaber, Serie 1616, Typ 003S), zwei 1,5

V-Batterien zur Spannungsversorgung und ein Schalter zum Einschalten befestigt ist (Abb. 5.24). An dem Kleinmotor befindet sich ein Wickelrad, auf das der Faden aufgewickelt werden kann, der beide Gleiter verbindet. Vor dem Wickelrad wird noch eine kleine Führungsöse befestigt, damit der Faden beim Aufprall auf den zweiten Gleiter nicht vom Wickelrad herunterrutscht. Will man zwei gleich schwere Gleiter, muss man auf den anderen ein entsprechendes Zusatzgewicht setzen.

Am Graphen (Abb. 5.25a) sieht man, dass sich beide Gleiter mit entgegengesetzten, aber betragsmäßig gleichen Beschleunigungen $|\vec{a}| \approx 0,05 \text{ m/s}^2$ bewegen, bis sie zusammenstoßen ($t = 3,8 \text{ s}$). Dabei bewegen sich die Gleiter ($m = 420 \text{ g}$) über jeweils eine Strecke von $\Delta x = 0,4 \text{ m}$. Wenn man will, kann man auch betrachten, wie sich die beiden Gleiter nach dem Stoß (3,8 - 4,6 s) mit betragsgleichen Beschleunigungen langsamer werdend voneinander wegbewegen (4,6 - 6,0 s) und dann wieder mit gegengleichen Beschleunigungen aufeinander zufahren (6,0 - 7,4 s) (Abb. 5.25 b). Die Beschleunigung ist beim auseinander fahren etwas größer, da die Reibung nun auch in die Richtung der Zugkraft wirkt.

Interessant sind natürlich auch die Phasen, in denen die Gleiter zusammenstoßen (in Abb. 5.25b bei 3,8 - 4,6 s und 7,4 - 8,2 s, 9,4 - 10,0 s), so dass es sich lohnt, diese Stöße allein ohne Motor zu betrachten – bei gleich schweren und unterschiedlich schweren Gleitern. Damit die Beschleunigungen nicht zu kurz und stark sind, wurden an die Gleiter weiche Stoßfedern befestigt. Nachdem nun ein Gleiter angestoßen wurde (in Abb. 5.26

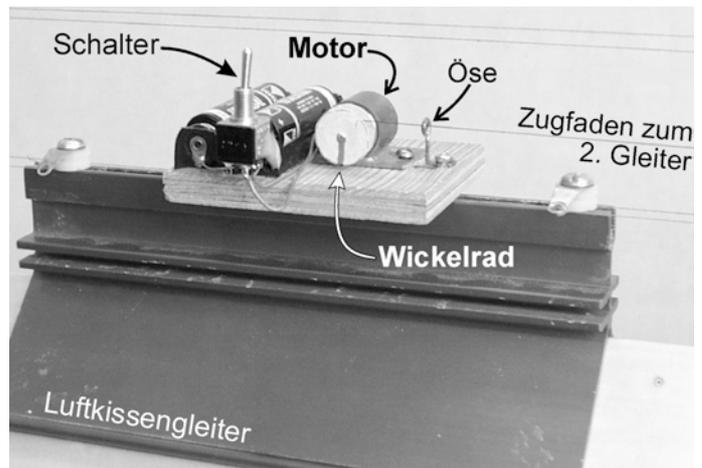


Abb. 5.24: Foto des Kleinmotors auf dem Luftkissengleiter (einschließlich Batterien, Schalter und Öse)

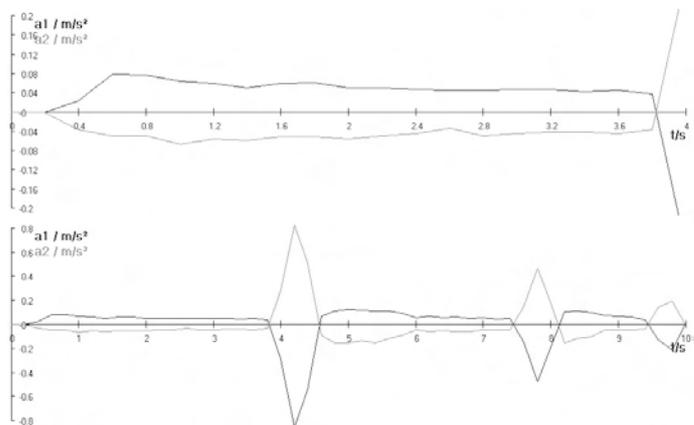


Abb. 5.25a: Beschleunigung der beiden Gleiter während des gegenseitigen Anziehens

Abb. 5.25b: Beschleunigung der beiden Gleiter einschließlich zweier Stöße (gemessen mit PC-Mäusen)

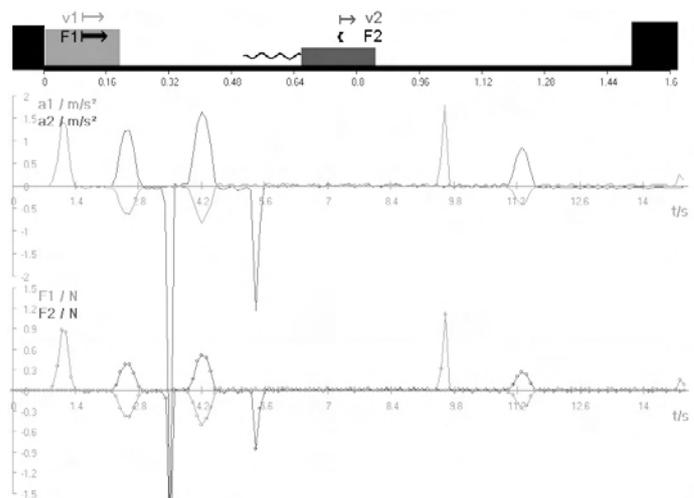


Abb. 5.26: Stoß unterschiedlich schwerer Gleiter, Ortsanimation mit Pfeilen für v und F , t - a -Graphen und t - F -Graphen (gemessen mit PC-Mäusen)

bei $t = 1,0$ s), stoßen die Gleiter während einer Messzeit von 15 s dreimal miteinander (in Abb. 5.26 bei 2,4 s, 4,1 s und 11,2 s) und mehrmals mit der Begrenzung der Luftkissenfahrbahn (in Abb. 5.26 bei 3,5 s, 5,4 s, 9,5 s und 14,8 s). Um in einer anschließenden Diskussion immer wieder nachschauen zu können, welcher Peak in welcher Situation entstand, ist eine Animation hilfreich, die die Bewegung der Gleiter entsprechend den Messwerten umsetzt und die jederzeit mit einem Ablauf des Graphen reproduziert werden kann. Als Vektoren können hier weitere interessierende Größen wie die Geschwindigkeit oder die Kräfte eingezeichnet werden (Abb. 5.26 oben), ohne dass man viele unübersichtliche Graphen erhält. Der Versuch kann leicht mit gleich schweren und unterschiedlich ungleich schweren Gleitern wiederholt werden, wobei insbesondere ungleich schwere Gleiter interessant sind (Abb. 5.26). Hier stellt man fest, dass zwar die Beschleunigungen während des Stoßes, also während der Wechselwirkung, unterschiedlich sind, aber die entsprechend den Massen gewichteten Beschleunigungen $m \cdot a$ betragsgleich sind (Abb. 5.26).

Dabei sollte man deutlich machen, dass beim Stoß unterschiedlich schwerer Körper die Wirkungen auf die beiden Körper tatsächlich entsprechend der Schülervorstellung unterschiedlich sind. Diese „Wirkungen“ sind die Beschleunigungen, sie entstehen aber durch gleich große Kräfte. Damit wird den Schülern zugestanden, dass ihre Erfahrung richtig ist; es findet allerdings eine Art Umdeuten statt. Ein Beispiel, das Schülern sehr gefallen hat, ist das Folgende: Wenn ein Hase von einem Auto erfasst wird, wirken auf beide gegengleiche Kräfte, was aufgrund der unterschiedlichen Massen zu recht unterschiedlichen Wirkungen führt.

NEWTON selbst hat bei „Wirkungen“ an die Kräfte gedacht und geschrieben „*Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung*“ (Newton, 1963, S. 32). In dieser Arbeit werden als Wirkungen die Beschleunigungen gesehen, so dass zwar die Kräfte (Einwirkungen), aber nicht die Wirkungen (Ergebnisse) gleich sind.

Eine weitere Variante auf der Luftkissenfahrbahn ist, die zwei unterschiedlich schweren Gleiter mit einer weichen Standard-Schraubenfeder ($D = 3$ N/m, $l = 0,15$ m, $\varnothing = 0,03$ m) zu verbinden. Zusätzlich wird an einen Gleiter eine der oben erwähnten kreisringförmigen Stoßfedern befestigt. Nun hat man einen ständigen Wechsel zwischen Anziehen durch die Schraubenfeder und ein Abstoßen durch die Stoßfeder, wobei wieder die Beschleunigungen im Allgemeinen unterschiedlich und die Kräfte in jedem Moment gleich groß sind (Abb. 5.27).

Auch beim dritten newtonschen Gesetz ist es wichtig, dass die vorhandenen Vorstellungen angesprochen und mit der physikalischen Sichtweise verglichen werden. Außerdem muss das erarbeitete Gesetz auf weitere Kontexte projiziert werden,

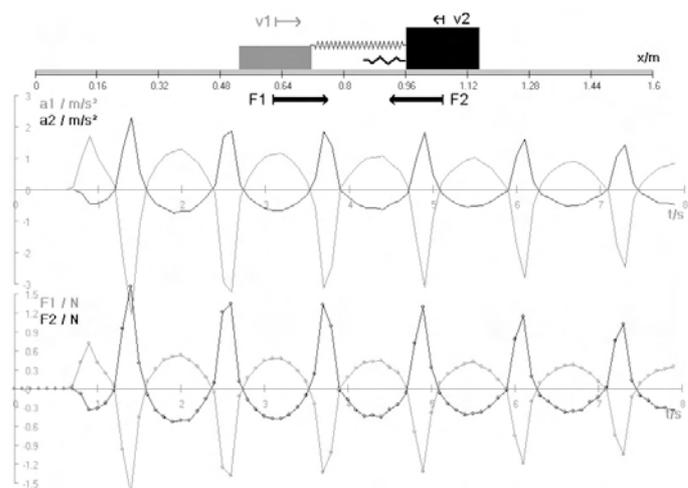


Abb. 5.27: Beschleunigungen und Kräfte beim Wechsel zwischen Anziehen und Abstoßen bei zwei unterschiedlich schweren Gleitern (gemessen mit PC-Mäusen)

nach Gemeinsamem darin gesucht werden und die Struktur wieder erkannt werden. Ein wichtiges, aber schwieriges Standardbeispiel ist, sich den Wechselwirkungspartner eines fallenden Apfels zu überlegen.

Ein guter Versuch, der mehr herausfordert und Schülervorstellungen bewusst angeht, ist der Versuch mit der batteriebetriebenen Spielzeugeisenbahn (Braunschmidt, 1972, S. 53; Bader et al. 1998, S. 35; Feuerlein et al., 1993, S. 44): Ein Schienenstück ist auf Walzen gelagert. Fährt die Eisenbahn an, bewegt sich nicht nur die Eisenbahn nach vorne, sondern auch die Schiene nach hinten. Für eine weitere Analyse des Anfahrvorgangs nimmt man ein Spielzeugfahrzeug, das von einem verdrillten Gummiring angetrieben wird. Spannt man den Gummiring extrem stark und setzt das Fahrzeug dann auf eine glatte, mit Wasser benetzte Fläche, fährt es trotzdem nicht an, sondern bleibt überraschenderweise an seinem Platz stehen, während das Wasser durch die sehr schnell drehenden Räder nach hinten weggespritzt wird. Das Fahrzeug konnte „sich“ also nicht „selbst“ beschleunigen. Durch die fehlende Reibung konnte die Unterlage keine Kraft auf das Fahrzeug ausüben.

Die Idee, dass sich ein Auto selbst beschleunigt, entspricht physikalisch der Geschichte des Barons Münchhausen, der sich selbst aus dem Sumpf zieht. Deshalb ist es sinnvoll, diese Geschichte zu diskutieren (Backhaus 2001, S. 14; Feuerlein et al., 1993, S. 44). Zum Vergleich eignet sich folgender Freihandversuch: Auf einem Wagen wird ein größeres ebenes Segel mit Pappe befestigt. Liegt ein kleiner Föhn auf dem Wagen und bläst in das ebene Segel (siehe Abb. 5.28), bewegt sich der Wagen bei der vorhandenen Reibung nicht (da die Luft hauptsächlich seitlich abgelenkt wird und nicht um 180°

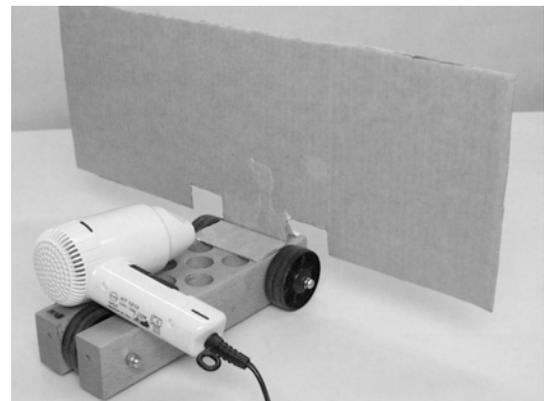


Abb. 5.28: Versuch zur Münchhausen-Geschichte: Föhn und Segel auf gleichem Wagen montiert

umgelenkt wird). Hält man dagegen den Föhn mit der Hand vor das Segel, bewegt sich der Wagen. Äquivalent, aber nicht so eindrücklich, ist ein Nachbau des Magnetantriebs aus den Geschichten MICHAEL ENDES über Jim Knopf und Lukas dem Lokomotivführer, bei dem die Lokomotive Emma durch einen an ihr befestigten Magneten gezogen wird.

Man sollte also unbedingt diskutieren, wie die Bewegungen im Alltag zustande kommen und wer auf wen eine Kraft ausübt. So wie der startende Sprinter den Startblock nach hinten drückt und vom Startblock nach vorne gedrückt wird, wird im Paddel- oder Motorboot das Wasser nach hinten gedrückt. Beim Propellerflugzeug, beim Propellerfahrzeug (im Spielwarenhandel) oder beim Düsenflugzeug wird die Luft nach hinten beschleunigt und damit von der Luft das Flugzeug nach vorne. Das dritte newtonsche Gesetz ist auch eine Erklärung für das Fliegen der Flugzeuge (Weltner, 2002): Die Tragflächen lenken die Luft nach unten (Kraft von Tragflächen auf Luft), entsprechend gibt es eine Kraft von der Luft auf die Tragflächen nach oben.

Als Versuche eignen sich auch einige Versuche, die normalerweise für das Thema Rakete aufgehoben werden. Das „Rückstoßprinzip“ ist ja nur ein Spezialfall für das „dritte newtonsche Gesetz“. Ein schöner einfacher Freihandversuch ist das Luftballonauto, bei dem ein aufgeblasener Luftballon auf dem Auto befestigt wird und die Luft nach hinten und das Auto nach vorne beschleunigt wer-

den. Steht dieses Spielzeug nicht zur Verfügung, kann man natürlich auch einen aufgeblasenen, nicht verschlossenen Luftballon frei davonfliegen lassen. Schließlich kann man obigen Fön auch so auf den Wagen legen, dass er Luft nach hinten bläst.

Fasziniert sind die Schüler stets von der Überlegung, dass bei einer Ohrfeige jeweils die gleiche Kraft auf die Backe und die Hand wirkt, obwohl beim Schmerzempfinden und den juristischen Folgen ein Unterschied besteht.

Wichtig ist auch etwas gegen die folgende Verwechslungsgefahr zu tun: Zwei gegengleiche Kräfte greifen als Wechselwirkungskräfte an zwei beteiligten Körpern an (3. newtonsches Gesetz) oder zwei gegengleiche Kräfte erzeugen an einem Körper ein Kräftegleichgewicht. Bei einem Kräftegleichgewicht darf man deshalb auch nicht von einer „Gegenkraft“ sprechen, da dieser Begriff für eine Wechselwirkungskraft reserviert sein soll, sondern nur von einer „Gleichgewichtskraft“ oder noch besser von einer „Kompensationskraft“.

Als Hausaufgabe zum Nachdenken kann man ein schwieriges Problem stellen, das für Schüler in der Erklärung recht anspruchsvoll ist. In einem Versuch befinden sich zwei Magnete mit gleicher Orientierung in einem passenden Glasgefäß auf einer Waage (die nicht auf magnetische Kräfte reagiert) (Feuerlein et al., 1993, S. 44). Wenn man den oberen Magneten umdreht, schwebt er und die Frage ist, was dann die Waage anzeigt. Eine andere Möglichkeit für eine schwierige Nachdenk-Hausaufgabe ist ein Versuch, bei dem ein Gewichtsstück an einer Feder über einem Becher Wasser hängt, der auf einer Waage steht. Die Frage ist, was an der Waage und was an der Feder zu beobachten ist, wenn das Gewichtsstück in das Wasser gehängt wird (Gaitzsch et al., 1996, S. 35).

5.3.6 Verschiedene Messmöglichkeiten zur Dynamik

Alle Experimente zur Dynamik wurden mit PAKMA (unter Windows 98) und der PAKMA-Hardware (Steckkarte, PAKMA-Interfacebox, Präzisionslaufräder) durchgeführt und entsprechende PAKMA-Programme standen den Lehrern auf der CD (siehe Anhang) zur Verfügung. Von Vorteil war, dass hier bis zu drei Zählräder angeschlossen werden konnten, die beide in zwei Richtungen messen konnten und sehr genau waren (Gitterabstand 80,4 μm). Mittlerweile wird die gesamte Hardware allerdings nicht mehr produziert und die Steckkarte ist nicht mit Windows NT/2000/XP kompatibel.

Natürlich gibt es viele andere Messwerterfassungssysteme, aber zum Zeitpunkt der Erstellung der Unterrichtsmaterialien konnte kein anderes Messwerterfassungssystem die gewünschten dynamisch ikonischen Repräsentationen anzeigen. Einzige Ausnahme ist das betriebssystemunabhängige Java-Programm JPAKMA (Schönberger et al., 2002; Gößwein et al., 2002; Gößwein et al., 2003), das mit dem LabPro von Vernier messen kann und noch mehr unterschiedliche dynamisch ikonischen Repräsentationen als Windows-PAKMA ermöglicht. Leider steht diese Software, die schnelle Rechner voraussetzt, aber noch nicht für Schulen zur Verfügung.

Ab der Version PAKMA 2004 ist es möglich, in PAKMA mit dem Sensor-Cassy von Leybold Didactic zu messen. Während aber die Messung von Spannungen (und Strömen) einfach geht, muss man beim Messen mit Zählrädern mehr beachten (Kleine Umbauarbeit und pro Laufrad zwei Kanä-

le, d.h. ein Sensor-Cassy nötig). Außerdem gibt es von Leybold keine Laufräder mit so hoher Ortsauflösung.

Deshalb wurden verschiedene Hardware-Alternativen für PAKMA getestet. Attraktive quantitative Versuche zur eindimensionalen Kinematik und Dynamik kann man auch mit der simplen PC-Maus und mit PAKMA durchführen. Mit einer Maus ist die Messung **einer** eindimensionalen Bewegung möglich (siehe Anhang Kapitel 11.1.3.1). Zu bedenken ist auch, dass in der Maus eine kleine Reibung vorliegt, die bei idealem Aufbau ca. 0,01 N beträgt.

Zum Messen von **zwei** eindimensionalen Bewegungen können zwei identische PC-Mäuse verwendet werden (siehe Anhang Kapitel 11.1.3.2). Alle Abbildungen der Versuche im Kapitel 5.3.5 wurden mit einem Laptop mit Windows XP und PAKMA 2002+ und zwei Mäusen als ein serielles Messgerät aufgenommen. Im Gegensatz zur Messung einer einzigen eindimensionalen Bewegung sind hier mehr Umbauarbeiten nötig (siehe Anhang Kapitel 11.1.3.2).

Eine sehr schöne, wenn auch nicht billige Lösung zur Aufnahme von Stoßversuchen erhält man mit VideoCom von Leybold Didactic. Mit dieser CCD-Kamera ist eine hochauflösende berührungsfreie Bewegungsaufnahme möglich (Auflösung: max. 80 Bilder/Sekunde, 0,25 mm bei 1 m registrierbare Weglänge). In der Software „VideoCom Bewegungen“ können die Messwerte außer in Graphen und Tabellen auch mit Marken auf einer Skala dargestellt werden, nicht aber als Pfeile. Allerdings ist es nicht möglich, gleichzeitig nur den $F(t)$ -Graphen und eine Zeigerdarstellung für den Ort anzuzeigen. Außerdem kann man keine Reproduktion der Messung (in Echtzeit oder verlangsamt) zeigen. Im Gegensatz zu anderen Messwerterfassungssystemen können aber auch mehr als zwei Objekte verfolgt werden. Insgesamt gesehen bietet die Maus als serielles Messgerät also das beste Preis-Leistungs-Verhältnis.

5.4 Unterrichtsstrategien

Eine Veränderung von Vorstellungen von Schülern von der Alltagsvorstellung hin zu einer physikalischen Vorstellung kann man als Konzeptwechsel beschreiben (siehe Kapitel 2.1.6). Gemeint ist hiermit auch der Aufbau paralleler 'wissenschaftlicher' Denkstrukturen neben den weiter bestehenden Alltagsstrukturen, wobei im Sinne eines bewussten Nebeneinanders auch mitgelernt werden muss, wann welche Begriffe und Strukturen angemessen sind (Niedderer, 1988, S. 88). Ein solches nicht-unberührtes, bewusstes Nebeneinander schließt eine Kompartimentalisierung des Wissens aus. In der didaktischen Literatur der letzten 15 Jahre gibt es recht unterschiedliche Vorschläge, wie im Unterricht ein Konzeptwechsel zu erreichen ist. (Einen kurzen, kommentierten Überblick gibt z.B. WODZINSKI, 1996, S. 23 ff.). DUIT unterscheidet dabei zwei grundlegende Möglichkeiten (Duit, 1993b, S. 191; Duit, 1996, S. 148; Villani, 1992, S. 228 ff.):

1. Konfliktstrategien, die einen kognitiven Konflikt zwischen Schülervorstellungen und physikalischer Sichtweise erzeugen und dann versuchen, diesen aufzulösen. Der Lehrer beginnt hier mit Aspekten der physikalischen Vorstellungen, die sich von den Alltagsvorstellungen deutlich unterscheiden, und versucht bei den Schülern kognitive Konflikte zu erzeugen. Der Lernende soll bei Experimenten eine deutliche Diskrepanz zwischen seinen Vorhersagen aufgrund seiner Vorstellung und dem tatsächlich eingetretenen Ergebnis sehen. „*Dies ist ein diskontinuierlicher Weg,*

der manches mit Revolution im Sinne von Kuhn (1976) gemein hat“ (Duit, 1993b, S. 191). Der Begriff „conceptual change“ wird in der Regel mit diesem diskontinuierlichen Weg verbunden und korrespondiert mit PIAGETS Begriff „Akkommodation“ (Duit, 1996, S. 148).

2. „Aufbau“-strategien, die an bestehende Vorstellungen anknüpfen, die bereits weitgehend mit den physikalischen übereinstimmen und von da aus die Schüler Schritt für Schritt zu wissenschaftlichen Vorstellungen führen. Die bestehenden Erfahrungen werden aufgenommen und neu abgegrenzt, um dann zusammen mit neuen Erfahrungen und Erkenntnissen angemessene physikalische Konzepte aufzubauen. Es handelt sich also um eine allmähliche Entwicklung. *„Man kann hier von einem bruchlosen, kontinuierlichen Weg (in Anspielung auf Paradigmenwechsel in der Geschichte der Wissenschaften in der Terminologie von T. S. Kuhn, 1976, auch von Evolution) sprechen*“ (Duit, 1993b, S.191). Hier spricht man auch von „conceptual growth“, was mit PIAGETS Begriff „Assimilation“ korrespondiert.

Welche Wege für einen Unterrichtsgang zu beschreiten sind, hängt u.a. von den Zielsetzungen ab: Sollen z.B. wissenschaftstheoretische Aspekte mit angesprochen werden, exemplarisch bewusst werden oder gar im Vordergrund stehen? Ebenso sind bei diesen Entscheidungen die kognitiven Fähigkeiten der Lernenden mit einzubeziehen: Wie komplex dürfen die zu erarbeitenden Inhalte sein? Aber auch: Inwieweit können Schüler für metakognitive Betrachtungen interessiert werden?

5.4.1 Aspekte kontinuierlichen Lernens im Gesamtkonzept

Bei dem hier entwickelten Konzept handelt es sich um eine Aufbaustrategie, bei der die Schüler Schritt für Schritt auf einen weitgehend bruchlosen Weg zu wissenschaftlichen Vorstellungen geführt werden. Durch eine behutsame Steuerung sollen die Schüler in die komplexe physikalische Sichtweise eingeführt werden. Es werden dabei also nicht erst die Alltagskonzepte ausführlich thematisiert, um sie dann durch kognitive Konflikte zu erschüttern. Charakteristisch für das Vorgehen sind folgende Aspekte, mit denen Schülervorstellungen berücksichtigt werden:

- Es werden relevante Alltagserfahrungen ins Gedächtnis gerufen. Wo Alltagsphänomene nicht so leicht zu erfassen sind, weil sie z.B. zu schnell ablaufen oder Vorgänge im allgemeinen von einem zu einseitigen Standpunkt gesehen werden, werden die eigenen Erfahrungen erweitert, z.B. mit einem Video, das zeigt, wie ein im Kreis geschleuderter Gummistopfen nach dem Loslassen (Abschneiden) weiter fliegt.
- Alle Versuchsaussagen aus quantitativen Experimenten werden mit Hilfe von dynamisch ikonische Repräsentationen anschaulich dargestellt und dabei auch strukturelle Aussagen über Größen mit angezeigt, um die Aussagen im Kontext der Versuchssituation möglichst direkt erschließbar zu machen und die Möglichkeiten für Fehlinterpretationen zu reduzieren.
- Komplexere Phänomene wie beschleunigte Bewegungen werden nicht nur an einem Einzelfall aufgezeigt, sondern an prototypischen Situationen, um zu vermeiden, dass durch die Beschränkung auf einengende Spezialfälle unangemessene Vorstellungen und Bedeutungen von Begriffen aufgebaut werden.
- Bei der Einführung wichtiger Grunderfahrungen wird vom allgemeinen Fall und nicht vom Spezialfall ausgegangen.

Diese Schritte beim Erkennen und Erarbeiten neuer qualitativer und quantitativer Aussagen aus Phänomenen und Experimenten sind zwanglos der obigen „Aufbau“-Strategie zuzuordnen. Fehlvorstellungen werden dabei bei der Auswahl der Experimente und Beispiele berücksichtigt, ohne sie vor dem Einsatz dieser Experimente und Beispiele explizit zu formulieren. Erst nachdem das physikalische Konzept vorgestellt ist, wird es an geeigneten Stellen den Alltagssichtweisen gegenübergestellt.

Eine besondere Klasse unter den Aufbaustrategien ist die des „Umdeutens“. Hierbei sagt man den Schülern bewusst nicht, dass ihre Vorstellungen aus der Sicht der Physik falsch sind, sondern betont, dass sie im Prinzip etwas Richtiges denken, aber die Physik dafür andere Begriffe benutzt. Das hierzu meist erwähnte Beispiel kommt aus der Elektrizitätslehre. Schüler denken häufig, dass in der Batterie „Strom gespeichert“ ist und im Lämpchen „Strom verbraucht“ wird. Der Lehrer bemüht sich nun um eine Umdeutung, indem er betont, dass in der Batterie chemische Energie „gespeichert“ ist, die in elektrische Energie umgewandelt wird. In dem Lämpchen wird die elektrische Energie in Licht und Wärme umgewandelt, also quasi „verbraucht“.

In der Kinematik und Dynamik ist dies kaum möglich, da es sich bei einigen Begriffen der Schüler wie „Kraft“ um Clusterbegriffe handelt. In dem hier erarbeiteten Konzept wurde dieses Umdeuten deshalb nur an einer Stelle genutzt. Den Schülern wurde gesagt, dass das, was sie mit „Geschwindigkeit“ bezeichnen, in der Physik mit „Schnelligkeit“ oder „Tempo“ oder „Geschwindigkeitsbetrag“ bezeichnet wird, während der physikalische Begriff „Geschwindigkeit“ eine Richtung bzw. ein Vorzeichen hat. Die Schüler kamen mit dieser Umdeutung gut zurecht und gebrauchten im Unterrichtsgespräch auch gerne den Begriff „Schnelligkeit“.

In gewisser Weise wird beim dritten newtonschen Gesetz ähnlich verfahren. Bei Stößen unterschiedlich schwerer Körper glauben Schüler, dass der schwerere eine größere Kraft auf den leichteren ausübt als umgekehrt. Hier wird den Schülern mitgeteilt, dass hinter ihrer Auffassung eine richtige Erkenntnis liegt: Die beobachtbare Wirkung, nämlich die Beschleunigungen, sind betragsmäßig unterschiedlich, aber nicht die Beträge der Kräfte.

Ein Vorteil des Umdeutens liegt auf der emotionalen Ebene. Den Schülern wird nicht gesagt, dass ihre Vorstellung falsch ist, sondern dass sie einen richtigen Aspekt beinhaltet.

5.4.2 Aspekte diskontinuierlichen Lernens im Gesamtkonzept

Dadurch, dass die Schüler vor dem Ablauf einer Messung oder einer Simulation häufig vorhersagen sollen, was sie erwarten (siehe Kapitel 5.4.4), ergeben sich auch Elemente einer Konfliktstrategie. Kognitive Konflikte können sowohl zwischen Schülervorstellungen und der Beobachtung des Ablaufs eines Experimentes bzw. einer Simulation als auch zwischen verschiedenen, nebeneinander bestehenden Schülervorstellungen entstehen. Dabei muss man sich den nicht unerheblichen Problemen dieser Strategie bewusst sein.

Bei dieser Strategie muss schon vor Durchführung des Experiments bzw. vor Ablauf einer Simulation klar herausgearbeitet werden, was die Schüler darüber denken, was sie vorhersagen. Damit die Schüler später ihre Voraussagen nicht leugnen können, legen sie insbesondere Graphenvorhersagen bei der Modellbildung im Voraus schriftlich fest. Es kann für Schüler durchaus motivierend sein,

wenn sie erleben, dass sie zu falschen Voraussagen kommen, obwohl die entsprechenden physikalischen Gesetze bereits gelernt wurden.

Eine Frage dabei ist, ob die Schüler auch wirklich den Unterschied zwischen Experiment und ihren Vorhersagen erkennen oder ob sie ihre Vorstellungen in das Experiment „hineinsehen“. So behaupten doch viele Schüler, dass ein Experiment nach ihrer Vorhersage ablief, obwohl dies nicht der Fall war (Beispiele dazu gibt z.B. DUIT (1992, S. 283; 1989, S. 37 f.) an). Hier ist die Darstellung des Versuchsablaufs oder Simulationsablaufs mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen eine wichtige Hilfe. Es wird z.B. vorher gefragt, ob ein bestimmter Pfeil, der eine bestimmte Größe repräsentiert, in einer bestimmten Situation nach rechts oder links zeigt, länger oder kürzer wird. Das Ergebnis ist jeweils so eindeutig, dass man nicht seine Vorhersage hineinsehen kann.

Problematisch ist allerdings, wenn Schüler in Bereichen, in denen sie kaum Vorstellungen haben, dazu aufgefordert werden, ihre Vorstellungen ausführlich explizit zu formulieren und damit erst einmal eine Theorie zu konstruieren. Während sie vorher nur eine Präferenz für die Einordnung des Phänomens haben, werden explizit formulierbare Fehlvorstellungen erst erzeugt. So schreibt WIESNER zum Optikunterricht: *„Haben die Schüler ihre 'Fehlvorstellungen' im Verlauf der Diskussion erst einmal zu einer gewissen Reife gebracht, ist eine Widerlegung der unerwünschten bzw. die Akzeptanz der physikalischen Vorstellungen schon aus Zeitgründen erheblich erschwert“* (Wiesner, 1992, S. 290). Daraus folgt: *„Die Methode des Hervorlockens von Schülervorstellungen am Anfang der Unterrichtseinheit ist nicht in allen Gebieten der Schulphysik sinnvoll“* (Grob et al., 1993, S. 365). Bei der Dynamik geradliniger Bewegungen haben die Schüler jedoch schon viele, konkrete und bewährte Vorstellungen, so dass dieser Einwand in diesem Bereich wohl nicht zutrifft.

Zu bedenken ist auch, dass die Diskussion der Schülervorstellungen und die Verunsicherung dieser Konzepte nicht zu viel Zeit in Anspruch nehmen darf, da der Aufbau des physikalischen Konzeptes und das Vertrautwerden damit auch viel Unterrichtszeit bedarf (Wodzinski, 1996, S. 28).

Zusätzlich zu den erwähnten Problemen gibt es die emotional begründete Schwierigkeit, dass sich viele Schüler nur ungern auf kognitive Konflikte einlassen. *„Gute, erfolgreiche Schüler reagierten enthusiastisch auf kognitive Konflikte. Ihnen gefiel der 'verblüffende Effekt' der Methode und die Konfrontation mit neuen Problemen. [...] Unerfolgreiche Schüler [...] entwickeln negative Selbstbilder, negative Einstellungen zur Schule und zu Schulaufgaben und einen hohen Grad an Angst“* (Dreyfus et al., 1990, S. 565, Übersetzung T. W.).

Deshalb ist es da, wo im Unterricht eine Konfliktstrategie eingesetzt wird, um den Lernenden Unzulänglichkeiten ihrer Vorstellungen deutlich zu machen, aus mehreren Gründen wichtig, wie diese Vorstellungen im Unterricht bewertet werden. Es wäre sachlich unangemessen und psychologisch ungeschickt, würden „Fehlvorstellungen“ als unsinnig klassifiziert, wie z.B. Reibung nur als Hemmnis zu sehen. Es hieße Schüler zu verunsichern und ihnen evtl. auch ihre Offenheit zu nehmen, wenn diese Aspekte nicht thematisiert und stattdessen nur negativ belegt werden. Vielmehr ist es unbedingt notwendig, dass die Schüler sehen, die physikalische Sichtweise ist eine Beschreibung der Realität, welcher generell nicht immer die Attribute „wahr“ oder „falsch“ zukommt. Wie genau Phänomene durch Vorstellungen beschrieben und vorhergesagt werden können, hängt entscheidend davon ab, wie weit quantitative Beschreibungen möglich sind. Für die Schüler ist es eine wichtige

Einsicht, dass es unterschiedliche Beschreibungen der uns umgebenden Welt gibt, die aber unterschiedlich präzise sind bzw. unterschiedliche Geltungsbereiche haben. Im Anfangsunterricht kann häufig die Vorstellung gewonnen werden, physikalische Gesetze und Begriffe sind absolute Wahrheiten. Umso wichtiger ist es, hier exemplarisch aufzuzeigen, dass es keine logische Herleitung von Vorstellungen und Theorien aus Phänomenen gibt. Ein Unterrichtsziel ist, dass die Schüler die physikalische Sichtweise verstehen und lernen, physikalisch zu argumentieren. Der Schüler muss aber nicht davon überzeugt werden, dass die physikalische Sichtweise die einzig mögliche ist; er darf seine Sichtweise in einem bewussten und reflektierten Nebeneinander neben der physikalischen Sichtweise durchaus behalten, sollte aber ihre Unterschiede klar herausstellen können.

5.4.3 Thematisieren von Schülervorstellungen

Eng zusammen mit der Frage, ob man einen kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Weg wählt, hängt die Frage, in welcher Phase des Unterrichts man Schülervorstellungen thematisieren soll. Wenn die vorhandenen Schülervorstellungen für das Lernen neuer physikalischer Konzepte von so grundlegender Bedeutung sind, wie es die konstruktivistische Sichtweise sieht, ist es sinnvoll, diese Vorstellungen im Unterricht auch zu thematisieren und den physikalischen Vorstellungen gegenüberzustellen. Geschieht dies nicht, besteht die Gefahr, dass *„neue Information [...] so selektiert und transformiert [wird], dass sie in die vorhandene kognitive Struktur eingepasst werden kann bzw. diese erweitert, ohne sie im Kern zu verändern“* (Schecker, 1984a, S. 179). *„Einig ist man sich darin, dass Schülervorstellungen ausdiskutiert werden müssen. Es besteht aber kein Konsens darüber, wie man am Anfang einer Unterrichtseinheit mit den bereits vorliegenden Alltagsvorstellungen umgehen soll“* (Grob et al., 1993, S. 365). Wichtig ist dabei, dass der Lehrer die typischen Schülervorstellungen kennt. Deshalb werden sie in den für die Lehrer erstellten Unterrichtsmaterialien am Anfang und nochmals beim entsprechenden Thema vorgestellt.

Wer die Schülervorstellungen für kognitive Konflikte nutzen will, muss ihr Bewusstmachen an den Anfang eines Lehrgangs stellen, was in diesem Konzept *nicht* genutzt wird. Wie zuvor erwähnt ist insbesondere in Bereichen, in denen Schüler noch kaum Vorstellungen haben, ein Formulieren von Vorstellungen problematisch, da damit erst einmal eine Theorie konstruiert wird (Beispiel Optik, siehe Wiesner, 1992, S. 290) (siehe Kapitel 5.4.2). Aber auch bei der Dynamik geradliniger Bewegungen, bei der die Schüler schon viele, konkrete und im Alltag bewährte Vorstellungen haben, gibt es Zweifel, ob ein Formulieren eigener Vorstellungen am Anfang Sinn macht (Wodzinski, 1995, S. 249). Am Anfang aufgedeckte Schülervorstellungen kann man den Schülern aber nach einem erfolgreichen Unterricht zusammen mit ihrem Konzeptwechsel und ihrem Lernfortschritt aufzeigen, vorausgesetzt die aufgedeckten Vorstellungen werden schriftlich festgehalten. Im Unterrichtskonzept sollen deshalb die Schüler zu Beginn der Dynamik einen Zeit-Geschwindigkeits-Graphen eines Fahrrades, das mit konstanter Kraft gezogen wird, zeichnen, wobei die Graphen zunächst nicht thematisiert werden. Eine Besprechung dieser Kurven ist erst nach der Behandlung der Luftreibung vorgesehen, da hier sowohl lineare als auch in eine konstante Geschwindigkeit übergehende Graphen als „kontextabhängige Wahrheit“ (siehe Kapitel 2.1.2) eingeordnet werden können.

In diesem Unterrichtskonzept werden andere Möglichkeiten bevorzugt. Ein Ziel ist, im Unterricht ein solches Lernklima zu schaffen, dass Schülervorstellungen während der Behandlung des Lehrstoffes von selbst hervorkommen. Damit hätte man die Schülervorstellungen genau an der Stelle im Unterricht, an der man sie wirklich braucht und auch nur die, die wirklich stabil sind und Probleme bereiten. Die Schwierigkeit besteht darin, wirklich ein solches Unterrichtsklima zu schaffen, dass sich die Schüler trauen, ihre Vorstellungen einzubringen. Dabei müssen die Schüler nicht selbstständig ihre Vorstellungen perfekt ausformulieren, sondern der Lehrer kann auf entsprechende Schüleräußerungen reagieren, indem er die entsprechende Fehlvorstellung, die er zu hören glaubte, formuliert und fragt, ob dies gemeint war. Insbesondere bei Geschwindigkeit und Beschleunigung kann so schnell die Alltagsvorstellung und die physikalische Vorstellung gegenübergestellt werden. In dem die Evaluation begleitenden Fortbildung wurden die teilnehmenden Lehrer darauf geschult, auf die Äußerungen typischer Schülervorstellungen zu achten und sie wurden angehalten, darauf einzugehen.

Eine andere Möglichkeit ist erst das physikalische Konzept vorzustellen und dieses danach mit anderen Vorstellungen zu vergleichen. Durch diesen nachträglichen Vergleich kann einer eventuell entstandenen Kompartimentalisierung von korrektem und inkorrektem Wissen entgegengewirkt werden und ein Clusterbegriff wie „Kraft“ in verschiedene physikalische Begriffe (Kraft, Impuls, Energie etc.) differenziert werden. So wird in dem Konzept vorgeschlagen, nach der Verallgemeinerung des zweiten newtonschen Gesetzes auf die Bedeutung des Begriffes „Kraft“ im Alltag einzugehen.

Das Thematisieren typischer Schülervorstellungen nimmt also auf dem ersten Blick in dem Unterrichtskonzept keinen großen Raum ein. Trotzdem werden in dem Konzept überall Fehlvorstellungen konsequent berücksichtigt. Dies geschieht in der Auswahl der Experimente und Beispiele, in der Schwerpunktsetzung bei den Themen und Beispielen und den Lehreraussagen. Der Unterricht soll nach diesem Konzept so gestaltet werden, dass eine Festigung von Fehlvorstellung und insbesondere eine Erzeugung von Fehlvorstellungen vermieden wird. Auch die graphische Modellbildung und die dynamisch ikonischen Repräsentationen werden bewusst zur Veränderung von Schülervorstellungen verwendet, wobei bei deren Einsatz Schülervorstellungen hervorkommen, die dann thematisiert werden können.

Zur Thematisierung der Schülervorstellungen ist das Gespräch zwischen Schülern und Lehrern nötig. Im Dialog, in dem die Schülervorstellungen ernst genommen und diskutiert werden, können sich die Schüler ihrer eigenen Ideen und Vorstellungen und der ihrer Mitschüler bewusst werden. Aufgabe des Lehrers ist es, ein vertrautes Lehr-Lern-Klima zu schaffen, in dem die Schüler frei über ihre Vorstellungen diskutieren können (Grob et al., 1993, S. 365). „*Im Gespräch stellen wir unser Verständnis auf den Prüfstand*“ (Nachtigall, 1992, S. 11). In einem Unterricht, in dem Schüler nur passive Informationsempfänger sind, ist ein Verstehen kaum zu erwarten. „*Der wichtigste Träger des begrifflichen Denkens ist die Sprache. Begriffliches Denken lernt man, in dem man spricht. Deshalb ist der Dialog, das Gespräch, der wichtigste Weg zur Einsicht*“ (Weizsäcker, 1978, zitiert bei: Nachtigall, 1992, S. 11).

Das eigenständige Denken des Schülers und damit seine Beobachtungen, Ideen und Fragen werden häufig durch Nichtbeachten, Umformulieren oder Warten auf die richtige Antwort unterdrückt. Der Lehrer braucht Geduld und echtes Verständnis und Interesse für die Ansätze der Schüler; er muss die Schüler zu eigenem Denken ermutigen. Dabei darf er nicht über „falsche“ Schülerantworten hinweggehen. Ungünstigerweise werden aber häufig solche „Fehler“ ignoriert oder als Ausrutscher oder Versehen abgetan, ohne darauf einzugehen. Auch der pure Hinweis, was falsch ist, genügt hier nicht. Ebenso genügt es nicht, die physikalische Sicht zum x-ten Mal auf gleiche Weise zu wiederholen. Recht häufig aber reagieren die Lehrer mit Entsetzen auf die Schülerantworten. BARUK legt dar, wie in Frankreich Mathematiklehrer häufig mit Antworten wie „Das darf doch wohl nicht wahr sein“, „erbärmlich“ oder „entsetzlich“ reagieren und was sie damit bei den Schülern anrichten (Baruk, 1989). Prinzipiell Ähnliches scheint auch für deutsche Physiklehrer zu gelten. Auf der Grundlage solcher Lehrerreaktionen ist kein partnerschaftlicher, sokratischer Dialog über Schülervorstellungen möglich. Stattdessen kann es beim Schüler tiefe Verletzungen geben. So entstehen die von HERICKS erwähnten „physikalisch sprachlosen“ Schüler (siehe Kapitel 2.1.5). Physikalisch tragfähige Theorien entstehen auch durch und auf dem Hintergrund von Fehlvorstellungen, wobei auch der Irrtum eine wichtige Rolle spielt. „*Die Erfahrung, dass wir irren können, ist unverzichtbar für das Verstehen der Physik*“ (Nachtigall, 1992, S. 11). Dem Irrtum darf deshalb nicht mit Entsetzen, sondern sollte mit Verständnis begegnet werden. Deshalb wird für einen Unterricht plädiert, in dem Fehler als Lerngelegenheit ihr eigenes Recht haben, Schüler Fehler als entwicklungsfördernde Ereignisse erleben und eine „Kultur des Fehlermachens und der Fehlerauswertung“ gepflegt wird (Bund-Länder-Kommission, 1997, S. 11 – 12; Häußler et al., 2000, S. 5).

5.4.4 Dynamisch ikonische Repräsentationen für Vorhersagen nutzen

Zur Veränderung von Schülervorstellungen ist ein Verstehen der physikalischen Sichtweise notwendig. Dazu muss der Dynamikunterricht erreichen, dass die Schüler sich aktiv mit den behandelten Fragen, Sachverhalten und Aussagen auseinandersetzen. Ein Zeigen und Erklären durch den Lehrer reicht nicht aus. Moderne Unterrichtsformen wie Freiarbeit und Projektarbeit, die sich für andere Zielsetzungen bewährt haben, sind allerdings nur wenig geeignet, stabile Fehlvorstellungen zur Dynamik zu überwinden und einen Konzeptwechsel herbeizuführen, da die Schüler in der selbstständigen Arbeit zu wenig mit der physikalischen Sicht konfrontiert werden. Auch wenn im lehrergeleiteten Unterricht alle Experimente als Demonstrationsversuche vorgeführt werden, ist mit Hilfe der dynamisch ikonischen Darstellungen trotzdem ein schülerzentrierter Unterricht möglich: Aufgabe der Schüler ist es, Vorhersagen zu machen, die Ergebnisse von Versuchen zu formulieren, zu beschreiben, zu diskutieren und sie zu den Vorhersagen in Beziehung zu setzen.

Ein sehr wichtiger Punkt für die Eigenaktivität ist vor allem, dass vor der Durchführung der Versuche und später dann vor dem Ablauf eines selbst erstellten Modells von den Schülern genaue Vorhersagen gefordert werden, insbesondere über relevante Größen und über die sie darstellenden Pfeile mit ihren Richtungen und ihren Änderungen. Anschließend können die Schüler ihre Vorhersagen mit den Abläufen vergleichen.

Findet die Darstellung eines Bewegungsablaufs nur mittels Graphen statt, können außer der Form des Graphen nicht viele Vorhersagen verlangt werden. Bei der Nutzung dynamisch ikonischer Repräsentationen ist das anders. Für jede Phase des Ablaufs kann nach der Form und Lage der Repräsentation jeder einzelnen Größe und evtl. ihrer Änderung gefragt werden. Beispielsweise kann man nach Richtung, Länge und Änderungsverhalten des Geschwindigkeitspfeiles, des Beschleunigungspfeiles oder verschiedener Kraftpfeile fragen.

Entscheidend ist dabei, dass der Lehrer nicht sagt, ob die Vorhersage richtig oder falsch ist, auch nicht indirekt durch Bemerkungen wie „Bist du dir da sicher?“ oder „Denk' doch noch 'mal genau darüber nach!“ Die Vorhersagen sollen weder bewertet noch hinterfragt werden, sondern vom Lehrer sollen nur verschiedene Vorhersagen gesammelt und vergleichend nebeneinander gestellt werden. Besonders die Unterschiede zwischen verschiedenen Vorhersagen sollen vom Lehrer aufgezeigt werden.

Durch die Vorhersagen können sich die Schüler ihrer eigenen Ideen und Vorstellungen bewusst werden. Bei dem anschließenden Ablauf werden die Schüler ihre Aufmerksamkeit besonders auf die Dinge richten, die unterschiedlich vorhergesagt wurden, und auch leichter erkennen, welche Vorhersage richtig war. Hätten die Schüler keine Vorhersagen gemacht, würden sie sich kaum über den Versuchsablauf wundern. So aber werden bei den Schülern evtl. kognitive Konflikte erzeugt und damit der Wunsch geweckt, den Vorgang zu verstehen. Dieses Infragestellen der eigenen Vorstellung passiert evtl. auch erst nach mehreren solchen Erfahrungen. Außerdem besteht hierdurch die Möglichkeit, während der Lehrstoff behandelt wird, die dazugehörigen Schülervorstellungen zu thematisieren. Dann aber ist zu analysieren, wieweit die Schülervorstellungen die experimentellen Befunde erklären und wie mit alternativen Vorstellungen umfassendere Erklärungen möglich sind, die dann im Vergleich zu bewerten sind. BLASCHKE und HEUER (2000, S. 87) nennen einen solchen Unterricht mit Vorhersagen, in dem Schüler ihre eigenen Vorstellungen formulieren und sich mit fremden Argumenten auseinandersetzen, einen „Werkstattunterricht“. LABUDDE (1997, S. 6) und AESCHLIMANN (1997, S. 15) sprechen dagegen nur dann von „Werkstattunterricht“, wenn die Schüler teils obligatorische, teils freiwillige und schriftlich formulierte Lern- und Übungsaufgaben einzeln oder in Gruppen selbstständig bearbeiten.

Im Detail können folgende Schritte bei der unterrichtlichen Behandlung eines Experiments mit Vorhersagen durchlaufen werden:

1. Der Lehrer zeigt den Versuch als qualitativen Versuch, d.h. ohne Messwerterfassung mit dem Computer, oder beschreibt, was beim Versuch gemacht wird.
2. Die Schüler machen (evtl. schriftlich auf einem vorbereiteten Antwortbogen) Vorhersagen zu typischen Situationen.
3. Der Lehrer sammelt Vorhersagen der Schüler und stellt sie vergleichend nebeneinander.
4. Der Lehrer führt das Experiment mit dem Computer durch.
5. Die Schüler vergleichen dabei das Ergebnis mit ihren Vorhersagen.
6. Einzelne Schüler beschreiben den Versuchsablauf und den Unterschied zu ihrer Vorhersage.

7. Im Klassengespräch wird eine Erklärung für den Versuchsablauf und die unzutreffenden Vorhersagen gesucht (Falsch wären sie im engeren Sinne nur, wenn sie sich durch falsche logische Schlüsse aus den Schülervorstellungen ergeben hätten).

8. Danach können analoge Situationen diskutiert oder Versuchsvarianten behandelt werden.

Ein ähnliches Vorgehen beschreiben für die Schule BLASCHKE und HEUER (2000, S. 88) und für Vorlesungen SOKOLOFF und THORNTON (1997, S. 340), wobei sie jeweils zusätzlich an unterschiedlichen Stellen Kleingruppenarbeit einsetzen.

Der unterrichtliche Einsatz eines Simulationsablaufes am Computer kann lernwirksam mit einer ähnlichen Verlaufsstruktur geplant werden. Sinnvoll ist, wenn dieser Simulationsablauf nach einem Modell geschieht, das erst gemeinsam mit Hilfe eines Modellbildungssystems erarbeitet wird (Kapitel 4):

- Der Lehrer zeigt auch hier einen qualitativen Versuch als Phänomen, den die Schüler beschreiben.
- Nach den Vorschlägen der Schüler wird gemeinsam ein Modell erstellt. Der Lehrer moderiert nur die Diskussion der Klasse über die Modellstruktur bzw. regt sie an. Er selbst oder ein Schüler gibt die Vorschläge in den Computer ein. Auch konkrete falsche Vorschläge werden umgesetzt.
- Man lässt das Modell als eine Animation mit dynamisch ikonischen Repräsentationen ablaufen. Dazu werden Animationen eingesetzt, die bereits vorgefertigt zur Verfügung stehen.
- Die Schüler erkennen vor allem an der Animation, dass ihr Modell das Phänomen nicht korrekt beschreibt. Häufig sind die Gründe anscheinend formale Fehler, wie z.B. dass falsche Vorzeichen bei einzelnen Kräften. Dahinter steht aber, dass den Schülern der Richtungscharakter der Kräfte, wie z.B. bei Reibungskräften oder bei der Hookeschen Feder nicht bewusst ist und sie nur Gleichungen für die Beträge der Kräfte angeben.
- Die Schüler suchen bzw. erkennen hier die Fehler an dem Modell, das entsprechend abgeändert wird, bis es mit dem realen Versuchsablauf übereinstimmt.

Nun kann mit der über die Modellbildung selbst erstellten Simulation gearbeitet werden, wobei genauso wie bei den Experimenten Vorhersagen eine wichtige Rolle spielen:

- Die Schüler machen Vorhersagen zu typischen Situationen des Modellablaufs oder zeichnen schriftlich auf einem vorbereiteten Arbeitsblatt die erwarteten Graphen.
- Der Lehrer sammelt die Vorhersagen der Schüler und stellt sie vergleichend nebeneinander.
- Man lässt die Simulation wieder mit dynamisch ikonischen Repräsentationen und mit Graphen ablaufen.
- Die Schüler vergleichen dabei das Ergebnis mit ihren Vorhersagen.
- Einzelne Schüler beschreiben den Unterschied zu ihrer Vorhersage.
- Im Klassengespräch wird unter Zuhilfenahme des Wirkungsgefüges des Modells eine Erklärung für den Modellablauf und die physikalisch unzutreffenden Vorhersagen gesucht.

Diese sechs Schritte werden evtl. mehrfach durchlaufen, wobei unterschiedliche Vorhersagen gefordert werden, z.B. zu verschiedenen Phasen des Ablaufs, bezüglich verschiedener Startwerte oder

insbesondere bezüglich verschiedener, im System vorkommender Konstanten. Möglich wäre auch nach dem Arbeiten mit dynamisch ikonischen Repräsentationen noch Vorhersagen zu Graphen machen zu lassen. SCHECKER (1998b, S. 41) beschreibt die Phasen bei einer Modellbildung sehr ausführlich. Dieser zweite Teil, das intensive Arbeiten mit Vorhersagen mit dem fertigen Modell, ist bei ihm aber nicht vorgesehen. Das mag daran liegen, dass in STELLA stets nur Graphen und diese als Ganzes ausgegeben werden, so dass auch nicht während des Zeichnens des Graphen der Ablauf unterbrochen und gefragt werden kann, wie es weiter geht.

Damit ist insgesamt eine Problemorientierung realisiert, wie sie auch MANDL ET AL. fordern (Mandl et al., 1998, S. 15) und somit eine Balance zwischen Instruktion und Konstruktion, also zwischen traditioneller und konstruktivistischer Lehr-Lerntheorie. Die Schüler müssen aktiv werden, finden auf Fragen Antworten, die wiederum für neue Probleme nutzbar sind. Die Lehrer präsentieren, regen an und unterstützen, so dass die Schüler nicht sich selbst überlassen bleiben.

Von Vorteil bei diesem Vorgehen ist, dass der Lehrer die Prognosen der Schüler nicht beurteilen muss. Die Schüler sehen es selbst am Computer, wenn der Ablauf nicht ihren Vorhersagen entspricht. Da sie quasi von einer dritten Instanz von ihrem „Fehler“ erfahren, belastet dies nicht das Schüler-Lehrer-Verhältnis.

5.5 Unterrichtsmaterialien für Lehrer

Um das hier vorgestellte Unterrichtskonzept zu evaluieren, wurde vom Autor und von zwölf weiteren Lehrern in insgesamt 17 Klassen danach unterrichtet. Die Unterrichtsmaterialien für diese Lehrer (siehe CD im Anhang) sollten so gestaltet werden, dass möglichst viele Lehrer möglichst leicht und einfach damit arbeiten können. Deshalb wurden einige Lehrer nach ihren Vorstellungen zur Gestaltung solcher Unterrichtsmaterialien befragt und Vorversionen mit ihnen besprochen. Es zeigte sich, dass sich die meisten Lehrer bei allen Freiheiten, die sie haben wollen und haben sollen, eine möglichst detaillierte Beschreibung des Unterrichts für dieses Konzept gewünscht. Das bedeutet, eine bloße Beschreibung der didaktischen Ideen und eine Weitergabe der benutzten Dateien der eingesetzten Programme ist zu wenig. Erst durch eine ausführliche Beschreibung jeder Unterrichtsstunde können sich die Lehrer vorstellen, wie die didaktischen Prinzipien umgesetzt werden können, wie man die PAKMA-„Projekte“⁸ im Unterricht nutzen kann oder wie man bei Modellbildung vorgehen kann. Deshalb wurde der Unterricht, der vom Autor dieser Arbeit im Schuljahr 2001/2002 gehalten wurde, detailliert dokumentiert und diese Unterrichtsdokumentation den Lehrern für das Schuljahr 2002/2003 zur Verfügung gestellt. Darin finden sich wesentliche Fragen, die den Schülern gestellt wurden, wichtige Aussagen des Lehrers und Anweisungen für den Einsatz von Experimenten und von Software.

Um die Gefahr zu vermeiden, dass Lehrer die Materialien als feste Vorgabe missverstehen, an die sie sich exakt halten müssen, wurde den an der Evaluation teilnehmenden Lehrern in der begleitenden Lehrerfortbildung ausdrücklich gesagt, dass keineswegs eine identische Reproduktion intendiert

⁸ Eine PAKMA-Datei, die sowohl ein Simulationsprogramm als auch ein Programm zur Messwerterfassung sein kann, wird in PAKMA ein „Projekt“ genannt.

ist. Vielmehr geht es darum, beispielhaft zu zeigen, wie die grundlegenden didaktischen Prinzipien im Physikunterricht umgesetzt werden können. Die eigene Unterrichtsvorbereitung muss dazu an den eigenen Stil, an eigene Vorlieben, an die bisherigen Erfahrungen mit der eigenen Klasse und an die gegebenen Möglichkeiten angepasst werden. Da dem Gespräch mit den Schülern ein hoher Stellenwert beigemessen wird und im Schulalltag immer viel Unvorhergesehenes dazwischen kommt, ist es auch nicht möglich, genaue Zeitvorgaben für die Themen einzuhalten. So müssen die Lehrer evtl. auch etwas ergänzen oder weglassen. Betont wurde außerdem, dass man sich bei einem solchen Skript nicht verleiten lassen darf, wie in einer Vorlesung genau an der Stelle weiterzumachen, wo man in der vorigen Stunde aufhörte. Jede Unterrichtsstunde soll ihr eigenes Thema (bzw. Themen) haben und einen eigenen motivierenden Einstieg.

In den Beschreibungen des Unterrichts steht häufig nach einer Lehrerfrage auch gleich die Antwort, die aber natürlich nicht gleich vom Lehrer vorgetragen werden soll. Ideal wäre, wenn die Antwort von den Schülern kommt, nicht vom Lehrer. Dazu ist es wichtig, nach dem Stellen einer Frage den Schülern ausreichend Zeit zum Reagieren zu lassen und nicht schon nach ein oder zwei Sekunden selbst zu antworten, wenn kein Schüler sich meldet. Die Lehrer wurden aufgefordert, nach einer Frage einmal auszuhalten, dass zehn Sekunden Stille ist, bis sie jemanden aufrufen.

Die Lehrer sollten die Möglichkeit haben, wenn sie bei ihrer Unterrichtsvorbereitung diese Unterrichtsbeschreibung am Computer lesen, an den entsprechenden Stellen Folien, Arbeitsblätter, Videos, PAKMA- oder VisEdit-Dateien oder didaktische Hintergrundinformationen auf Wunsch aufzurufen. Deshalb wurden Hyperlinks verwendet. Um eine Unabhängigkeit von Betriebssystemen oder von Software zu haben, bot es sich an, die Unterrichtsbeschreibung im html-Format zu erstellen. Allerdings hätte damit nicht jeder Lehrer die Möglichkeit gehabt, Texte nach seinen Wünschen zu verändern, da nicht jeder mit html vertraut ist. Deshalb wurde das Textverarbeitungssystem Word gewählt, das zumindest unter Lehrern und an Schulen Standard ist. Ab Word 97 sind hier Hyperlinks möglich.

Durch die Formatierung der Unterrichtsbeschreibung sollte sowohl am Bildschirm als auch im Graustufen-Ausdruck jeweils sofort erkennbar sein, ob es sich bei einem Textabschnitt um Hinweise handelt, die nur für den Lehrer gedacht sind, oder um etwas, was den Schülern gesagt werden soll. Auch Vorschläge für Tafelanschriften sollten als solche erkennbar sein. Deshalb wurde der Text in vier unterschiedlichen Schriften mit vier unterschiedlichen Farben geschrieben und zusätzlich vier unterschiedliche Symbole vor die Absätze gesetzt.

Der erhobene Zeigefinger ☞ zeigt an, dass hier dem Lehrer für seine Unterrichtsvorbereitung zu Hause didaktische und methodische Hinweise gegeben werden, z.B. werden die gerade relevanten Schülervorstellungen dargelegt oder der vorgeschlagene Unterrichtsweg begründet. Da es nicht den konkreten Unterricht beschreibt, ist es in einer kleineren, serifenlosen Schrift und in grün (im Ausdruck dunkelgrau) geschrieben. Beim miteinander verschmolzenen Fragezeichen und Ausrufezeichen ?! stehen Fragen, die der Lehrer den Schülern stellen kann und Bemerkungen, die der Lehrer zu dieser Stelle machen kann. Etwas problematisch ist, dass die Antwort auf die Lehrerfrage auch meist gleich dabeisteht, denn diese soll der Schüler und nicht der Lehrer geben. Dieser Text ist in der Serifen-Schrift dieser Arbeit in schwarz geschrieben. Beim deutenden Zeigefinger ☞ steht, was

der Lehrer tun sollte, z.B. ein Arbeitsblatt austeilen, eine Datei öffnen, einen Versuch durchführen etc. Dies ist kurz formuliert und in kursiv und hellgrau geschrieben. Die schreibende Hand \neq macht einen Vorschlag, was als Tafelanschrift angeschrieben werden kann. Dieser ist bewusst knapp gehalten, da nur das Wichtigste festgehalten werden soll. Die Unterrichtszeit soll zum Durchdenken und Diskutieren verwendet werden, nicht zum Anlegen eines Buches. Tafelanschriften werden in einer großen, fetten und roten (im Ausdruck dunkelschwarzen) Schrift geschrieben, damit man sie gut sieht, falls man einen Ausdruck einmal mit in den Unterricht nimmt.

Bei den Übungsaufgaben wurde soweit wie möglich auf Lehrbücher verwiesen. Dazu wurden die beiden in Bayern verbreiteten Lehrbücher „HAMMER, KNAUTH, KÜHNEL: *Physik II Mechanik Fundamentum*, Oldenbourg-Verlag, München, 1996“ (Gaitzsch et al., 1996) und „FEUERLEIN, NÄPFEL, SCHEDL: *PHYSIK mechanik*, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München, 1993“ verwendet und als außerbayerisches Lehrbuch „GREHN, KRAUSE (HRSG.): *Metzler Physik*, Schroedel-Verlag, Hannover, 1998“ hinzugezogen. Wenn in einer Schule ein anderes Lehrbuch eingeführt ist, muss der Lehrer evtl. nach ähnlichen Aufgaben suchen oder selbst welche schreiben und für die Schüler kopieren. Da mit den Schulbüchern nicht alle gewünschten Themen abgedeckt werden können, mussten weitere Übungsaufgaben (z.B. zur Vektorrechnung, zur zweidimensionalen Kinematik und insbesondere mit qualitativen Aufgaben) auf Arbeitsblättern zur Verfügung gestellt werden. Außerdem wurden zwei im Schuljahr 2001/2002 gehaltene Stegreifaufgaben und Schulaufgaben (reguläre und Nachholschulaufgabe) aufgenommen, um beispielhaft zu zeigen, wie zu diesem Konzept passende Prüfungsaufgaben aussehen könnten, und um zu zeigen, dass auch Modellbildung, qualitative Aufgaben und ikonische Repräsentationen in Prüfungen integriert werden können.

Die Lehrer erhielten außerdem eine Fülle von PAKMA-„Projekten“, mit denen außer Simulationen auch Realexperimente durchgeführt werden können. Da die meisten Versuche zur Kinematik mit der normalen, unveränderten Maus gemacht werden, konnte jeder Lehrer diese Versuche nach ein paar Voreinstellungen durchführen. Für Versuche, die mit PAKMA-Hardware vorgesehen sind, wurden verschiedene organisatorische Alternativen vorgeschlagen. Die Lehrer aus dem Raum Würzburg bekamen die Hardware ausgeliehen, so dass sie die Versuche durchführen konnten. Bei den aufwändigeren Versuchen haben die Lehrer aus Zeit- und Materialgründen trotzdem nicht die Möglichkeit, alle Versuche selbst durchzuführen. Aber so ist es auch nicht gemeint. Zum einen sind bei jedem PAKMA-„Projekt“ die Messwerte einer Messung mit abgespeichert, so dass sie auch als Reproduktion gezeigt werden können, wobei durch die Animationen immer der Ablauf mit gezeigt wird. Zum anderen bekamen die an dem Evaluations-Projekt teilnehmenden Lehrer von den neun aufwändigeren Versuchen zur Dynamik digitalisierte Videos, die gleichzeitig mit den Messwerten aufgenommen wurden und der Klasse gezeigt werden können. Dies ermöglichte den Lehrern weitere methodische Varianten. Z.B. kann ein solcher Versuch erst qualitativ ohne Messwertaufzeichnung durchgeführt werden, um dann anschließend als perfekterer Versuch als Video und als Reproduktion gezeigt zu werden.

Insgesamt erhielten die Lehrer ausführliche Stundenentwürfe (als Vorschläge), einen Stoffverteilungsplan, fast 100 PAKMA-„Projekte“ und ca. 30 VisEdit-Modell-Dateien, 17 verschiedene Videos, über 20 Aufgabenblätter, über 20 weitere Folien, zwei Stegreifaufgaben, zwei Schulaufgaben,

sieben Musterlösungen und vieles mehr, so dass der zeitliche Aufwand mit dem ihnen neuen Konzept nicht wesentlich höher war, als wenn sie nach ihrem bisherigen Konzept unterrichtet hätten. Dazu bekamen sie einen Ordner mit über 200 kopierten Seiten sowie eine CD mit sämtlicher Software und sämtlichen Dateien (z.B. 100 Word-Dateien). Die am Projekt teilnehmenden Lehrer waren mit dieser Unterrichtsbeschreibung und den angebotenen Materialien sehr zufrieden (aus Platzgründen ist es nicht möglich, die Unterrichtsbeschreibung oder Materialien im Anhang abzdrukken, die Lehrer-CD ist Teil der CD, die der Arbeit beiliegt). Selbst bei Lehrern, die nicht nach diesem Konzept unterrichteten, bestand großes Interesse an den Materialien, um Teile daraus in ihren Unterricht integrieren zu können.

6 Evaluation des Unterrichtskonzeptes

6.1 Zielsetzung und Ablauf

Eine Zielsetzung der summativen Evaluation war festzustellen, inwieweit das gesamte Unterrichtskonzept von Lehrern durchführbar ist, wie hoch die Akzeptanz ist und wie Lehrer die dynamisch ikonische Repräsentationen einschätzen. Deshalb wurden die teilnehmenden Lehrer mehrfach nach ihren Meinungen und Erfahrungen befragt. Ein weiteres Ziel war, mit Hilfe von paper-and-pencil-Tests festzustellen, inwieweit es Veränderungen in den Schülervorstellungen gab (Vor-/Nachtest-Design) und diese Veränderungen mit konventionell unterrichteten Klassen zu vergleichen (Trainings-/Kontrollgruppen-Design). Im Rahmen dieser Arbeit war es dabei nur durch Befragungen der Lehrer möglich festzustellen, inwieweit die Lehrer der Trainingsklassen auch wirklich nach den Prinzipien dieses Unterrichtskonzeptes unterrichteten. Auf der anderen Seite sollte im Rahmen dieser Arbeit auch nicht erforscht werden, was „konventioneller“ Unterricht bedeutet und inwieweit der Unterricht in den Kontrollklassen „konventionell“ war. Hier wurde versucht, bei den Tests der Vergleichsklassen durch die Einbeziehung vieler Klassen vieler Lehrer (je nach Test 10 bis 18 Klassen) eine Mittelung zu erreichen.

Bereits im Schuljahr 2000/2001 wurde wie beschrieben ein Unterricht mit graphischer Modellbildung zur Kinematik und Dynamik entwickelt und im Rahmen einer Interventionsstudie in drei Klassen erprobt (siehe Kapitel 4). Im Schuljahr 2001/2002 wurde dann das Gesamt-Unterrichtskonzept entwickelt und vom Autor dieser Arbeit in einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse getestet. Außerdem wurde das Konzept Lehrern vorgestellt und um deren Teilnahme an der Evaluation im folgenden Schuljahr 2002/2003 gebeten. Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung sagte eine Übernahme anfallender Kosten wie z.B. Kopierkosten und Fahrtkosten zu (das Forschungsprojekt lief unter dem Titel „Innovativer Kinematik/Dynamik-Unterricht“). Das Konzept wurde schriftlich niedergelegt und die Materialien dazu zusammengestellt, wobei die Art und Weise in Absprache mit Lehrern geschah (siehe Kapitel 5.5).

Für die teilnehmenden Lehrer wurde ein Vorbereitungs- bzw. Begleit-Veranstaltung zu diesem Unterrichtskonzept an der Universität Würzburg angeboten. Bereits im Sommer 2002 fanden vorbereitend vier Seminartreffen statt. Dabei wurden typische Schülervorstellung zu Geschwindigkeit und Beschleunigung vorgestellt, der Einstieg in die Kinematik über zweidimensionale Bewegungen begründet und der Umgang mit der Mausmessung am Computer gezeigt. Des Weiteren wurden typische Schülervorstellung zum Begriff „Kraft“ vorgestellt und die Grundideen und Prinzipien des Dynamikunterrichts sowie die didaktischen Vorteile der Modellbildung dargelegt, wobei Modellbildung auch geübt wurde. Außerdem mussten die Schülertests und die CD vorgestellt und Alternativen zum Hardwareeinsatz diskutiert werden.

Insgesamt unterrichteten 13 Lehrer in 17 Klassen (einschließlich einer Klasse des Autors dieser Arbeit) nach diesem Konzept (meist im Schuljahr 2002/2003). Dabei bestand das Angebot an die Lehrer, dass sie jederzeit per E-Mail oder telefonisch Fragen zum Konzept stellen oder Ergänzun-

gen und weitere Materialien wünschen können. Etliche Lehrer machten davon reichlich Gebrauch – allerdings nur bei der Kinematik, die sich deutlicher vom traditionellen Vorgehen unterschied als die Dynamik. Die sofortige didaktische und methodische Unterstützung wurde dabei sehr geschätzt. In den begleitenden Seminartreffen wurden nicht nur die gemachten Erfahrungen ausgetauscht und Fragen geklärt. Es wurden Schüler- und Expertenmeinungen zum Lernen vorgestellt und ihre Konsequenzen diskutiert, das dritte newtonsche Gesetz sowie die betreffenden Schülervorstellungen beleuchtet und weitere experimentelle Möglichkeiten zur Bewegungsaufnahme mit Ortsänderungen vorgestellt. Diese Lehrerfortbildung erfüllt damit etliche Faktoren, die sich in vielen Studien über Lehrerfortbildungen als transferbegünstigend herausstellten (die praktische Umsetzung wurde illustriert, die Lehrer bekamen Rückmeldung über ihren Unterrichtserfolg, Erfahrungen wurden in der Lehrergruppe ausgetauscht, eine Materialbasis wurde bereitgestellt, es gab spätere Nachtreffen) (Haenisch, 1994, S. 3).

6.2 Lehrerstudien

6.2.1 Zusammensetzung der Lehrergruppe

Die an der Evaluation teilnehmenden Lehrer waren bezüglich verschiedener Kriterien recht unterschiedlich, was auch beabsichtigt war. Dabei handelte es sich (abgesehen vom Autor dieser Arbeit) um elf Männer (einschließlich eines Lehrers, der frühzeitig während der Evaluation wieder ausstieg) und zwei Frauen. Von diesen 13 Lehrern waren neun aus dem Raum Würzburg und konnten an den Begleitseminaren teilnehmen. Die anderen vier Lehrer sollten zeigen, ob das Konzept auch ohne Begleitung nur aufgrund der schriftlichen Angaben in der Unterrichtsbeschreibung problemlos durchführbar ist. Elf Lehrer unterrichteten in Bayern, worauf der Stundenumfang und die Lehrbuchverweise ausgerichtet waren; ein Lehrer unterrichtete einen Grundkurs in Hessen und eine Lehrerin einen Kurs in Nordrhein-Westfalen. Voraussetzung war die Bereitschaft, sich auf ein neues Unterrichtskonzept einzulassen und die gewählte Software zu nutzen. Die Software bzw. Modellbildung allgemein war anfangs nicht allen Lehrern vertraut.

Das Durchschnittsalter der Lehrer lag mit 35 relativ niedrig, obwohl auch zwei Lehrer teilnahmen, die über 50 Jahre alt waren. Dies lag u.a. daran, dass auch drei Referendare an der Evaluation teilnahmen. Da sie zum ersten Mal eine elfte Klasse unterrichteten und noch kein anderes Konzept gewohnt waren, war eine interessante Frage, ob sie anders mit dem Konzept umgehen, als die erfahrenen Lehrer, die ebenfalls vertreten waren. Anscheinend sind junge Lehrer gegenüber neuen Konzepten aufgeschlossener und eher bereit, Neues zu wagen. Für einen Anfänger spielt es natürlich bezüglich des Arbeitsaufwandes keine Rolle, in welches Konzept er sich hineindenken muss, während es für erfahrene Lehrer zeitökonomischer ist, bei ihrem bisherigen Konzept zu bleiben.

Von diesen 13 Lehrern unterrichteten sechs im mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig (3 Std. pro Woche) und hatten damit die Möglichkeit, das Additum „Experimente zu ausgewählten Kapiteln der Mechanik“, für das laut Lehrplan ca. 14 Stunden vorgesehen sind, ganz oder teilweise mit der Kinematik und Dynamik zu behandeln. So hatten sie ausreichend Unterrichtszeit für das Konzept – auch für Schülerübungen und Modellbildung. Fünf Lehrer gehörten zu einem anderen

Schulzweig (2 Std. pro Woche) und hatten damit das Problem, dass nach dem Lehrplan die Themen in recht wenig Stunden unterrichtet werden sollen. Obwohl das Konzept so erstellt war, dass dies mit Verzicht auf Schülerübungen und mit Einschränkung der Modellbildung möglich ist, konnten sie doch je nach äußeren Bedingungen gezwungen sein, manche thematischen Bereiche weiter zu kürzen. Insbesondere konnten in diesen Klassen z.T. nicht alle Tests für die empirische Auswertung durchgeführt werden. Von den 17 Klassen, in denen nach dem Kinematik-/Dynamik-Konzept unterrichtet wurde, gehörten schließlich acht Klassen zum bayerischen mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig, sieben Klassen zu einem anderen bayerischen Schulzweig und zwei Kurse zu anderen Bundesländern.

Bei vier Lehrern war an der Schule bereits die PAKMA-Hardware vorhanden und konnte genutzt werden. Vier weitere Lehrer liehen sich vom Lehrstuhl für Didaktik der Physik in Würzburg PAKMA-Hardware aus. Die übrigen fünf Lehrer konnten zwar alle Versuche zur zweidimensionalen Bewegung mit der PC-Maus durchführen, mussten jedoch in der Dynamik auf andere Messwertfassungssysteme und auf Reproduktionen von Messungen mit PAKMA zurückgreifen. Die Möglichkeit, in PAKMA Dynamik-Versuche auf der Luftkissenfahrbahn mit einer umgebauten PC-Maus durchzuführen, wurde von den Lehrern nicht genutzt.

6.2.2 Gründe der Lehrer für die Teilnahme

Eine wichtige Frage zur Charakterisierung der teilnehmenden Lehrer war, warum und aus welcher Motivation heraus die Lehrer an dieser Studie teilnahmen. Dazu sollten die Lehrer zum einen in freier Formulierung auf die Frage antworten, warum sie sich zur Teilnahme entschieden haben. Zum anderen sollten sie in einer Liste vorgeschlagener möglicher Gründe angeben, wie groß das Gewicht dieser Gesichtspunkte jeweils für ihre Entscheidung war. Die Umfrage wurde anonym durchgeführt. Elf der 13 Lehrer füllten den Fragebogen (siehe CD im Anhang) aus, zwei weiter entfernt unterrichtende Lehrer, die nicht an den Seminaren teilnehmen konnten, antworteten nicht.

In der freien Antwortformulierung wurde am häufigsten angegeben, dass persönliche Kontakte entscheidend waren und dass die Lehrer etwas Neues ausprobieren möchten. Des Weiteren wurde der Computereinsatz und insbesondere PAKMA und VisEdit als Anreiz genannt. In je einem Fall wurde Unzufriedenheit mit dem bisherigen Physikunterricht der elften Klasse und die angebotenen Unterrichtsmaterialien genannt.

Bei der Liste der 14 vorgegebenen Gründe sollten die Lehrer angeben, ob sie jeweils eine „sehr große“, „große“, „auch noch große“, „weniger große“, „nicht große“ oder „keine“ Rolle bei der Entscheidung spielten, also zwischen sechs Stufen wählen. Da hiermit ordinal skalierte Daten vorliegen, wurde jeweils der Median M und die Spannweite S der auftretenden Antworten bestimmt. Da diese Skala näherungsweise intervallskaliert ist, wurde die qualitative Skala zusätzlich quantifiziert, indem der Skala die Zahlen 1 (für keine Rolle) bis 6 (sehr große Rolle) zugeordnet wurden, und dann Mittelwert μ und Standardabweichung σ bestimmt.

Demnach spielte die größte Rolle (Median $M = 5 = \text{groß}$) bei kleinster Spannweite $S = 2$ die beiden Gesichtspunkte „*Ich will noch etwas dazulernen.*“ ($\mu = 5.4$, $\sigma = 0.7$) und „*Ich will meinen Unterricht verbessern.*“ ($\mu = 5.2$, $\sigma = 0.8$). Außerdem eine große Rolle ($M = 5 = \text{groß}$, $S = 3$) spielten die

Aspekte „*Ich probiere gerne etwas Neues aus.*“ ($\mu = 4.6$, $\sigma = 0.9$) und „*Die Vorstellung des Projektes durch Herrn Wilhelm hat mich überzeugt.*“ ($\mu = 4.5$, $\sigma = 0.8$). Die geringste Bedeutung hatte „*Es macht beim Schulleiter einen guten Eindruck.*“ ($\mu = 2.8$, $\sigma = 1.3$) und mit dem geringsten Median 2 (= Rolle nicht groß) die Aussage „*Die Teilnahme kostet mich mehr Zeit in der Unterrichtsvorbereitung.*“ ($\mu = 2.5$, $\sigma = 1.4$). Gespräche über das letzte Item ergaben, dass dies nicht so aufzufassen ist, dass die Lehrer meinten, durch die vielen Materialien bleibe der Zeitbedarf gleich oder werde kleiner. Stattdessen meinten sie, dass der erwartete höhere Zeitbedarf durch das Einarbeiten in ein neues Unterrichtskonzept bei der Entscheidung für die Teilnahme kaum eine Rolle spielte. Bei der Aussage „*Ich erspare mir Zeit durch die vorbereiteten Materialien.*“ trat die maximal mögliche Spannweite 5 ($\mu = 3.4$, $\sigma = 2.0$) auf, wobei aber nicht klar war, ob hier das neue Konzept mit konventionellem Unterricht verglichen wurde oder das neue Konzept mit und ohne Materialien. Diese maximale Spannweite 5 kam außerdem bei den Gesichtspunkten „*Ich kenne Herrn Wilhelm.*“ ($\mu = 4.1$, $\sigma = 1.8$), „*Ich bekomme sehr viel Materialien.*“ ($\mu = 3.3$, $\sigma = 1.6$) und „*Ich bin mit meinem bisherigen Unterricht in der elften Klasse unzufrieden.*“ ($\mu = 3.8$, $\sigma = 1.4$). Die anderen fünf Aspekte fielen im Ergebnis nicht auf.

Insgesamt kann man also davon ausgehen, dass es sich um engagierte Lehrer handelte, die ihre eigenen Kompetenzen verbessern und einen guten Unterricht halten wollen. Es zeigt sich aber auch, wie wichtig für die Gewinnung von Lehrern persönliche Kontakte und eine überzeugende Darstellung des Forschungsprojektes sind.

6.2.3 Testergebnisse zu didaktisch-methodischen Prioritäten

6.2.3.1 Didaktisch-methodische Prioritäten bayerischer Physiklehrer

In dem im Rahmen dieser Arbeit ausgearbeiteten Unterrichtskonzept zur Kinematik und Dynamik werden bestimmte Prioritäten gesetzt, die den teilnehmenden Lehrern auch vermittelt werden mussten. Hierzu stellt sich die Frage, ob diese Schwerpunktsetzungen zu Einstellungen der Lehrer passt oder diesen entgegenläuft. Man muss wissen, wo viel bzw. wenig Fortbildungsarbeit nötig ist, sei es, dass die Schwerpunkte neu bzw. im Unterricht bereits Standard sind.

In einer weiteren Fragebogenaktion wurde deshalb erfragt, welche didaktischen und methodischen Prioritäten Physiklehrer im Physikunterricht der elften Jahrgangsstufe haben (Fragebogen siehe CD im Anhang). Dabei wurde nicht für so wichtig eingeschätzt, was Lehrer als wichtige Punkte nennen, sondern was sie tatsächlich in ihren Augen intensiv einsetzen. Deshalb sollten sie in einem Multiple-Choice-Verfahren selbst einschätzen, wie intensiv die einzelnen Aspekte in ihrem Kinematik-/Dynamikunterricht vorkommen. Es war durchaus bewusst, dass die eigene Einschätzung andere Ergebnisse liefern kann als eine objektive Fremdeinschätzung. Es ging jedoch nicht darum, wie Unterricht wirklich aussieht, sondern wie die Lehrer ihn sehen und was sie für wichtig halten. Für die Akzeptanz eines neuen Unterrichtskonzeptes ist es wichtig, die Sicht der Lehrer zu kennen, um die Implementation zielgerichtet planen zu können. Dabei bestand die Gefahr, dass die Lehrer Aspekte, die sie bei dem Thema Kinematik/Dynamik kaum einsetzen, dennoch als intensiver angeben, da sie diese sonst für wichtig halten bzw. da sie glauben, dass sie diese für wichtig halten sollten.

Deshalb wurde einerseits auf dem Fragebogen genannt, dass nicht alle Ziele verwirklicht werden können und dies auch vom Thema abhängt. Andererseits wurde auch die Möglichkeit gegeben, allgemein und unabhängig von einem bestimmten Themengebiet anzukreuzen, was ihnen wichtig ist. Die Frage nach der Wichtigkeit der einzelnen Items setzt eigentlich eine Übereinstimmung von Überzeugung und Machbarem voraus. Manches ist jedoch aufgrund der äußeren Bedingungen in der Schule nur schwer durchführbar. So merkten einige Lehrer an, dass die Zeit für Manches fehle.

Neben dieser gebundenen Antwortform wurde zusätzlich in einer freien Antwortform gefragt, was für die Lehrer ein guter Kinematik-/Dynamikunterricht ist bzw. ihre Hauptziele sind. Außerdem wurde gefragt, bei was sie in ihrem Unterricht am ehesten Abstriche machen würden und was sie an ihrem bisherigen Unterricht stört.

Der Fragebogen wurde an etliche Lehrer aus einigen Bundesländern per E-Mail geschickt, deren Adresse dem Verfasser auf verschiedenste Weisen bekannt geworden war. Sie wurden gebeten, den Fragebogen in ihrem Kollegium zu verteilen und wieder zurückzusenden. Auf diese Weise antworteten 85 Lehrer aus 16 Kollegien aus drei Bundesländern. Des Weiteren antworteten 21 einzelne Lehrer mehrerer Bundesländer, die in irgendeiner Weise Kontakt zum Lehrstuhl hatten. 18 Lehrer füllten schließlich den Fragebogen bei einer Fortbildung zum Thema „Projektarbeit“ aus, so dass insgesamt die Antworten von 124 Bögen vorliegen. Die letzten beiden Gruppen sind sicher nicht repräsentativ, da man davon ausgehen kann, dass nur Lehrer mit gewissen Interessen an bestimmten Fortbildungen teilnehmen oder Kontakt zu einem Didaktik-Lehrstuhl suchen. Bei der ersten Gruppe von Lehrern (ganze Kollegien) kann man eher von einer Repräsentativität ausgehen, wobei nicht ausgeschlossen ist, dass bestimmte Lehrertypen nicht teilnahmen. Wie hoch die Rücklaufquote ist, ist nicht angebar.

Ergebnisse der gebundenen Antworten

In einer Liste mit 20 vorgegebenen Aspekten sollten die Lehrer angeben, ob diese in ihrem Kinematik-/Dynamikunterricht „sehr intensiv“, „intensiv“, „auch noch intensiv“, „weniger intensiv“, „kaum“ oder „nicht“ vorkommen. Vorher sollten die Lehrer bei 13 dieser Aspekte, die nicht auf ein Themengebiet bezogen sind, angeben, ob sie ihnen allgemein in ihrem Physikunterricht „sehr wichtig“, „wichtig“, „auch noch wichtig“, „weniger wichtig“, „nicht wichtig“ oder „völlig unwichtig“ sind. Da manche Lehrer noch nie eine elfte Klasse unterrichtet haben bzw. schon lange nicht mehr, füllten sie nur diesen allgemeinen Teil aus, aber nicht den Teil zum Kinematik-/Dynamikunterricht, so dass für diese Items nur 113 Antwortbögen vorliegen. Da jeweils ordinal skalierte Daten vorliegen, wurde jeweils der Median M und die Spannweite S der auftretenden Antworten bestimmt. Da die Skala näherungsweise intervallskaliert ist, wurde diese qualitative Skala zusätzlich quantifiziert, indem der Skala die Zahlen 1 (für nicht) bis 6 (sehr intensiv) zugeordnet wurden, und dann Mittelwert μ und Standardabweichung σ bestimmt.

Die drei Lehrergruppen „ganze Kollegien“, „Lehrer mit Kontakt zum Lehrstuhl“ und „Teilnehmer an Projektfortbildung“ unterschieden sich in den meisten Aspekten nur sehr geringfügig, so dass für die Auswertung alle 113 Lehrer hinzugenommen werden konnten. Am intensivsten eingesetzt ($M = 5 = \text{intensiv}$) werden demnach im Kinematik-/Dynamikunterricht nach dieser Umfrage (siehe Abb. 6.1) „*Interpretation von Diagrammen*“ ($\mu = 5.1$, $\sigma = 0.8$), „*Üben von Rechenaufgaben*“ ($\mu =$

4.9, $\sigma = 0.7$), „Demonstrationsversuche“ ($\mu = 4.8$, $\sigma = 0.8$), „Aufzeigen von Anwendungen im Alltag“ ($\mu = 4.6$, $\sigma = 1.0$) und „Miterleben des Ganges von Messwertaufnahme über -umrechnung bis Formel“ ($\mu = 4.5$, $\sigma = 1.2$), wobei es bei „Üben von Rechenaufgaben“ die geringsten Unterschiede ($S = 3$, $\sigma = 0.7$) und bei „Miterleben des Ganges Messwertaufnahme/-umrechnung bis Formel“ die größten Unterschiede gab ($S = 5$, $\sigma = 1.2$).

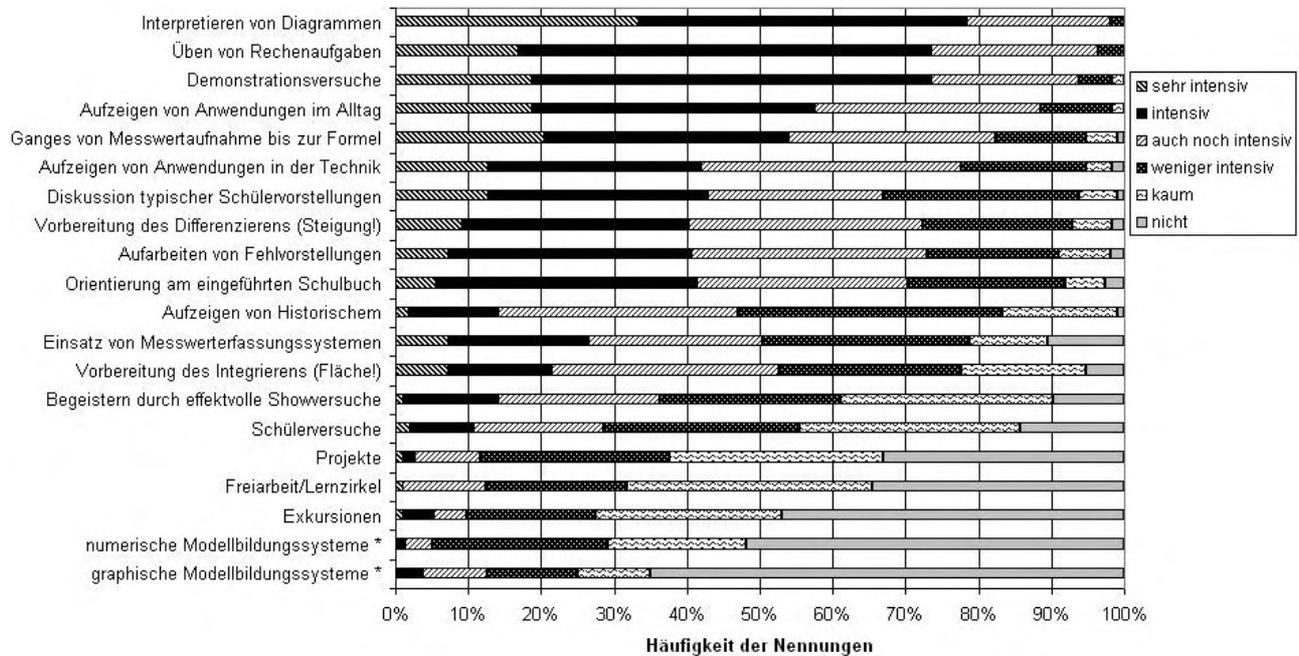


Abb. 6.1: Häufigkeiten eingesetzter Elemente bei allen befragten Lehrern (N = 113) bzw. bei * nur bei Lehrerguppe „Kollegien“ (N = 80)

Am wenigsten intensiv ($M = 2 = \text{kaum}$) bei großen Unterschieden ($S = 5$) kommen „Projekte“ ($\mu = 2.2$, $\sigma = 1.1$), „Freiarbeit/Lernzirkel“ ($\mu = 2.1$, $\sigma = 1.1$), „Exkursionen“ ($\mu = 2.0$, $\sigma = 1.1$), „Einsatz von numerischen Modellbildungssystemen (z.B. Excel)“ ($\mu = 2.1$, $\sigma = 1.2$) und „Einsatz von graphischen Modellbildungssystemen (z.B. Stella, Dynasys, VisEdit)“ ($\mu = 2.0$, $\sigma = 1.3$, $M = 1 = \text{nicht}$, $S = 4$) vor. Da gerade Modellbildung einen großen Teil der Lehrerfortbildung des Lehrstuhles für Didaktik der Physik ausmacht, ist es hier nötig, sich die Ergebnisse nur der Kollegien anzuschauen (Anzahl $N = 81$). Hier findet man die geringsten Werte der Umfrage ($M = 1 = \text{nicht}$) bei „numerische Modellbildung (z.B. Excel)“ ($\mu = 1.8$, $\sigma = 1.0$) und „graphische Modellbildung (z.B. Stella, Dynasys, VisEdit)“ ($\mu = 1.8$, $\sigma = 1.2$). Einige an den Rand geschriebene Bemerkungen einiger Lehrer zeigen, dass viele wohl nicht einmal wissen, was dies ist. So ist auch bei denen, die einen Einsatz angaben, nicht sichergestellt, dass sie wirklich Modellbildung durchführten oder vielleicht nur Programme wie Excel anders nutzten.

Im mittleren Bereich ($M = 3 = \text{weniger intensiv}$ oder $M = 4 = \text{auch noch intensiv}$) landeten die Aspekte „Aufzeigen von Anwendungen in der Technik“ ($\mu = 4.3$, $\sigma = 1.1$), „Diskussion typischer Schülervorstellungen“ ($\mu = 4.2$, $\sigma = 1.2$), „Vorbereitung des Differenzierens“ ($\mu = 4.1$, $\sigma = 1.1$), „Aufarbeiten von Fehlvorstellungen“ ($\mu = 4.1$, $\sigma = 1.1$), „Orientierung am eingeführten Schulbuch“ ($\mu = 4.1$, $\sigma = 1.2$), „Historisches“ ($\mu = 3.5$, $\sigma = 1.0$), „Einsatz von Messwertauffassungssystemen“ ($\mu = 3.5$, mit $\sigma = 1.4$ die höchste vorkommende Streuung!), „Vorbereitung des Integrierens“ ($\mu = 3.5$, σ

= 1.3), „*Begeistern durch effektvolle Showversuche*“ ($\mu = 3.0$, $\sigma = 1.2$) und „*Schülerversuche*“ ($\mu = 2.8$, $\sigma = 1.3$), wobei jeweils die größtmögliche Spanne auftrat ($S = 5$).

Wie oben bereits aufgezeigt wurde (siehe Kapitel 4.2.2), ist es aus didaktischer Sicht zur Veränderung von Fehlvorstellungen ungünstig, dass das Üben von Rechenaufgaben sehr stark eingesetzt wird (73 % geben „intensiv“ oder „sehr intensiv“ an), denn möglicherweise werden damit kaum qualitative Aufgaben eingesetzt. Auch das Miterleben des Ganges von Messwertaufnahme über Messwertumrechnung bis zur Gleichung müsste nicht so intensiv vorkommen. Dagegen wären eine intensivere Diskussion typischer Schülervorstellungen, ein intensiveres Aufarbeiten von Fehlvorstellungen und der Einsatz von graphischer Modellbildung wünschenswert, wobei den Lehrern gezeigt werden muss, wie dies möglich ist. Dass Diagramme sehr viel interpretiert werden (78 % geben „intensiv“ oder „sehr intensiv“ an), ist ein positives Ergebnis, da dies für viele Schüler nicht leicht ist. Doch scheint es bedenklich, wenn die Ergebnisse stets nur in Diagrammen und in Gleichungen dargestellt werden. Für Schüler, die diese noch nicht sicher interpretieren können, braucht man einfacher verstehbare Codierungsformen.

Zu bedenken ist auch, dass die Orientierung am Schulbuch sehr hoch ist. 70 % bezeichnen sie als „auch noch intensiv“ bis „sehr intensiv“, während nur 30 % sie als „nicht“ bis „weniger intensiv“ bezeichnen“. Daraus folgt, dass man bei der Umsetzung eines neuen Konzeptes den Lehrern auch viel Lehr-Lern-Material an die Hand geben muss.

Auf die signifikanten Unterschiede (5 %-Niveau) zwischen den drei Lehrergruppen soll hier kurz eingegangen werden: 1. Die Gruppe „Kontakt zum Lehrstuhl“ ($N = 20$) behandelt im Kinematik-/Dynamikunterricht im Gegensatz zur eher repräsentativen Gruppe „Kollegien“ ($N = 80$) Schülervorstellungen ($M = 5$, $\mu = 4.7$ entgegen $M = 4$, $\mu = 4.0$) bzw. Fehlvorstellungen ($M = 5$, $\mu = 4.6$ entgegen $M = 4$, $\mu = 4.1$) deutlich intensiver. Außerdem werden graphische Modellbildung ($M = 2$, $\mu = 2.5$ entgegen $M = 1$, $\mu = 1.8$) und numerische Modellbildung ($M = 2.5$, $\mu = 2.9$ entgegen $M = 1$, $\mu = 1.8$) intensiver eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass nicht nur Lehrer mit diesen Interessen den Kontakt zum Lehrstuhl suchen, sondern dies das Ergebnis diverser Fortbildungsveranstaltungen ist. 2. Die Lehrer „Projektfortbildung“ ($N = 13$) legen entgegen der Gruppe „Kollegien“ ($N = 85$) mehr Wert auf Exkursionen ($M = 3$, $\mu = 2.9$ entgegen $M = 1$, $\mu = 1.8$) und es wird ebenso numerische Modellbildung ($M = 3$, $\mu = 2.8$ entgegen $M = 1$, $\mu = 1.8$) intensiver eingesetzt, was neben der Bereitschaft zur Fortbildung an dem eher jungen Alter der Teilnehmer liegen könnte. Der Unterschied bei graphischer Modellbildung ($M = 3$, $\mu = 2.4$ entgegen $M = 1$, $\mu = 1.8$) ist groß, aber nicht signifikant.

Ordnet man die jeweils vorkommenden Aspekte einmal nach ihrer angegebenen Wichtigkeit als allgemeine Ziele und einmal nach ihrem angegebenen Einsatz im Kinematik-/Dynamikunterricht (jeweils nach Mittelwert), gibt es neben hohen Übereinstimmungen in der Rangordnung auch auffallende Unterschiede: Das Üben von Rechenaufgaben und das Miterleben des Ganges von Messwerten bis zur Gleichung werden viel intensiver eingesetzt als es der ermittelten Rangordnung bei den Zielen entspricht. Der größte Unterschied betrifft die Schülerversuche, die zwar für wichtig gehalten, aber wenig eingesetzt werden.

Ergebnisse der freien Antworten

Bei den freien Antworten fällt zunächst auf, dass die Lehrergruppe „Kontakt zum Lehrstuhl“ mehr, ausführlichere und didaktischer ausformulierte Antworten gab. In dieser Gruppe würde niemand Abstriche bei Demonstrationsversuchen, Fahrbahnversuchen oder Messwerterfassung machen – im Gegensatz zur der Gruppe „Kollegien“ (13 % aller Lehrer, die sich in der Gruppe „Kollegien“ an den freien Antworten beteiligten, gaben dies an). Ansonsten gibt es keine auffälligen Unterschiede zwischen den Teilgruppen. Die folgende Auswertung bezieht sich auf die repräsentativere Gruppe „Kollegien“. Von den 81 zur Kinematik/Dynamik ausgefüllten Bögen haben sich 55 an den freien Antworten beteiligt.

Auf die Frage, was aus ihrer Sicht ein guter Kinematik-/Dynamikunterricht ist, gaben 30 % eine Antwort, die sich auf physikalisches Verständnis bezieht. 22 % betonten die Anwendungen, vor allem im Alltag und im Verkehr. Bei der Frage, wo die Lehrer Abstriche im Kinematik-/Dynamikunterricht machen würden, wenn sie neue Elemente einbauen sollten, und auf die Frage, was sie an ihrem bisherigen Kinematik-/Dynamikunterricht stört, gab es nur eine einzige Häufung: 30 % aller Lehrer (in jeder Teilgruppe) finden, dass zu viel Rechenaufgaben gemacht werden und würden an diesen Abstriche machen. Anscheinend sind sich viele Lehrer bewusst, dass Rechenaufgaben ein zu starkes Gewicht im Kinematik-/Dynamikunterricht einnehmen. Aus der Tatsache, dass sie dies beklagen, aber anscheinend nicht ändern, muss man schließen, dass sie nicht wissen, wie man anders üben kann und wie qualitative Übungs- bzw. Testaufgaben aussehen können. Deshalb wurde in dem hier entwickelten Unterrichtskonzept andere Übungsmöglichkeiten wie Vorhersagen zu Realexperimenten/Simulationen und Modellbildung aufgezeigt sowie qualitative Übungs- und Prüfungsaufgaben angegeben.

6.2.3.2 Didaktisch-methodische Prioritäten der teilnehmenden Lehrer

Die an dem Forschungsprojekt teilnehmenden Lehrer (abgesehen vom Autor dieser Arbeit) bekamen auch in einer der ersten Seminarsitzungen den gleichen Fragebogen zu den im Physikunterricht gesetzten Prioritäten. Von den 13 Lehrern (einschließlich eines Lehrers, der frühzeitig während der Evaluation wieder absprang) waren drei Referendare und hatten deshalb noch nie eine elfte Klasse unterrichtet. Von den zehn erfahrenen Lehrern haben acht geantwortet. Dabei konnten geringe Unterschiede zur Vergleichsgruppe ($N = 113$) festgestellt werden. So wurde in dieser Gruppe Messwerterfassungssysteme häufiger ($M = 5 = \text{intensiv}$, $\mu = 4.1$, $\sigma = 1.5$, 63 % intensiv) als im Durchschnitt ($M = 4 = \text{auch noch intensiv}$, $\mu = 3.5$, $\sigma = 1.4$, 26 % intensiv) eingesetzt (nicht signifikant), in der Hälfte der Fälle PAKMA, weshalb sie auch an der Evaluation interessiert waren. Weniger intensiv haben sie dagegen das Miterleben des Ganges von der Messwertaufnahme bis zur Gleichung ($M = 4$, $\mu = 3.8$, $\sigma = 1.4$ entgegen $M = 5$, $\mu = 4.5$, $\sigma = 1.2$) betont (nicht signifikant), was zum ersteren passt, da dies vor allem bei traditionellem Messen ohne Computer betont wird. Dass bei ihnen Projekte ($M = 1 = \text{nicht}$, $\mu = 1.4$, $\sigma = 0.7$ entgegen $M = 2 = \text{kaum}$, $\mu = 2.2$, $\sigma = 1.1$) signifikant seltener vorkamen, spielt wohl keine Rolle. Interessant ist dagegen, dass die Orientierung am Schulbuch signifikant geringer war ($M = 3$, $\mu = 3.1$, $\sigma = 1.2$ entgegen $M = 4$, $\mu = 4.1$, $\sigma = 1.2$), was für das Umsetzen eigener Ideen spricht. Anscheinend fällt es Lehrern, die sich normalerweise nicht

so stark am Schulbuch orientieren, leichter, sich auf ein neues Unterrichtskonzept einzulassen. Insgesamt weisen auch diese Daten darauf hin, dass es sich um engagierte Lehrer handelte. Die großen Spannweiten in den Gewichtungen zeigen, dass eine bunte Mischung an Lehrern vorlag, die sich im Mittel wenig vom Durchschnitt unterscheiden.

Bei den allgemeinen Zielen haben die acht Lehrer insbesondere die Diskussion von Schülervorstellungen ($M = 5.5$, $\mu = 5.5$, $\sigma = 0.5$ entgegen $M = 5$, $\mu = 4.7$, $\sigma = 1.0$, signifikant) und das Aufarbeiten von Fehlvorstellungen ($M = 6 = \text{sehr intensiv}$, $\mu = 5.8$, $\sigma = 0.5$ entgegen $M = 5$, $\mu = 4.9$, $\sigma = 0.8$, signifikant) für wichtiger als die Vergleichsgruppe eingeschätzt. Dies ist sicher das Ergebnis der ersten beiden Veranstaltungen der Fortbildung, bei denen die vorhandenen Schülervorstellungen ausführlich dargestellt wurden, was von den Lehrern mit großem Interesse aufgenommen wurde und ihnen bis dahin so nicht bekannt war. Für nicht so wichtig wie in der Vergleichsgruppe wurde das Üben von Rechenaufgaben ($M = 4$, $\mu = 4.1$, $\sigma = 0.8$ entgegen $M = 5$, $\mu = 4.7$, $\sigma = 0.8$, nicht signifikant) und das Durchführen von Projekten ($M = 3$, $\mu = 3.3$, $\sigma = 0.9$ entgegen $M = 4$, $\mu = 3.8$, $\sigma = 1.0$, nicht signifikant) eingeschätzt.

6.3 Schulpraktische Erfahrungen der Lehrer

6.3.1 Erfahrungen im Kinematik-Unterricht

Einige teilnehmende Lehrer haben bei der Kinematik häufig per E-Mail oder telefonisch Fragen gestellt, von Erfahrungen berichtet oder Ergänzungen und weitere Materialien gewünscht. Darüber hinaus haben nach Abschluss des Kinematikunterrichts alle Lehrer einen Fragebogen ausgefüllt und damit angegeben, wie intensiv sie die Kinematik unterrichteten und welche Erfahrungen sie dabei machten, so dass viele detaillierte Aussagen schriftlich vorliegen.

6.3.1.1 Aspekte zur Akzeptanz der Inhalte und zum vorgeschlagenen Stundenumfang

Die teilnehmenden Lehrer haben sich in der Regel recht eng an das vorgegebene Unterrichtskonzept gehalten und sind auch gut mit der Zeitaufteilung zurechtgekommen. Nach ihren Angaben haben sie dafür zwischen 12 und um die 20 Unterrichtsstunden eingesetzt. Es zeigte sich, dass das Konzept in der vorgeschlagenen Zeit von 14 Unterrichtsstunden gut durchführbar ist. Zu beachten ist, dass dies mehr Stunden sind als der bayerische Lehrplan vorschlägt (10 Unterrichtsstunden für eindimensionale Kinematik, nur ca. 1 Unterrichtsstunde für zweidimensionale Kinematik).

Die meisten Lehrer haben vom Gesamtkonzept nichts weggelassen. Einige Lehrer (fast 50 %) haben lediglich die Einführung in die Modellbildung über die Kinematik mit Graphenvorhersage nicht unterrichtet, da sie in neusprachlichen Klassen generell keine Zeit für Modellbildung sehen. Andererseits wurde jedoch von fast allen Lehrern irgendetwas ausführlicher als im vorgeschlagenen Unterrichtskonzept behandelt. Sieht man hier von Einzelfällen ab (Bemerkung zur Digitalisierung von Messwerten, ausführlichere Behandlung des Grenzübergangs von Durchschnitts- zu Momentanwerten, noch intensivere Behandlung des Beschleunigungsvektors, Schülerübung, Unterrichtsgang, Datenauswertung mit Excel) wurde insbesondere das Thema „Bewegungsfunktionen und Bewe-

gungsdiagramme“ ausführlicher behandelt. Diese Lehrer meinten auch, dass Rechenaufgaben und Aufgaben zum Straßenverkehr wie Überholaufgaben stärker berücksichtigt werden sollten.

Die beiden Lehrer außerhalb Bayerns sowie einige Lehrer an bayerischen mathematisch-naturwissenschaftlichen Gymnasien haben sich bewusst dazu entschieden, mehr Stunden für die Kinematik aufzuwenden. Für manche Lehrer an bayerischen neusprachlichen Gymnasien ergab sich ein Dilemma: Einerseits fanden sie manches im Konzept (z.B. Überholaufgaben) zu knapp und würden diese ausführlicher unterrichten, andererseits fanden sie, dass die Kinematik in Anbetracht des Lehrplanes lange dauert. Um dieses Dilemma zu lösen, ist in dem Konzept vorgesehen, die grundlegenden kinematischen Begriffe anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen einzuführen, dann aber schnell auf die eindimensionale Bewegung zu spezialisieren und vor allem diese zu üben. Es ging also nicht darum, zweidimensionale Kinematik in allen Details zu beherrschen. Die Lehrer nutzten aber nicht nur gerne fakultativ angebotene Übungsblätter zur zweidimensionalen Kinematik, sondern etliche wollten auch noch mehr Anwendungsaufgaben und Problemstellungen zur zweidimensionalen Bewegung. Ein Lehrer meinte dagegen, man könnte diese Einführung der grundlegenden kinematischen Begriffe anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen (Stunden 1 bis 9) straffen, was er im folgenden Jahr (ohne Evaluation) auch tat. Möglicherweise gab es bei manchen Lehrern das Problem, dass sie bei der ersten Durchführung nach diesem Konzept noch nicht klar unterscheiden konnten, was mehr und was weniger relevant ist, und alle Aspekte ausführlicher behandelten, als wenn sie sie ein zweites Mal unterrichten würden.

Ein Lehrer hat für die Kinematik (insbesondere für die Einführung der kinematischen Begriffe anhand zweidimensionaler Bewegungen) besonders viel Unterrichtsstunden aufgewandt, so dass er sich gegen Ende des Kinematikunterrichts entschloss, nicht mehr dem Konzept zu folgen und nicht weiter an der Evaluation teilzunehmen, sondern konventionell weiter zu unterrichten. Er sagte, er hätte zu wenig Zeit gehabt, sich in das Konzept reinzudenken und so manches selbst nicht völlig verstanden. Andererseits hatte er wohl auch eine besonders schlechte, unmotivierte Klasse. Schließlich gefiel ihm das viele Arbeiten mit dem Computer nicht und es störten ihn die Probleme, die er mit der Hard- und Software hatte.

6.3.1.2 Von den Lehrern eingebrachte Ideen

Man kann feststellen, dass die Lehrer das Konzept verstanden haben, was auch daran zu sehen ist, dass einige Lehrer neue Ideen mit in den Unterricht einbrachten. Ein Lehrer entwarf das Bild, dass bei einem Auto auf der Motorhaube der Geschwindigkeitsvektor befestigt ist, der in Fahrtrichtung zeigt und dessen Länge das Tempo angibt. Den Schülern war klar, dass man diesen Vektor nicht nur mit Gaspedal und Bremse, sondern auch mit dem Lenkrad verändern kann. Ein anderer Lehrer visualisierte seine eigene Geschwindigkeit beim Gehen durch seinen ausgestreckten Arm. Für den Fall, dass die Beschleunigung senkrecht zur Geschwindigkeit steht und sich ständig die Geschwindigkeitsrichtung ändert, konnte er somit zeigen, dass sich beim Gehen ein Kreis ergibt. Im Unterrichtsgespräch wurde deutlich, dass sich die Schüler die Wirkung des Beschleunigungsvektors wie eine Krafteinwirkung auf den Geschwindigkeitsvektor vorstellten.

Ein Lehrer außerhalb Bayerns entwickelte eine zum Unterrichtskonzept passende Schülerübung ohne Computer mit Hilfe der in 5.3.3.4 bereits erwähnten Spurenplatte. Ausgehend von der Idee, Ortsänderungen bzw. Geschwindigkeitsänderungen zu betrachten, verwendete er die alte Schwefelbahn (eindimensional) und die Spurenplatte (für zweidimensionale Bewegungen) der Firma Kröncke, um Ortsänderungen als Streifen im Schwefelstaub sichtbar zu machen, was im zweidimensionalen Fall auch leicht selbst nachgebaut werden kann. Bei sanfter Bewegung des Fingers über die Platte entsteht eine Spur aus schwarzen und gelben Streifen, die jeweils 0,01 s dauern. Damit wurde eine sinnvolle qualitative Schülerübung durchgeführt, von der der Lehrer berichtete: *"Ich habe kurz vorgemacht, wie man eine Spur mit dem Finger erzeugt, habe wiederholen lassen, wie die Spuren entstehen und wie man prinzipiell das Tempo bestimmen könnte bzw. welcher Zusammenhang zwischen Spurdichte und Tempo besteht. [...] Aufgabe an die Schüler war: Stellt mit dem Finger schöne Spuren her und interpretiert sie in Richtung Geschwindigkeit und Beschleunigung. Dann bin ich herumgegangen und habe mehr oder weniger sanft mit den Gruppen qualitative Auswertungen betrieben, mit der Spitze der Pinselrückseite haben wir tangential Geschwindigkeitsvektoren eingezeichnet und je zwei dann am selben Bezugspunkt angesetzt daneben noch einmal gezeichnet um daraus die Beschleunigung zu ermitteln (dabei haben wir Δv und a sprachlich gleich behandelt [...]). Verschiedene Spuren wurden erzeugt: Spiralen, Herzen, Ovale mit deutlich unterschiedlicher Bahngeschwindigkeit, Weihnachtsbäume und Engel, Namen wurden geschrieben. Eine Gruppe stellte systematisch gleichförmige, gleichmäßig beschleunigte und gebremste, kreisförmige mit konstantem Tempo und mit variablem Tempo her. Am Schluss stellen verschiedene Gruppen ihre Kurven vor und erläuterten daran Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren. Bei der Zerlegung in tangentiale und radiale Komponente habe ich dann etwas stärker gelenkt. Besprochen wurde in der Stunde noch die Rennbahn-Aufgabe - das passte ganz gut."* Dies zeigt, dass das Kinematik-Konzept ausbaubar und auch ohne Computer behandelbar ist, obwohl es dann viel mühsamer ist, die Vektoren zu erhalten.

Der gleiche Lehrer verwendete in der Stunde vor den Ferien auch das Spiel „Autorennen“ zur zweidimensionalen Kinematik (siehe Kapitel 5.3.3.5). Auch dieses Beispiel zeigt, dass die Grundidee des Konzeptes vielfältig angewandt und variiert eingesetzt werden kann.

Im Allgemeinen, aber nicht in jedem Fall wurde anerkannt, dass reine Rechenaufgaben und Gleichungsmanipulieren nicht so sinnvoll sind. Entsprechend dem Konzept wurden quantitative Aufgaben häufiger über Diagramme statt über allgemeine Bewegungsfunktionen gelöst, indem z.B. Flächen unter dem Graphen berechnet wurden. Etliche Lehrer haben die Stegreifaufgaben und Schulaufgaben, die sie gehalten haben, zur Verfügung gestellt. Diese Prüfungen unterscheiden sich von traditionellen Aufgabenstellungen. Neben traditionellen Rechenaufgaben und Grapheninterpretation wurden mehr qualitative, Verständnis verlangende Aufgaben gestellt. Dabei wurden zum einen Vorschläge aus den Materialien übernommen, wie z.B. die Aufgabe zum Beschleunigungsvektor aus Abb. 5.7 (siehe Kapitel 5.3.2.), und zum anderen neue Ideen entwickelt. Es wurde das Zeichnen von Vektoren verlangt, die Ergänzung eines Modells, Begründungen, Erklärungen oder die Entscheidung, ob Aussagen richtig sind (z.B. *„Ist bei einer Bewegung der Beschleunigungsvektor ungleich dem Nullvektor so ändert sich die Schnelligkeit.“*, *„Bei einer eindimensionalen Bewegung*

mit kleinem Δt gilt: Wenn a negativ ist, so wird $|v|$ kleiner.“). Nichtbeteiligte Lehrer gaben hierzu zu bedenken, dass die Schwerpunktverschiebung bei den Aufgaben in den Bundesländern ein Problem sein könnte, in denen es ein Zentralabitur gibt, das auch die Themen der elften Klasse in Rechenaufgaben abprüft (nicht in Bayern).

Eine neu entwickelte Aufgabe eines Lehrers sei noch vorgestellt: Der Lehrer hat um einen Startpunkt (konzentrische) Felder gezeichnet, in denen jeweils eine Beschleunigung in eine bestimmte Richtung vorhanden war (Beschleunigungsfelder) (siehe Abb. 6.2). Die Schüler sollten nun selbst eine Bahnkurve, die zu diesen Beschleunigungen passt, einzeichnen und die Bewegung beschreiben. Je nach gewählter Richtung der Startgeschwindigkeit ergeben sich ganz unterschiedliche Bahnkurven, wobei jeweils die Änderung der Richtung und der Schnelligkeit zu beachten ist. Der Lehrer gab hier

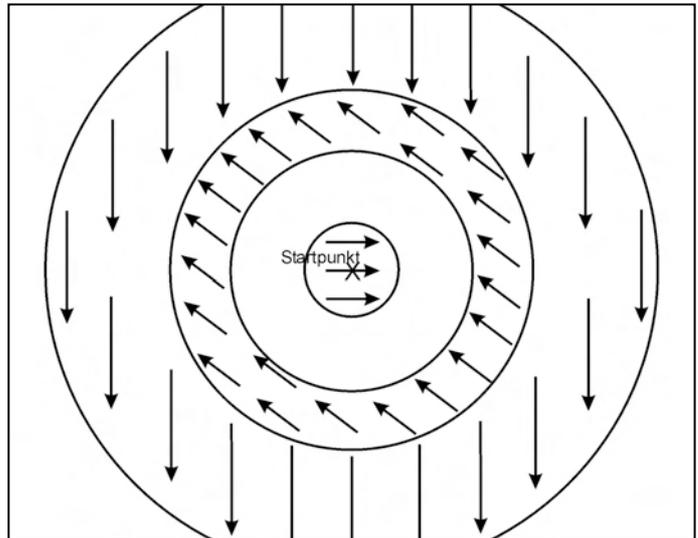


Abb. 6.2: Darstellung eines Beschleunigungsfeldes zur Aufgabe eines Lehrers zur zweidimensionalen Bewegung

vor, dass aus der Ruhelage heraus begonnen wird. Dass damit auch schon der Begriff eines Kraftfeldes vorbereitet wurde, war keine Absicht, aber im Sinne eines kumulativen Lernens sinnvoll. Wieder aufgreifen könnte man diese Darstellung beim waagrechten Wurf im Gravitationsbeschleunigungsfeld oder später bei einer Elektronenbewegung im elektrischen Feld. „Das Schwerfeld [ist] ein reines Beschleunigungsfeld, und die Schwerkraft ist eine Größe, die in der Beschreibung eigentlich völlig überflüssig ist (Treitz, 2003, S. 91).“

6.3.1.3 Probleme mit dem Unterrichtskonzept

Die Hardware, die den Lehrern ausgeliehen wurde, ergab bei einigen Lehrern nicht unerhebliche Schwierigkeiten. Nicht zu unterschätzen ist auch der Aufwand für den Lehrer durch Aufbau von Versuchen, Computer/Laptop und Beamer. Wenn es nicht möglich ist, dies vor der Unterrichtsstunde aufzubauen, geht damit wertvolle Unterrichtszeit verloren, weshalb in einer Klasse viele PAKMA-„Projekte“ (= PAKMA-Programm) zur Kinematik nicht gezeigt wurden. Leider kann ein feststehender, funktionierender Beamer noch nicht in den Physikräumen vorausgesetzt werden.

In manchen Klassen entstand durch die am Anfang geplante Wiederholung der Vektorrechnung einiges Entsetzen. Die hessische Klasse hatte noch nie etwas von Vektoren gehört; man kann die Vektorrechnung in der elften Klasse nicht in jedem Bundesland voraussetzen, da sie z.T. erst in der zwölften Klasse zum ersten Mal behandelt wird. Aber auch bei einigen bayerischen Klassen entstand dieser Eindruck, obwohl laut damaligen Lehrplan in Mathematik (von 1992) in der siebten Jahrgangsstufe mit Verschiebungspfeilen auch in Koordinatendarstellung gearbeitet wird und in der achten Klasse der Vektorbegriff behandelt und Vektoradditionen ausgeführt werden, was in Physik bei der Kräfteaddition und -zerlegung gebraucht wird. Offensichtlich wurde das aber in Mathema-

tik nicht entsprechend unterrichtet. Andererseits braucht man hier in der Kinematik nicht mehr als das Wissen, wie man zwei „Pfeile“ graphisch addiert, was als „Pfeilzeichnungsalgorithmus“ schnell gezeigt werden kann. Ein quantitatives Rechnen mit Vektoren ist nicht notwendig. Das Entsetzen der Schüler äußerte sich in Fragen wie „Müssen wir mit den Vektoren rechnen?“ und „Und wie rechne ich jetzt damit?“ Deshalb wird gefordert, dass im Mathematikunterricht bereits in der Unter- und Mittelstufe Vektoraddition und –subtraktion zeichnerisch und rechnerisch behandelt und geübt wird. Die Bedeutung des Arbeitens mit Vektoren für ein Verständnis der Physik kann nämlich nicht unterschätzt werden. Das Arbeiten mit den Vektorpfeilen wurde jedoch schließlich von den Lehrern als anschaulich, klar und sogar einfach eingeschätzt. Die Lehrer meinten, dass die Schüler dieses Arbeiten mit Vektorpfeilen verstanden hätten und worin in den Vektoren einen Unterschied zur Alltagsbedeutung der Begriffe sahen: „Dann ist die Beschleunigung also auch ein Vektor?“ Vektorielle Größen in PAKMA anschaulich als Pfeil zu sehen, wurde als recht nützlich beschrieben. Ein anfängliches Entsetzen über die Vektorrechnung war also ungerechtfertigt.

Gute Schüler, die vielleicht unterfordert waren, suchten z.T. nach Schwierigkeiten und Problemen. Ein Problem für einige Klassen und einige Lehrer war, wo bei einer gegebenen Bahnkurve mit Zeitmarken der ermittelte Geschwindigkeitsvektor hingezeichnet werden soll (irgendwo in der Mitte zwischen den beiden Zeitmarken.) bzw. wo der ermittelte Beschleunigungsvektor beginnen soll (irgendwo in der Mitte zwischen den beiden Geschwindigkeitsvektoren). Ein anderes Problem in einer Klasse war, dass die Anschaulichkeit bei der Grenzwertbildung verloren geht: Obwohl für $\Delta t \rightarrow 0$ der Ortsänderungsvektor gegen Null geht, hat der Geschwindigkeitsvektor eine von Null verschiedene Länge. Während in der Mathematik der Grenzwert immer als Grenzwert einer Folge von Skalaren auftritt, geht man hier darüber hinaus, indem der Grenzwert einer Folge von Vektoren betrachtet wird: $\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$. Einige Schüler hatten auch ein Problem damit, dass \vec{v} gleich lang bleibt, wenn \vec{a} und \vec{v} senkrecht zueinander sind, denn ein \vec{v} -Vektor plus ein dazu senkrechter $\Delta \vec{v}$ -Vektor ergeben einen längeren \vec{v} -Vektor. Ein Lehrer war sehr darüber verblüfft, dass der Betrag der mittleren Geschwindigkeit bei einer Kreisbewegung mit konstantem Tempo abhängig vom gewählten Zeitintervall kleiner ist als das konstante Tempo. So gab es auch in zwei Klassen Schwierigkeiten mit der mittleren Geschwindigkeit.

6.3.1.4 Gesamteinschätzung der Lehrer

Allen Lehrern gefiel die Einführung kinematischer Begriffe anhand von zweidimensionalen Bewegungen und die Betonung des Vektorcharakters der Größen. Letztlich lobten die Lehrer das Konzept, das als inhaltlich geschlossen mit erkennbarem rotem Faden beschrieben wurde. Als besonders positiv wurde genannt, dass hier im Gegensatz zur Einführung in die Kinematik über eindimensionale Bewegungen Ort und Weglänge sowie Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsbetrag klar unterscheidbar sind. Das Herausarbeiten des zentralen Beschleunigungsbegriffes in Abgrenzung zur Geschwindigkeit gelinge hier deutlich besser als beim traditionellen Vorgehen. Die Einführung der kinematischen Begriffe über zweidimensionale Bewegungen wurde außerdem als realitätsnäher

beschrieben. Geschätzt wurden insbesondere auch die Visualisierungsmöglichkeiten von PAKMA, insbesondere die Darstellung der Größen und ihrer Änderungen durch Vektorpfeile.

Manche Schüler fanden es angeblich sehr spannend, wie viel Folgerungen sich aus den einfachen Gleichungen $\vec{v} = \Delta\vec{x} / \Delta t$ und $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ ziehen lassen. Beim quantitativen Rechnen verwendeten die Schüler wie erwünscht auch häufiger die Definitionsgleichungen $v = \Delta x / \Delta t$ und $a = \Delta v / \Delta t$ statt der Bewegungsfunktionen. Allerdings kam es hier auch zu unangemessener Anwendung, wenn bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung die Geschwindigkeit über $v = \Delta x / \Delta t$ berechnet wurde. Von einigen Lehrern wurde geschätzt, dass der Schwerpunkt von der Handhabung von Gleichungen auf die Interpretation und Berechnung von Diagrammen verschoben wurde. Einzelne Schüler erkannten dabei an den Diagrammen, dass der zurückgelegte Weg bei konstanter Beschleunigung auch leicht mit der mittleren Geschwindigkeit berechnet werden kann.

Insgesamt habe es den meisten Schülern nach Lehrereinschätzung gut gefallen und fast alle Lehrer waren überzeugt, dass die Schüler bei diesem Vorgehen die Begriffe Geschwindigkeit und insbesondere Beschleunigung besser als nach traditionellem Vorgehen verstanden haben. Die Definition der Beschleunigung wurde als sehr einsichtig beschrieben.

Alle Lehrer gaben schließlich an, dass sie auch in ihrer nächsten elften Klasse wieder über zweidimensionale Bewegungen in die Kinematik einsteigen werden und viele haben seit dem tatsächlich wieder nach diesem Konzept unterrichtet. Einige haben davon auch an ihrer Schule in Fachsitzungen berichtet, die Materialien weitergegeben und so als Multiplikatoren gewirkt. Aufgrund der Langzeitwirkung kann die begleitende Lehrerfortbildung zu dem Forschungsprojekt auch als Innovationserfolg aufgefasst werden. Andere, die mit Begeisterung von dem Kinematikkonzept gelesen haben, haben es auf den ihnen zur Verfügung stehenden Softwaregegebenheiten angepasst (siehe z.B. Kapitel 7.1. und 7.3).

Zusammenfassend kann also zum Kinematikkonzept gesagt werden, dass es bei den Lehrern eine hohe Akzeptanz fand, in der vorgeschlagenen Zeit unterrichtet werden kann, mit weiteren Ideen erweiterbar ist und keine größeren Probleme bereitete.

6.3.2 Erfahrungen im Dynamik-Unterricht

Auch zum Dynamikunterricht erhielten die teilnehmenden Lehrer Fragebögen, um anzugeben, wie intensiv sie die Dynamik unterrichteten und welche Erfahrungen sie dabei machten. Dabei wurde auch nach methodischem Vorgehen bezüglich des Einsatzes der Videos und der Reproduktionen bei den komplexen Versuchen gefragt. Diese Erfahrungsberichte liegen also schriftlich vor und wurden durch Mitschriften bei Diskussionen im Begleitseminar ergänzt.

6.3.2.1 Aspekte zur Akzeptanz der Inhalte und zur benötigten Unterrichtszeit

Im Gegensatz zur Kinematik wurde die Dynamik in den beteiligten Klassen recht unterschiedlich unterrichtet. Große Unterschiede gab es bei der Zeit, die die Lehrer für die Dynamik aufwandten. Wenn sich die Lehrer an das vorgegebene Unterrichtskonzept hielten, dann schafften es auch einige in der dafür vorgesehenen Zeit (ohne Modellbildung und Prüfungen: 20 Stunden für ein- und zweidimensionale Dynamik), während andere dafür jeweils mehr Zeit brauchten. Zusätzlich wurden

verschiedene Themen in einzelnen Klassen weggelassen oder zusätzlich unterrichtet. Ein Teil der Lehrer kam deshalb gut mit der Zeit zurecht. Ein anderer Teil stellte fest, dass sie mehr Zeit als konventionell brauchten, worin sie ein Problem sahen. Ein weiterer kleiner Teil nahm sich bewusst viel Zeit für die Dynamik auf Kosten anderer Themengebiete, speziell der vorgesehenen Addita im mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig. Ein Lehrer sagte, dass er sich deshalb mehr Zeit genommen habe, weil das Unterrichten nach diesem Konzept so schön war und ihm Spaß gemacht hat, wobei er insbesondere die Modellbildung nannte.

Ein Lehrer stellt fest, dass er für den neusprachlichen Zweig entgegen konventionellem Vorgehen mehr Zeit für die Kinematik gebraucht hat, so dass er in der Dynamik ein Zeitproblem sah und sich beeilen wollte. Andererseits stellte er auch fest, dass sich die Zeit für die Kinematik gelohnt hatte und er in der Dynamik davon profitierte. Speziell war es den Schülern bei der Kreisbewegung klar, dass eine Beschleunigung zur Mitte vorliegt, während im konventionellen Unterricht, in dem Beschleunigung meist als skalare Größe (Schneller- oder Langsamerwerden ohne Richtung) erscheint, Schüler hier Schwierigkeiten haben. Dennoch gab es die Meinung, in der Kinematik Zeit vertan zu haben, und die Absicht, es beim nächsten Mal zügiger zu unterrichten. Aber gerade nach Abschluss der Dynamik waren alle Lehrer überzeugt, dass sie beim nächsten Mal wieder entsprechend dem Konzept über zweidimensionale Bewegungen in die Kinematik einführen.

In den nicht-naturwissenschaftlichen Zweigen wurde die Modellbildung entweder gekürzt oder in einigen Fällen ganz weggelassen. Zum Teil wurde die Stunde zur Atwoodschen Fallmaschine weggelassen, was kein Problem ist, da es nur als eine mögliche Übung zum Lösen von Rechenaufgaben zum Grundgesetz der Mechanik $m_{ges} \cdot \vec{a} = \sum \vec{F}_{angreifend}$ nach dem immer gleichen Prinzip sein sollte und deren Vorteil nur darin liegt, dass sich nicht nur eine Masse bewegt. Ungünstiger ist, dass in Einzelfällen auch bei der Behandlung der komplexen Versuche zum zweiten newtonschen Gesetz mit mehreren Kräften (variable Hangabtriebskraft, zusätzlicher Propeller) gekürzt wurde bzw. diese weggelassen wurden. Gerade hier kann die Besprechung der dynamisch ikonischen Reproduktionen in den Versuchsreproduktionen zum Verständnis von $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ beitragen. Bedauerlich ist ebenso, dass ein Lehrer ein Gespräch mit den Schülern über den Kraftbegriff in der Alltagssprache nicht durchführte.

Die meisten Lehrer haben gewisse Aspekte ausführlicher als vorgeschlagen unterrichtet. Dies waren z.B. das erste newtonsche Gesetz, ein bewegtes Bezugssystem, ein beschleunigtes Bezugssystem, Kräfte auf der schiefen Ebene, die Kreisbewegung, Grapheninterpretation im Sinne der Infinitesimalrechnung (Steigung/Flächeninhalt bei kinematischen Größen), der schräge Wurf, ein Beispiel zur Videoanalyse und mehr Übungsaufgaben. Da jeder Punkt nur einmal genannt wurde, kann man hier keine generalisierenden Aussagen treffen.

Die ikonischen Repräsentationen, vor allem Pfeile, sollten auch in qualitativen Aufgaben genutzt werden. Praktisch alle Lehrer kamen dieser Aufforderung nach, wobei die Erfahrungen sehr unterschiedlich waren. Es gibt sowohl Berichte darüber, dass der Großteil der Schüler hier erfolgreich war, als auch ernüchternde Erfahrungen, was natürlich auch vom Schwierigkeitsgrad der Aufgaben abhing. Manchen Lehrern wurde bei diesen aus seiner Sicht einfachen, qualitativen und verständnis-

verlangenden Aufgaben erst klar, wie resistent Schülervorstellungen gegenüber Unterricht sind. Ganz allgemein wurde angegeben, dass erkannt wurde, wie tief Schülervorstellungen sitzen und dass man viel Zeit bräuchte, um darauf Einfluss zu nehmen.

Ein wichtiges Prinzip dieses Unterrichtskonzeptes ist, von den Schülern konkrete Vorhersagen zu den PAKMA-„Projekten“ zu fordern (siehe Kapitel 5.4.4). Die meisten Lehrer gaben an, dass sie diese Vorhersagen verlangten, wobei Angaben über die Anzahl der im Unterricht geforderten Vorhersagen nicht möglich sind. Anfangs waren die Schüler hier anscheinend zögerlich, was sich aber während des Lehrgangs änderte. So wurde festgestellt, dass Schüler in der Schule leider dahin erzogen wurden, nichts Falsches zu sagen und es deshalb Zeit brauchte, eine Veränderung zu bewirken. Häufig bildeten sich in den Klassen zwei Lager mit zwei unterschiedlichen Vorhersagen. Nach Ablauf eines PAKMA-„Projektes“ waren die Prognosen dann eine gute Grundlage für angeregte Diskussionen. Nach Lehrerangaben habe das Angeben von Vorhersagen den Schülern gefallen, wodurch ein Wettbewerbsaspekt hinzukam.

6.3.2.2 Lehrereinschätzungen der angebotenen Materialien

Die Lehrer waren der Meinung, dass die PAKMA-„Projekte“, d.h. Programme mit ikonisch dynamischen Repräsentationen, den Schülern helfen würden. Insbesondere wurde geschätzt, dass mit der Darstellung von Größen durch Pfeile deutlich werde, welche Größen Vektoren sind. Die anschauliche Darstellung auch bei komplexen Versuchen (wie z.B. komplexe Versuche zum dritten newtonschen Gesetz) trüge viel zum Verständnis bei und sei Grundlage für gute Diskussionen. Die Darstellungen mit Pfeilen (z.B. bei den Versuchen zum zweiten newtonschen Gesetz) leuchte angeblich allen Schülern sofort ein. So wunderte es einzelne Lehrer, dass dennoch in der Schulaufgabe z.B. beim senkrechten Wurf nach oben Beschleunigungs- und Kraftvektor falsch zueinander gezeichnet wurden oder auch nach dem Unterricht noch Begriffe wie die „Schwungkraft“ benutzt wurden. Die Darstellung in den PAKMA-„Projekten“ mit ikonisch dynamischen Repräsentationen wurde zwar sehr geschätzt, es ist aber nicht feststellbar, wie intensiv auch damit gearbeitet wurde. Schüler freuen sich angeblich besonders über optisch schön gestaltete PAKMA-„Projekte“ bei denen ein ansprechendes Bild im Hintergrund liegt (z.B. schiefer Turm von Pisa oder Himmel mit Regenwolke und grimmiger Sonne). Kritisiert wurde von einem Lehrer, dass manche PAKMA-„Projekte“ zu viele Pfeile gleichzeitig zeigen und es wurde angeregt, dass Ebenenkonzept (siehe Kapitel 3.3) noch viel konsequenter zu verfolgen und so je nach Wunsch jeweils wenige gerade interessante Pfeile zu zeigen. Dies passt zu der Forderung (Kapitel 3.2.1), dass neue Darstellungen langsam sukzessive eingeführt werden müssen. Unterschiedliche Meinungen gibt es aber dazu, wie sinnvoll es ist, später den Schülern mehrere bereits bekannte Darstellungsformen gleichzeitig anzubieten, so dass der Schüler auswählen muss, worauf er seine Aufmerksamkeit steuert.

Da nicht alle Lehrer über die PAKMA-Hardware verfügten und einige komplexe Versuche sehr aufwändig sind, bestand die Möglichkeit, Videos der Versuche zu zeigen und die Messung in PAKMA als Reproduktion in Echtzeit ablaufen zu lassen. Auch hierzu wurden die Lehrer schriftlich nach ihren Erfahrungen gefragt. Dabei stellt sich heraus, dass die wirklich komplexen Versuche von keinem als Realversuch vorgeführt wurden, sondern nur einfachere Versuche (vor allem der

Standardversuch zu $F = m \cdot a$ wurde real vorgeführt). Am häufigsten wurden das Video des Versuchs und anschließend die Reproduktion gezeigt. Fast genauso viele Lehrer haben auch erst einen qualitativen Versuch ohne Messung vorgeführt und anschließend das Video und die Reproduktion gezeigt. Ein anderer Lehrer betont, dass er jeweils vorher an einer realen Luftkissenfahrbahn zeigte, wo welche Messgeräte bei der Aufzeichnung angebracht waren und wie gemessen wurde. Gelegentlich wurden die Reproduktionen auch ohne Video eingesetzt. Insgesamt wurden die Erfahrungen mit den Versuchsreproduktionen (Videos und Abläufe in PAKMA mit Animation und dynamisch ikonische Repräsentationen) positiv beurteilt. Da langwierige bzw. langweilige Messungen entfallen, wurde eine größere Schülersaufmerksamkeit festgestellt. Der Vorteil der Zeitersparnis wird allgemein sehr groß eingeschätzt, während der Nachteil, keine Originalmessungen zu haben, als gering eingeschätzt wird. Eine Zeitersparnis ist dabei sowohl in der Unterrichtsvorbereitung als auch im Unterricht selbst zu sehen. Die gewonnene Unterrichtszeit kann zum Gespräch mit den Schülern genutzt werden. So ist die Messwertreproduktion mit Animationen und/oder Videos wohl die einzige Möglichkeit, komplexe Dynamik-Versuche, die bisher nicht gemacht werden, effizient und motivierend im Unterricht einzusetzen (auch bei veralteter Ausstattung der Physiksammlung). Die Behandlung komplexer Bewegungen mit mehreren Kräften und vor allem mit Reibung wurde von einigen Lehrern als besonders positiv genannt; andere dagegen hielten speziell die Behandlung einer Bewegung mit einer variablen, nicht konstanten Hangabtriebskraft für weniger relevant.

Dass Reproduktionen statt Originalmessungen vorgeführt wurden, wurde von den Schülern stets akzeptiert, was einige Lehrer verwunderte. Für Schüler machte es vermutlich keinen Unterschied, ob sie eine Originalmessung sehen oder ein Video mit Reproduktion. In beiden Fällen sind sie selbst unbeteiligte Zuschauer. Anscheinend hat kein Schüler daran gezweifelt, dass die Reproduktion wirklich der Realmessung entspricht. Die Schüler sehen auch ein, dass der Aufbau komplexer Versuche zu zeitaufwändig wäre.

Ein Realversuch ist etwas grundlegend anderes als eine Simulation - auch wenn die gleiche Darstellung benutzt wird. Ob den Schülern immer klar war, ob sie gerade eine Reproduktion oder eine Simulation sehen, ist nicht geklärt. Das Video hilft jedenfalls, deutlich zu machen, dass nun eine Reproduktion eines Realversuches folgt. Die Lehrer betonten, dass die Videos generell hilfreich seien; eine Versuchsreproduktion ohne ein Video des Realversuchs wurde dagegen meist abgelehnt. Die Videos dienen der Anschauung und verdeutlichen Versuchsaufbau und Versuchablauf. Ein Vorteil gegenüber dem Realversuch ist, dass sie wiederholt und angehalten werden können. Andererseits ist die Verlockung als Lehrer groß, bei Vorhandensein eines Videos auch dann keinen Versuch aufzubauen, wenn dessen Aufbau und Durchführung einfacher möglich ist.

Um deutlicher zu machen, dass es sich beim Ablauf um eine Reproduktion handelt, könnte man das Video auch im PAKMA-Fenster ablaufen lassen und die Vektoren statt an die Animation direkt an das Objekt im Video anheften, was bei der Erstellung der Unterrichtsmaterialien noch nicht möglich war (siehe 3.5 b in Kapitel 3.2.2.1). Die Lehrer betonten aber, dass die Animation als eine Abstraktion auch sinnvoll sei, denn bei einer Animation als Reduktion auf das Wesentliche fehlen ablenkende unwichtige Details. Deshalb meinten Lehrer, dass Videos im PAKMA-„Projekt“ nur in Zu-

sammenhang mit dem Ebenenkonzept sinnvoll seien, bei dem der Lehrer vom Video auf eine auf einer anderen Ebene vorhandene Animation umschalten kann.

Die Videos der Versuche wurden einmal mit kleiner Auflösung im mpg-Format, was auch auf alten langsamen Rechnern noch in Echtzeit abläuft, und einmal in großer Auflösung im avi-Format, wozu man einen schnelleren Rechner braucht, auf die CD gebrannt, wobei in der Unterrichtsbeschreibung stets das Video mit kleiner Auflösung (mpg-Format) verlinkt war. Da jeder dieses statt das bessere Video nutzte, gaben dann auch einige Lehrer an, dass die Auflösung bzw. Bildgröße besser hätte sein sollen.

Zusammenfassend wurde die Vielfältigkeit der Unterrichtsmaterialien und der eingesetzten Mittel gelobt. Die Videos und die PAKMA-„Projekte“ seien von hoher Qualität, was auch Schüler schätzen würden. Als besondere Highlights wurden Videos und PAKMA-„Projekte“ zu komplexen Versuchen auf der Luftkissenfahrbahn, die Videos zum ersten newtonschen Gesetz (Crashversuche) und die PAKMA-„Projekte“ zu komplexen Versuchen zum dritten newtonschen Gesetz genannt.

6.3.2.3 Gesamteinschätzung

Insgesamt lobten die beteiligten Lehrer auch hier das Konzept und die Materialien und alle gaben an, dass sie auch beim nächsten Mal wieder so unterrichten werden, was auch einige seitdem tatsächlich ausführten. Auch am Projekt nicht beteiligte Lehrer haben gerne einzelne Materialien für ihren sonst konventionellen Unterricht genutzt. Der Autor dieser Arbeit wurde mehrfach eingeladen, auf Lehrerfortbildungen das Kinematik und Dynamik-Konzept vorzustellen und wurde dort häufig nach den Materialien gefragt, so dass eine gewisse Verbreitung festgestellt werden konnte.

Bei dem Konzept werde nach Lehreraussage der zentrale Kraft- und Beschleunigungsbegriff konsequenter erkannt, da z.B. auch bei der Kreisbewegung von den Schülern eine Beschleunigung erkannt werde. So sei das Konzept insgesamt schlüssiger als konventioneller Unterricht. Auch die Anwendbarkeit auf reale Vorgänge sei den Schülern einsichtiger geworden. So wurde auch geschätzt, dass beim Grundgesetz der Mechanik in der Form $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ statt F nun die Summe aller Kräfte $\Sigma \vec{F}_{\text{angreifend}}$ betont wird, da dies realitätsnäher sei und in Wirklichkeit fast immer mehrere Kräfte angreifen würden. Speziell wurde die Behandlung der Luftreibung als gut befunden. Insgesamt meinten die Lehrer, dass die Schüler bei diesem Unterrichtskonzept den Begriff „Kraft“ und insbesondere den Zusammenhang mit der Beschleunigung besser als nach einem traditionellen Vorgehen verstanden hätten. Konkret sei im Unterrichtsgespräch von den Schülern mehr Verständnis gezeigt worden.

Einzelne Lehrer gaben auch an, dass sie selbst noch fachlich dazugelernt haben und nun ein besseres Verständnis für die drei newtonschen Gesetze haben. Insbesondere zeigten sich bei Lehrern Fehlvorstellungen und Probleme mit dem dritten newtonschen Gesetz. Bemerkte wurde, dass durch die Vorträge im Begleitseminar und die dort diskutierten Probleme erst klar geworden ist, welche Probleme die Schüler und man selbst als Lehrer mit den Begriffen Kraft, Impuls und Energie hat. Es wurde dabei von den Lehrern festgestellt, dass Kräfte im physikalischen Studium nur wenig be-

handelt werde; Erhaltungsgrößen haben in universitären Lehrveranstaltungen eine größere Bedeutung.

Da die Schüler einige Tests durchführen sollten, wurde leider aus Zeitgründen darauf verzichtet, die Schüler systematisch nach ihrer Beurteilung der Versuche, der Videos, der dynamisch ikonischen Repräsentationen etc. zu befragen. Bei allgemeinen Diskussionen des Autors mit den Schülern (im Klassenverband) anlässlich von Unterrichtsbesuchen wurden häufig von den Schülern die dynamisch ikonischen Darstellungen in den PAKMA-„Projekten“ als anschaulich und hilfreich bezeichnet. Als besonderen Aspekt wurde von Schülern hervorgehoben, dass sie gesehen haben, dass die Beschleunigung auch gegen die Bewegungsrichtung gerichtet sein kann.

6.3.3 Erfahrungen mit der Modellbildung

Von den 13 beteiligten Lehrern setzten sieben auch Modellbildung ein (eine Klasse 3 Std., eine Klasse 12 Std., sonst stets 5 bis 6 Std.). Dabei wurden die Vorschläge aus den Materialien genutzt, wobei das Modell zur Fallbewegung mit Luftreibung von allen benutzt wurde. Auch hier haben die entsprechenden Lehrer nach Abschluss des Unterrichts einen Fragebogen ausgefüllt und ihre Erfahrungen schriftlich angegeben, was im Gespräch weiter erläutert wurde.

6.3.3.1 Modellbildung im Unterricht

Die Lehrer, die Modellbildung einsetzten, waren davon ohne Ausnahme begeistert. Besonders gefiel, dass man die Konsequenzen der gemachten Fehler schnell sieht und gemeinsam versuchen kann, dies zu analysieren, ohne dass der Lehrer die Fehler benennt. Gerade die Fehlersuche wurde als wertvoll eingeschätzt. Beim Modellieren kamen auch die gleichen Schülerprobleme und physikalisch falschen Vorschläge wie in der oben vorgestellten Interventionsstudie vor, worauf die Lehrer, die am Seminar teilnahmen, vorbereitet waren. Geschätzt wurde, dass der wichtige Zusammenhang $\bar{a} = \Sigma \vec{F} / m$ hervorgehoben wurde. Hier helfe die Modellbildung dann auch bei der Bearbeitung konventioneller Übungsaufgaben. Häufig gelobt wurde, dass man interessante Probleme wie Luftreibung behandeln könne, die ohne Modellbildung nicht so gut zugänglich seien. Des Weiteren wurde positiv eingeschätzt, dass man schnell andere Anfangswerte einstellen und auf einfache Weise Varianten (z.B. charakteristische Fehlvorstellungen) ausprobieren könne. So wurden auch unrealistische Werte, z.B. für eine Gleitreibung eingestellt und in ihrer Auswirkung betrachtet.

Als zusätzliches Angebot für naturwissenschaftliche Klassen wurden Unterrichtsmaterialien zur Modellbildung in der Biologie angeboten, um Modellbildung als fächerübergreifendes Werkzeug vorstellen zu können. Dabei wurde die Modellierung des exponentiellen und des logistischen Wachstums geschätzt. Aber die Modellierung des Räuber-Beute-Modells wurde als zu weit gehend und zu schwierig eingestuft.

Wenn mit Schülern einige Mal ein Modell zur Dynamik entwickelt wurde, können sie weitere Modelle recht schnell gemeinsam im Unterrichtsgespräch erstellen. D.h. das immer gleiche Grundschema der „Newton-Maschine“ wurde schnell gemerkt und darauf zurückgegriffen. Am Anfang hatten die Schüler Probleme damit, dass die Software kein „ Δ “ darstellen kann und stattdessen ein „d“ eingegeben wird. Aber dann akzeptieren die Schüler diese Softwareschwäche einfach. Nicht

allen Schülern ist klar, wie die Geschwindigkeit und der Ort berechnet werden, und haben Probleme mit der kinematischen Kette $a \rightarrow v \rightarrow x$; sie wollen eine Gleichung wie $s = \frac{1}{2} a t^2$ eingeben.

Nur ein Lehrer hat seine Schüler in der Schule selbst im Computerraum Modelle erstellen lassen. Die anderen Lehrer ließen Modelle nur gemeinsam im Klassenunterricht erstellen, da sie bei Schülerübungen abgesehen vom Zeitproblem auch technische Probleme sahen. So scheiterte es in einer Schule daran, dass man nicht verhindern kann, dass die Schüler während der Zeit im Computerraum unerlaubt ins Internet gehen. Ein paar Lehrer haben die Software den Schülern mit nach Hause gegeben und diese wurde von Schülern auch genutzt, woraus wiederum viele softwaretechnische Rückfragen an die Lehrer entstanden. Die Probleme bei falschen Abläufen lagen im Unterricht häufig bei falschen Vorzeichen für die Kräfte, unsinnigen Startwerten oder am bei neuen Modellen standardmäßig eingestellten Eulerverfahren, das manchmal aber zu ungenau ist.

Zwei Referendarinnen nutzten die positiven Erfahrungen mit der Modellbildung und der verwendeten Software PAKMA/VisEdit, um im Anschluss an das Forschungsprojekt zu einem weiteren Thema eine Schriftliche Hausarbeit zum Zweiten Staatsexamen in jeweils einer der elften Klassen zu schreiben. GIGLIOLA hat im Rahmen des Forschungsprojektes entsprechend den ausgegebenen Unterrichtsmaterialien eine Modellbildung zum Wagen, der mit einer Zugmasse konstant beschleunigt wird, eine zum Wagen, der mit einer fallenden Gliederkette beschleunigt wird, und eine zum Barthschen Fallkegel durchgeführt. Nach der Behandlung der Erhaltungsgrößen und der Schwingungen hat sie dann als Abschluss der newtonschen Mechanik eine Unterrichtseinheit „Trampolinspringen“ über insgesamt sieben Unterrichtsstunden durchgeführt (Gigliola, 2003), wobei dieser Vorgang physikalisch äquivalent zum Wagen auf der schiefen Ebene mit reflektierender Feder ist, der in den ausgegebenen Unterrichtsmaterialien zur Modellbildung vorgeschlagen wird⁹. Die Schüler waren motiviert und interessiert dabei. Vor allem die Schüler, die an der Stunde in der Sporthalle teilnahmen (4. Std.), waren vom Unterrichtskonzept bis zum Ende begeistert. Besonders lohnenswert war die Diskussion (3. Std.), warum der Springer nicht sofort gebremst wurde, als er das Tuch berührte (Betrag der Gewichtskraft noch größer als Betrag der Federkraft). Einige Schüler haben auch selbst zu Hause mit der Software experimentiert.

THEISMANN hat im Rahmen des Forschungsprojektes ausführlich Modellbildung in einem Kurs in Nordrhein-Westfalen eingesetzt (schiefe Ebene mit Reflexion am Ende und mit Reibung, Fallbewegung ohne und mit Luftreibung), wobei die Schüler auch eigenständig modellierten. Insbesondere die Darstellungen mit Vektorpfeilen wurden von ihr sehr geschätzt. Für ihre Schriftliche Hausarbeit

⁹ Zunächst sollten die Schüler ihre Vorstellungen bezüglich des Bewegungsablaufs und der Kräfte auf Arbeitsblättern festhalten (1. Std.). In Einzelarbeit haben die Schüler dann das Wirkungsgefüge auf einem Arbeitsblatt erstellt und ein Schüler hat es am Computer in VisEdit eingegeben (2. Std.). Als Hausaufgabe sollten die Graphen schriftlich vorhergesagt werden, was dann mit der Ausgabe in PAKMA verglichen wurde (3. Std.). In einer freiwilligen Zusatzstunde am Nachmittag wurde die Federhärte eines großen Trampolins bestimmt und ein Video eines Trampolinsprungs aufgenommen (4. Std. mit nur 10 von 26 Schülern). Nach einigen Überlegungen, wie die Bewegung von den Konstanten und Anfangswerten abhängt (5. Std.), wurde das Modell mit dem Video verglichen (6. Std.). Dazu wurde das Video mit dem Videoanalyseprogramm AVA analysiert und die Daten in PAKMA eingelesen (Wilhelm et al., 2003). In der letzten Stunde wurde eine Aufgabe zum (physikalisch äquivalenten) Bungee-Sprung bearbeitet. Wie in dem Unterrichtskonzept betont (siehe Kapitel 5) wurden also intensiv Vorhersagen gefordert und viel Zeit für Diskussionen vorgesehen.

zum Zweiten Staatsexamen hat THEISMANN (2003) beim Thema „Schwingungen“ (als Anwendung der newtonschen Dynamik) die Schüler in fünf Gruppen geteilt, von denen jede drei Stunden eine harmonische oder anharmonische Schwingung anhand eines Arbeitsblattes eigenständig bearbeitete und anschließend der Klasse vorstellte, wobei auch Modellbildung integriert wurde¹⁰. Das eigenständige Modellieren mit VisEdit fiel den Schülern leicht. Erst durch diese Eigentätigkeit mussten die Schüler unterscheiden lernen, welche Erkenntnisse dem Experiment entnommen waren und welchen Stellenwert die Simulation des Modells im Vergleich dazu hat, so dass die Schüler einen vertieften Einblick in die Arbeitsweise der Physik bekamen.

Die beiden Beispiele zeigen, dass die im Konzept verwendete Modellbildung ein motivierender und auch erweiterbarer Ansatz ist. Deutlich wurde auch, wie interessant und lehrreich der Vergleich von Messung und Modell im gleichen Softwareprogramm ist, wobei hier aber ein gewisser Aufwand betrieben werden musste. Die beiden Arbeiten zeigen ferner, dass das Unterrichtsprinzip „Vorhersagen im Physikunterricht“ (Kapitel 5.4.4) erfolgreich übernommen wurde.

6.3.3.2 Modellbildung in Prüfungsaufgaben

Interessant ist außerdem, wie Schüler mit Prüfungsaufgaben umgingen, in denen sie ein Wirkungsgefüge zeichnen sollten. In einer Klasse wurde für die Schüler unerwartet eine Stegreifaufgabe zur Modellbildung geschrieben (Lehrer = Autor der Arbeit). In den vier Stunden zuvor wurde die schiefe Ebene mit Reflexion und Reibung modelliert sowie die Hausaufgabe besprochen, in der ein Modell zu einem Wagen erstellt wurde, der mit einer konstanten Zugmasse bzw. mit einer sich verkürzenden Kette beschleunigt wurde. In der Stegreifaufgabe wurde die Situation beschrieben, dass eine Person auf ein Trampolin springt, dessen Netz als eine Feder aufgefasst werden kann (Reibungskräfte vernachlässigt). Dies ist physikalisch äquivalent zur schiefen Ebene mit Reflexion. Die Schüler sollten ein vorgegebenes rudimentäres Wirkungsgefüge (siehe Abb. 6.3) auf dem Papier vervollständigen und angeben, wie die Größen und die Gleichungen heißen, die zu ihrer Berechnung nötig sind. In der zweiten Teilaufgabe sollten noch für bestimmte Situationen (Trampolin sehr leicht eingedrückt, tiefster Punkt, Aufwärtsbewegung) die Kräfte (F_g , F_{Tramp} , F_{ges}) und Geschwindigkeit und Beschleunigung als Pfeile eingezeichnet werden. Die Stegreifaufgabe fiel in beiden Teilen gut aus, wobei es bei dem Wirkungsgefüge große Unterschiede gab. Drei Schüler (20 %) waren überhaupt nicht in der Lage, ein einigermaßen sinnvolles Wirkungsgefüge zu zeichnen. Die Struktur der anderen gezeichneten Wirkungsgefüge war im Wesentlichen richtig. Schwierigkeiten gab es fast ausschließlich mit der Trampolinauslenkung, die vom Ort abhängt und die Federkraft bestimmt. Bei

¹⁰ Die Schüler sollten dabei den Ablauf beobachten, Graphen schriftlich vorhersagen, den Ablauf mit VisEdit modellieren und mit PAKMA messen, Modell und Messung vergleichen, eine ergänzende Simulation mit dynamisch ikonischen Repräsentationen beobachten und Parameter verändern. Verwendet wurde 1. ein vertikal schwingendes Federpendel (Messwerverfassung mit der Maus, ebenso in VisEdit programmiert), 2. ein Stabpendel (Messwerverfassung über einen Joystick über ein selbst geschriebenes Programm und Datenimport in PAKMA), 3. ein Wagenpendel auf der Luftkissenbahn mit zwei verschieden großen Zuggewichten an den beiden Seiten (Goldkuhle, 1997, S. 63 - 69) (Messwerverfassung mit der Maus, ebenso in VisEdit programmiert), 4. eine im U-Rohr schwingende Wassersäule (Messwerverfassung mit dem Videoanalyseprogramm Galileo und Datenimport in PAKMA) und 5. ein Schiefebene-Pendel mit einer Kugel auf einer geknickten Rollbahn (Messwerverfassung über eine Digitalwaage über die serielle Schnittstelle ergab Probleme mit der gewählten, nicht geeigneten Waage).

den Gleichungen wurden jedoch verschiedene Fehler gemacht. Am Computer hätten die Schüler diese Fehler bemerkt; es ist jedoch fraglich, wie sinnvoll es ist, die Schüler lange selbst nach diesen Fehlern suchen zu lassen. Die wichtigen Gleichungen für a , v und x ($a = F_{ges}/m$, $\Delta v = a \cdot \Delta t$, $\Delta x = v \cdot \Delta t$) wurden jeweils von zwei Dritteln richtig angegeben. Trotz des guten Ergebnisses wollten die Schüler nicht, dass sie nochmals eine solche Aufgabe in einer Schulaufgabe gestellt bekommen, da es kaum lernbar ist und Verständnis verlangt.

Ein anderer Lehrer hat in der Schulaufgabe den (praktisch nicht sinnvollen) Versuch beschrieben, dass ein Gleiter auf einer schief stehenden Luftkissenbahn ein großes Segel hat, um die Luftreibungskraft zu untersuchen (es müsste unrealisierbar groß sein). Es handelte sich also um die Kombination von schiefer Ebene und Fallkegel. Auch hier war schon ein kleiner Teil des Wirkungsgefüges vorgegeben, das fertig gestellt werden sollte. Diese Aufgabe wurde von allen Aufgaben der Klausurarbeit am Besten gelöst.

Es wurde hiermit nicht nur gezeigt, dass sich das Erstellen von Wirkungsgefügen auch für Prüfungsaufgaben eignet. Man sieht, dass diese Aufgaben im Wesentlichen nicht schwer, sondern gut lösbar sind. Die Schüler haben gezeigt, dass sie die Grundstruktur kennen ($F_{ges} \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$) und wissen, welche Größe auf welche einen Einfluss hat. Es wurde aber auch deutlich, dass man als Lehrer Mut braucht, eine solche Aufgabe zu stellen.

6.4 Schülerstudien zur Kinematik

In den folgenden Kapiteln werden die Testergebnisse von konventionell unterrichteten bayerischen elften Klassen (kein Kurssystem) dargestellt und diese mit Klassen nach dem Gesamtunterrichtskonzept verglichen. Die Grundzüge des herkömmlichen Unterrichts sind aus dem Lehrplan für das bayerische Gymnasium, Fachlehrplan für Physik zu entnehmen, der 1992 in Kraft trat. Laut Lehrplan wird in ca. 10 Unterrichtsstunden die Kinematik und in ca. 13 Stunden die Dynamik behandelt. Dann folgen in ca. 10 Stunden die Erhaltungssätze (Energie und Impuls) und in ca. 7 Stunden die Behandlung zweidimensionaler Bewegungen. Gravitation (ca. 8 Std.) und Wellenphänomene (ca. 8 Std.) schließen das Schuljahr ab. Im mathematisch-naturwissenschaftlichen Schulzweig (3 statt 2 Wochenstunden) sind außerdem zwei Zusatzgebiete zu behandeln (je ca. 14 Stunden), wobei häufig

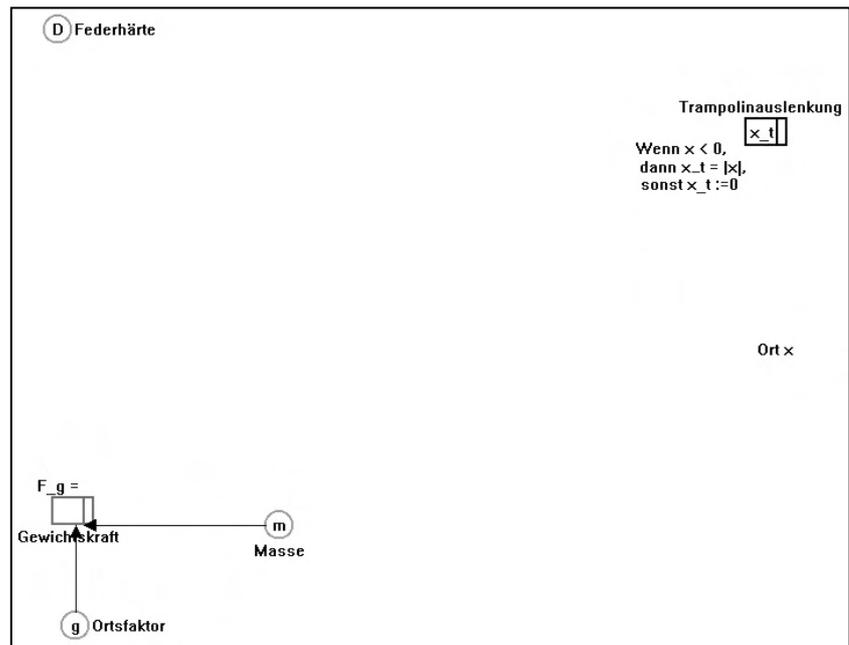


Abb. 6.3: Vorgaben des Wirkungsgefüges zum Trampolinsprung, das von den Schülern vervollständigt werden sollte.

ein Zusatz dadurch erfüllt wird, dass zu ausgewählten Kapiteln mehr Experimente geplant und durchgeführt werden.

Tests nehmen Unterrichtszeit in Anspruch; das ist vor allem in nicht-naturwissenschaftlichen Schulzweigen ein Problem, in denen nur zwei Wochenstunden für Physikunterricht zur Verfügung stehen. Das hatte zur Folge, dass nicht in allen Klassen alle Vor- und Nachtests durchgeführt werden konnten und so einzelne Tests von weniger Schülern als wünschenswert bearbeitet wurden. Dieses Problem war von vorneherein klar und ist nicht überwindbar.

Außerdem reduzierte sich die Population durch Erkrankungen und Schüleraustauschprogrammen und es versteht sich, dass bei Vergleichen zwischen Vor- und Nachtest nur Testbögen von Schülern ausgewertet wurden, die an beiden Tests teilgenommen haben. Nicht vermeidbar ist aufgrund des längeren Zeitraumes der Untersuchung, dass auch Schüler in die Untersuchungspopulation aufgenommen wurden, die Teile des Unterrichts nicht anwesend waren.

6.4.1 Aufgaben zur zweidimensionalen Kinematik

6.4.1.1 Ergebnisse traditioneller Klassen

REUSCH hat festgestellt, dass selbst Klassen, bei denen bei der eindimensionalen Kinematik der Vektorcharakter der kinematischen Größen durch den Einsatz dynamisch ikonischer Repräsentationen betont wurde und die bei dem Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ (siehe Kapitel 6.4.2.1) bei den Graphen zur eindimensionalen Bewegung sehr gut abschnitten, kein vektoriell Verständnis haben, das sie auf zweidimensionale Bewegungen richtig anwenden können (Reusch, Heuer, 1999a, S. 184; Reusch, Heuer, 1999b, S. 32 und private Mitteilung). In diesen vier Klassen, in denen die Kinematik und Dynamik in traditioneller Reihenfolge bereits behandelt wurde, konnte REUSCH durch einen zusätzlichen Unterricht zur zweidimensionalen Kinematik, der dem hier in der Kinematik eingesetztem Unterricht ähnelt, einen erheblichen Lernzuwachs erzielen (Reusch, Heuer, 1999a, S. 184; Reusch, Heuer, 1999b, S. 32).

Das betrifft sowohl einfache Aufgaben wie die Richtung von Geschwindigkeit und Beschleunigung beim Kurvenfahren mit konstanter Schnelligkeit, aber auch schwierigere Fragen wie die Richtung der Beschleunigung beim Kurvenfahren mit veränderlicher Schnelligkeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 217 Schüler aus zwölf herkömmlich unterrichteten Klassen am Schuljahresende gebeten, bei der qualitativen Aufgabe aus Abb. 6.4 bei fünf verschiedenen Situationen den Beschleunigungsvek-

Auf einer Rennstrecke fährt ein Auto unter normalen Bedingungen (schneller werden, abbremsen, abschnittsweise konstante Geschwindigkeit). Die Fahrweise in den einzelnen Streckenabschnitten kannst du der Graphik entnehmen. Zeichne an den fünf markierten Stellen der Bahn den Beschleunigungsvektor ein.

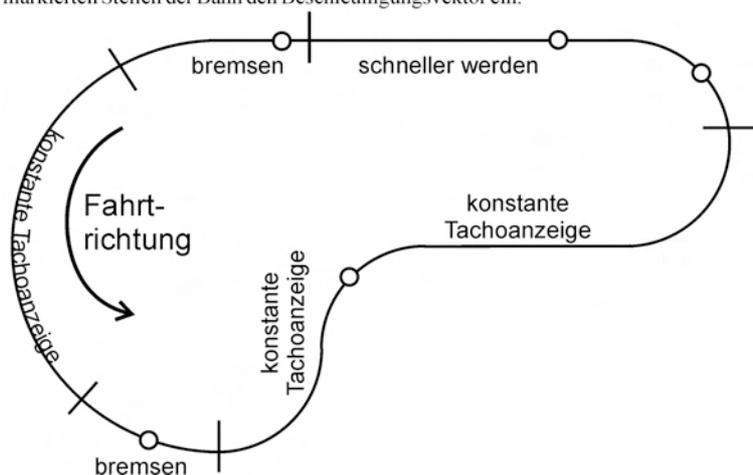


Abb. 6.4: Testaufgabe zur Beschleunigung bei einer zweidimensionalen Bewegung

tor einzuzeichnen. Alle Schüler hatten also bereits die Kinematik und Dynamik zweidimensionaler Bewegungen behandelt, ein Großteil erst kurz davor. Dabei traten Unterschiede zwischen den einzelnen Klassen auf. So wurde z.B. nur in einer Klasse häufig Pfeile gezeichnet, die stets irgendwie in das Innere der umfahrenen Fläche zeigen - auch bei Fahrt geradeaus und bei entgegengesetzter Kurvenkrümmung; die Schüler sehen also die Bewegung als Ganzes („Kreisfahrt“), nicht die einzelnen Abschnitte.

Insgesamt haben im Gegensatz zur Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ in Kapitel 6.4.3, in der nach dem Vorzeichen der Beschleunigung gefragt wurde und dann ein Pfeil zu zeichnen war, nur sehr wenige Schüler einen Pfeil gezeichnet, der der Geschwindigkeitsrichtung entspricht (siehe Tab. 6.1). Dabei wurde beim Schnellerwerden ein langer und beim Langsamerwerden ein kurzer Pfeil in Bewegungsrichtung gezeichnet.

Bei den geradlinigen Bewegungen haben die meisten Schüler

(93 % bzw. 88 %, siehe Tab. 6.1) die richtigen Pfeile eingezeichnet. Das heißt aber nicht, dass diese Schüler ein vektoriellles Verständnis der Beschleunigung haben. Viele haben wohl nur ihre „Schneller-/Langsamer-Vorstellung“ (Beschleunigung als skalare Größe, + ist schneller, - ist langsamer) in Pfeile umgesetzt. So haben einige Schüler zusätzlich „ $\vec{a} > 0$ “, „ $-\vec{a}$ “ oder das Vorzeichen „+“ oder „-“ dazugeschrieben. 2 % der Schüler haben sogar keine Pfeile, sondern nur Vorzeichen auf das Blatt geschrieben.

Bei der Kurvenfahrt haben dagegen nur wenige Schüler eine richtige Antwort gegeben. Obwohl Kreisbewegungen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und die Zentripetalkraft längere Zeit unterrichtet wurden, haben hier nur 12 % richtig geantwortet (in sechs Klassen: 0 %). Noch schwieriger ist es, wenn die Bewegung während der Kurvenfahrt schneller oder langsamer wird. Dass sich die Beschleunigung hier aus einer Tangential- und einer Normalkomponente zusammensetzt, wurde den Schülern im Unterricht wahrscheinlich mitgeteilt, aber wohl wenig veranschaulicht und geübt. Deshalb werden hier nur von 9 % bzw. 6 % richtige Pfeile gezeichnet. Sehr häufig wird bei der Kurvenfahrt der Nullvektor bei konstantem Tempo (48 %) bzw. ein Pfeil in oder gegen die Bewegungsrichtung je nach Schneller- oder Langsamerwerden gezeichnet (56 % bzw. 73 %). Zusätzlich ist dabei zu beachten, dass einige dieser Schüler (10 % bzw. 6 % aller Schüler) einen deutlich gebogenen Pfeil (wie die Fahrbahn) zeichnen. Viele zeichnen den Pfeil leider so kurz, dass nicht ent-

	richtige Lösung	nur Angabe der tangentialen Beschleunigung (<i>deutlich tangential, deutlich gebogen, undeutlich</i>)	Angabe von \vec{v}
geradeaus schneller werdend	93 %	-	-
geradeaus bremsend	88 %	-	4 %
Kurvenfahrt konstantes Tempo	12 %	48 %	15 %
Kurvenfahrt schneller werdend	9 %	56 % (31 % + 10 % + 15 %)	-
Kurvenfahrt bremsend	6 %	73 % (36 % + 6 % + 32 %)	4 %

Tab. 6.1: Antwortverhalten herkömmlich unterrichteter Elftklässler am Schuljahresende bei der Aufgabe zur Richtung des Beschleunigungsvektors (N = 217, zwölf Klassen, sechs bayerische Gymnasien)

scheidbar ist, ob sie an eine echte Tangente oder an einen gebogenen Pfeil dachten. Ca. ein Drittel der Schüler geben einen deutlich tangentialen Pfeil an.

Insgesamt kann man sagen, dass ein Großteil der Schüler eine vereinfachte Vorstellung des Beschleunigungsbegriffes im Sinne der Angabe „schneller/langsamer“ bis zum Ende der elften Klasse entwickelt hat, auch wenn nicht alle dieser Schüler dies bei schwierigen Items (mit Graphen oder Münzwurf) umsetzen können. Dagegen haben nur wenige Schüler eine vektorielle Vorstellung, die bei zweidimensionalen Bewegungen die richtige qualitative Lösung ermöglicht.

Es wäre sicher wünschenswert, wenn wie bei der eindimensionalen Kinematik auch zur zweidimensionalen Kinematik mit einer größeren Anzahl verschiedener Aufgaben Tests durchgeführt worden wären. FLORES ET AL. (2004, S. 465) stellten z.B. nach einem Einführungskurs zwei physikalisch ähnliche Aufgaben an Studenten. LABUDDE, REIF und QUINN (1988, S. 97 f.) beschrieben in je einem Satz verschiedene Bewegungen, zu denen die Studenten die Beschleunigung beschreiben sollten, wobei z.T. eine, meist falsche Antwort in der Aufgabenstellung bereits vorgeschlagen war.

6.4.1.2 Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich

Dass die Schüler, die nach dem Unterrichtskonzept dieser Arbeit unterrichtet wurden, Aufgaben zur zweidimensionalen Kinematik besser lösen als Schüler, die traditionell unterrichtet wurden, schien aufgrund der Ergebnisse von REUSCH (Reusch, Heuer, 1999a, S. 184; Reusch, Heuer, 1999b, S. 32) so selbstverständlich, dass es wenig getestet wurde. Denn es wurden bis zu sieben Unterrichtsstunden für die Kinematik zweidimensionaler Bewegungen verwendet, während dies im konventionellen Unterricht in der Regel nur kurz bei den Spezialfällen „waagrechter Wurf“ und „Kreisbewegung“ behandelt wird. Deshalb kann man von traditionell unterrichteten Schülern nicht erwarten, dass sie eine Vorstellung haben, welche Richtung z.B. der Beschleunigungsvektor hat, wenn in einer Kurve gebremst wird.

Aufgaben zur zweidimensionalen Bewegung wurden im Rahmen dieses Unterrichtskonzeptes häufig in Übungs- und Prüfungsaufgaben gestellt. Nach den Angaben der Lehrer des Forschungsprojektes wurden diese von den Schülern der Treatmentgruppe auch gut gelöst; jedoch liegen wie oben begründet wenige empirische Daten vor.

In einer Klasse (17 Schüler) wurde nach nur einer Übungsstunde zur ein- und zweidimensionalen Kinematik eine Stegreifaufgabe geschrieben. Obwohl die Konstruktion des Beschleunigungsvektors auf dem Papier kaum (nur an einem Beispiel) geübt wurde, konnten doch 70 % der Schüler eine solche Konstruktion aus zwei gegebenen Geschwindigkeitsvektoren durchführen. Bei der Aufgabe aus Abb. 6.4, deren Fragestellung auch nur sehr kurz geübt wurde, wurden die Beschleunigungsrichtungen bei Kurvenfahrten mit konstanter Schnelligkeit von Dreiviertel der Schüler richtig angegeben (drei Monate später in einer anderen, schwierigeren Aufgabe der Schulaufgabe: von der Hälfte der Schüler). Bei der schwierigeren Situation des Bremsens oder Schnellerwerdens in der Kurve gaben in dieser Stegreifaufgabe noch 50 % – 60 % eine richtige Beschleunigungsrichtung an (siehe Tab. 6.2). Das zeigt, dass viele Schüler auch ohne viel Übung solche Zusammenhänge schnell erfassen. Die Unterschiede zu den Ergebnissen traditioneller Klassen sind bei gerader Strecke nicht

signifikant, aber bei Kurvenfahrten signifikant (0,001-Niveau). Die Lehrer meinten allerdings, dass solche qualitativen Aufgaben bei etwas Übung für Schulaufgaben zu leicht sind.

In zwei (guten, nicht repräsentativen) Klassen (35 Schüler) wurde am Jahresende der gleiche Test gestellt. Im Gegensatz zu den konventionellen Klassen lag der Unterricht dazu bereits acht Monate zurück, so dass also nicht kurzzeitig Angelerntes, sondern langfristig verfügbares Wissen abgefragt wurde (siehe Tab. 6.2).

Dabei haben nicht nur

97 % der Schüler bei eindimensionalen Bewegungen eine richtige Antwort gegeben, sondern auch 86 % bei Kurvenfahrt mit konstantem Tempo und 66 % bzw. 80 % bei veränderlichem Tempo, was weit mehr als bei herkömmlichen Klassen ist. Die Unterschiede sind bei gerader Strecke nicht signifikant (0,05-Niveau), aber bei Kurvenfahrten signifikant (0,001-Niveau).

Aus den beiden Items mit geradliniger Bewegung wurde eine Subgruppe „geradeaus“ und aus den drei Items mit Kurvenfahrt wurde eine Subgruppe „Kurve“ geschaffen (siehe Tab. 6.2). Unter Einbeziehung aller vorhandener Schülerantworten (N = 315) ergeben sich bei einem Reliabilitätstest mit $\alpha = 0,82$ bzw. $\alpha = 0,81$ hohe Cronbachs Alphas für die beiden Subgruppen.

Statistische Signifikanzmaße haben generell den Nachteil, dass sie von der Größe der Stichprobe abhängig sind. Deshalb werden in dieser Arbeit bei allen Tests noch Effektstärken berechnet, die unabhängig davon sind, wie viele Versuchspersonen betrachtet werden. Die Effektstärke gibt den Unterschied der Mittelwerte im Verhältnis zur mittleren Standardabweichung an. Sie wird aus der Anzahl N der Schüler, dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ nach der Gleichung

	Unterricht nach Konzept	Unterricht nach Konzept	traditioneller Unterricht	trad. Unterr. + intensiv 2-dimens. + Animationen
	Test direkt nach Einführung der Beschleunigung	Test am Jahresende (8 Monate nach Unterr.)	Test am Jahresende (kurz nach Unterr.)	Test am Jahresende (kurz nach Unterricht)
	1 Klasse, 17 Schüler	2 Klassen, 35 Schüler	12 Klassen, 217 Schüler	2 Klassen, 46 Schüler
gerade schneller werdend	-	97 %	93 %	100 %
geradeaus bremsend	88 %	97 %	88 %	98 %
Kurve konstantes Tempo	76 % *	86 % *	12 %	33 % *
Kurve schneller werdend	53 % *	66 % *	9 %	33 % *
Kurvenfahrt bremsend	59 % *	80 % *	6 %	35 % *
Subgruppe „geradeaus“ ($\alpha = 0,82$)	-	97 % (d = 0,26)	90 %	99 % (d = 0,34)
Subgruppe „Kurve“ ($\alpha = 0,81$)	63 % * (d = 2,32)	77 % * (d = 2,95)	9 %	33 % * (d = 0,96)

Tab. 6.2: Vergleich der Anteile der richtigen Antworten bei der Aufgabe zur Richtung des Beschleunigungsvektors (abhängig vom Unterricht); signifikante Unterschiede im Vergleich zum traditionellen Unterricht (12 Klassen) sind mit einem Stern markiert (χ^2 -Test, 0,001-Niveau).

Vergleich der Ergebnisse der zwei Subgruppen; signifikante Unterschiede zum traditionellen Unterricht sind mit einem Stern markiert (Mann-Whitney-U-Test, 0,001-Niveau); Effektstärke d gegenüber dem traditionellen Unterricht.

$d = \frac{\mu_{\text{Treatment}} - \mu_{\text{Kontroll}}}{\sqrt{\frac{\sigma_{\text{Treat}}^2 \cdot (N_{\text{Treat}} - 1) + \sigma_{\text{Kontroll}}^2 \cdot (N_{\text{Kontroll}} - 1)}{(N_{\text{Treat}} - 1) + (N_{\text{Kontroll}} - 1)}}$ berechnet. Dabei wird eine Effektstärke von $d = 0,2$

als schwach, $d = 0,5$ als mittel und $d = 0,8$ als stark bezeichnet (Bortz, Döring, 2002, S. 604). Effektstärken werden – entgegen dem Vorgehen in dieser Arbeit – auch genutzt, um vor der Durchführung eines Tests den optimale Stichprobenumfang festlegen zu können (Power-Analyse).

HÄUBLER ET AL. stellen fest: „Viele Autoren gehen davon aus, dass ein Faktor erst dann von pädagogischen Interesse ist, wenn er den Lernerfolg zu mindestens 5 % erklärt [aufgeklärte Varianz]. Das entspräche [...] einer Effektstärke von $d = 0.46$.“ (Häußler et al., 1998, S. 151). Hier ergibt sich bei der Subgruppe „geradeaus“ bei der Treatmentgruppe ($N_{\text{Treat}} = 35$) gegenüber der Kontrollgruppe ($N_{\text{Kontroll}} = 217$) eine Effektstärke von nur $d = 0,26$, die pädagogisch nicht interessant ist. Aber bei der Subgruppe „Kurve“ ergibt sich eine extrem große Effektstärke von $d = 2,95$. D.h. die Treatmentgruppe hat bei der Subgruppe „Kurve“ über achtmal so viele richtige Antworten gegeben (77 % versus 9 %) und der Unterschied entspricht ca. drei gemittelte Standardabweichungen. Wünschenswert wäre dennoch gewesen, dass dieser Test mit mehr Schülern der Treatmentgruppe durchgeführt worden wäre.

Interessant sind außerdem zwei gute Klassen, in denen der Lehrer in der herkömmlichen Themenreihenfolge nicht nur die vektorielle Beschreibung der Bewegung sehr eingehend behandelt hat, sondern diese auch mit dynamisch ikonischen Repräsentationen visualisiert hat, wozu kurz das DOS-Programm „radial“ (siehe Kapitel 5.2), aber insbesondere Physlets sowie Animationen der CD „cliXX Physik in bewegten Bildern“ (Treitz, 2000) eingesetzt wurden. Gerade auf der cliXX-CD werden auch Beschleunigungsvektoren gezeigt. Diese Klassen sind damit bei der Kurvenfahrt wesentlich besser als sonstige traditionelle Klassen, aber nicht so gut wie die Klassen, die nach dem hier vorgestellten Konzept unterrichtet wurden (siehe Tab. 6.2). Die Unterschiede zu den Ergebnissen traditioneller Klassen sind bei den Items zu gerader Strecke nicht signifikant (0,05-Niveau), aber bei den Items zu Kurvenfahrten signifikant (0,001-Niveau).

6.4.2 Graphen zur eindimensionalen Kinematik

Die Frage war, ob die Schüler, die nach diesem Konzept unterrichtet wurden, so viel Verständnis gewonnen haben, dass sie auch Testaufgaben zur eindimensionalen Kinematik mit Grapheninterpretation genauso oder besser als konventionell unterrichtete Klassen lösen können, denn für die eindimensionale Kinematik und Grapheninterpretation wurde in diesem Unterrichtskonzept weniger Unterrichtszeit als in den meisten konventionellen Klassen aufgewandt.

6.4.2.1 Der Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“

Der Fragebogen „Fragen zu Kraft und Bewegung“ geht auf den Amerikaner RONALD THORNTON von der Tufts University in Boston in Massachusetts (USA) zurück (Der Originalfragebogen findet sich in THORNTON (1996) und auf der CD im Anhang; kinematische Teile finden sich auch in THORNTON (1990), THORNTON (1992) und THORNTON, SOKOLOFF (1990)). Inhaltlich geht es um die

Kinematik und Dynamik eindimensionaler Bewegungen, wobei die Fragen aus physikalischer Sicht relativ einfach sind. Unterschiedliche Situationen können nun beim Schüler unterschiedliche Vorstellungen aktivieren und Schüler können zwischen verschiedenen Vorstellungen hin- und herspringen (siehe Kapitel 2.1.3 und 2.1.4). Deshalb werden Fragen zu einer größeren Zahl physikalisch ähnlicher bzw. physikalisch sich entsprechender Situationen gestellt. Beim Thema „Kraft“ werden außerdem die Antwortmöglichkeiten auf verschiedene Weise dargestellt. Dadurch wird auch festgestellt, bei welchen Situationen oder Antwortdarstellungen welche Vorstellungen aktiviert werden und wie konsistent bzw. wie sprunghaft die Beantwortung der Schüler ist.

Dieser Test ist ein „paper pencil-test“, mit geschlossener (gebundener) Aufgabenbeantwortung. Es handelt es sich bei jedem Aufgabenblock um die Kombination mehrerer Mehrfachwahlaufgaben (multiple choice-Aufgaben). Da in jedem Aufgabenblock jeder einzelnen Aufgabe eine Antwort aus den für diesen Block vorgegebenen Antwortmöglichkeiten zugeordnet werden soll, können die Aufgaben als Zuordnungsaufgaben bezeichnet werden (Fischler, 1970, S. 22).

Jeder Aufgabenblock ist dabei nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Zuerst wird jeweils eine Situation beschrieben und meist durch eine Skizze veranschaulicht. Dann ist die Aufgabenstellung erklärt und zum Teil durch Hinweise zum Bearbeiten ergänzt. Als nächstes sind je drei bis acht verschiedene Antwortmöglichkeiten aufgelistet. Erst danach sind unterschiedliche Bewegungen des in der Aufgabenstellung erwähnten Gegenstandes beschrieben, die in keiner Weise geordnet sind. Der Schüler muss nun zu jeder der beschriebenen Bewegungen die Antwortmöglichkeit heraussuchen, die je nach Aufgabe die Geschwindigkeit, Beschleunigung oder wirkende Kraft bei dieser Bewegung angibt. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, alle vorgegebenen Antworten als falsch abzulehnen. Jedes Item hat nur eine (in der Regel, siehe unten) eindeutige Lösung. Negative Formulierungen sind nicht vorhanden und jedes Item ist unabhängig von allen anderen. Der Fragebogen ist durch die gewählte Testform ökonomisch, da sowohl die Durchführung als auch die Auswertung einfach und relativ zeitsparend ist.

Außerdem ist der Test in dem Sinn objektiv, dass die Testergebnisse von der Durchführung und Auswertung unabhängig sind (Rhöneck, 1971, S. 71). Die Durchführungsobjektivität ist dadurch gewährleistet, dass alle Informationen, die zur Durchführung benötigt werden, auf dem Fragebogen stehen und der Lehrer nichts mehr dazu erklären muss. Jeder Lehrer bekam noch eine Einweisung, in der unter anderem angegeben wurde, wie viel Zeit die Schüler zur Beantwortung typischerweise benötigen. Die Auswertungsobjektivität ist einerseits durch die geschlossene Aufgabenbeantwortung gewährleistet und andererseits dadurch, dass die Antworten in Form von Buchstaben nicht bewertet, sondern nur gezählt werden müssen.

Der Fragebogen von THORNTON wurde von WILHELM möglichst genau übersetzt und in einem Vorlauf in vier Klassen 89 Schülern kurz nach dem Dynamikunterricht getestet. 1994 wurde der Fragebogen dann intensiv überarbeitet: die sprachliche Formulierung, damit nicht etwa die Lesefähigkeit des Schülers mitgetestet wird, und die Gestaltung des Fragebogens, um ihn möglichst übersichtlich und anschaulich zu gestalten (Wilhelm, 1994) (siehe CD im Anhang). Die Ausgangssituation sowie die Aufgabenstellung sollten ausführlich und klar beschrieben werden. Überall sollten kurze Sätze verwendet und Nebensätze, Fremdwörter und Fachwörter weitgehend vermieden werden. Bei der

Formulierung der Items wurde darauf geachtet, dass sie klar und verständlich formuliert sind, um sprachliche Schwierigkeiten zu vermeiden. Außerdem sollte jedes Item so kurz wie möglich sein und innerhalb eines Aufgabenblockes sollten die einzelnen Items weitgehend die gleiche grammatikalische Struktur haben. Auch die Antwortmöglichkeiten sollten in Bezug auf Form und grammatikalische Struktur vergleichbar sein (Fischler, 1970, S. 20).

Das Layout sollte möglichst übersichtlich und ansprechend sein. Vor allem sollte dadurch ein Aufgabenblock, der doch viel Text enthält, deutlich gegliedert werden. Deshalb wurde der Aufgabenstamm, der aus Situationsbeschreibung, Aufgabenstellung und Bearbeitungshinweisen besteht und sich am Anfang jedes Aufgabenblockes befindet, in einer anderen Schrift als die einzelnen Items geschrieben. Der lange Text des Aufgabenstammes wurde dadurch gegliedert, dass die Begriffe „*Situation*“, „*Aufgabe*“ und „*Hinweis*“ einzelnen Aussagen vorangestellt wurden. Skizzen zur Veranschaulichung der Situation und die Antwortmöglichkeiten wurden stets in einen Kasten gesetzt, der damit auch den Aufgabenblock weiter strukturiert. Vor jedes Item wurde schließlich noch eine Hand mit ausgestrecktem Zeigefinger gesetzt, um den Schülern zu zeigen, dass sich an dieser Stelle nun die eigentliche Aufgabe befindet, bei der sie gefordert sind. Der auf diese Weise erhaltene Fragebogen wurde zwei Schülerinnen aus zwei verschiedenen elften Klassen Gymnasium vorgelegt, die zu lautem Denken aufgefordert wurden, was zu einer weiteren Überarbeitung führte. Eine weitere Überprüfung der Verständlichkeit geschah, indem erfahrene Lehrer den Test überprüften und die Schüler einer Klasse bei einer Auswahl von Aufgaben jede Antwort schriftlich begründen sollten. Insgesamt kann man nun annehmen, dass die Schüler mit der sprachlichen Formulierung kaum noch Probleme haben und weitgehend gewährleistet ist, dass sie die Aufgabenstellungen verstehen (Teile des End-Fragebogens zur Dynamik findet man in HEUER, WILHELM (1997)).

Als wichtiger Punkt erwies sich die Darstellung des Koordinatensystems. Im englischsprachigen Originaltestbogen waren in der Skizze ein Nullpunkt und eine „+ *Abstands-Achse*“ eingezeichnet. In den einzelnen Items wurde außerdem eine Bewegung nach rechts bzw. links mit dem in Klammern stehenden Zusatz „*weg vom Ursprung*“ bzw. „*zum Ursprung*“ verdeutlicht. Mit dieser Darstellung und Formulierung taten sich jedoch die interviewten Schülerinnen schwer. Außerdem sagten sie, dass sie die als Ursprung eingezeichnete Null mit einem Startpunkt assoziieren. Als ihnen als Alternative vorgeschlagen wurde, die horizontale Linie als „*x-Achse eines Koordinatensystems*“ zu bezeichnen, einen Pfeil in positive und negative Richtung in die Skizze einzuzeichnen und statt „*weg vom Ursprung*“ nun „*in positive Richtung*“ und statt „*zum Ursprung*“ nun „*in negative Richtung*“ zu schreiben, fanden sie dies wesentlich verständlicher. Deshalb wurde in allen Aufgaben diese Möglichkeit gewählt. Dabei wurde nach beiden Richtungen ein Pfeil gezeichnet, an dem sich deutlich sichtbar das Vorzeichen befand. Die Null beim Ursprung wurde dagegen weggelassen. Außerdem sollte die Achse sehr lang und das Auto nicht zu groß sein. Auch bei der Gestaltung der Graphen wurde darauf geachtet, dass sie - so wie es die Schüler gewohnt sind - ein Koordinatensystem darstellen. Deshalb wurde an die Achsen in positive Richtungen ein deutlicher Pfeil gezeichnet, an dem die aufgetragenen Größen stehen. An die y-Achse wurden deutlich die Vorzeichen „+“ und „-“ angetragen. Ein Lehrer sprach sich gegen diese zweite Formulierung mit der x-Achse eines Koordinatensystems und für die Plus-Abstands-Achse aus, da seine Schüler aus seinem Unterricht diese Formulierung gewohnt seien; aber

gerade eine seiner Schülerinnen sprach sich im persönlichen Interview für die erste Formulierung aus, die sie verständlicher fand.

Der Test wurde 1994 schließlich von 139 Schülern aus neun Klassen der Fachoberschule beantwortet, worauf nicht näher eingegangen werden soll, und von 188 Schülern aus zehn Gymnasialklassen (fünf mathematisch-naturwissenschaftlich, fünf anderer Schulzweig, neun verschiedene Lehrer, neun Klassen aus Unterfranken, eine aus Oberfranken). Die Ergebnisse dieser konventionell unterrichteten Vergleichsklassen werden im Folgenden kurz dargestellt (siehe auch Wilhelm, 1994, und Heuer, Wilhelm, 1997). Möglicherweise ist diese Gruppe nicht repräsentativ, da ein Teil der Lehrer lange Jahre an einer regelmäßigen Fortbildungsveranstaltung (Seminarform) am Lehrstuhl für Didaktik an der Universität Würzburg teilnahm und so als besonders engagiert gelten kann.

Die Konstruktion des Tests wurde anhand der 188 Antwortbögen der Gymnasiasten überprüft. Dabei ging es um die Annahme, dass jede Aufgabengruppe etwas anderes abprüft, aber die verschiedenen Items einer Aufgabengruppe das Gleiche abprüfen. Es wurde eine Hauptkomponenten-Faktorenanalyse mit Varimaxrotation durchgeführt, wobei nur betrachtet wurde, ob ein Item richtig oder falsch beantwortet wurde. Das Item zur notwendigen Kraft bei einem stehenden Fahrzeug, wurde von fast allen Schülern richtig beantwortet und korreliert kaum mit anderen Items, so dass es nicht mit in die Analyse einbezogen wurde. Aus dem gleichen Grund wurden die Items zu Geschwindigkeitsgraphen nicht in die Faktorenanalyse einbezogen. Bei den Aufgaben zum Münzwurf wurde geschaut, ob die ganze Aufgabe richtig beantwortet wurde, nicht die Teilaufgaben. Für die Anzahl „bedeutender“ Faktoren gibt es verschiedene Kriterien. Werden nach dem KAISER-GUTTMANN-Kriterium (Bortz, 1993, S. 503) alle Faktoren berücksichtigt, deren Eigenwert über 1 liegt, erhält man fünf Faktoren. Der Scree-Test von CATTELL (Bortz, 1993, S. 503 f.) liefert ebenfalls fünf (evtl. sechs) Faktoren. Auf dem ersten Faktor laden alle sieben Items zu Kraftgraphenaufgaben hoch und alle anderen Items schwach. Auf dem zweiten Faktor laden alle sieben Items zu Krafttextaufgaben zum reibungsfreien Schlitten hoch und alle anderen Items schwach. Auf dem dritten Faktor laden alle Items zu Beschleunigungsgraphen außer der nach links langsamer werdenden Bewegung hoch (drei Items) und alle anderen Items schwach. Auf dem fünften Faktor laden ausschließlich die beiden Aufgaben „Kraft beim Münzwurf“ und „Kraft bei der Rampe“ hoch. Der vierte Faktor lädt hoch bei der Beschleunigung beim Münzwurf (mit Richtungswechsel), bei der Beschleunigungsaufgabe zur langsamer werdenden Bewegung nach links und bei der Schlitten-Kraftaufgabe zur langsamer werdenden Bewegung nach links. Man sieht, dass die Faktoren im Wesentlichen den fünf Aufgabengruppen entsprechen. Außerdem wird schon deutlich, dass eine langsamer werdende Bewegung gegen die positive Koordinatenachse eine besondere Aufgabe ist.

Die kinematischen Teile des Tests wurden bereits von TREFFER eingesetzt (Treffer, 1989; Treffer, 1990) (siehe CD im Anhang). Allerdings war der Fragebogen ungünstig formatiert und es wurde sogar völlig auf Skizzen verzichtet. Dennoch sollen an ausgewählten Stellen diese (z.T. bisher unveröffentlichten Ergebnisse) zum Vergleich angegeben werden.

BLASCHKE (1999) hat diesen Test von THORNTON ebenfalls benutzt und dazu weiter verändert (siehe CD im Anhang). Dabei hat er allerdings die hier dargestellten Aspekte zur Gestaltung nicht berücksichtigt und insbesondere auch wieder eine andere, nach den hier gewonnen Erkenntnissen un-

günstige Darstellung des Koordinatensystems gewählt: Es gibt einen Prellbock (= Ursprung) und eine positive Orts-Achse. Außerdem hat BLASCHKE bei den kinematischen Aufgabenblöcken einige weitere Items dazu genommen. Da bei drei dieser Items explizit mehrere Antworten möglich und gefordert sind, verließ er damit das Prinzip, dass die Schüler bei jedem Item genau eine Lösung angeben müssen. BLASCHKE hat diesen Test außer von seinen vier Versuchsklassen 1997 noch von 433 Schülern aus 21 elften Klassen (13 mathematisch-naturwissenschaftlich, sieben neusprachlicher Schulzweig) aus acht bayerischen Orten und einem außerbayerischen Ort bearbeiten zu lassen. Zusätzlich hat er die Lehrer nach ihrem Unterricht befragt und die Klassen entsprechend den Angaben zur Integration des Rechnereinsatzes in vier Kategorien eingeteilt. Da er von einem sehr starken Zusammenhang zwischen Unterricht und Testergebnis ausging, gab er alle Ergebnisse klassenweise bzw. für die vier Kategorien an. Insofern existieren keine Informationen über die Streuungen bei den Schülerergebnissen, nur vereinzelt Angaben über die Streuungen der Klassenergebnisse. Dennoch sollen auch diese Ergebnisse mit zum Vergleich herangezogen werden.

Schließlich wurde der Test 2001 bis 2003 im Rahmen dieser Arbeit in der Form von WILHELM (1994) mit den Ergänzungen von BLASCHKE (1999) zu Beginn der elften Jahrgangsstufe gestellt (Test siehe CD im Anhang). Es nahmen 373 Schüler aus 18 Klassen (14 Lehrer) aus 13 Gymnasien teil, wobei zwei Klassen nicht aus Bayern waren und acht Klassen zum mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig gehörten.

6.4.2.2 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen zur Geschwindigkeit

Der ursprüngliche Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ hatte drei Teile, die die Kinematik betreffen. In einem Teil sollte der zu einer beschriebenen Bewegung passende Geschwindigkeitsgraph gewählt werden, in einem anderen Teil der zu einer beschriebenen Bewegung passende Beschleunigungsgraph. Bei einer senkrecht nach oben geworfenen Münze sollte im amerikanischen Original nur das Vorzeichen der Beschleunigung angegeben werden. Im deutschen Fragebogen von WILHELM (1994) wurde zusätzlich noch nach der Richtung der Beschleunigung gefragt. Diese Aufgabe wurde schließlich (für die Test in den Jahren 2001 bis 2004) als eigener Test aus dem Gesamttest herausgenommen (siehe Kapitel 6.4.3).

<i>Items mit Geschwindigkeitsgraphen</i>	richtige Lösung, <i>nach traditionellem</i> Unterricht, 1994, WILHELM (N = 188, 10 Klassen)	richtige Lösung, <i>vor</i> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 373, 18 Klassen)
nach rechts, v konstant	98 %	97 %
nach links, v konstant	98 %	89 %
v gleichmäßig größer	97 %	88 %
ändert Richtung	92 %	81 %
v nach rechts und gleichmäßig kleiner	-	93 %

Tab. 6.3: Anteil richtiger Antworten bei den Geschwindigkeitsaufgaben (Bewegungen beschrieben, passende Geschwindigkeitsgraphen auszuwählen) vor und nach konventionellem Unterricht in der Jahrgangsstufe 11 (nur Gymnasium)

Beim ersten Aufgabenblock zur Geschwindigkeit bewegt sich ein Spielzeugauto eindimensional entlang einer horizontalen Linie, der x-Achse eines Koordinatensystems. Die Schüler müssen zu den beschriebenen Bewegungen den passenden Zeit-Geschwindigkeits-Graphen aus den vorgegebenen Graphen herausuchen. Wie Tab. 6.3 zeigt, beantworteten fast alle Schüler nach dem konventionellen Kinematik-/Dynamikunterricht die Aufgaben richtig. Man kann also sagen, dass die Schüler mit diesen kinematischen Fragen und mit der Grapheninterpretation hier keine Probleme hatten. Inwieweit die Schüler den Begriff „Geschwindigkeit“ bei der Beschreibung einfacher Bewegungen realer Objekte korrekt anwenden können, wie es z.B. von TROWBRIDGE und MCDERMOTT (1980) untersucht wurde, kann aber nicht gesagt werden. Leider ergab sich auch nur eine kleine Reliabilität von $\alpha = 0,28$.

Wichtig ist, dass diese guten Ergebnisse aber auch schon vor Beginn des Unterrichts der elften Klasse möglich sind, wie Tab. 6.3 zeigt. Diese Testergebnisse stellen den Sinn so mancher Unterrichtsstunde in der Kinematik der bisherigen elften Klasse in Frage, in der intensiv die Grapheninterpretation von Geschwindigkeitsgraphen bei eindimensionalen Bewegungen geübt wird. Da die Schüler offensichtlich diese Fähigkeiten bereits in die Oberstufe mitbringen, ist es sinnvoller, stattdessen die Geschwindigkeit bei zweidimensionalen Bewegungen ausführlicher zu behandeln.

<i>Items mit Geschwindigkeitsgraphen</i>	nach rechts, v konstant	nach links, v konstant	v gleichmä- ßig größer	ändert Richtung	gesamt
Uni. Oregon, noncal.+cal., 1987, N=172	57 %	38 %	93 %	62 %	63 %
Uni. Oregon, noncalcul., 1988, N = 170	58 %	33 %	-	60 %	-
Uni. Tuft, noncal., 1988, N = 72	75 %	50 %	96 %	74 %	74 %
Uni. Tuft, calcul., 1988, N = 177	81 %	55 %	97 %	79 %	78 %
Uni., USA insgesamt, THORNTON, 1987 + 1988, N = 591	67 %	43 %	95 %	68 %	68 %
Gymnasium, TREFFER, 1988, N = 426	65 %	30 %	95 %	74 %	66 %
Universität Würzburg, TREFFER, 1988	83 %	67 %	96 %	83 %	82 %
Gymnasium, WILHELM, Vorlauf, 1993, 4 Klassen, N = 89	91 %	91 %	99 %	85 %	92 %
Gymnasium, WILHELM, Haupttest , 1994, 10 Klassen, N = 188	98 %	98 %	97 %	92 %	96 %
techn. FOS (2-jährig), WILHELM, Haupt- test, 1994, 7 Klassen, 3 Schulen, N = 110	98 %	93 %	96 %	94 %	95 %
Gymnasium, BLASCHKE, 1997, N = 363, 18 Klassen	92 %	80 %	96 %	74 %	85 %

Tab. 6.4: Vergleich der Anteile der richtigen Lösungen der Geschwindigkeitsitems (Bewegungen beschrieben, passende Geschwindigkeitsgraphen auszuwählen) nach herkömmlichem Unterricht.

Quellen: THORNTON, SOKOLOFF (1990); THORNTON (1992) (Ergebnisse aus graphischen Darstellungen abgelesen); TREFFER (1990), und private Aufzeichnungen von TREFFER; BLASCHKE (1999) (Die Angaben wurden aus den Angaben für die einzelnen Klassen berechnet. Gemittelt wurde dabei über die Schüler, nicht wie bei BLASCHKE über die Klassenergebnisse.) und eigene Erhebung

Interessant ist noch der Vergleich der Ergebnisse dieser Untersuchung mit den Ergebnissen von THORNTON, TREFFER und BLASCHKE, wie es Tab. 6.4 zeigt. Alle hier aufgeführte Ergebnisse beziehen sich auf Tests, die nach einem herkömmlichen Unterricht gestellt wurden. Dabei handelt es sich um die gleichen Aufgaben, sich physikalisch entsprechenden Aufgabenformulierungen und gleiche

Antwortgraphen. Sehr verblüffend sind die großen Unterschiede bei bayerischen Gymnasiasten. Ein überraschender Punkt ist, dass im Jahr 1988 Studenten, die im ersten Semester Physik studierten, schlechtere Ergebnisse erzielten als Gymnasiasten im Jahr 1994, die pflichtweise in der elften Klasse noch Physik machen müssen. Das ist wohl nicht damit zu erklären, dass die Studenten den Fragebogen unter Zeitdruck bearbeiten mussten, während die Gymnasiasten Zeit hatten, was auch wichtig ist, wenn man nicht Leistung messen will, sondern Vorstellungen aufdecken will. Weiterhin verwundert es, dass Gymnasiasten des gleichen Bundeslandes bei einem im Wesentlichen gleichen Lehrplan 1988 bedeutend schlechter als sechs Jahre später sind. Möglich ist, dass die Lehrer mittlerweile mehr Wert auf Grapheninterpretation legen oder engagiertere Lehrer ausgewählt wurden. Andererseits war der Fragebogen 1988 auch etwas umfangreicher, unübersichtlicher, von der Gestaltung her nicht ansprechend und fast ohne Skizzen zur Veranschaulichung. Schließlich wurde der Fragebogen 1994 auch später im Schuljahr gestellt, so dass die Schüler vielleicht mehr Übung mit Grapheninterpretation hatten. Dennoch erklärt dies noch nicht die Unterschiede. Es ist zu bedenken, dass bei WILHELM die 373 Schülern vor dem Unterricht bei drei der vier Items schon besser sind, als die ebenfalls bayerischen Gymnasiasten bei TREFFER (im Jahr 1988) und BLASCHKE (im Jahr 1997) nach dem Kinematik-/Dynamikunterricht bei physikalisch identischen Aufgaben.

Auffallend ist bei allen Untersuchungen von THORNTON, TREFFER und BLASCHKE, dass der Anteil der richtigen Antworten bei der Bewegung nach links deutlich geringer als bei der Bewegung nach rechts ist, während bei WILHELM diese Items fast gleich beantwortet wurden. Dies liegt wahrscheinlich an der in Kapitel 6.4.2.1 diskutierten Präsentation des Koordinatensystems (1988 und 1997: positive Orts-Achse; 1994: x -Achse eines Koordinatensystems). Von Interesse ist deshalb, welche Antwort die Schüler 1988 statt der richtigen gaben. 16 % bis 26 % der Schüler wählten den Graph aus, der statt der Geschwindigkeit den Ort angibt. Dies wird durch die Formulierung der Items unterstützt, denn Formulierungen wie „*der sich mit gleich bleibender (konstanter) Geschwindigkeit vom Ursprung weg bewegt*“ bzw. „*zum Ursprung hin bewegt*“ lassen eher an einen bestimmten Ortsgraph denken wie Formulierungen wie „*bewegt sich nach rechts*“. Ein anderer Grund könnte bei TREFFER und BLASCHKE sein, dass im Aufgabenblock davor zu ähnlichen Items das passende Zeit-Ort-Diagramm ausgewählt werden sollte (Platzierungseffekt). Dies zeigt, wie entscheidend die Formulierung der Fragestellung in einem Test ist.

Es sei hier aber noch die folgende Kritik an der Aufgabenstellung angemerkt: In fast allen Items des gesamten Fragebogens werden die Bewegungen der entsprechenden Fahrzeuge fast gleich lautend über die Geschwindigkeit bzw. Schnelligkeit beschrieben (konstant, schneller werdend, langsamer werdend). Im Aufgabenblock zur Beschleunigung (und indirekt in den Aufgaben zur Kraft) ist also nach der ersten Ableitung der beschriebenen Geschwindigkeit gefragt, während in diesem Block nach der Geschwindigkeit selbst gefragt ist. Deshalb ist auch unabhängig von den Vorstellungen der Schüler dieser Aufgabenblock einfacher zu beantworten. Um einen vergleichbaren Schwierigkeitsgrad zu haben, müsste es z.B. statt „*bewegt sich nach rechts mit einer festen Geschwindigkeit*“ hier „*bewegt sich nach rechts und vergrößert seinen Abstand vom Ursprung gleichmäßig*“ heißen. Bei einer so ähnlich formulierten Aufgabe in der Untersuchung von BLASCH-

KE haben nach dem Kinematik-/ Dynamikunterricht auch nur 47 % eine richtige Antwort abgegeben.

Letztlich sei noch das Item kritisiert, in dem das Auto ohne Angabe der Richtung seine Geschwindigkeit gleichmäßig vergrößert. In der ersten Version 1994 gibt es (wie bei THORNTON) unter den möglichen Antwortgraphen aber nur einen Geschwindigkeitsgraphen, in dem sich die y-Werte stets irgendwie vergrößern - sei es in positive oder negative Richtung. Es gibt hier also keine alternativen Lösungsmöglichkeiten, die für die Schüler irgendwie plausibel oder attraktiv sein könnten. Bei der Variante von BLASCHKE und der von 2002 wurde noch zusätzlich eine Antwortmöglichkeit angeboten, bei der der Betrag einer negativen Geschwindigkeit abnimmt, also die Geschwindigkeit zunimmt. Für die Vergleichbarkeit musste es schon als richtig gewertet werden, wenn nur die erste Möglichkeit gewählt wurde.

6.4.2.3 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen zur Beschleunigung

<i>Items mit Beschleunigungsgraphen</i>	<i>nach traditionellem</i> Unterricht, 1994, WILHELM (N = 188, 10 Klassen)			<i>vor</i> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 373)	
	richtige Lösung	+ :=“schneller“ - :=“langsamer“	\vec{v} statt \vec{a}	richtige Lösung	\vec{v} statt \vec{a}
(nach rechts) v konstant	64 %		25 %	21 %	66 %
nach links, v konstant	57 %		30 %	10 %	73 %
nach rechts, schneller werdend	58 %		40 %	10 %	87 %
nach links, schneller werdend	40 %	5 %	45 %	6 %	64 %
nach rechts, langsamer werdend	37 %		50 %	4 %	76 %
nach links, langsamer werdend	28 %	9 %	33 %	4 %	61 %

Tab. 6.5: Auswahlhäufigkeiten bei den Aufgaben mit Beschleunigungsgraphen (Bewegungen beschrieben, passende Beschleunigungsgraphen auszuwählen) bei Gymnasiasten vor und nach konventionellem Unterricht. Weitere Erläuterung siehe Text.

Genauso wie bei den Geschwindigkeitsaufgaben wird bei den Aufgaben zur Beschleunigung die Bewegung eines Spielzeugautos beschrieben und es werden die möglichen Antworten für die dazu passenden Beschleunigungen in Zeitgraphen dargestellt. Im Durchschnitt werden die Aufgaben von 47 % der Schüler richtig gelöst (siehe Tab. 6.5). Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, ist für viele Schüler Beschleunigung nur die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages, so dass Schnellerwerden stets positive und Langsamerwerden stets negative Beschleunigung bedeutet. Dieses Schneller/langsamer-Denken führt hier nur bei Bewegungen nach links mit veränderlicher Geschwindigkeit zu einer anderen Antwort als die physikalische Sichtweise. Im Gegensatz zum Münzwurf (siehe Kapitel 6.4.3) gaben nur 5 % bzw. 9 % diese „Schneller/langsamer-Antwort“ (siehe Tab. 6.5). Die deutliche Darstellung des Koordinatensystems und die Präsentation der möglichen Antworten in Graphen statt mit Worten bewirkte also, dass viel weniger Schüler eine „Schneller/langsamer-Antwort“ gaben, sondern stattdessen eine Antwort mit Angabe der richtigen Richtung. Fasst man die richtige und die „schneller/langsamer“-Lösung zusammen, die beide ein gewisses Verständnis der Beschleunigung zeigen, haben im Durchschnitt 50 % der Gymnasiasten eine Antwort gegeben, die ein Verständnis der Beschleunigung zeigt. 37 % haben dagegen im Durchschnitt einen Graphen

gewählt, der die Geschwindigkeit statt der Beschleunigung beschreibt (siehe Tab. 6.5). Interessanterweise sind diese Durchschnittsanteile fast genauso hoch wie die entsprechenden Anteile in der Münzaufgabe (dort: 53 % und 41 %, siehe Kapitel 6.4.3).

Die Betrachtung verschiedener Korrelationen zeigt, dass dieser Aufgabenblock zur Beschleunigung in sich relativ konsistent beantwortet wurde. Denn sowohl die richtigen Antworten korrelieren mittelstark miteinander (zwischen 0,29 und 0,76; im Durchschnitt 0,45; alle Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 signifikant), als auch die „Geschwindigkeitsantworten“ (zwischen 0,43 und 0,82; im Durchschnitt 0,59), was zu einer hohen Reliabilität von Cronbachs $\alpha = 0,84$ führt.

Anders als bei den Geschwindigkeitsaufgaben stellt man bei den Beschleunigungsaufgaben deutlich andere Ergebnisse zu Beginn der elften Klasse fest, wo im Durchschnitt die Items in nur 9 % der Fälle richtig beantwortet werden und durchschnittlich in 71 % der Fälle so geantwortet wird, als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden (siehe Tab. 6.5, rechter Teil). Eine „Schneller/langsamer-Antwort“ gaben im Vortest bei Bewegungen nach links nur 2,4 % der Schüler an. Da Vortest- und Nachtestergebnisse nicht von den gleichen Schülern vorliegen, können keine Korrelationen zwischen z.B. Vortestergebnissen, Nachtestergebnissen oder den Zugewinnen der einzelnen Schüler berechnet werden.

Unter der Annahme, dass die Schüler 1994 mit traditionellem Unterricht gleiche Vortestergebnisse erreicht hätten, wie sie aus den Jahren 2001 - 2003 vorliegen, schafft der Unterricht bei diesen sechs Items bei den richtigen Angaben im Mittel einen Zugewinn von 38 Prozentpunkten (von 9 % auf 47%). Das ist ein relativer Zugewinn der Gruppe von 42 % (nach Hake, 1998, S. 65), was nur als mittelmäßig eingeschätzt wird. Der relative Zugewinn der Gruppe ist der absolute Zugewinn der Gruppe (Nachtestwert-Vortestwert) bezogen auf den möglichen Zugewinn der Gruppe (also dividiert durch 100 %-Vortestwert). Dieser relative Zugewinn der Gruppe wird auch g-Wert genannt (in Anlehnung an „gain“ = Gewinn, Zunahme) und er wird aus den Mittelwerten von Vor- und Nachtest berechnet, nicht als Mittelwert der relativen Zugewinne der einzelnen Schüler. Ein individueller relativer Zugewinn eines einzelnen Schülers ist nämlich dann nicht definiert, wenn beim Vortest bereits alles richtig gelöst wurde, was z.B. bei den $v(t)$ -Diagrammen häufig der Fall ist.

In jeder Klasse Schüler sollten die Schüler zwei andere Antworten des Gesamttests schriftlich begründen, so dass nun zu circa zwei Dritteln der Items eine Fülle von Schüleräußerungen vorliegt. Bei den Beschleunigungsitems sind die Schülerbegründungen für die richtigen Antworten und die „Schneller/langsamer-Antworten“ wie erwartet. Interessant sind nur die Begründungen der „Geschwindigkeitsantworten \vec{v} statt \vec{a} “. Hier hat man bei manchen Begründungen den Eindruck, dass Geschwindigkeit und Beschleunigung für den Schüler identisch ist. Bei anderen scheint Beschleunigung etwas zu sein, das eng mit der Geschwindigkeit zusammenhängt - vielleicht proportional dazu ist. Als Beispiele seien Begründungen aufgeführt, in dem sich das Auto nach rechts bewegt und gleichmäßig schneller wird.

Begründungen in der Form „Beschleunigung / Geschwindigkeit“:

- „Bei der Antwort E ist zu sehen, dass die Beschleunigung mit der Zunahme der Zeit immer schneller wird, weil der y-Wert (die Beschleunigung) zunimmt.“

- „Das Auto bewegt sich nach rechts, wird gleichmäßig schneller 6 gleichmäßige Erhöhung der Beschleunigung in gleichmäßigen Zeitabschnitten.“

Begründungen in der Form „Geschwindigkeit größer Ψ Beschleunigung größer“:

- „Da die Geschwindigkeit gleichmäßig ansteigt, muss auch die Beschleunigung konstant steigen.“

- „Da das Auto gleichmäßig schneller wird, nimmt die Beschleunigung ebenfalls gleichmäßig zu.“

Interessant ist auch, wie Schüler in einem eigenen Test mit 19 Schülern den Begriff Beschleunigung definierten. Sieben Schüler (37 %) gaben an, dass die Beschleunigung die Änderung der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitintervall ist, ohne auf die Grenzwertbildung einzugehen. Sechs Schüler (32 %) sprachen nur von der Änderung der Geschwindigkeit (meist ohne irgendeine Nennung der Zeit), wobei zwei die Formel $a = \Delta v / \Delta t$ angaben. Bei zwei Schülern wurde die Beschleunigung sogar über die Formel $a = F/m$ definiert. Am interessantesten ist jedoch, dass für vier Schüler (21 %) Beschleunigung eine Bewegung ist; Zitat: „Beschleunigung: Bewegung eines Körpers mit veränderlicher Geschwindigkeit.“ Bei dieser Definition ist es jedoch nicht verwunderlich, dass die Schüler bei den Beschleunigungsaufgaben den Graphen wählten, der die Bewegung, d.h. die Geschwindigkeit, angibt.

Vergleicht man Items mit Bewegungen, die physikalisch zwar äquivalent sind, aber sich in der Richtung unterscheiden, so zeigt sich, dass Items mit Bewegungen nach rechts häufiger richtig beantwortet werden als Items mit Bewegungen nach links (siehe Tab. 6.5). Innerhalb einer Bewegungsrichtung werden außerdem Items mit Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit am häufigsten richtig beantwortet gefolgt von Items mit schnellerwerdenden Bewegungen, während die Items mit langsamerwerdenden Bewegungen am schlechtesten ausfallen. Umgekehrt nehmen die „Geschwindigkeitsantworten \vec{v} statt \vec{a} “ von Items mit konstanter Geschwindigkeit über solchen mit schnellerwerdenden Bewegungen hin zu solchen mit langsamerwerdenden Bewegungen zu.

Schließlich sollen die Ergebnisse dieses Aufgabenblockes wieder mit den Ergebnissen entsprechender Items in den Untersuchungen (siehe Tab. 6.6), die von THORNTON, TREFFER und BLASCHKE nach einem herkömmlichen Unterricht durchgeführt wurden, verglichen werden. Auffallend ist dabei das Item zu einer schnellerwerdenden Bewegung nach links, bei dem der Anteil der richtigen Antworten in den Untersuchungen der drei Autoren wesentlich niedriger liegt als bei den übrigen Items, während dieser Anteil bei der Untersuchung von WILHELM im Rahmen der übrigen Items liegt. Da es sich bei diesem Item um das einzige aufgeführte Item handelt, in dem eine Bewegung nach links mit veränderlicher Geschwindigkeit beschrieben wird, könnte dies wieder an der Präsentation des zugrunde liegenden Koordinatensystems liegen. Eine direkte Prüfung dieser Hypothese, indem Schüler Aufgaben mit beiden Präsentationsarten vorgelegt bekommen, wurde nicht durchgeführt.

Ansonsten liegen die Anteile der richtigen Antworten in der Untersuchung von THORNTON an den amerikanischen Universitäten etwa in gleicher Höhe wie bei dieser Untersuchung (vergleiche „Uni., USA insgesamt, THORNTON“ mit „Gymnasium, WILHELM, Haupttest“). Die Anteile der richtigen Antworten an der Universität Würzburg 1988 liegen abgesehen von dem erwähnten Item wie erwartet etwas höher. Überraschend ist jedoch, dass das Ergebnis 1988 an den Gymnasien so schlecht

ausfiel. Als mögliche Erklärungen könnten hier nur wieder die in Kapitel 6.4.2.2 aufgelisteten Hypothesen erwähnt werden.

<i>Items mit Beschleunigungsgraphen</i>	nach rechts, v konstant	nach links, v konstant	nach rechts, schneller-werdend	nach links, schneller-werdend	nach rechts, langsamer-werdend
Uni. Oregon, noncalcul., 1988, N = 170	-	52 %	34 %	11 %	24 %
Uni. Tuft, noncal., 1988, N = 72	55 %	49 %	37 %	7 %	32 %
Uni. Tuft, calcul., 1988, N = 177	71 %	53 %	47 %	21 %	43 %
Uni., USA insgesamt, THORNTON, 1988, N = 591	66 %	52 %	40 %	14 %	33 %
Gymnasium, TREFFER, 1988, N = 426	47 %	22 %	28 %	12 %	21 %
Uni., Würzburg, TREFFER, 1988	84 %	60 %	70 %	23 %	58 %
Gymnasium, WILHELM, Haupttest , 1994, 10 Klassen, N = 188	64 %	57 %	58 %	40 %	38 %
Techn. FOS, WILHELM, Haupttest , 1994, 3 Schulen, N = 110	53 %	52 %	56 %	44 %	42 %
Gymnasium, BLASCHKE, 1997, N = 433, 21 Klassen	61 %	48 %	46 %	24 %	36 %

Tab. 6.6: Vergleich der Anteile der richtigen Lösungen der Beschleunigungsitems (Bewegungen beschrieben, passende Beschleunigungsgraphen auszuwählen) nach herkömmlichem Unterricht.

Quellen: THORNTON, SOKOLOFF (1990); THORNTON (1992) (Ergebnisse aus graphischen Darstellungen abgelesen); private Aufzeichnungen von TREFFER; BLASCHKE (1999) (Die Angaben wurden aus den Angaben für die einzelnen Kategorien berechnet. Gemittelt wurde dabei über die Schüler, nicht wie bei BLASCHKE über die Klassenergebnisse.) und eigene Erhebung

6.4.2.4 Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich

Allgemeine Gesichtspunkte:

Die Schüler, die nach dem Konzept dieser Arbeit unterrichtet wurden, wurden weniger zur eindimensionalen Kinematik unterrichtet als konventionell unterrichtete Klassen und die Interpretation von Zeitgraphen bei eindimensionalen Bewegungen fiel kürzer aus, während dies in manchen traditionellen Klassen sehr intensiv geübt wird. Die Hypothese 1 war jedoch, dass die Schüler bei der zweidimensionalen Kinematik soviel Verständnis für die Begriffe erwarben, dass sie auch bei der Grapheninterpretation mit traditionellen Klassen mithalten können. Da sie aber zusätzlich noch über mehr Wissen und Verständnis bezüglich der zweidimensionalen Bewegung haben, wäre dies als Erfolg zu werten. Die Hypothese 2 war, dass sie aufgrund des besseren qualitativen Verständnisses der Größen auch bei der Grapheninterpretation besser als traditionelle Klassen sind.

Der Fragebogen „Fragen zu Kraft und Bewegung“ wurde allen 13 Lehrern, die an der Evaluation teilnahmen, für ihre 17 Klassen gegeben. Von drei Klassen liegt jedoch kein Nachtest vor (Zeitproblematik), so dass sie nicht in die Auswertung aufgenommen werden konnten. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die zehn Klassen, deren Lehrer am Begleitseminar teilnahmen und sich nach eigenen Aussagen an die Grundideen des Konzeptes hielten (sieben Klassen naturwissenschaftlicher Zweig). Getrennt analysiert wurden drei entferntere Klassen und eine Klasse, deren

Lehrkraft sich nach eigener Aussage wenig an die Grundideen hielt (wie Darstellung der kinematischen Größen einer zweidimensionalen Bewegung durch dynamisch ikonische Repräsentationen). Der Test hat die Form des Tests von WILHELM von 1994, aber es wurden zusätzliche Items aus der Erweiterung von BLASCHKE aufgenommen, um auch hier Vergleiche durchführen zu können. An der Erweiterung von BLASCHKE ist ungünstig, dass er Items hinzugenommen hat, bei der mehrere Antworten (statt genau einer) auszuwählen sind; diese zählt er nur dann als richtig, wenn alle richtigen Antworten gefunden werden. Er berechnet dann aus mehreren Items (mit einer und mehreren Antworten) einen Mittelwert, wobei alle Items gleich gewichtet werden, obwohl die Anforderungen recht unterschiedlich sind. Dabei war nicht erforscht, was dieser Mittelwert aussagt und ob die verschiedenen Items das Gleiche prüfen.

Aufgaben mit Geschwindigkeitsgraphen:

Items mit Geschwindigkeitsgraphen	Traditioneller Unterricht			Unterricht nach Konzept, <i>Treatmentgruppe</i> , 2001 - 2004		
	<u>vor</u> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 373, 18 Klassen)	<u>Kontrollgruppe 1 nach trad.</u> Unterricht, 1994, WILHELM (N = 188, 10 Klassen)	<u>Kontrollgruppe 2 nach trad.</u> Unterricht, 1997, BLASCHKE (N = 363, 18 Klassen)	<u>vor</u> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)	<u>nach</u> Unterricht, 2002-2004, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)	relativer Zugewinn g
nach rechts, v konstant	97 %	98 %	92 %	97 %	98 %	17 %
nach links, v konstant	89 %	98 %	80 %	88 %	97 %	76 %
v gleichmäßig größer	88 %	97 %	96 %	89 %	95 %	52 %
ändert Richtung	81 %	91 %	74 %	82 %	89 %	39 %
4 $v(t)$-Aufgaben nach THORNTON	89 %	96 %	85 %	89 %	95 %	51 %
Reliabilität	0,43	0,28	-	0,46	0,63	-
v nach rechts, v gleichmäßig kleiner	93 %	-	89 %	91 %	94 %	32 %
nach rechts, Entfernung gleichmäßig zunehmend	34 %	-	47 %	44 %	62 %	33 %
Alle $v(t)$ -Graphen mit beschleunigtem Auto	3 %	-	51 %	4 %	61 %	60 %
7 $v(t)$-Aufgaben nach BLASCHKE	69 %	-	76 %	71 %	85 %	47 %
Reliabilität	0,41	-	-	0,46	0,57	-

Tab. 6.7: Anteil richtiger Lösungen bei den Aufgaben mit Geschwindigkeitsgraphen bei traditionellem Unterricht und nach dem Unterrichtskonzept (Bewegungen beschrieben, passende Geschwindigkeitsgraphen auswählen),

Quelle: Eigene Erhebung und BLASCHKE, 1999 (Die Angaben wurden aus den Angaben für die einzelnen Kategorien berechnet. Gemittelt wurde hier über die Schüler, nicht wie bei BLASCHKE über die Klassenergebnisse.)

Die Schüler der zehn betrachteten Versuchsklassen (211 Schüler in Vor- und Nachtest; Schüler, die nur an einem Test teilnahmen, wurden nicht gewertet) konnten sich bei den Aufgaben mit Geschwindigkeitsgrapheninterpretation bei jedem Item vom Vortest bis zum Nachtest verbessern, obwohl die Vortestergebnisse schon sehr gut waren (siehe Tab. 6.7, rechter Teil). Die vier Aufgaben aus dem Test von WILHELM werden im Durchschnitt von 95 % richtig gelöst (schlechteste Klasse:

84 %, beste Klasse: 100 %). Bei den kleinen noch möglichen absoluten Zugewinnen ergeben sich nicht so aussagekräftige relative Zugewinne, die meist im mittleren Bereich liegen (Deckeneffekt). Die 188 Schüler aus zehn herkömmlich unterrichteten Klassen (Kontrollgruppe 1) kommen nach dem Kinematik-/ Dynamikunterricht bei jedem Item auf fast die gleichen, nur minimal größere Werte (siehe Tab. 6.7, linker Teil). Bei den vier Aufgaben aus dem Test von WILHELM erreichen die Schüler der Treatmentgruppe einen relativen Zugewinn von 51 %. Nimmt man an, dass die Schüler der Kontrollgruppe 1 von 1994 die gleichen Vortestergebnisse wie in der Untersuchung von 2001/03 hatten ($N = 373$), ergäbe dies einen leicht größeren relativer Zugewinn von 66 %. Die Schüler der Treatmentgruppe haben aber wohl etwas konsistenter als die Kontrollgruppe 1 geantwortet, denn es ergibt sich ein deutlich größeres Cronbachs Alpha.

BLASCHKE hat dem Test noch fünf weitere Aufgaben zur Interpretation von Geschwindigkeitsgraphen hinzugefügt, die andere Fähigkeiten abtesten. So wurde nicht der Ausdruck „konstante Geschwindigkeit“ verwendet, sondern eine „gleichmäßig zunehmende Entfernung“, oder es wird bereits ein Verständnis der Beschleunigung abgefragt. Diese schwereren Aufgaben lösen ca. zwei Drittel der Schüler richtig. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von BLASCHKE ist allerdings problematisch, da dessen Aufgaben anders (ungeschickter) formuliert waren (siehe Kapitel 6.4.2.2).

Als Messgrößen für den Lernerfolg kann der Anteil der vier (bzw. sieben) richtig gelösten Items genommen werden, obwohl die Reliabilitäten nicht sehr groß sind. Ein t-Test ergibt, dass die Hypothese, dass sich die Nachtestwerte zwischen der Kontrollgruppe 1 (1994) und der Treatmentgruppe unterscheiden, *nicht* abgelehnt werden kann. Man kann also sagen, dass das Unterrichtskonzept keinen Einfluss auf die Lösung dieser Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen mit Geschwindigkeitsgrapheninterpretation hat. Die Effektstärke ist hier bei der Treatmentgruppe ($N_{\text{Treat}} = 211$), gegenüber der Kontrollgruppe ($N_{\text{Kontroll}} = 188$) entsprechend nur -0,11 (kein signifikanter Unterschied bei den Mittelwerten).

Ein Vergleich mit der Kontrollgruppe 2 (Blaschke, Testjahr 1997), von der keine Streuungen bekannt sind, ergibt mit $d = \frac{\mu_{\text{Treatment}} - \mu_{\text{Kontroll}}}{\sigma_{\text{Treatment}}}$ bei den vier $v(t)$ -Aufgaben nach THORNTON ($N_{\text{Kontroll}} =$

363, $\mu_{\text{Kontroll}} = 0,85$) eine mittlere Effektstärke von $d = +0,60$ und bei den sieben $v(t)$ -Aufgaben nach BLASCHKE ($\mu_{\text{Kontroll}} = 0,76$, $\mu_{\text{Treat}} = 0,85$, $\sigma_{\text{Kontroll}} = 0,17$) eine mittlere Effektstärke von $d = +0,52$. Wie bereits erläutert könnte es aber sein, dass dieser Effekt, der nicht als bescheiden betrachtet wird, weniger auf den Unterricht, sondern vielmehr auf die unterschiedliche Testformulierung zurückgeführt werden kann.

Aufgaben mit Beschleunigungsgraphen:

Bei den sechs Aufgaben mit Beschleunigungsgrapheninterpretation haben sich die Schüler der Treatmentgruppe ebenso bei jedem Item vom Vortest bis zum Nachtest verbessert (28 % bis 72 % richtige Antworten, im Mittel 47 %) und erreichen mittlere relative Zugewinne (24 % bis 63 %, im Mittel 41 %) (siehe Tab. 6.8, rechter Teil). Die 188 Schüler aus zehn herkömmlich unterrichteten Klassen (Kontrollgruppe 1) kommen bei ähnlicher Ausgangslage nach dem Kinematik-/Dynamikunterricht bei jedem Item auf fast die gleichen Werte (siehe Tab. 6.8, linker Teil). Unter

der Annahme, dass die Schüler mit traditionellem Unterricht gleiche Vortestergebnisse erreicht hätten, wie die 373 von WILHELM befragten Schüler, schafft der Unterricht bei den richtigen Angaben einen relativer Zugewinn von 25 % bis 54 %, im Mittel 43 %. Auf einen detaillierten Vergleich mit den Ergebnissen herkömmlich unterrichteter Klassen bei BLASCHKE wird verzichtet, da hier wieder das Problem vorliegt, dass das Koordinatensystem in der Aufgabenbeschreibung anders beschrieben wurde.

<i>Items mit Beschleunigungsgraphen</i>	Traditioneller Unterricht, <i>Kontrollgruppe 1</i>			Unterricht nach Konzept, <i>Treatmentgruppe, 2001 - 2004</i>		
	<i>vor</i> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 373, 18 Klassen)	<i>nach trad.</i> Unterricht, 1994, WILHELM (N = 188, 10 Klassen)	relativer Zugewinn g	<i>vor</i> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)	<i>nach</i> Unterricht, 2002 – 2004, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)	relativer Zugewinn g
(nach rechts) v konstant	21 %	64 %	(54 %)	23 %	72 %	63 %
nach links, v konstant	10 %	57 %	(53 %)	14 %	52 %	44 %
nach rechts, schnellerwerdend	10 %	58 %	(53 %)	14 %	54 %	46 %
nach links, schnellerwerdend	6 %	40 %	(36 %)	8 %	40 %	34 %
nach rechts, langsamerwerdend	4 %	37 %	(34 %)	6 %	37 %	33 %
nach links, langsamerwerdend	4 %	28 %	(25 %)	6 %	28 %	24 %
6 $a(t)$-Aufgaben nach WILHELM	9 %	47 %	(42 %)	12 %	47 %	40 %
Reliabilität	0,82	0,84	/	0,84	0,89	/
8 $a(t)$-Aufgaben nach BLASCHKE	9 %	/	/	12 %	48 %	41 %
Reliabilität	0,88	/	/	0,89	0,92	/

Tab. 6.8: Anteil richtiger Lösungen bei den Aufgaben mit Beschleunigungsgraphen bei traditionellem Unterricht und nach dem Unterrichtskonzept sowie Reliabilitäten (Cronbachs Alpha)

Schaut man sich außerdem an, welche falschen Antworten bei der Kontrollgruppe 1 und der Treatmentgruppe gegeben werden, stellt man auch da große Übereinstimmung fest (siehe Tab. 6.9).

Als Messgrößen für den Lernerfolg wird der Anteil der sechs (bzw. acht) richtig gelösten Items genommen. Die stets recht hohen Reliabilitäten sprechen dafür, dass hiermit jeweils die Fähigkeit ermittelt wurde, zu einer beschriebenen Bewegung den passenden Beschleunigungsgraphen zu finden. Ein t-Test ergibt natürlich, dass die Hypothese, das sich die Nachtestwerte zwischen der Kontrollgruppe 1 (1994) und der Treatmentgruppe unterscheiden, nicht abgelehnt werden kann, da die Mittelwerte mit circa 0,47 fast gleich sind. Die Effektstärke bei der Treatmentgruppe ($N_{\text{Treat}} = 211$, $\mu_{\text{Treat}} = 0,47$, $\sigma_{\text{Treat}} = 0,39$) gegenüber der Kontrollgruppe ($N_{\text{Kontroll}} = 188$, $\mu_{\text{Kontroll}} = 0,47$, $\sigma_{\text{Kontroll}} = 0,35$) ist deshalb fast Null. Man kann also sagen, dass das Unterrichtskonzept keinen Einfluss auf die Lösung dieser Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen mit Beschleunigungsgrapheninterpretation hat.

Items mit Beschleunigungsgraphen	<i>Kontrollgruppe 1, nach trad. Unterricht, 1994, WILHELM (N = 188, 10 Klassen)</i>			<i>Treatmentgruppe, nach dem Konzept, 2002-2004, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)</i>		
	richtige Lösung	+ :=schn. - :=langs.	\vec{v} statt \vec{a}	richtige Lösung	+ :=schn. - :=langs.	\vec{v} statt \vec{a}
(nach rechts) v konstant	64 %		25 %	72 %		25 %
nach links, v konstant	57 %		30 %	52 %		39 %
nach rechts, schnellerwerdend	58 %		40 %	54 %		45 %
nach links, schnellerwerdend	40 %	5 %	45 %	40 %	6 %	41 %
nach rechts, langsamerwerdend	37 %		50 %	37 %		50 %
nach links, langsamerwerdend	28 %	9 %	33 %	28 %	8 %	44 %

Tab. 6.9: Auswahlhäufigkeiten bei den Aufgaben mit Beschleunigungsgraphen bei Gymnasiasten nach konventionellem Unterricht und nach dem Unterrichtskonzept, Quelle: Eigene Erhebung

Ein Vergleich mit der Kontrollgruppe 2 (Blaschke, Testjahr 1997), von der keine Streuungen bekannt sind, ergibt bei den sechs $a(t)$ -Aufgaben nach WILHELM ($N_{\text{Kontroll}} = 433$, $\mu_{\text{Kontroll}} = 0,43$) eine sehr schwachen Effektstärke von $d = 0,10$ und bei den acht $a(t)$ -Aufgaben nach BLASCHKE ($\mu_{\text{Kontroll}} = 0,38$, $\mu_{\text{Treat}} = 0,48$, $\sigma_{\text{Kontroll}} = 0,39$) eine schwache Effektstärke von $d = 0,27$. Wie bereits erläutert könnte es aber sein, dass dieser Effekt weniger auf den Unterricht, sondern vielmehr auf die unterschiedliche Testformulierung zurückgeführt werden kann.

Interpretation:

Die Tatsache, dass sich die Versuchsklassen bei den Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen mit Geschwindigkeitsgrapheninterpretation nicht nachweisbar von der Kontrollklassen unterscheiden, kann als Erfolg gewertet werden (Hypothese 1 kann angenommen werden). Denn in diesen Klassen sollten eindimensionale Bewegungen und Grapheninterpretation weniger intensiv zugunsten einer intensiveren Behandlung allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen (mit Pfeilen als dynamisch ikonische Repräsentationen) behandelt werden. Die zeitlich kürzere Behandlung von Grapheninterpretationen eindimensionaler Bewegungen sollte dagegen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen unterstützt werden. Es ist deshalb positiv, wenn die Schüler trotz der angenommenen kürzeren Zeit gleiche Werte erreichen. Allerdings wurde nicht ermittelt, wie viel Zeit tatsächlich von den Lehrern der Versuchsklassen und der Kontrollklassen dafür aufgewandt wurde.

Allerdings wurde erwartet, dass die Behandlung zweidimensionaler Bewegungen sowie die Betonung des Geschwindigkeitsänderungsvektors und die verschiedenen Darstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen auch einen positiven Einfluss bei den Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen mit Beschleunigungsgrapheninterpretation haben. Dieser ist jedoch in dieser Untersuchung nicht nachweisbar (Hypothese 2 muss abgelehnt werden). BLASCHKE, der wenige gute Klassen mit Hilfe dynamisch ikonischen Repräsentationen unterrichtete und damit eindimensionale Bewegungen und Grapheninterpretation intensiv übte, beschreibt dagegen für diese Klassen große Zugewinne (Blaschke, 1999, Testjahre 1996/98) (siehe Kapitel 3.2.3). Kein eindeutiger Ef-

fekt von dynamisch ikonischen Repräsentationen auf das Verständnis von Liniendiagrammen wurde auch in der DFG-Studie „Erwerb qualitativer physikalischer Konzepte durch dynamisch-ikonische Repräsentationen von Strukturzusammenhängen“ gefunden (Galmbacher et al., 2005a+b) (siehe Kapitel 3.2.3).

Aufgaben- gruppe	Anzahl berück- sichtigter Items	<i>Lehrer A, 1. Jahr</i>			<i>Lehrer A, 2. Jahr</i>		
		Mittel- wert vorher	Mittel- wert nachher	relativer Zugewinn g	Mittel- wert vorher	Mittel- wert nachher	relativer Zugewinn g
$v(t)$ -Aufgaben nach THORNTON	4	90 %	93 %	25 %	89 %	100 %	100 %
$v(t)$ -Aufgaben nach BLASCHKE	7	69 %	84 % *	49 %	69 %	96 % *	87 %
$a(t)$ -Aufgaben nach WILHELM	6	4 %	28 % *	25 % *	17 %	73 % *	67 % *
$a(t)$ -Aufgaben nach BLASCHKE	8	4 %	28 % *	24 % *	17 %	72 % *	66 % *
Krafttextaufga- ben (Schlitten)	7	10 %	13 % *	3 % *	27 %	64 % *	50 % *
$F(t)$ -Aufgaben	7	4 % *	8 % *	4 %	31 % *	43 % *	17 %

Tab. 6.10: Ergebnisse bei den Aufgabengruppen bei zwei unterschiedlichen Klassen eines Lehrers der Versuchsgruppe. Signifikante Unterschiede bei entsprechenden Werten wurden mit einem * gekennzeichnet (t-Test bzw. Mann-Whitney-U-Test, 5 %-Niveau). Um bei den relativen Zugewinnen Signifikanzen berechnen zu können, wurde nicht wie bei HAKE der relative Zugewinn aus den Klassenmittelwerten bei Vor- und Nachtest berechnet (g-Wert), sondern die relativen Zugewinne der einzelnen Schüler und deren Mittelwert; angegeben wurde hier dennoch der g-Wert von HAKE (bis auf die $v(t)$ -Aufgaben nur minimale Unterschiede bei den Zahlenwerten).

Insgesamt ist klar, dass bei einem solchen Feldversuch, der sich über ein halbes Schuljahr erstreckt sehr viele Einflüsse vorhanden sind und die Qualität und Effektivität von viel mehr Faktoren bestimmt wird, als nur von den Möglichkeiten dynamisch ikonischer Repräsentationen. Ein gutes Beispiel wie beschränkt der Einfluss des Lehrers und des Unterrichts ist, lieferte ein engagierter Lehrer, der in zwei aufeinander folgenden Jahren zwei Klassen des selben Gymnasiums genauso nach dem vorgestellt Unterrichtskonzept unterrichtet hatte. Die erste Klasse liegt sowohl beim absoluten Nachtestergebnis, als auch beim relativen Zugewinn deutlich unter dem Mittelwert aller getesteten Versuchsklassen (siehe Tab. 6.10). Außer bei den Geschwindigkeitsaufgaben ist sie bei allen Teilbereichen die schlechteste Klasse der Treatmentgruppe. Die zweite Klasse liegt sowohl beim absoluten Nachtestergebnis, als auch beim relativen Zugewinn deutlich über dem Mittelwert aller Versuchsklassen. Sie ist in fast allen Teilbereichen deutlich die beste Klasse der Treatmentgruppe. Es ist zwar möglich, dass der Lehrer im zweiten Jahr, in dem er mit dem Konzept vertraut war, besser unterrichtete, während er im ersten Jahr noch Umstellungsschwierigkeiten auftraten. Die wesentliche Erklärung ist aber bei den Schülern zu finden. Die zweite Klasse gehörte zum anspruchsvollen europäischen Gymnasium (Schulzweig, Modellversuch in Bayern), in dem nur sehr gute Schüler bis zur elften Klasse kommen. Die erste Klasse gehörte zum neusprachlichen Zweig des gleichen Gymnasiums, in dem solche Leistungsträger entsprechend fehlen. Dies ist auch daran zu sehen, dass - außer bei den Geschwindigkeitsaufgaben - die Vortestergebnisse bei der ersten Klasse unter dem Durchschnitt und bei der zweiten über dem Durchschnitt liegen. Das führt zu der bekannten These,

dass die Einstellung der Schüler und ihr Vorwissen entscheidender sind, als das verfolgte Unterrichtskonzept. Nach WANG, HAERTEL und WALBERG (1993) ist der entscheidendste Einfluss auf den Lernerfolg die kognitive Kompetenz der Schüler, während die Organisation des Lehrplans erst auf Platz 10 und die Qualität des Unterrichts erst auf Platz 13 kommen (zitiert nach Meyer, 2004, S. 35).

Generell kann man sagen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Klassen sowohl beim traditionellen Unterricht als auch beim Unterricht nach diesem Konzept sehr groß sind. Es stellt sich auch die Frage, inwiefern die Treatmentgruppe und Kontrollgruppe repräsentativ ist und ob je zehn Klassen für diese Untersuchung ausreichend sind. Zumindest kann angemerkt werden, dass die Kontrollgruppe von erfahrenen Lehrern unterrichtet wurde, während die Treatmentgruppe größtenteils von jungen Lehrern unterrichtet wurde.

Testergebnisse liegen auch von drei weiteren Klassen bzw. Kursen aus drei Bundesländern vor, deren Lehrer allein aufgrund der Materialien-CD nach dem Unterrichtskonzept unterrichten, aber an keinem Seminar teilnahmen und nicht persönlich instruiert wurden. Da hier wenige Rückmeldungen vorlagen, wie genau unterrichtet wurde, konnten die Klassen nicht in die Auswertung aufgenommen werden. Diese Gruppe war im Nachtest bei den 4 $v(t)$ -Aufgaben nach THORNTON mit 92 % nur minimal schlechter als die Treatmentgruppe (95 %) und die Kontrollgruppe 1 (96 %). Bei den 6 $a(t)$ -Aufgaben nach WILHELM waren die Schüler jedoch sowohl beim Vortest mit 2 % deutlich schlechter als die Treatmentgruppe (12 %) als auch beim Nachtest mit 28 % (Treatmentgruppe und die Kontrollgruppe 1 je 48 %) und beim relativen Zugewinn (26 % statt 40 % in Treatmentgruppe). Ob dies an den Schülern liegt oder ob hier ein Effekt der Lehrerschulung im Begleitseminar vorliegt, kann nicht gesagt werden.

6.4.3 Beschleunigung beim senkrechten Münzwurf

6.4.3.1 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen

Eine weitere Aufgabengruppe des Tests „Fragen zu Kraft und Bewegung“ betrifft die Beschleunigung einer senkrecht nach oben geworfenen Münze. Es wird dabei nicht nach der Kraft auf die Münze sondern nach ihrer Beschleunigung während der verschiedenen Phasen gefragt. Im Originalfragebogen von THORNTON wird nach dem Vorzeichen der Beschleunigung (negativ, null, positiv) gefragt, wobei im Aufgabenstamm aufwärts als die positive Richtung festgelegt wurde. In der hier vorgestellten Untersuchung (Fragebogen siehe CD im Anhang) wurde zusätzlich nach der Richtung der Beschleunigung gefragt (abwärts gerichtet, null, aufwärts gerichtet). Die Antwort kann man sich als Physiker auf zwei Weisen überlegen: Entweder man weiß die Krafrichtung und folgert daraus die proportionale Beschleunigung oder man überlegt sich neben der Geschwindigkeitsrichtung, wann die Münze schneller bzw. langsamer wird. Gespräche mit Schülern ergaben, dass sie die zweite Variante wählen, weshalb diese Aufgabe als kinematische, nicht als dynamische betrachtet wird.

Vorzeichen der Beschleunigung:

Eine Richtungsumkehr tritt beim senkrechten Wurf mit einer Münze natürlicherweise auf, so dass bei einer entsprechenden Verständnisaufgabe die im Wesentlichen drei verschiedenen Vorstellungen ($\vec{a} \sim \vec{v}$, $a \sim \Delta|\vec{v}|$ und $\vec{a} \sim \Delta\vec{v}$) gleichzeitig in einer Klasse auftreten (siehe Kapitel 2.2.3). Nur 7% der Schüler gaben 1994 auch nach dem konventionellen Unterricht die vollständig richtige

Antwortkombination (siehe Tab. 6.11). 10 % gaben eine Antwortkombination, bei der zwar für die Aufwärts- und Abwärtsbewegung die richtige Lösung angegeben wurde, aber zum höchsten Punkt die Beschleunigung null angegeben wird, also wahrscheinlich eine statische Vorstellung überwiegt.

Untersuchung \ Antwort	WILHELM 1994, N = 188, <i>nach trad. U.</i> , Bayern	TREFFER 1988, N = 426, <i>nach trad. U.</i> , Bayern	WILHELM, 2002, N = 17 <i>vor</i> 11. Klasse, Hessen
richtige Lösung	7 %	3 %	0 %
fast-richtige Lösung	10 %	3 %	0 %
+ := "schneller" - := "langsamer"	36 %	34 %	12 %
v statt a	41 %	55 %	82 %
sonstige Angaben	6 %	5 %	6%

Tab. 6.11: Auswahlhäufigkeiten bei der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ vor und nach konventionellem Unterricht, Quelle: Eigene Erhebungen und Aufzeichnung TREFFER

ARONS (1981, S. 168) sieht diese Problem eng verzahnt mit der von TROWBRIDGE und MCDERMOTT beschriebenen Schwierigkeit mit dem Begriff „Momentangeschwindigkeit“, der für Schüler einen Zeitraum, keinen Zeitpunkt beschreibt. Als Ursache dieser Beantwortung nennt er die Schulbuchausdrucksweise, der Ball komme im Umkehrpunkt „einen Moment zur Ruhe“. Diese Antwortkombination möchte ich als „fast-richtig“ bezeichnen.

Bezeichnet man in einem vereinfachten Beschleunigungskonzept Schnellerwerden als positive und Langsamerwerden als negative Beschleunigung, gaben 36 % der Schüler in diesem Sinne eine richtige Antwort. Bei Bewegung in positive Richtung - was in der Schule meistens der Fall ist - führt dies zum gleichen Ergebnis wie der physikalische Beschleunigungsbegriff; bei Bewegung in negative Richtung aber zum jeweils entgegengesetzten Vorzeichen. Dennoch muss man sagen, dass diese Schüler das Wesentliche des Beschleunigungsbegriffes verstanden haben, nämlich dass er die Änderung der Geschwindigkeit (hier ebenso als skalare Größe aufgefasst) angibt. Einige Lehrer bestätigten in Gesprächen, dass sie im Unterricht positive Beschleunigung als Schnellerwerden und negative Beschleunigung als Langsamerwerden einführen und Beschleunigung nicht als vektorielle Größe behandeln. Eine Schülerantwort in diesem Sinne muss dann als Lernerfolg verstanden werden. Wenn man die drei ersten, bisher diskutierten Antwortkombinationen, die alle wenigstens ein Teilverständnis des Beschleunigungsbegriffes zeigen, zusammenfasst, ergibt sich ein Anteil von 53%. Circa die Hälfte der Schüler hat also wenigstens zum Teil den Beschleunigungsbegriff verstanden.

41 % der Schüler verfügen jedoch anscheinend über keinen Beschleunigungsbegriff, da sie eine Antwortkombination gaben, die der Geschwindigkeit, aber nicht einer Beschleunigung entspricht. Für sie ist wohl Beschleunigung etwas, das mit der Geschwindigkeit, nicht mit deren Änderung zu

tun hat. TROWBRIDGE und MCDERMOTT (1981, S. 250, Abschnitt IV. C.) geben auch an, dass in ihren Interviews nach dem Unterricht circa 40 % der Studenten Geschwindigkeit und Beschleunigung verwechselten. Auch sie stellten eine zum Münzwurf äquivalente Aufgabe, in der eine Kugel eine schiefe Ebene hinauf- und wieder herunterrollt. Zum höchsten Punkt erhalten TROWBRIDGE und MCDERMOTT (1981, S. 248, Abschnitt III. E.) in Interviews Schülerantworten, die den Antworten „+:=schneller/ -:=langsamer“ und „ \vec{v} statt \vec{a} “ entsprechen.

Bei keiner anderen Aufgabe des Fragebogens „Fragen zu Kraft und Bewegung“ waren die Unterschiede in der Beantwortung zwischen den einzelnen Klassen so extrem wie bei dieser Aufgaben- gruppe: Sieht man von einer sehr kleinen (N = 8), sehr guten mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse ab, so gaben je nach Klasse 0 - 17 % der Schüler die richtige Antwortkombination, 0 - 28 % die fast-richtige Antwortkombination, 5 - 58 % die Schneller/Langsamere-Antwortkombination und 24 - 84 % die Geschwindigkeits-Antwortkombination; fasst man die drei Antwortkombinationen zusammen, die wenigstens ein Teilverständnis des Beschleunigungsbegriffes zeigen, gaben je nach Klasse zwischen 5 % und 71 % der Schüler eine entsprechende Antwort. Trotz dieser Schwankungen erhielt TREFFER 1988 bei 426 Schülern sehr ähnliche Durchschnittsergebnisse (siehe Tab. 6.11). BLASCHKE (1999) hat die Aufgabe zwar ebenso gestellt, macht aber keine Angaben zur Häufigkeiten der auftretenden Antwortkombinationen, nur zu den Teilphasen. Eine eigene Untersuchung vor Beginn des Unterrichts ergibt wie bei den Aufgaben zu Beschleunigungsgraphen ein deutlich anderes Ergebnis (siehe Tab. 6.11 rechts).

Richtung der Beschleunigung:

Vorzeichen \ Richtung	richtig	fast-richtig	„schneller/ langsamer“	\vec{v} statt \vec{a}	sonstiges	Summe
↓↓↓ (= richtig)	6,4 %	-	2,1 %	0,5 %	-	9,0 %
↓ 0 ↓ (= fast-richtig)	-	7,4 %	10,1 %	1,1 %	-	18,6 %
↓ 0 ↑ (= nach + / -)	-	-	2,7 %	1,1 %	-	3,7 %
↑ 0 ↓ (wie v)	-	2,1 %	18,6 %	36,7 %	4,8 %	62,2 %
keine oder sonstige Angabe	0,5 %	0,5 %	2,7 %	1,6 %	1,1 %	8,5 %
Summe	6,9 %	10,1 %	36,2 %	41,0 %	5,9 %	100 %

Tab. 6.12: Kombinationshäufigkeiten (angegebenes Vorzeichen und angegebene Pfeilrichtung) bei der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ nach konventionellem Unterricht, N = 188

Interessant ist - insbesondere wenn im Sinne von „schneller/langsamer“ geantwortet wurde -, wie die Schüler antworten, wenn anstatt nach dem Vorzeichen der Beschleunigung nun nach der Richtung der Beschleunigung gefragt wird. Deshalb sollten die Schüler zusätzlich mit einem Pfeil die Richtung der Beschleunigung angeben. Die Frage nach der Richtung wurde von den Schülern, die richtig oder fast-richtig antworteten, und denen, die der Geschwindigkeit entsprechend antworteten, meist passend zur Vorzeichenangabe gelöst (siehe Tab. 6.12). Dagegen wurden die Schüler, die beim Vorzeichen entsprechend der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages antworteten, von dieser Fragestellung häufig verwirrt und änderten ihre Antwort mehrmals. Etliche Schüler gaben explizit an, mit der Frage der Richtung Probleme zu haben, was wohl daran liegt, dass Beschleunigung für

sie ein Zahlenwert ist. 28 % dieser Schüler gaben schließlich die fast-richtige Richtungsantwort $\downarrow 0 \downarrow$ und 52 % dieser Schüler die Geschwindigkeitsantwort $\uparrow 0 \downarrow$, so dass insgesamt von 62 % der Schüler die Richtung der Geschwindigkeit statt die der Beschleunigung angegeben wurde, während nur 9 % die richtige und 19 % die fast-richtige Antwort gaben.

In der TIMSS III-Testaufgabe G15 (http://www.mpib-berlin.mpg.de/TIMSSIII-Germany/Die_Testaufgaben/Die_Testaufgaben.htm) wurde analog zu dieser Münzaufgabe nach der Richtung der Beschleunigung eines springenden Balles gefragt, der zusätzlich zur senkrechten Bewegung noch eine horizontale Komponente hat (Parabelflugbahn). Während die Aufgabe international von 16 % der Schüler richtig beantwortet wurde, waren es in Deutschland in der 13. Jahrgangsstufe nur 7 % (in dieser Untersuchung in der 11. Jahrgangsstufe bei senkrechter Bewegung 9 %), wobei in deutschen Grundkursen 2 % der Schüler und in deutschen Leistungskursen 14 % der Schüler eine richtige Antwort gaben.

Vergleich mit den Angaben der Kraft beim Münzwurf:

Es ist noch zu zeigen, dass die Aufgabe zur Beschleunigung beim Münzwurf als kinematisch, nicht als dynamische Aufgabe zu sehen ist. Dazu wird betrachtet, wie Schüler antworten, wenn beim Münzwurf nach der resultierenden Kraft statt nach der Beschleunigung gefragt wird. Neben der Aufgabe zur senkrecht nach oben geworfenen Münze wurde auch eine Aufgabe gestellt, in der ein Spielzeugauto nach einem Stoß eine schiefe Rampe hinauf- und wieder hinunterrollt. Man kann annehmen, dass die Schüler hier nur gemäß der Aufgabenstellung über Kräfte nachdenken und nicht von der Beschleunigungsrichtung auf die Richtung der resultierenden Kraft schließen.

Nur 9 % bzw. 11 % der Schüler antworteten konsequent im newtonschen Sinne (siehe Tab. 6.13). Allerdings waren hier die Schwankungen zwischen den einzelnen Klassen recht hoch. So gab in drei

	newtonsche Sichtweise	fast-newtonsche Antwort	aristotelische Sichtweise	\vec{F} gegen \vec{v}
Auto	9 %	3 %	80 %	5 %
Münze	11 %	6 %	73 %	5 %

Tab. 6.13: Auswahlhäufigkeiten bei zwei Kraftaufgaben in 10 Klassen Gymnasium mit 188 Schülern, Quelle: Eigene Erhebung

Klassen kein einziger Schüler eine newtonsche Antwortkombination, während in einer anderen Klasse 50 % der Schüler dies taten. Die Antwortkombination, bei der nur am höchsten Punkt fälschlich keine Kraft angegeben wurde, wird hier als „fast-newtonsch“ bezeichnen. Die Aussage, dass die Summe aller Kräfte auf einen Körper null ist, wenn er sich nicht bewegt, kann hier aber nicht angewandt werden, da es sich nur um einen Zeitpunkt, nicht um ein Zeitintervall handelt, in dem die Geschwindigkeit null ist. 80 % bzw. 73 % antworteten „aristotelisch“ (d.h. Kraft in Bewegungsrichtung) (Es wird hier nicht zwischen aristotelischen Vorstellungen und Impetusvorstellungen unterschieden). Die schriftlichen Begründungen der Schüler helfen, die gegebenen Antwortkombinationen zu interpretieren. Verwunderlich ist eine Antwortkombination, bei der die Kraft stets gegen die Bewegungsrichtung geht (je 5 %), also auch für die Abwärtsbewegung eine Kraft nach oben angegeben wurde. Ein Schüler schrieb hierzu, dass die Kraft, deren Richtung er angegeben hat, die Reibungskraft ist. Allerdings übersieht der Schüler die auf das Auto bzw. die Münze wirkende Gewichtskraft, was an die aristotelische Vorstellung erinnert, dass zur natürlichen Fallbewegung keine äußere Kraft nötig ist. Selbst bei einem Lehrer, der den Münzwurf ausführlich thematisiert hatte, da er den Fragebogen schon von einem Vorlauf her

kannte, antworteten bei dieser Aufgabe nur 17 % (d.h. drei von 18 Schülern) newtonsch, 28 % (5 Schüler) fast-newtonsch, aber 44 % (8 Schüler) aristotelisch.

Schaut man sich nun den Zusammenhang zwischen den Beantwortungen der beiden Aufgabengruppen an, stellt man fest, dass sie von einigen Schülern (18 %) unterschiedlich beantwortet wurden, was rechtfertigt, diese beiden physikalisch äquivalenten Aufgabengruppen zu stellen. Dagegen gaben 8 % in beiden Aufgabengruppen die newtonsche Antwortkombination an und 69 % in beiden die aristotelische. Entsprechend gibt es zwischen den beiden newtonschen Antworten eine starke Korrelation ($r = 0,79$) und zwischen den aristotelischen Antworten eine mittelstarke Korrelation ($r = 0,56$).

<i>Münzwurf</i>		Beschleunigung				insgesamt
		richtig	fast-richtig	schn./langs.	\bar{v} statt \bar{a}	
Kraft	newtonsch	4 %	2 %	3 %	1 %	11 %
	aristotelisch	2 %	4 %	29 %	34 %	73 %
insgesamt		7 %	10 %	36 %	41 %	

Tab. 6.14: Kombinationen zwischen der Beantwortung der Aufgaben zu Beschleunigung bzw. Kraft beim Münzwurf, 188 Gymnasiasten, eigene Erhebung

Ein Vergleich der Beantwortung der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ und der Aufgabe „Kraft beim Münzwurf“ ergibt, dass aus der richtigen Antwort der einen Aufgabe nicht auf die richtige Beantwortung der anderen geschlossen werden kann (siehe Tab. 6.14). Die Beantwortung der beiden Aufgaben ist weitgehend unabhängig voneinander; es werden wohl unterschiedliche Argumentationen benutzt und nicht die Proportionalität $a \sim F$. Die Faktorenanalyse ergab ebenso sehr deutlich, dass hier verschiedene Fähigkeiten abgeprüft werden. Deshalb kann die Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ als kinematische Aufgabe betrachtet werden. Das unterstützt auch die These, dass die Schüler nur wenig Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kraft sehen und dies deutlicher vermittelt werden muss.

Die Ergebnisse bei diesen beiden Aufgabengruppen zur Kraft entsprechen den Ergebnissen ähnlicher Aufgaben in anderen Untersuchungen (siehe Tab. 6.15). Als erster hat WARREN (1979) eine ähnliche Aufgabe zu einem springenden Ball gestellt (Schecker, 1985, S. 112), in der ein Ball eine Parabelbahn durchfliegt und in

Untersuchungen mit Münzwurfaufgabe bzw. Aufgabe zum springenden Ball	befragte Bewegung	Anteil richtiger Lösungen
SHECKER, 11. und 12. Klasse Gymnasium, Grund- und Leistungskurse , N = 254	nur Scheitel	15 %
WILHELM, 1994, 11. Klasse Gymnasium, nach dem Dynamikunterricht, N = 277	nur Scheitel	12 %
CLEMENT, Erstsemester Ingenieurwissenschaften, zu Beginn des Studiums , N = 34	nur hoch	12 %
CLEMENT, Erstsemester Ingenieurwissenschaften, nach Physikvorlesung , N = 43	nur hoch	28 %
WILHELM, 1994, 11. Klasse Gymnasium, nach dem Dynamikunterricht, N = 277	nur hoch	22 %
NACHTIGALL, 12. Klasse Gymnasium, Physikleistungskurs , N = 18	hoch, oben und runter	25 %
NACHTIGALL, 11. Klasse Gymnasium, Physikgrundkurs , N = 27	hoch, oben und runter	4%
WILHELM, 1994, 11. Klasse Gymnasium, nach dem Dynamikunterricht, N = 277	hoch, oben und runter	10 %

Tab. 6.15: Vergleich von einigen Ergebnissen verschiedener Untersuchungen zum Münzwurf bzw. zum springenden Ball. Bei WILHELM sind außer obigen 188 Gymnasiasten noch weitere 89 Gymnasiasten mitberücksichtigt. Quellen: Siehe Text.

der unter anderem nach der Krafrichtung im höchsten Punkt (Scheitelpunkt) gefragt wurde. Diese Aufgabe wurde in Deutschland von JUNG und WIESNER (1981, S. 111 und 117) an Physikstudenten, von SCHECKER (1985, S. 107, 113 und 300) an Gymnasiasten und von NACHTIGALL (1987, S. 148 f.) an Studenten und Schüler gestellt. Bei den Untersuchungen mit Schülern liegen die Ergebnisse circa in gleicher Höhe wie bei dieser Untersuchung (siehe Tab. 6.15). CLEMENT (1982, S. 67) dagegen stellte eine Aufgabe, in der die Münze wie hier senkrecht nach oben geworfen wurde, und fragte nach der Krafrichtung beim Hochbewegen. Weitere Testergebnisse zu dieser Aufgabe finden sich bei THUIS (1992), WILHELM (1994) und DEMIDOW ET AL. (1997).

Bei der hier gestellten Aufgabe sollte nur die Richtung der Kraft in den drei Fällen (Aufwärtsbewegung, oben, Abwärtsbewegung) angegeben werden; es wurde nicht gefragt, ob der Betrag der Kraft konstant ist, ab- oder zunimmt. Bei einer Aufgabe des FCI-Tests (Item Nummer 5 in Version 1) wurden mit Worten fünf mögliche Antworten genau beschrieben. Interessanterweise geben die Gymnasiasten (11. Jahrgangsstufe) bei dieser Aufgabe deutlich seltener eine richtige Antwort (5 % statt 10 %) (siehe Kapitel 6.5.1.2). Die dort logisch klingenden Alternativen sind offensichtlich attraktive Distraktoren und erschweren eine physikalisch korrekte Antwort.

6.4.3.2 Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich

Die Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ wurde aus dem ursprünglichen Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ ausgegliedert und als separater kurzer Test in sieben Treatmentklassen nur als Nachtest gestellt – teilweise erst spät im Schuljahr mit großem Abstand zum entsprechenden Unterrichtsstoff. Auf einen Vortest wurde verzichtet; es ist anzunehmen, dass dies vor dem Unterricht kaum ein Schüler richtig löst. Der senkrechte Wurf wurde in den Versuchsklassen als Anwendung des zweiten newtonschen Gesetzes sehr kurz behandelt, wie dies auch in den bayerischen Schulbüchern behandelt wird. Es wurde nicht gefragt, ob dies auch in allen Vergleichsklassen gemacht wurde, jedoch ist davon auszugehen, dass dies in der Regel geschah. Damit die Versuchsklassen bei dieser Aufgabe gegenüber den Vergleichsklassen durch die Behandlung der Aufgabe nicht im Vorteil sind, wurde die Beschleunigungsrichtung bei diesem Vorgang nicht im Unterrichtskonzept thematisiert.

Das Besondere dieser Aufgabe ist nicht nur, dass eine natürliche Richtungsumkehr vorliegt und sich die Münze somit teilweise in Richtung der negativen Koordinatenachse bewegt, sondern dass hier keine Grapheninterpretation notwendig ist. Es genügt, sich die Richtung der Beschleunigung zu überlegen. Deshalb wurde hier bei der Testgruppe ein deutlich besseres Ergebnis als bei der Vergleichsgruppe erwartet, denn diese Fähigkeit sollte in der Kinematik im Zusammenhang mit zweidimensionalen Bewegungen entwickelt worden sein.

In den sieben Treatmentklassen haben 39 % der Schüler die Aufgabe richtig gelöst (siehe Tab. 6.16) (Klassenergebnisse zwischen 27 % und 54 %). Damit liegt deren Anteil fast sechsmal so hoch wie in den herkömmlich unterrichteten Klassen (Unterschied auf 0,01-Niveau signifikant). Zusammen mit den fast-richtigen Lösungen hat damit die Hälfte aller Schüler die Aufgabe richtig gelöst. Die Antwort, bei der Schnellerwerden stets einer positiven und Langsamerwerden stets einer negativen Beschleunigung entspricht, wurde nur von 14 % der Schüler gewählt gegenüber einem Drittel der

Schüler in konventionell unterrichteten Klassen. Eine Antwort gemäß der Geschwindigkeitsrichtung wurde mit 25 % ebenfalls deutlich seltener gegeben (Unterschied jeweils auf dem 0,01-Niveau signifikant).

Untersuchung Antwort	<i>Kontrollgruppe 3</i> TREFFER 1988, <i>nach trad. U.</i> , N = 426	<i>Kontrollgruppe 1</i> WILHELM 1994, <i>nach trad. U.</i> , N = 188, 10 Klassen	<i>Treatmentgruppe</i> WILHELM 2003, <i>nach Konzept</i> , N = 151, 7 Klassen
Vorzeichen richtig	3 %	7 %	39 % *
Vorzeichen fast-richtig	3 %	10 %	10 %
+ :=“schneller“ - :=“langsamer“	34 %	36 %	14 % *
Vorzeichen entsprechend \bar{v} statt \bar{a}	55 %	41 %	25 % *
restliche Vorzeichen- kombinationen	5 %	6 %	12 %
Pfeile richtig $\downarrow\downarrow\downarrow$	-	9 %	42 % *
Pfeile fast-richtig $\downarrow 0 \downarrow$	-	19 %	18 %
Pfeile entsprechend der +/- Antwort $\downarrow 0 \uparrow$	-	4 %	7 %
Pfeile entsprechend \bar{v} statt \bar{a} $\uparrow 0 \downarrow$	-	62 %	27 % *
restliche Pfeil- kombinationen	-	6 %	6 %

Tab. 6.16: Auswahlhäufigkeiten bei der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ abhängig vom Unterricht, Quelle: Eigene Erhebung und Aufzeichnung TREFFER. Ein Stern bedeutet einen signifikanten Unterschied zur Kontrollgruppe 1 (χ^2 -Test, 0,01-Niveau).

Vorzeichen Richtung	richtig	fast- richtig	„schneller/ langsamer“	\bar{v} statt \bar{a}	sonstiges	Summe
$\downarrow\downarrow\downarrow$ (= richtig)	38,4 %	-	-	1,3 %	2,6 %	42,4 %
$\downarrow 0 \downarrow$ (= fast-richtig)	0,7 %	9,3 %	6,0 %	1,3 %	0,7 %	17,9 %
$\downarrow 0 \uparrow$ (= nach +/-)	-	-	6,6 %	-	-	6,6 %
$\uparrow 0 \downarrow$ (wie v)	-	0,7 %	1,3 %	21,2 %	4,0 %	27,2 %
keine oder sonstige Angabe	-	-	-	1,3 %	4,6 %	6,0 %
Summe	39,1 %	9,9 %	13,9 %	25,2 %	11,9 %	100 %

Tab. 6.17: Kombinationshäufigkeiten bei der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ in sieben Treatmentklassen, N = 151

Außerdem sollten die Schüler wieder die Richtung der Beschleunigung mit einem Pfeil angeben. Die Schüler, die richtig, fast-richtig oder der Geschwindigkeit entsprechend antworteten, haben fast alle die Pfeile entsprechend ihrer Vorzeichenangabe gezeichnet (siehe Tab. 6.17). Interessant sind die Schüler, die beim Vorzeichen entsprechend der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (schneller/ langsamer) antworteten. Während in herkömmlich unterrichteten Klassen die Hälfte dieser Schüler Pfeile entsprechend der Geschwindigkeit einzeichnet, tritt dies hier kaum auf (nur 2 Schüler). Dagegen gibt hier fast die Hälfte dieser Schüler eine fast-richtige Pfeillösung an und die

andere Hälfte zeichnet die Pfeile entsprechen dem gewählten Vorzeichen ($\downarrow 0 \uparrow$ entsprechend $-0+$) und damit besser als nur entsprechend der Geschwindigkeit. Während somit in herkömmlich unterrichteten Klassen 62 % als Richtung der Beschleunigung einfach die Richtung der Geschwindigkeit angeben, sind das hier nur 27 %.

Insgesamt ist damit gezeigt, dass in der Treatmentgruppe häufiger zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung unterschieden werden kann. Die Schüler der Treatmentgruppe wissen, dass Beschleunigung eine Richtung hat und viele geben auch die richtige an. Physikalische Aussagen mit Hilfe von Pfeilen darzustellen ist ihnen ebenso vertraut. Nur die Darstellung durch Zeitgraphen ist anscheinend nicht so gefestigt, so dass die Schüler da auf das Niveau herkömmlich unterrichteter Klassen zurückfallen.

6.5 Schülerstudien zur Dynamik

6.5.1 Der FCI-Test

6.5.1.1 Diskussionen um den Test

Der bekannte Test „Force Concept Inventory“ (FCI) wurde 1992 von HESTENES, WELLS und SWACKHAMER (1992) vorgestellt und war zunächst als Hilfe für Lehrer gedacht, das Denken ihrer Schüler zu erforschen (Hestenes et al., 1992, S. 142). Der Test ist mittlerweile aber zu einem standardisierten Diagnoseinstrument geworden, das in den USA an Highschools, Colleges und Universitäten in breitem Umfang eingesetzt wird (Girwidz, Kurz et al., 2003, S. 1) und zum Vergleich der Lernwirkung unterschiedlicher Unterrichtskonzepte angewandt wird (Schecker, Gerdes, 1999, S. 75). Einen Überblick über die Geschichte des Tests, seine Struktur und die wichtigsten Forschungsergebnisse findet man bei SAVINAINEN und SCOTT (2002a).

Der Test besteht aus Denkaufgaben zur newtonschen Mechanik, zu deren Lösung man keine Kenntnisse von Gleichungen oder mathematische Fähigkeiten zum Lösen derselbigen braucht, da nur ein Verständnis physikalischer Grundbegriffe nötig ist. Die Aufgaben sind Multiple-Choice-Aufgaben mit je fünf Antwortalternativen, von denen in der Regel nur eine der physikalischen Betrachtungsweise entspricht (Ausnahme: Aufgabe 12 in der Originalversion). Die anderen Antwortalternativen sind auf bekannte Schülervorstellungen abgestimmt. Dadurch, dass die Fragen einfach sind, ermöglichen sie ad-hoc-Antworten, bei der die Alltagsvorstellungen eine starke Alternative zu den physikalischen Antworten sind (Gerdes et al., 1999, S. 284). Auf diese Weise wird eine Entscheidung zwischen dem newtonschen Konzept und den Alltagsvorstellungen erzwungen (Hestenes et al., 1992, S. 142). Dennoch wird der Test vorwiegend in dichotomisierter Form (richtig/falsch) ausgewertet (Schecker, Gerdes, 1999, S. 75), was den Aussagewert verkürzt.

Die ursprünglich von HESTENES ET AL. (1992, S. 154 – 158) veröffentlichte Formulierung enthält 29 Items (siehe CD im Anhang). Diese wurden von SCHECKER und GERDES übersetzt und eingesetzt (Gerdes et al., 1998; Gerdes et al., 1999; Schecker, Gerdes, 1999; Schecker, Klieme et al., 1999) (Test siehe CD im Anhang). Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde die Formulierung kaum geändert, aber der Test neu formatiert und die Bilder neu in besserer Qualität erstellt (siehe

CD im Anhang). Die ursprüngliche erste Version des FCI-Testes wurde jedoch in den USA aufgrund der gemachten Erfahrungen überarbeitet, klarer formuliert und auf 30 Items erweitert (Halloun et al., 1997) (siehe CD im Anhang). KAUTZ hat von dieser deutlich verbesserten zweiten Version eine deutsche Version hergestellt (Girwidz, Kurz, Kautz, 2003, S. 1) (siehe CD im Anhang), die unter <http://modeling.asu.edu/R&E/Research.html> wie auch die englischsprachige überarbeitete Version downloadbar ist.

HALLOUN und HESTENES haben bereits bei einem Vorläufer des FCI-Tests die Validität und Reliabilität getestet (Konsens über richtige Antworten, Antwortalternativen werden richtig verstanden, Vergleich mit Begründungen in Nachinterviews, Vergleich mit freien Antworten, keine Wiederholungseffekte) (Halloun, Hestenes, 1985b, S. 1044; Schecker, Gerdes, 1999, S. 77). Aufgrund der Ähnlichkeit dieses Vorläufers mit dem FCI-Test hielten die Autoren eine weitere Validierung nicht für nötig und führten lediglich einige Interviews durch (Hestenes et al., 1992, S. 148 f.).

Bereits von HESTENES ET AL. (1992, S. 142) wurden die einzelnen Items aufgrund physikalischer Überlegungen aus Sicht des Physiklehrers sechs Inhaltsbereichen (= Subskalen des FCI-Tests) zugeordnet (Kinematik, 1. newtonsches Gesetz, 2. Gesetz, 3. Gesetz, Superpositionsprinzip, Arten von Kräften). Die Alltagsvorstellungen der Alternativantworten wurden von HESTENES ET AL. unabhängig davon ebenso sechs Kategorien zugeteilt (1992, S. 144). Eine ausführliche Überprüfung dieser beiden Zuordnungen wurde jedoch nicht durchgeführt (Schecker, Gerdes, 1999, S. 77). Die Psychologen HUFFMAN und HELLER (1995) stellten bei einer Faktorenanalyse fest, dass die Lernenden kein konsistentes Antwortverhalten (bei dichotomisierter Auswertung) zeigten. Sie behaupteten, *„dass die Fragen des FCI nur lose miteinander zusammenhängen und nicht notwendigerweise ein einziges Kraftkonzept oder die sechs Dimensionen eines Kraftkonzeptes messen, wie dies ursprünglich von den Autoren des FCI vorgeschlagen wurde“* (Huffman et al., 1995, S. 140, eigene Übersetzung). Demnach misst der FCI Teile des Wissens und die Vertrautheit der Lernenden mit dem Kontext, aber weniger das Verständnis eines Kraftkonzeptes (Huffmann et al., 1995, S. 141 f.). HESTENES und HALLOUN verteidigten daraufhin den Einsatz zur Bewertung bestimmter Instruktionsverfahren, wozu der Gesamtwert zu verwenden sei (1995, S. 505); das Antwortverhalten sei nur bei nicht-newtonschen Probanden inkonsistent, die keine konsistente Alltagstheorie besäßen. HELLER und HUFFMAN (1995) blieben jedoch dabei, dass ein hoher FCI-Wert nicht auf ein konsistentes Grundverständnis schließen lässt. HAKE (1998) legte dann eine Metaanalyse von 6542 Testpersonen aus amerikanischen Highschools, Colleges und Universitäten vor und unterschied zwischen einerseits traditionellen Kursen mit herkömmlichen Vorlesungen, algorithmisch zu lösenden Prüfungen und kochbuchartige zu bearbeitenden Praktika und andererseits „Interactive Engagement“ (IE)-Kursen mit praktischen Tätigkeiten und Diskussionen unter den Lernenden und mit dem Lehrenden. Dabei war der relative Zuwachs bei den 48 IE-Kursen ($g = 0,48 \pm 0,14$) deutlich höher als bei den 14 traditionellen Kursen ($g = 0,23 \pm 0,04$) (HAKE, 1998, S. 65 f. + S. 71). *„Mit der Metastudie von Hake wird der Wandel des FCI vom diagnostischen Test zu einer Art Rating-Koeffizient für Kurse evident“* (Schecker, Gerdes, 1999, S. 78).

SCHECKER und GERDES gingen der Frage nach, ob über den Gesamtwert hinaus Aussagen über das Verständnis bestimmter Teilbereiche der Mechanik getroffen werden können, wozu Reliabilitätsa-

analysen durchgeführt wurden (Schecker, Gerdes, 1999; Gerdes et al., 1999). Wenn die einzelnen Items einer Subskala als eine Menge paralleler Messungen aufgefasst werden können, die alle die gleiche Dimension des zu messenden theoretischen Konstrukts erfassen, dann kann die Reliabilität (als ein Maß für die Messgenauigkeit der Skala des Messinstrumentes) mit Hilfe eines Maßes der internen Konsistenz geschätzt werden (gemessen durch Cronbachs α). Die Höhe des Reliabilitätskoeffizienten ist als statistisches Maß in Form des Korrelationskoeffizienten natürlich wiederum von verschiedenen Bedingungen abhängig, die zur falschen Einschätzung der Reliabilität führen können. Es wurden die Reliabilitäten von 49 Schülern aus vier Leistungskursen im Nachtest (Schecker, Gerdes, 1999, S. 82) und 30 Schülern aus drei Leistungskursen in Vor- und Nachtest (Gerdes, Schecker, 1999, S. 287) veröffentlicht. Es wird dabei jeweils deutlich, dass die Subskalen „Superpositionsprinzip“ und „Arten von Kräften“ eine geringe interne Konsistenzen aufweisen, aber die Subskala „3. newtonsches Gesetz“ und der Gesamtwert eine hohe Konsistenz aufweisen. Während in der zweiten Literaturstelle behauptet wird, dass die verbleibenden drei Subskalen des Tests (= Aspekte des Kraftkonzeptes) inhaltlich zusammenhängende Gruppen bilden, wird in der ersten Literaturstelle (bei ähnlichen Ergebnissen) von geringen Zusammenhängen zwischen den Items gesprochen, so dass Aussagen über Aspekte des Kraftbegriffes problematisch sind (ebenso bei SCHECKER, KLIEME ET AL. (1999, S. 22)), da die Reliabilität der Subskalen nicht über dem in der Psychometrie geforderten Grenzwert 0,7 liegen. Der Vergleich der Ergebnisse aus Vor- und Nachtest zeigt außerdem durch eine Zunahme des Reliabilitätskoeffizienten, dass der Grad der Strukturierung des Kraftkonzeptes steigt. Eine Analyse der Subskalen erlaubt also gewisse Aussagen, doch ist z.T. Vorsicht aufgrund mangelnder Reliabilitäten geboten. SCHECKER und GERDES (1999, S. 84) haben außerdem nach der Testdurchführung noch eine weitere Subskala „Kraftverständnis“ aus sieben wichtigen Items konstruiert, bei der es um den Zusammenhang zwischen Kräften und Bewegung (ohne 3. newtonsches Gesetz) geht und die bei ihnen mit $\alpha = 0,53$ eine höhere Reliabilität als die Subskala „2. newtonsches Gesetz“ ($\alpha = 0,44$) erreicht.

Der Kontext einer Aufgabe beeinflusst, welche Schülervorstellung aktiviert wird. Deshalb ist interessant, wie stark diese Kontextabhängigkeit die Ergebnisse des FCI-Tests beeinflusst. SCHECKER und GERDES (Schecker, Gerdes, 1999, S. 83; Gerdes et al., 1999, S. 287) gaben Schülern Tests, die originale Formulierungen und alternative, aber physikalisch äquivalente Formulierungen mit anderem Kontext enthielten, wobei sich zeigte, dass die Schüler sensibel auf unterschiedliche Formulierungen reagierten. Die größten Unterschiede gab es dabei bei Aufgaben, die eine Abbildung enthielten (z.B. Item 22: Fliegender Fußball statt fliegender Golfball, Item 17 (zweite Version: 12): Waagrechtlicher Wurf durch rutschenden Jungen statt Kanonenkugel). Da die Schüler auch auf Details bildlicher Präsentationen achten, wurde bei der Neuerstellung der Bilder im Rahmen dieser Arbeit darauf geachtet, dass sie sich außer in der Druckqualität nicht unterscheiden. MCCULLOUGH ET AL. (2001) meinen, dass im FCI-Test an Jungen und an der Schule orientierte Kontexte verwendet werden, wohingegen sie physikalisch äquivalente Aufgaben mit an Mädchen und dem täglichen Leben orientierten Kontexten erstellt haben (z.B. Item 17 (12): ein Baby schlägt einen Ball von dem Tisch des Hochstuhls anstelle eines waagrechten Kanonenschusses). Bei zwei Items gab es große, signifikante Unterschiede bei den Studentinnen (Item 23 (14): ein Vogel verliert im Flug einen Fisch an-

statt ein Flugzeug eine Kiste, Item 26 (23): Eine auf Eis rutschende Person schaltet einen Feuerlöscher aus anstatt das Triebwerk einer Rakete im Weltraum wird abgeschaltet). Bei zwei anderen Items gab es große, signifikante Unterschiede bei den männlichen Studenten (Item 12 (29): Tagebuch auf Nachttisch statt Stuhl auf Boden (Version 2) (in Version 1: Buch auf Tisch)). Daraus folgt, dass Ergebnisse bei einzelnen Aufgaben noch keine Schlüsse auf allgemeine Vorstellungen und Antworten bei äquivalenten Aufgaben zulassen.

6.5.1.2 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen

Im Schuljahr 2003/04 haben 13 herkömmlich unterrichtete elfte Klassen aus fünf bayerischen Gymnasien (aus Mittelfranken, Oberfranken und der Oberpfalz) den FCI-Test am Schuljahresbeginn und im letzten Schuljahresdrittel (einige Wochen nach Abschluss des relevanten Unterrichts) durchgeführt (acht Klassen aus dem mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig, in einem Fall Angabe unsicher. In diesem Zweig sind die Lehrer aus Zeitgründen eher zu einem Test bereit). Dabei haben jeweils alle elften Klassen der entsprechenden Schulen teilgenommen. Damit ist nicht nur eine Streuung über verschiedene Schulzweige, sondern auch über unterschiedliche Lehrer gewährleistet. In die Auswertung wurden nur die 258 Schüler aufgenommen, von denen sowohl ein Vortest als auch ein Nachtest vorliegt.

Beschreibung der Gesamtergebnisse:

Da die Lehrer angehalten waren, den Schülern so viel Zeit zu geben, wie diese benötigen, trat nicht wie bei GIRWIDZ, KURZ ET AL. (2003, S. 2) der Effekt auf, dass die späteren Items nicht von allen bearbeitet wurden. Keine Antwort wurde von den Schülern nur dann gegeben, wenn sie sich für keine Lösungsmöglichkeit entscheiden konnten. Beim Nachtest hat im Durchschnitt ein Schüler 0,14 Items (= 0,5 %) nicht beantwortet (oder: ein Item wurde im Durchschnitt von 1,2 Schülern nicht beantwortet). Beim Vortest, bei dem sich die Schüler schwerer taten, hat dagegen ein Schüler im Durchschnitt 0,55 Items (= 1,9 %) nicht beantwortet (oder: ein Item wurde im Durchschnitt von 4,9 Schülern nicht beantwortet). Mit Abstand am häufigsten (6,6 % der Schüler) wurde das Item 28 nicht beantwortet, bei dem es um die Kräfte geht, sie auf eine Kiste wirken, die auf dem Boden mit Reibung und konstanter Geschwindigkeit gezogen wird (Kräftegleichgewicht). Sinnvollerweise wurden in der zweiten Version des FCI-Tests bei diesem Item die Antwortmöglichkeiten einfacher formuliert und ein Teilaspekt in einem getrennten Item abgefragt.

Für jedes richtig gelöste der 29 Items gab es einen Punkt. Das Histogramm der Punkteverteilung beim Vor- und Nachtest zeigt Abb. 6.5. Beim Vortest ergab sich bei den 258 Schülern ein Mittelwert von 8,0 Punkten (= 28 % richtig gelöste Items) (Standardab-

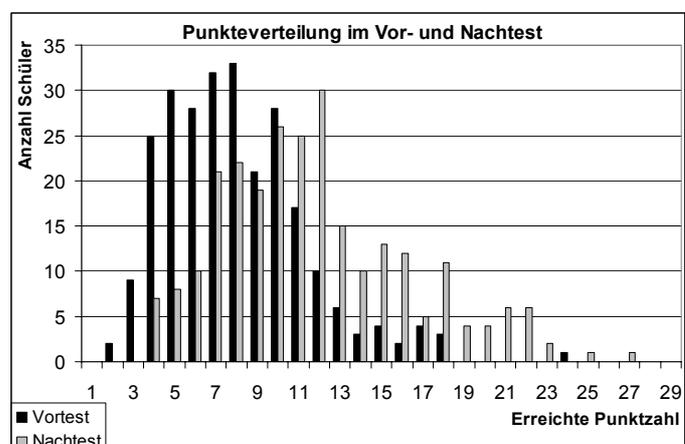


Abb. 6.5: Histogramm der Punkteverteilung in Vor- und Nachtest (Anzahl Schüler, die die jeweilige Anzahl von Items richtig lösten) (258 konventionell unterrichtete bayerische Elftklässler)

weichung: 3,4 Punkte = 12 %), wobei sich die Verteilung von 2 bis 24 Punkten (= 7 % bis 83 %) erstreckt (mehr als sechs Standardabweichungen). Beim Nachtest ergab sich ein Mittelwert von 11,8 Punkten (= 41 %) (mit größerer Standardabweichung: 4,6 Punkte = 16 %), wobei die Verteilung von 4 bis 27 Punkten (= 14 % bis 93 %) reicht (fünf Standardabweichungen). Das ergibt einen relativen Zugewinn der ganzen Gruppe von nur $g = 18 \%$. Ein Vergleich der g -Werte mit GIRWIDZ, KURZ ET AL. (2003, S. 6) ist nicht sinnvoll, da es sich dort um deutsche Studenten handelt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von HAKE (1998, S. 66) zeigt, dass 1113 amerikanische Highschoolschüler aus 14 Highschools auch auf einen Vortestwert von 28 % kommen. Die relativen Zugewinne von Highschools, Colleges und Universitäten liegen bei traditionellem Unterricht jeweils nahe bei 23 % (keine genaueren Angaben vorhanden). Im Gegensatz zum Vorgehen von HAKE wird außer dem relativen Zugewinn der Gruppe (berechnet aus den Mittelwerten bei Vor- und Nachtest) noch zusätzlich der mittlere relative Zugewinn (berechnet aus den relativen Zugewinnen der einzelnen Schüler) berechnet (bei diesem Test immer fast der gleiche Wert), um auch beim Vergleich verschiedener Gruppen Signifikanztests durchführen zu können.

Interessant ist nicht nur die Streuung bei den Schülerergebnissen, sondern auch bei den Klassenergebnissen. Das mittlere Vortestergebnis der Klassen variiert zwischen 21 % und 39 %, das Nachtestergebnis zwischen 27 % und 53 %. Der relative Zugewinn der einzelnen Klassen reicht von 7 % bis 31 % (Mittelwert der Klassenergebnisse: $18,1 \% \pm 7,0 \%$).

Da HESTENES und HALLOUN (1995, S. 505) ein Testergebnis von 60 % richtigen Antworten als Schwelle für ein newtonsches Verständnis ansehen, wurde geschaut, wie viele Schüler 17 oder mehr der 29 Items richtig lösten ($\geq 59 \%$). Dieser Anteil stieg von 3 % der Schüler im Vortest auf lediglich 15 % der Schüler im Nachtest an. Das ist ein bedenkenswert schlechtes Gesamtergebnis.

Analyse auf Itemebene:

Für Lehrer, die ihren Unterrichtserfolg mit wenigen Items abprüfen wollen, ist es wichtig, wie die einzelnen Items beantwortet wurden, weshalb hier noch eine kurze Analyse auf Itemebene gemacht wird. In Abb. 6.6 sind die Vortestergebnisse der einzelnen Items an der Oberkante der schwarzen Säulen abzulesen. Die Säulen für

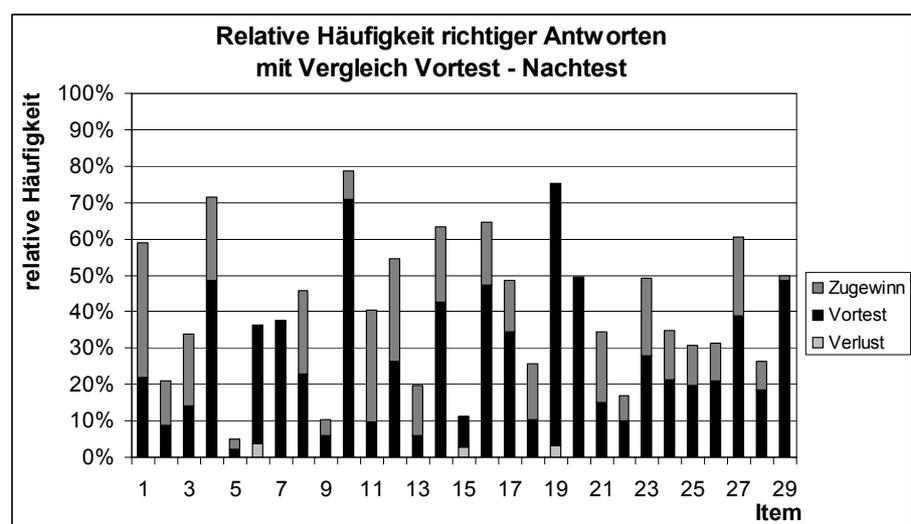


Abb. 6.6: Relative Häufigkeit richtiger Antworten bei den einzelnen Items mit Vergleich von Vor- und Nachtest (258 bayerische Elftklässler)

Zugewinne wurden auf die der Vortests gestellt, während die Säulen für die Verluste an die Grundlinie gestellt wurden. Die Ergebnisse des Nachtests erhält man bei Zugewinn als Summe (= Oberkante graue Säulen) und bei Verlust als Differenz der schwarzen und hellen Säulen.

Beim Vortest reicht der Anteil richtiger Antworten von 2 % (Item 5) bis 75 % (Item 19). Die schwierigsten Items (unter 12 % richtig) waren die Nummern 5, 9, 13, 2, 11, 22, 18 und 15 (siehe Tab. 6.18). Über 50 % richtige Aufgaben gab es nur bei Item 19 (75 %, Bewegungsrichtung bei zwei unterschiedlichen Kräften) und bei Item 10 (Bewegungsrichtung eines Balles, der aus einem kreisförmigen Kanal austritt). Item 19 ist eigentlich schlecht formuliert, denn gemeint ist, in welche Richtung sich die zunächst ruhende Kiste anfangs bewegt; es wird aber der Eindruck erweckt, es ging um die Bahnkurve während einer längeren Bewegung. Dieses Item wurde in der zweiten Version des FCI-Testes weggelassen. Interessant ist, dass das zu Item 10 physikalisch äquivalente Item 4 (Ball wird an Faden herum geschwungen und Faden reißt) deutlich schlechter als das Item 10 ausfällt (48 %).

Item erste (zweite) Version	richtig (Vortest/ Nachtest)	Thema der Aufgabe	Häufigste falsche Antworten, Alltagsvorstellung	Häufigkeit Vortest/ Nachtest
5 (13)	2% / 5%	Kräfte auf eine senkrecht nach oben geworfene Kugel	D: <i>I3. Allmählicher Verlust des Impetus (Dissipation)</i>	60% / 76%
15 (-)	11% / 9%	Fallender und zurückprallender Hartgummiball	A: <i>AF1. Nur aktive Körper üben Kräfte aus.</i>	33% / 38%
9 (11)	6% / 10%	Kräfte bei reibungsfreien Gleiten auf einer Oberfläche	B und C: <i>II. Impetus vermittelt durch „Schlag/Stoß“</i>	47% / 36% 38% / 48%
22 (30)	10% / 17%	Kräfte auf einem fliegenden Golfball	C: <i>II. Impetus vermittelt durch Schlag/Stoß</i>	81% / 72%
13 (15)	6% / 20%	Kräfte zwischen Fahrzeugen (leichtes schiebt schweres beschleunigt an)	C: <i>AR2. Der aktivste Körper produziert die größte Kraft</i>	68% / 68%
2 (4)	9% / 21%	Kräfte beim Zusammenstoß zweier unterschiedlich schwerer Fahrzeuge	A: <i>AR1. Größere Masse impliziert größere Kraft</i>	84% / 76%
18 (17)	10% / 26%	Kräfte auf einen Aufzug bei konst. Steiggeschwindigkeit	A: <i>AF2. Bewegung impliziert aktive Kraft</i>	49% / 50%
28 (-)	19% / 26%	Kraft auf Kiste auf Boden mit Reibung bei $v = \text{konstant}$	D: <i>AF2. Bewegung impliziert aktive Kraft</i>	41% / 52%

Tab. 6.18: Die acht schwierigsten Aufgaben (im Nachtest weniger als 30 % der Schüler richtig) und die entsprechenden Fehlkonzepte (Index nach HESTENES ET AL. (1992), S. 144, Übersetzung von GERDES, SCHECKER (1999), S. 285) mit Angabe der Häufigkeiten der richtigen und häufig falschen Antworten in Vor- und Nachtest (13 bayerische elfte Klassen, 258 Schüler, eigene Erhebung) (Anteil an allen Schülern, nicht Anteil an abgegebenen Antworten)

Beim Nachtest reichte der Anteil richtiger Antworten von 5 % (Item 5) bis 79 % (Item 10). Interessant sind insbesondere die am schlechtesten bearbeiteten Aufgaben und die hinter den falschen Antworten stehenden Fehlvorstellungen. Die Items, die von weniger als 30 % der Schüler richtig beantwortet wurden, findet man in Tab. 6.18 einschließlich der relevanten Fehlvorstellungen. Über 70 % richtige Antworten gab es wieder bei Item 10 und 19 sowie nun bei dem zu Item 10 äquivalentem Item 4.

In Abb. 6.6 sind auch die absoluten Veränderungen durch den Unterricht ablesbar. Überraschend ist, dass es vier Items gibt, bei denen sich die Schüler sogar leicht verschlechtert haben (Nr. 6, 19, 15 und 7). Der Zugewinn ist damit bei den einzelnen Items zwischen -4 Prozentpunkten (Nr. 6) und 37 Prozentpunkten (Nr. 1).

Da aber der absolute Zugewinn nur in Zusammenhang mit dem Vortestwert aussagekräftig ist, wurde wie bei GIRWIDZ, KURZ ET AL. (2003) ein relativer Zugewinn I_g pro Item berechnet (siehe Abb. 6.7). Der g -Wert von HAKE (1998, S. 65) bezieht sich auf den relativen Zugewinn an Punkten einer Gruppe bei allen Items: Zugewinn an Punkten oder Prozentpunkten durch möglichen Zugewinn. Der I_g -Wert von GIRWIDZ ET AL. bezieht sich auf den relativen Zugewinn an richtig antwortenden Schülern bei einem Item: Zugewinn an Schülern durch möglichen Zugewinn.

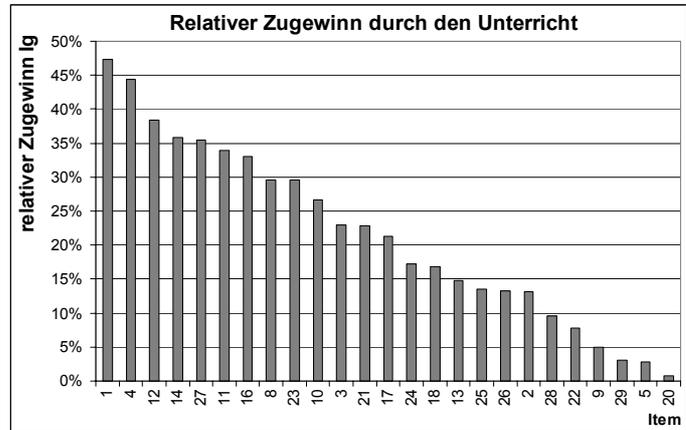


Abb. 6.7: Relativer Zugewinn durch herkömmlichen Unterricht (N = 258) bei den Items mit positivem Zugewinn

Größere relative Zugewinne von über 40 % gab es nur bei dem Item 4 ($I_g = 44$ %, siehe Beschreibung oben) und Item 1 ($I_g = 47$ %). Bei Item 1 wurde nach den Fallzeiten zweier gleich großer, aber unterschiedlich schwerer (Faktor 2) Metallkugeln gefragt, die von einem Gebäudedach fallen (ein Rechenbeispiel mit Luftreibung (und Auftrieb) ergibt für 4 m Fallhöhe nur sehr geringe Differenzen in der Fallzeit). Beim Vortest antworteten 60 % entsprechend der Alltagserfahrung, dass die schwerere Kugel deutlich weniger Zeit braucht, aber nur 16 % behaupten es sei die Hälfte (24 %: etwa gleiche Zeit). Beim Nachtest geben nun 59 % die hier richtige Antwort, dass beide ungefähr gleich lange brauchen (24 %: schwere deutlich weniger, 16 %: schwere die Hälfte). Unklar ist, ob die Schüler nun meinen, alle Körper fallen gleich schnell, oder ob sie eine Vorstellung haben, wann sich die Luftreibung wie stark auswirkt.

Die Items, bei denen der relative Zugewinn I_g kleiner als 4 % ist, findet man in Tab. 6.19 einschließlich der relevanten Fehlvorstellungen. Es handelt sich dabei um die Items, die resistent gegenüber dem herkömmlichen Unterricht sind, wobei es große Unterschiede zwischen den Häufigkeiten gibt. Die Items 19, 20 und 29 haben zwar nur sehr geringe Zugewinne, schneiden aber beim Vortest mit am Besten ab, während die Items 5 und 15 außerdem bei Vor- und Nachtest sehr schlecht abschneiden. Zu Item 5 ist auch das Ergebnis in Kapitel 6.4.3.1, 3. Teil zu berücksichtigen, da dort die Schüler bei der identischen Situation, aber ohne Antwortalternativen in Textform häufiger richtig antworten, d.h. die Distraktoren dieser Aufgabe sind sehr attraktiv.

Item erste (zwei- te) Version	richtig (Vortest/ Nachttest)	Thema der Aufgabe	Häufigste falsche Antworten, Alltagsvorstellung	Häufigkeit Vortest/ Nachttest
19 (-)	75% / 72%	Bewegungsrichtung bei unterschiedlichen Kräften	A: C11. Größte Kraft bestimmt Bewegung C: C12. Kraft-Kompromiss bestimmt Bewegung	13% / 12% 7% / 12%
6 (8)	36% / 33%	Bahnkurve einer Scheibe nach einem senkrechten Kick	D: I4. gradueller/verzögerter Impulsaufbau/-gewinn	34% / 36%
15 (-)	11% / 9%	Fallender und zurückprallender Hartgummiball	A: AF1. Nur aktive Körper üben Kräfte aus.	33% / 38%
7 (9)	38% / 37%	Tempo einer Scheibe nach einem senkrechten Kick	B und C: K3. Keine vektorielle Zusammensetzung von Geschwindigkeit	27% / 17% 13% / 23%
20 (19)	49% / 50%	Geschwindigkeitsvergleich anhand von Stroposkopbildern	D: K1. Ort-Geschwindigkeit nicht unterschieden A: K2. Geschwindigkeit-Beschleunigung nicht unterschieden	19% / 23% 21% / 17%
5 (13)	2% / 5%	Kräfte auf eine senkrecht nach oben geworfene Kugel	D: I3. Allmählicher Verlust des Impetus (Dissipation)	60% / 76%
29 (27)	48% / 50%	Bewegungsart nur unter Einfluss von konstanter Reibung	B: I3. allmählicher Verlust des Impetus (Dissipation)	29% / 33%

Tab. 6.19: Die sieben resistantesten Aufgaben (relativer Zugewinn I_g unter 4 %) und die entsprechenden Fehlkonzepte (Index nach Hestenes et al. (1992), S. 144, Übersetzung von Gerdes, Schecker (1999), S. 285) mit Angabe der Häufigkeiten der richtigen und häufig falschen Antworten in Vor- und Nachttest (13 bayerische elfte Klassen, 258 traditionell unterrichtete Schüler, eigene Erhebung) (Anteil an allen Schülern, nicht Anteil an abgegebenen Antworten)

Analyse von Subskalen:

Will man verschiedene Klassen oder Unterrichtskonzepte vergleichen, ist der Vergleich bei den einzelnen Items schwierig und nicht notwendigerweise aussagekräftig. Um nicht nur das Gesamtergebnis vergleichen zu können, könnte man bei aller gebotener Vorsicht die von HESTENES ET AL. (1992, S. 142) vorgeschlagenen Subskalen, die von SCHECKER und GERDES (1999, S. 84) vorgeschlagene Subskala oder andere Subskalen analysieren. Wie bei HUFFMAN und HELLER (1995) bzw. HELLER und HUFFMAN (1995) findet man beim Nachttest aber keine oder sehr schwache Korrelationen zwischen den einzelnen Items (von den 406 Korrelationskoeffizienten liegen nur sieben über 0,3 und nur 29 weitere über 0,2) und bei einer Faktorenanalyse nach der Hauptkomponentenmethode mit Varimax-Rotation findet man nur wenige Faktoren, die außerdem nicht den Subskalen entsprechen. Eine Faktorenanalyse (mit SPSS) bei den nur 258 Schülern (Nachttest, dichotome Auswertung) ergibt (sowohl nach einem Scree-Test als auch, wenn ein Faktor 5 % der Gesamtvarianz erklären muss) vier Faktoren: Die Faktoren 1 und 3 sind nicht interpretierbar, Faktor 2 (Item 2, 3, 11 und 13) entspricht fast der Subskala „3. newtonsches Axiom“ und Faktor 4 besteht aus den physikalisch äquivalenten Items 6 und 26. Werden zu der Faktorenanalyse weit mehr Schülerantworten hinzugenommen (Vor- und Nachttest, Vergleichs- und Treatmentgruppen) ergeben sich auch bei 970 Schülerantworten nur drei nicht interpretierbare Faktoren. Dennoch werden im Folgenden die nach

physikalischen Gesichtspunkten erstellten Subskalen gemäß HESTENES ET AL. (1992, S. 142) und SCHECKER, GERDES (1999, S. 84) analysiert.

Wie bei GERDES, SCHECKER (1999, S. 287) nehmen die Reliabilitäten der Subskalen (Cronbachs α) von Vor- zu Nachtest zu, sind aber in der Regel unter 0,7 (siehe Tab. 6.20, linker Teil). Wie HESTENES und HALLOUN (1995) bemerken, haben Schüler, die nicht über das newtonsche Konzept verfügen, keine konsistente Alltagstheorie. Deshalb liegen die Reliabilitäten beim Vortest noch recht niedrig und steigen mit zunehmendem newtonschen Verständnis in der untersuchten Gruppe. Es ergeben sich bei den Nachtestwerten in der Regel leicht geringere Werte als bei SCHECKER und GERDES (1999, S. 82), nur bei den Subskalen „3. Newton“ und „Kraftverständnis“ sind die Nachtestwerte deutlich geringer. Bei den in Kapitel 6.5.1.3 diskutierten Nachtestwerten der Treatmentgruppe ergeben sich allerdings außer beim Gesamtwert auch bei den Subskalen „1. Newton“, „Arten von Kräften“ und „Kraftverständnis“ Reliabilitäten in der Größe von $\alpha \approx 0,7$.

Subskala	Anzahl Items	Reliabilität α			Mittelwert Vortest	Mittelwert Nachtest	relativer Zugewinn g
		im Vortest	im Nachtest	bei Treatmentgruppe			
Gesamt	29	0,61	0,75	0,80	28 % ± 12 %	41 % ± 16 %	18 % (± 18 %)
Kinematik	6	0,38	0,50	0,57	28 %	39 %	15 %
1. Newton	8	0,46	0,54	0,67	33 %	47 %	20 %
2. Newton	4	0,17	0,31	0,41	29 %	34 %	7 %
3. Newton	4	0,21	0,51	0,61	17 %	36 %	23 %
Superposition	4	0,26	0,18	0,34	28 %	34 %	8 %
Arten von Kräften	12	0,37	0,51	0,67	22 %	36 %	18 %
Kraftverständnis	7	0,23	0,35	0,68	14 %	25 %	13 %

Tab. 6.20: Mittelwerte von Vortest, Nachtest und relativen Zugewinn bei den einzelnen Subskalen bei traditioneller Unterricht an bayerischen Gymnasien im Schuljahr 2003/04 (N = 258, 13 Klassen) sowie Cronbachs α bei Vor- und Nachtest und bei der Treatmentgruppe (N = 138, 7 Klassen) (Eigene Erhebungen)

Wie man in Tab. 6.20 (rechter Teil) sieht, sind die relativen Zugewinne bei allen Subskalen recht gering. Am Geringsten sind die relativen Zugewinne bei der Subskala „2. newtonsches Axiom“ (7%), obwohl das zweite newtonsche Gesetz den Kern des newtonschen Kraftkonzeptes bildet. Ebenso sind die relativen Zugewinne bei der Subskala „Superposition“ sehr gering (8 %), was dadurch mitbedingt sein könnte, dass im herkömmlichen Unterricht fast nur eindimensionale Bewegungen betrachtet werden.

Subgruppenanalysen:

Subgruppen nach Vorwissen			Mittelwert			
Beschreibung	erreichte Punktezahl	Anzahl Schüler	Vortest richtig	Nachtest richtig	Zugewinn	relativer Zugewinn
Unteres Drittel	bis 6	94	16 %	33 %	16,2 %	19 %
Mittleres Drittel	7 bis 9	86	27 %	39 %	11,4 %	16 %
Oberes Drittel	10 oder mehr	78	42 %	52 %	10,5 %	19 %

Tab. 6.21: Ergebnisse der im Vortest schwachen, mittleren und guten Schüler bei konventionellem Unterricht in Bayern (N = 258, 13 Klassen). Relativer Zugewinn hier als Mittelwert der individuellen relativen Zugewinne. (Eigene Erhebung)

Aus der Lernpsychologie weiß man, dass derjenige leichter und schneller bedeutungshaltig lernt, der schon mehr relevantes Vorwissen mitbringt (Renkl, 2002, S. 592) (Wissens-Paradox). Deshalb wurden zum einen die Schüler aufgrund ihrer Vortestergebnisse in drei ungefähr gleich große Gruppen eingeteilt und deren Mittelwerte berechnet und zum anderen Korrelationen in der Gesamtgruppe zwischen verschiedenen Werten berechnet. Wie man Tab. 6.21 und Abb. 6.8 entnehmen kann, korrelieren die Vortestergebnisse mittelstark mit den Nachtestergebnissen. Allerdings korrelieren die Vortestergebnisse schwach negativ mit dem Zugewinn. Dies wird verständlich, wenn man bedenkt, dass es bei guten Vortestergebnissen schwieriger als bei schlechten Vortestergebnissen ist (evtl. sogar unmöglich), den gleichen absoluten Zugewinn zu erreichen. Deshalb wird der relative Zugewinn der einzelnen Schüler (absoluter Zugewinn bezogen auf den noch möglichen Zugewinn) betrachtet. Hier ist keine Korrelation zwischen Vortestergebnis und relativen Zugewinn zu erkennen und ein Kruskal-Wallis-Test ergibt entsprechend, dass die Hypothese, dass die Mittelwerte der relativen Zugewinne in den drei Gruppen gleich sind, nicht abgelehnt werden kann. D.h. es besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Vortestergebnissen und dem relativen Zugewinn.

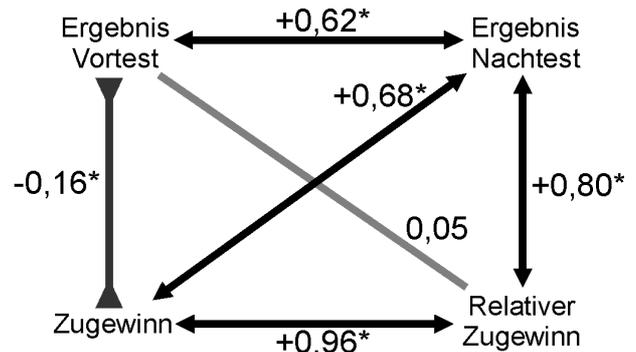


Abb. 6.8: Korrelationen zwischen verschiedenen Werten (N = 258, 13 Klassen)

Schließlich ist noch interessant, inwieweit es Unterschiede zwischen den Geschlechtern gibt (siehe Tab. 6.22). 122 Schülerinnen und 81 Schüler haben ihr Geschlecht angegeben. Dabei sind die männlichen Schüler sowohl im Vor- als auch im Nachtest signifikant besser (unabhängiger t-Test, 0,001-Niveau). Beide Gruppen verbessern sich signifikant (abhängiger t-Test, 0,001-Niveau). Der relative Zugewinn ist bei den Jungen aber nur leicht und nicht signifikant höher.

Schließlich ist noch interessant, inwieweit es Unterschiede zwischen den Geschlechtern gibt (siehe Tab. 6.22). 122 Schülerinnen und 81 Schüler haben ihr Geschlecht angegeben. Dabei sind die männlichen Schüler sowohl im Vor- als auch im Nachtest signifikant besser (unabhängiger t-Test, 0,001-Niveau). Beide Gruppen verbessern sich signifikant (abhängiger t-Test, 0,001-Niveau). Der relative Zugewinn ist bei den Jungen aber nur leicht und nicht signifikant höher.

Subgruppe	Vortest	Nachtest	relativer Zugewinn g
Gesamt weiblich (N = 122)	24 % * ^o ± 9 %	37 % * ^o ± 15 %	17 % ± 17 %
Gesamt männlich (N = 81)	32 % * ^o ± 13 %	45 % * ^o ± 17 %	19 % ± 20 %

Tab. 6.22: Vergleich der FCI-Ergebnisse bei den beiden Geschlechtern. Ein * gibt an, dass sich der Wert signifikant von dem entsprechenden Wert des anderen Geschlechtes unterscheidet, ein ^o gibt an, dass sich Vor- und Nachtest signifikant unterscheiden (0,001-Niveau).

6.5.1.3 Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich

Der FCI-Fragebogen wurde allen 13 Lehrern, die an der Evaluation teilnahmen, für ihre 17 Klassen (elfte Jahrgangsstufe, ganze Klassen ohne Kurssystem) gegeben. Aus Zeitgründen wurde er jedoch nur in elf Klassen als Vor- und Nachtest durchgeführt. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die sieben Klassen, deren Lehrer am Begleitseminar teilnahmen und sich nach eigenen Aussagen an die Grundideen des Konzeptes hielten (davon fünf Klassen aus dem mathematisch-naturwissenschaftlichem Zweig, d.h. dieser Anteil ist nur minimal höher als in der Vergleichsgruppe). Es wurden dabei nur die 138 Schüler berücksichtigt, die an Vor- und Nachtest teilnahmen. Getrennt analysiert wurden die vier Klassen, deren Lehrer nicht am Seminar teilnahmen, sondern le-

diglich teilweise nach der Materialien-CD unterrichteten. Bei den sieben Klassen dieser Analyse (sechs Lehrer) wurde jedoch nicht überprüft, ob sie tatsächlich entscheidende Prinzipien des Unterrichtskonzeptes umsetzten (z.B. Nutzung von dynamisch ikonischen Repräsentationen und das Einfordern von Vorhersagen).

Beschreibung der Gesamtergebnisse:

Alle 138 Schüler haben jeweils alle Items auch tatsächlich beantwortet. Das Histogramm der Punkteverteilung beim Vor- und Nachtest zeigt Abb. 6.9. Beim Vortest ergab sich bei den Schülern ein Mittelwert von 9,8 Punkten (= 34 % richtig gelöste Items) (Standardabweichung: 3,8 Punkte = 13 %), wobei die Verteilung von 2 bis 21 Punkten (= 7 % bis 72 %) geht

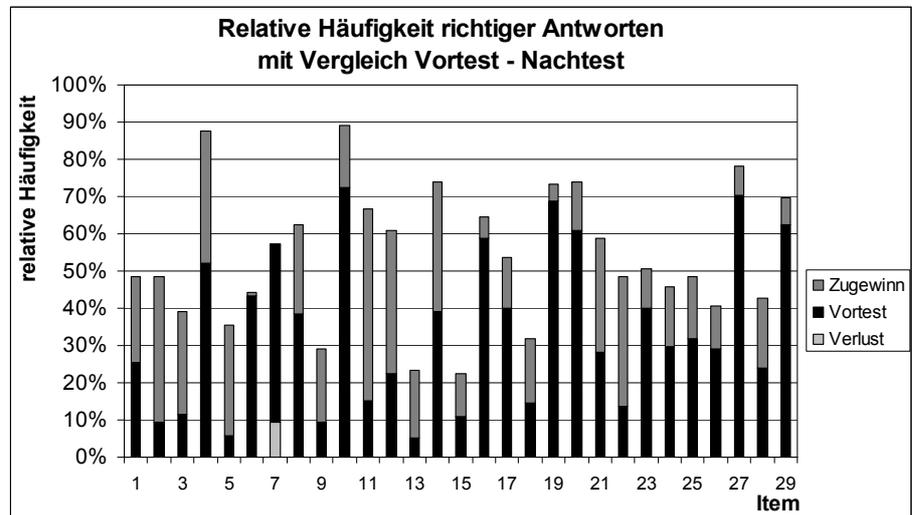


Abb. 6.9: Relative Häufigkeit richtiger Antworten bei den einzelnen Items mit Vergleich von Vor- und Nachtest (138 Schüler der Treatmentgruppe)

(mehr als fünf Standardabweichungen). Damit sind diese Schüler im Mittel um 1,8 Punkte oder 6 Prozentpunkte besser als die Vergleichsgruppe, was auf dem Niveau von 0,01 signifikant ist (unabhängiger t-Test). Beim Nachtest ergab sich ein Mittelwert von 15,5 Punkten (= 53 %) (mit großer Standardabweichung: 5,3 Punkte = 18 %), wobei die Verteilung von 3 bis 29 Punkten (= 10 % bis 100 %) geht (fünf Standardabweichungen). Damit unterscheidet sich die Treatmentgruppe signifikant auf dem strengen Niveau von 0,001 von der Vergleichsgruppe (Mann-Whitney-U-Test, da nicht normalverteilt), die im Nachtest nur auf durchschnittlich 11,8 Punkte (= 41 %) kam. Die Treatmentgruppe erreicht damit einen relativen Zugewinn nach HAKE von $g = 29,7\%$. Vergleicht man die individuellen relativen Zugewinne der Schüler, stellt man fest, dass der Unterschied der Mittelwerte zwischen der Treatmentgruppe (31,0 %) und der Vergleichsgruppe (17,8 %) ebenso signifikant (0,001-Niveau, t-Test) ist.

Das Vortestergebnis der einzelnen Klassen geht in der Treatmentgruppe von 24 % bis 41 % und das Nachtestergebnis von 41 % bis 57 %. Damit variiert der relative Zugewinn der Klassen zwischen 22% und 34 %. Dabei fällt wieder auf, dass wie in Kapitel 6.4.2.4 die beiden Klassen des einen Lehrers sehr stark differieren. Während die eine Klasse auch im FCI-Test am schlechtesten von der Treatmentgruppe abschließt, unterscheidet sich die andere bei ähnlichem Unterricht nur minimal von der besten Klasse.

Hier ist nun die Effektstärke (Verhältnis von Differenz der Testergebnisse der beiden Gruppen zu gewichteten Standardabweichungen) interessant (siehe Kapitel 6.4.1.2). Die Treatment-Effektstärke bei dem Nachtestergebnis bei allen Aufgaben beträgt $d = 0,77$. Betrachtet man statt den Nachtestergebnissen den relativen Zugewinn der einzelnen Schüler in beiden Gruppen, ergibt sich eine Treat-

ment-Effektstärke beim relativen Zugewinn bei allen Aufgaben von 0,66. Dies kann nach HÄUBLER ET AL. (1998, S. 157 f.) jeweils als ein relativ hoher Effekt bezeichnet werden. Nach HÄUBLER ET AL. (1998, S. 151) ist ein Lernerfolg ab einer Effektstärke von $d = 0,46$ pädagogisch interessant. Besser ist, bei dem Test aus inhaltlichen Überlegungen heraus festzulegen, welcher Gesamtwert wünschenswert ist. So sehen HESTENES und HALLOUN (1995, S. 505) ein Testergebnis von 60 % richtigen Antworten als Schwelle für ein newtonsches Verständnis an. Der Anteil der Schüler, die 17 oder mehr der 29 Items richtig lösten ($\geq 58,6\%$), stieg von 7 % der Schüler im Vortest auf 42 % im Nachtest an (siehe Tab. 6.23). Damit hat dieser Anteil von Schülern einen relativen Zugewinn von 38 % gegenüber nur 13 % bei herkömmlich unterrichteten Klassen, er ist also ca. dreimal so hoch.

	Traditioneller Unterricht 2003/04 (N = 258, 13 Klassen)			Unterricht nach Konzept, <i>Treatmentgruppe</i> , 2002/03 (N = 138, 7 Klassen)		
	Vortest	Nachtest	rel. Zugewinn	Vortest	Nachtest	rel. Zugewinn
Anteil Schüler mit $\geq 58\%$ richtig	3 %	16 %	13 %	7 %	42 %	38 %
Anteil Schüler mit $\geq 62\%$ richtig	2 %	14 %	12 %	4 %	38 %	36 %

Tab. 6.23: Anteil Schüler, die 17 bzw. 18 oder mehr Fragen richtig beantwortet haben

Der gleiche FCI-Test (erste Version) wurde von SCHECKER und GERDES (1999, S. 80 ff.) bei Leistungskursen in Bremen eingesetzt. Die beiden (konventionell unterrichteten) Leistungskurse der Kontrollgruppe (N = 26) erreichten dort mit 53,7 % so gut wie den gleichen Nachtestwert wie die Treatmentgruppe dieser Untersuchung (53,4 %). Die beiden Leistungskurse der Versuchsgruppe (N = 23), bei der die Schüler in Gruppenarbeit Modellbildung durchführten, beantworteten allerdings nur 48,7 % der FCI-Items richtig. Da es sich in Bremen um Leistungskurse handelt (5 Unterrichtswochenstunden, 6-8 Wochen Kinematik, 4-5 Wochen Dynamik) (Schecker, 1998a, S. 230), ist ein Vergleich wegen dem größeren Interesse der Leistungskursschüler nur bedingt sinnvoll (Treatmentgruppe: 2 bzw. 3 Unterrichtswochenstunden, ca. 15 Std. Kinematik, ca. 20 Std. Dynamik). Dennoch ist es beachtlich, dass die Treatmentgruppe in Würzburg (ganze Klassen) auf gleiche bzw. höhere Werte als die Bremer Leistungskurse kommt.

Schließlich wurde noch ermittelt, ob es beim FCI-Test bei den Treatmentklassen einen Unterschied macht, ob mit oder ohne graphische Modellbildung unterrichtet wurde. Während in vier Treatmentklassen, die am FCI-Test teilnahmen, mit Modellbildung unterrichtet wurde (76 Schüler), wurde in drei Treatmentklassen darauf verzichtet (62 Schüler). Ein unabhängiger t-Test ergibt, dass sich die Mittelwerte der individuellen relativen Zugewinne der Schüler bei diesen beiden Gruppen (32 % versus 30 %) nicht signifikant unterscheiden (5 %-Niveau). In Kapitel 4.5.3.3 und Kapitel 6.5.3 wird anhand von Concept Maps gefolgert, dass die graphische Modellbildung das strukturelle Verständnis fördert. Demgegenüber kann aus dem FCI-Test geschlossen werden, dass bei den Schülern der Treatmentgruppe durch die zusätzliche Modellbildung nicht zusätzliches situatives Verständnis

zum Lösen anwendungsbezogener, alltagsnaher Probleme gefördert wird. Dieses Verständnis ist unabhängig von der Modellbildung größer als in der traditionell unterrichteten Vergleichsgruppe.

Analyse auf Itemebene:

Im Folgenden sollen noch kurz die Items genannt werden, bei welchen sich die relativen Zugewinne I_g bei Vergleichs- und Treatmentgruppe um mehr als 20 Prozentpunkte unterscheiden (siehe Tab. 6.24). Das sind fast alle Items (2, 11, 14) zum dritten newtonschen Gesetz, das anders als herkömmlich unterrichtet wurde (Kapitel 5.3.5); dabei spielte die Messwerterfassung mit dem PC und die dynamische Darstellung mit Graphen sowie (statische) ikonische Repräsentationen mit Vektorpfeilen eine wichtige Rolle. Verstehbar ist auch, dass die Schüler bei den kinematischen Aufgaben 20 und 21 deutlich besser sind, bei denen Geschwindigkeit und Beschleunigung aus Stroboskopbildern entnommen werden sollen: Neben einem besseren Verständnis der kinematischen Begriffe kann hier auch mitwirken, dass bei zweidimensionalen Bewegungen auch mit Zeitmarken (in anderer Darstellung) gearbeitet wurde (Kapitel 5.3.1 bis 5.3.3). Des Weiteren sind die beiden äquivalenten Items 4 und 10 zum ersten newtonschen Gesetz bei vorausgehender Drehbewegung zu nennen, bei denen sich der Körper beim Loslassen mit der augenblicklichen tangentialen Geschwindigkeit (nicht Schnelligkeit) weiterbewegt. Bei Aufgabe 19, bei der die vektorielle Summe der beiden Kräfte gebildet werden muss, macht sich evtl. bemerkbar, dass bei der Kinematik (Kapitel 5.3.1 bis 5.3.3) und bei der eindimensionalen Dynamik (Kapitel 5.3.4.2) auch häufig Vektoren mit ihren Richtungen addiert wurden. Die Items 22 und 5 betreffen Wurfbewegungen, wobei bereits in Kapitel 6.4.3.2 dargelegt wurde, dass die Schüler der Treatmentgruppe bei einer Aufgabe wie Item 5 die Beschleunigung deutlich häufiger richtig angeben.

Item erste (zweite) Version	Thema des Items	<i>Vergleichsgruppe</i> Vortest/Nachtest/ relativer Zugewinn I_g	<i>Treatmentgruppe</i> Vortest/Nachtest/ relativer Zugewinn I_g
10 (6)	1. Newton	71% / 79% / 27%	72% / 89% / 61%
22 (30)	Wurf	10% / 17% / 8%	14% / 49% / 40%
20 (19)	Kinematik	49% / 50% / 1%	61% / 74% / 33%
2 (4)	3. Newton	9% / 21% / 13%	9% / 49% / 43%
4 (7)	1. Newton	48% / 71% / 44%	52% / 88% / 74%
5 (17)	Wurf	2% / 5% / 3%	6% / 36% / 32%
11 (28)	3. Newton	10% / 40% / 34%	15% / 67% / 61%
19 (-)	Richtung der Resultierenden	75% / 72% / -13%	69% / 73% / 14%
14 (16)	3. Newton	43% / 63% / 36%	39% / 74% / 57%
21 (20)	Kinematik	15% / 34% / 23%	28% / 59% / 42%

Tab. 6.24: Die Aufgaben mit den größten Unterschieden im relativen Zugewinn I_g (Differenz über 20 Prozentpunkte) zwischen Vergleichs- und Treatmentgruppe mit Angabe der Häufigkeiten der richtigen Antworten in Vor- und Nachtest (eigene Erhebung)

Analyse der Subskalen:

Schließlich sollen noch die Unterschiede in den Subskalen betrachtet werden (Tab. 6.25). Dabei ist zu beachten, dass keine hohen Reliabilitäten vorliegen und die Subskalen aus Schülersicht nicht die Konzepte abtesten, die sie vorgeben. Dennoch zeigen sie, wie Schüler auf eine Gruppe spezieller FCI-Aufgaben antworten. Dabei zeigt sich, dass die Treatmentgruppe im Vortest bereits bei allen

Subskalen (außer 3. newtonsches Axiom) etwas besser als die Vergleichsgruppe ist, wobei der Unterschied bei vier der sieben Subskalen signifikant (0,01-Niveau) ist. Beim Nachttest ist der Unterschied zur Vergleichsgruppe bei allen Subskalen noch größer, was auf dem strengen Niveau von 0,001 signifikant ist. Auch der relative Zugewinn (als Mittelwert der relativen Zugewinne der einzelnen Schüler) ist bei der Treatmentgruppe bei allen Subskalen größer und in vier der sieben Subskalen auf dem Niveau von 0,001 signifikant („1. newtonsches Axiom“ auf 0,01-Niveau signifikant); nur bei den Subskalen „Kinematik“ und „2. newtonsches Axiom“ ist der Unterschied beim relativen Zugewinn nicht signifikant.

Subskala	Traditioneller Unterricht 2003/04 (N = 258, 13 Klassen)			Unterricht nach Konzept, <i>Treatmentgruppe</i> , 2002/03 (N = 138, 7 Klassen)			Effekt- stärke beim Nachttest
	Vortest	Nachttest	rel. Zu- gewinn g	Vortest	Nachttest	rel. Zu- gewinn g	
Gesamt	28 % ± 12 %	41 % ± 16 %	18 % ± 18 %	34 %* ± 13 %	53 %* ± 18 %	31 %* ± 22 %	0,77
Kinematik	28 %	39 %	15 %	40 %*	53 %*	21 %	0,50
1. Newton	33 %	47 %	20 %	43 %*	60 %*	29 %	0,57
2. Newton	29 %	34 %	7 %	38 %*	44 %*	10 %	0,37
3. Newton	17 %	36 %	23 %	17 %	53 %*	43 %*	0,58
Superposition	28 %	34 %	8 %	29 %	44 %*	21 %*	0,44
Arten von Kräften	22 %	36 %	18 %	26 %*	46 %*	27 %*	0,56
Kraftverständnis	14 %	25 %	13 %	17 %	42 %*	30 %*	0,77

Tab. 6.25: Mittelwerte von Vortest, Nachttest und relativen Zugewinn bei den einzelnen Subskalen, Vergleich zwischen traditionellem Unterricht an bayerischen Gymnasien im Schuljahr 2003/04 (N = 258, 13 Klassen) und der Treatmentgruppe (N = 138, 7 Klassen) (Eigene Erhebungen). Ein * gibt an, dass sich der Wert signifikant von dem entsprechenden Werte der Vergleichsgruppe unterscheidet (0,01-Niveau bei Vortest, 0,001-Niveau bei Nachttest und relativen Zugewinn) (in der Regel unabhängiger t-Test. Wenn nicht normalverteilt, auch Mann-Whitney-U-Test).

Interessant ist auch der Unterschied (zwischen den zwei Gruppen) beim Nachttest im Verhältnis zur Streuung. Die größte Effektstärke gibt es bei der von SCHECKER und GERDES (1999, S. 84) konzipierten Subskala „Kraftverständnis“, die mit $d = 0,77$ hoch ist. Auch bei den Subskalen „3. newtonsches Gesetz“ ($d = 0,58$) und „1. newtonsches Gesetz“ ($d = 0,57$) ergibt sich noch eine relativ hohe Effektstärke. Am niedrigsten und schlechter als erwartet ist das Ergebnis bei der Subskala „2. newtonsches Gesetz“, bei dem sowohl der relative Zugewinn als auch die Effektstärke gering sind. Den Sinn dieser Subskala, die aus nur zwei Aufgabenpaaren besteht, kann man aber mit SCHECKER und GERDES (1999, S. 83) bezweifeln und stattdessen die Subskala „Kraftverständnis“ betrachten.

Analyse weiterer Klassen:

Im Schuljahr 2002/03 haben auch vier Lehrer in vier weiteren Klassen nach dem Unterrichtskonzept dieser Arbeit unterrichtet, die nur die Materialien-CD bekamen, aber an keinem Seminar teilnahmen und nicht persönlich instruiert wurden. Die beiden außerbayerischen Lehrer haben sich dabei nicht sehr an das Konzept gehalten und von den beiden bayerischen Lehrern lagen wenige Rückmeldungen vor, so dass sie nicht in die Auswertung aufgenommen werden konnten, da sichergestellt sein sollte, dass entsprechend den Ideen des Unterrichtskonzeptes unterrichtet wurde. Der

Grundkurs eines außerbayerischen Lehrers, der sich nur in der Kinematik ungefähr an das Konzept hielt, hat einen Verlust von 0,4 Prozentpunkten von Vor- zu Nachtest erreicht. Die anderen drei Klassen haben sich von 28 % auf 41 % verbessert, (relativer Zugewinn: 18 %), was genau dem Durchschnitt traditioneller Klassen entspricht. Daraus könnte man schließen, dass zu einem erfolgreichen Umgang mit den erstellten Materialien ein Lehrertraining notwendig ist. Die Effekte der Treatmentgruppe sind möglicherweise nur auf die Kombination von Unterrichtsmaterialien und Lehrertraining zurückzuführen, was nicht überprüft werden konnte.

6.5.2 Aufgaben zur eindimensionalen Dynamik

6.5.2.1 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen bei Textaufgaben zur Kraft

Aufgaben zur eindimensionalen Dynamik sind auch in dem Fragebogen „Fragen zu Kraft und Bewegung“ von THORNTON enthalten (Der Originalfragebogen findet sich in THORNTON (1996), die dynamischen Aufgaben mit Textantworten außerdem in SOKOLOFF, THORNTON (1997)). Wie im Kinematikteil werden auch hier Fragen zu einer größeren Zahl physikalisch ähnlicher bzw. physikalisch sich entsprechenden Situationen gestellt. Allgemeine Informationen zum Aufbau des Tests, der Überarbeitung, der Gestaltung und den Varianten anderer Autoren findet man im Kapitel 6.4.2.1.

Im Aufgabenblock „Krafttextaufgaben“ wird ein Schlitten betrachtet, der sich reibungsfrei auf einer Eisfläche bewegen kann. Es handelt sich hier also um eine Idealisierung, wie sie in der Physik und im Physikunterricht üblich ist, um „reine Phänomene“ zu erhalten, die sich in der Wirklichkeit nie verwirklichen lassen. Hier wurde jedoch eine Situation aus der realen Welt gewählt, die dieser Idealisierung sehr nahe kommt, damit die Schüler möglichst wenige Probleme mit dem Gedankenexperiment haben. In den einzelnen Items bewegt sich der Schlitten nun nach rechts oder links und es ist nach der Kraft gefragt, die benötigt wird, damit sich der Schlitten mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegt oder gleichmäßig schneller oder langsamer wird. Als Hilfe ist in den beiden letzten Fällen noch in Klammern angegeben, dass dies eine konstante Beschleunigung ist. Es handelt sich hier also um eine einfache Anwendung des ersten und zweiten newtonschen Gesetzes. Die möglichen Antworten für die gesuchte Kraft sind dabei als Sätze formuliert und zum Teil mit einer Skizze veranschaulicht. Die kurzen Sätze sind dabei leicht verständlich und ohne Fachwörter.

Entgegen dem Original wurde der Schlitten und im nächsten Aufgabenblock das dargestellte Auto symmetrisch gestaltet, damit durch die Skizze nicht eine bestimmte Bewegungsrichtung impliziert wird. Außerdem wurden die möglichen Antworten dadurch übersichtlicher gestaltet, dass nicht in jedem Fall ein ganzer Satz dasteht, sondern nach dem Satzbeginn verschiedene Satzfortsetzungen angeboten werden. Im Originaltestbogen heißt es, dass eine Person, die Schuhe mit Spikes trägt, auf dem Eis steht und die beschriebenen Kräfte auf den Schlitten ausüben kann. Im persönlichen Interview zeigte sich hier bei einer Schülerin das von SCHECKER (1985, S. 136) beschriebene Realisationsdenken. Die Person müsste vorwärts oder auch rückwärts laufen, dabei eine Geschwindigkeit halten oder gleichmäßig langsamer oder schneller werden, und zusätzlich müsste sie eine Kraft auf den Schlitten ausüben, die nach rechts oder links geht und deren Stärke zu- oder abnimmt oder konstant bleibt. Um dieses Vorstellungsproblem zu umgehen, wurde die Situation abgeändert. Im überarbeiteten Fragebo-

gen befindet sich nun auf dem Schlitten ein Propeller, mit dem mit Hilfe der Fernsteuerung auf den Schlitten eine bestimmte Kraft unabhängig von der Schlittenbewegung ausgeübt werden kann. Doch auch hier trat bei einigen Schülern ein unnötiges Realisationsdenken auf, die sich z.B. fragten, in welche Richtung sich der Propeller drehen müsste. Weiter überlegten sie - vielleicht in Erinnerung an das 3. newtonsche Gesetz ($actio = reactio$) -, dass der Propeller z.B. eine Kraft nach **links** ausüben müsste (wobei wohl eine Kraft auf die Luft gemeint ist), damit der Schlitten eine Kraft nach **rechts** erfährt. Insgesamt gibt es bei jedem Item neben Antworten, die der newtonschen und der aristotelischen Sichtweise entsprechen würden, auch Antworten mit jeweils der entgegengesetzten Richtung. Darauf entfallen jedoch jeweils nur 2 % bis 5 % der Antworten, wobei nicht gesagt werden kann, ob dies von dem beschriebenen Realisationsdenken kommt oder ob ein Verwechseln von rechts und links vorliegt. Im persönlichen Interview stellte sich letztlich noch heraus, dass es zur Idealisierung nicht genügt anzugeben, dass die Reibung vernachlässigt werden kann, wobei jede Reibung einschließlich Luftreibung gemeint ist. Da es eine interviewte Schülerin gewohnt war, dass es bei solchen Aufgaben sonst stets heißt, dass Reibung **und Luftwiderstand** vernachlässigbar sind, nahm sie an, dass der Luftwiderstand hier nicht vernachlässigt werden darf und argumentierte entsprechend. Deshalb wurde die Aufgabenstellung entsprechend ergänzt.

<i>Textitems zum Kraftverständnis</i>	WILHELM, 1994, 188 Gymnasiasten, 10 Klassen <i>nach trad.</i> Unterricht		BLASCHKE, 1997, 433 Gymnasiasten, 21 Klassen, <i>nach trad.</i> Unterricht		WILHELM, 2002, 373 Gymnasiasten, 18 Klassen, <i>vor</i> 11. Klasse	
	newtonsche Sichtweise	aristotelische Sichtweise	newtonsche Sichtweise	newtonsche Sichtweise	aristotelische Sichtweise	
rechts, v konstant	49 %	41 %	51 %	29 %	51 %	
rechts, schneller	38 %	55 %	29 %	13 %	74 %	
rechts, langsamer	20 %	58 %	22 %	9 %	63 %	
links, v konstant	35 %	54 %	33 %	16 %	68 %	
links, schneller	34 %	55 %	28 %	10 %	73 %	
links, langsamer	29 %	42 %	27 %	10 %	52 %	
bremsen mit konst. Beschl. nach rechts	16 %		17 %	10 %		

Tab. 6.26: Auswahlhäufigkeiten bei der Schlittenaufgabe mit Textantworten vor und nach konventionellem Unterricht (Bewegungen beschrieben, passende Kraft auszuwählen, mögliche Antworten im Textformat)

Quelle: Eigene Erhebung und BLASCHKE (1999) (Die Angaben wurden aus den Angaben für die einzelnen Klassen berechnet. Gemittelt wurde dabei über die Schüler, nicht wie bei BLASCHKE über die Klassenergebnisse.)

In der Untersuchung von WILHELM nach einem traditionellem Unterricht gaben je nach Aufgabe nur zwischen 17 % und 49 % der Schüler (im Durchschnitt 32 %) eine newtonsche Antwort, während 41 % bis 58 % (im Durchschnitt 51 %) eine aristotelische Antwort gaben, also eine Kraft in Bewegungsrichtung angaben, die sich entsprechend der Geschwindigkeit verändert („aristotelisch“ steht als Sammelbegriff für vornewtonsche Vorstellungen, insbesondere auch für Impetustheorien). Abgesehen von dem speziellen Item, das unten diskutiert wird, haben nur 7 % bis 30 % eine andere Antwort gegeben. Vergleicht man physikalisch äquivalente Items unterschiedlicher Bewegungsrichtung, stellt man fest, dass hier in der Regel die Items mit einer Bewegung nach rechts häufiger richtig beantwortet werden als die mit einer Bewegung nach links (siehe Tab. 6.26). Hier ist jedoch keine Richtung ausge-

zeichnet und kein Koordinatensystem festgelegt. Allerdings ist wohl die Bewegung nach rechts die in der Schule übliche Bewegung, während Bewegungen nach links selten vorkommen. Ein solcher Zusammenhang ist in der Literatur anscheinend noch nicht beschrieben. Vergleicht man außerdem bei einer festen Bewegungsrichtung Items mit verschiedenen Bewegungsarten, stellt man - wie zu erwarten - fest, dass Items mit Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit am häufigsten und solche mit langsamerwerdenden Bewegungen am seltensten richtig beantwortet werden (siehe Tab. 6.26).

Bei einem Item wird nicht angegeben, in welche Richtung sich der Schlitten bewegt, sondern nur, dass er gleichmäßig abbremst und eine konstante Beschleunigung nach rechts hat, woraus man schließen kann, dass er sich nach links bewegt. Durch Anwendung des Grundgesetzes der Dynamik $F = m \cdot a$ könnte man hier jedoch die richtige Antwort geben, auch ohne die Bewegung durchschauen zu müssen. Die interviewten Schülerinnen wollten die Bewegung jedoch verstehen, was ihnen nicht gelang. Insbesondere für eine aristotelische Antwort müsste man erst wissen, in welche Richtung sich der Schlitten bewegt. Um das zu erkennen, muss man allerdings den Beschleunigungsbegriff verstanden haben, was auch nur bei einem Teil der Schüler der Fall ist.

In der Untersuchung von BLASCHKE ist der Anteil der newtonschen Antworten bei den meisten Items fast genauso groß; nur die Items mit schnellerwerdenden Bewegungen fallen schlechter aus. In der Untersuchung von WILHELM vor dem Mechanikunterricht ist der Anteil der newtonschen Antworten nur ein Drittel bis die Hälfte, obwohl diese Thematik in der Mittelstufe behandelt wurde. Die aristotelischen Antworten liegen dafür höher. Unter der Annahme, dass die Schüler mit traditionellem Unterricht gleiche Vortestergebnisse erreicht hätten, schafft der Unterricht nach den Daten von WILHELM bei den newtonschen Antworten je nach Item einen Zugewinn von 6 bis 25 Prozentpunkten (durchschnittlich 18). Das ist ein relativer Zugewinn der Gruppe (bezogen auf den möglichen Zugewinn der Gruppe) von 7 % bis 29 % (durchschnittlich 21 %), was nur als gering einzustufen ist.

Letztlich ist noch von Interesse, wie konsistent bzw. sprunghaft die Schüler die Items beantworteten. Beim Auswerten stellt man einerseits fest, dass nur sehr wenige Schüler die newtonsche oder aristotelische Sichtweise absolut konsequent durchhalten. Trotzdem hat man den Eindruck, dass relativ konsistent geantwortet wird. Eine Berechnung der Korrelationskoeffizienten zwischen verschiedenen Antworten ergibt, dass bei diesem Aufgabenblock die newtonschen Antworten schwach bis mittelstark korrelieren (zwischen 0,30 und 0,72; im Durchschnitt 0,48; alle Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 signifikant). Die aristotelischen Antworten korrelieren ebenfalls schwach bis mittelstark (zwischen 0,36 und 0,74; im Durchschnitt 0,51). Die Schüler bleiben also relativ konsistent bei einer Sichtweise. Bei einer dichotomen Auswertung (richtig – falsch) ergibt das eine hohe Reliabilität von $\alpha = 0,87$.

Da jeder Schüler zwei Antworten schriftlich begründen sollte, liegen nun zu circa zwei Dritteln der Items eine Fülle von Schüleräußerungen vor, die den in der Literatur beschriebenen Schülervorstellungen entsprechen (siehe Kapitel 2.2.4.2), wobei viele Begründungen jedoch konfus, widersprüchlich oder unlogisch erscheinen. Andere passen sehr gut zu den Vorstellungen „innere Kraft“, „Energie“, „Impuls“, „wirkende Antriebskraft proportional zur Geschwindigkeit“ oder „Kraftverbrauch“ (siehe WILHELM, 1994, S. 94 – 97). Interessanterweise wechselten viele Schüler, wenn sie ihre Antwort begründen sollen, von einer aristotelischen zu einer newtonschen Antwort über. Andere begründen rich-

tig die newtonsche Antwort, obwohl sie eine andere Antwort gegeben haben; sie merken also nicht, dass ihre erste Antwort nicht mit ihrer zweiten, schriftlichen übereinstimmt. Wieder andere haben zuerst bei gleichmäßig schneller- oder langsamerwerdenden Bewegungen eine aristotelische Antwort gegeben und beim Begründen erklären sie physikalisch richtig, was dies bedeutet - nämlich, dass die Beschleunigung gleichmäßig linear zu- oder abnimmt; sie merken also nicht, dass bei dem Item extra „konstante Beschleunigung“ stand. Dieser Inkonsistenz liegt wohl eine Kompartimentalisierung von Vorstellungen (siehe Kapitel 2.1.4) zugrunde. Man kann in diesen Begründungen auch sehen, dass hinter gleichen Antworten verschiedene Begründungen und Vorstellungen stehen können. Andererseits findet man auch bei unterschiedlichen Antworten die gleiche Begründung. Häufig wird eine physikalische Sprache und ein physikalischer Formalismus (speziell $F = m \cdot a$) verwendet, um damit auch unphysikalische Antworten zu begründen.

Leider liegen die Vortest- und Nachtestergebnisse von traditionell unterrichteten Schülern nicht von den gleichen Schülern vor (Test vor Unterricht: 2001, Test nach Unterricht: 1994), so dass keine Korrelationen zwischen z.B. Vortestergebnissen und dem relativem Zugewinn berechnet werden können.

6.5.2.2 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen bei Graphenaufgaben zur Kraft

Der Aufgabenblock „Kraftgraphenaufgaben“ des Tests „Fragen zu Kraft und Bewegung“ (THORNTON, 1996) entspricht physikalisch gesehen dem Frageblock mit dem idealen Schlitten. Hier bewegt sich ein Spielzeugauto bei vernachlässigbarer Reibung und vernachlässigbarem Luftwiderstand nach links oder rechts entlang einer horizontalen Linie entweder mit konstanter Geschwindigkeit oder gleichmäßig schneller- oder langsamerwerdend. Die Schüler sollen nun wieder zu jeder beschriebenen Bewegung die Kraft auswählen, die diese Bewegung ermöglicht, wobei die Antwortmöglichkeiten nun nicht mehr als Antwortsatz vorgegeben, sondern als Graphen $F(t)$ dargestellt sind. Im englischsprachigen Originaltestbogen wurde ein Koordinatensystem durch eine horizontale Linie namens „+ Abstands-Achse“ (mit einer Null und einem Pfeil nach rechts) festgelegt. Wie bereits in Kapitel 6.4.2.1 dargelegt, taten sich die interviewten Schüler damit schwer, so dass eine horizontale Linie als „ x -Achse eines Koordinatensystems“ (mit einem Pfeil in positive und negative Richtung) gewählt wurde.

Wie Tab. 6.19 zeigt, gaben bei diesem Aufgabenblock - abgesehen von der Aufgabe zum ruhenden Auto - nur 15 % bis 27 % (im Durchschnitt 21 %) der Gymnasiasten eine newtonsche Antwort, aber - abgesehen von der Aufgabe zum ruhenden und gestoßenen Auto - gaben 67 % bis 76 % (im Durchschnitt 69 %) eine aristotelische Antwort. Vergleicht man physikalisch äquivalente Bewegungen unterschiedlicher Richtung, stellt man wieder fest, dass Bewegungen nach rechts häufiger richtig beantwortet werden als Bewegungen nach links (siehe Tab. 6.27). Innerhalb einer Bewegungsrichtung werden Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit am besten beantwortet gefolgt von schnellerwerdenden Bewegungen. Am Schlechtesten werden wie im Frageblock mit Textitems (Schlitten) die langsamerwerdenden Bewegungen beantwortet (siehe Tab. 6.27).

Eine Berechnung der Korrelationskoeffizienten zwischen verschiedenen Antworten ergibt, dass bei diesem Aufgabenblock die newtonschen Antworten schwach bis stark korrelieren (zwischen 0,39 und 0,85; im Durchschnitt 0,56; alle Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 signifikant). Die Schüler bleiben also relativ konsistent bei einer Sichtweise. Ebenso korrelieren die aristotelischen Antworten

schwach bis stark (zwischen 0,25 und 0,81; im Durchschnitt 0,50). Es wird also auch in diesem Aufgabenblock relativ konsistent geantwortet und die Reliabilität ist bei einer dichotomen Auswertung (richtig – falsch) mit $\alpha = 0,90$ hoch, wenn man die Aufgabe zum ruhenden Auto weglässt (7 Items), und mit $\alpha = 0,87$ mit dieser Aufgabe (8 Items).

Items mit Kraftgraphen	WILHELM, 1994, 188 Gymnasiasten, 10 Klassen, <i>nach trad.</i> Unterricht		BLASCHKE, 1997, 433 Gymnasiasten, 21 Klassen, <i>nach trad.</i> Unterricht		WILHELM, 2002, 373 Gymnasiasten, 18 Klassen, <i>vor</i> 11. Klasse	
	newtonsche Sichtweise	aristotelische Sichtweise	newtonsche Sichtweise	newtonsche Sichtweise	aristotelische Sichtweise	
$v = 0$	94 %		-	94 %		
nach rechts, v konstant	27 %	68 %	36 %	9 %	83 %	
Stoß rechts, dann losgelassen	25 %	33 %	32 %	16 %	21 %	
nach links, v konstant	23 %	70 %	29 %	9 %	73 %	
nach rechts, schneller werdend	22 %	76 %	28 %	5 %	87 %	
nach links, schneller werdend	21 %	67 %	19 %	6 %	67 %	
rechts, schneller und langsamer	18 %	71 %	16 %	9 %	78 %	
nach rechts, langsamer werdend	14 %	68 %	22 %	5 %	73 %	
nach links, langsamer werdend	-	-	19 %	-	-	

Tab. 6.27: Auswahlhäufigkeiten bei den Kraftgraphenaufgaben vor und nach konventionellem Unterricht (Bewegungen beschrieben, passende Kraftgraphen auszuwählen)

Quelle: Eigene Erhebung und BLASCHKE (1999) (Die Angaben wurden aus den Angaben für die einzelnen Klassen berechnet. Gemittelt wurde dabei über die Schüler, nicht wie bei BLASCHKE über die Klassenergebnisse.)

In der Untersuchung von BLASCHKE ist der Anteil der newtonschen Antworten bei den meisten Items etwas höher. In der Untersuchung von WILHELM vor dem Mechanikunterricht ist der Anteil der newtonschen Antworten nur ein Viertel bis die Hälfte, obwohl dies in der Mittelstufe behandelt wurde. Die aristotelischen Antworten liegen dagegen höher. Unter der Annahme, dass die Schüler mit traditionellem Unterricht gleiche Vortestergebnisse erreicht hätten, schafft der Unterricht bei den newtonschen Antworten je nach Item einen Zugewinn von 9 bis 17 Prozentpunkten (durchschnittlich 13). Das ist ein relativer Zugewinn der Gruppe (bezogen auf den möglichen Zugewinn der Gruppe) von 10 % bis 19 % (durchschnittlich 14 %), was recht gering ist.

Vergleicht man die Antworten der Items bei diesem Aufgabenblock mit physikalisch äquivalenten Textitems des Aufgabenblocks mit dem Schlitten, stellt man bei allen Items fest, dass deutlich weniger Schüler newtonsch antworteten (im Durchschnitt circa 21 % statt 32 %), aber wesentlich mehr Schüler aristotelisch antworteten (im Durchschnitt 70 % statt 51 %). Ein genauere Vergleich sich jeweils entsprechender Items zeigt, dass die meisten Schüler, die ein Item zu den Kraftgraphen richtig beantworteten, auch das entsprechende Item zum Schlitten richtig beantworteten (64 % - 80 % dieser Schüler;

im Durchschnitt 72 %). Dagegen schaffte nur ein kleinerer Teil der Schüler, die ein Item zum Schlitten richtig beantworteten, es auch, das entsprechende Item zu den Kraftgraphen richtig zu beantworten (41% - 49 %; im Durchschnitt 45 %) (So korrelieren die newtonschen Antworten der beiden Aufgabenblöcke im Durchschnitt schwach mit $r = 0,36$ und die aristotelischen Antworten schwach im Durchschnitt mit $r = 0,25$). Bei der Antwortdarstellung in Graphen fällt es den Schülern also deutlich schwerer, eine newtonsche Antwort zu geben. Der Aufgabenblock zu der Geschwindigkeit zeigte aber, dass die Schüler Graphen durchaus richtig interpretieren können. Eine Vermutung ist hier, dass es für die Schüler schwerer ist, wenn sie zusätzlich zur Überlegung, welche Kraft wirkt, gleichzeitig noch Graphen interpretieren sollen. Das heißt, die Kombination dieser beiden Aufgaben stellt höhere Anforderungen als jede einzelne Aufgabe allein, was im Rahmen der „cognitive load“-Theorie verständlich ist: Zusätzlich zur eigentlichen Aufgabe, die richtige Kraft zu überlegen, erzeugt die Antwortdarstellung im Graphenformat eine zusätzliche kognitive Belastung. Ein sehr guter Schüler drückte dies auf einem Antwortblatt so aus: *„Die Graphen, die variable Kräfte oder Beschleunigungen zeigen, verleiten zu falschen Antworten.“* Interessant und für die Interpretation von Bedeutung wäre es zu sehen, ob die Schüler Aufgaben, in denen reine Grapheninterpretation verlangt wird, hier wirklich - wie vermutet - ganz richtig beantworten. So könnte man z.B. noch ein paar Items in der Form *„Auf das Auto wirkt eine konstante Kraft nach rechts/links“* stellen. Ein solcher Test wurde jedoch nur mit zwei Schülerinnen durchgeführt, die im Haupttest aristotelisch geantwortet haben. Diese beiden antworteten bei solchen Items zur Grapheninterpretation stets richtig.

Interessant ist auch der Vergleich der Ergebnisse bei den Beschleunigungsgraphenaufgaben mit den Ergebnissen bei den Kraftgraphenaufgaben. Von Schülern, die in diesem Aufgabenblock „Geschwindigkeitsantworten \vec{v} statt \vec{a} “ gegeben haben (circa 40 %), kann man kaum erwarten, dass sie einen Kraftgraphen wählen, der der newtonschen Sichtweise entspricht. Diese Antwortkombination haben bei sich entsprechenden Aufgaben auch nur 3 % bis 5 % aller Schüler gegeben. Dagegen haben je nach Aufgabe 76 % bis 88 % der Schüler, die eine „Geschwindigkeitsantwort \vec{v} statt \vec{a} “ gaben, bei der entsprechenden Kraftaufgabe aristotelisch geantwortet. Von den Schülern, die die Beschleunigungsaufgaben richtig lösten (circa 50 %), könnte man dagegen erwarten, dass sie bei den Aufgaben mit Kraftgraphen gemäß $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ auch die newtonsche Antwort geben. Allerdings haben nur durchschnittlich 31% der Schüler, die ein Beschleunigungsitem richtig lösten, beim entsprechenden Kraftitem newtonsch geantwortet, während aber durchschnittlich 63 % der Schüler, die ein Beschleunigungsitem richtig lösten, beim entsprechenden Kraftitem eine aristotelische Antwort gegeben haben. So wurden die Aufgaben mit Kraftgraphen auch nur von durchschnittlich 21 % der Gymnasiasten richtig beantwortet, was durchschnittlich nur 41 % der jeweils entsprechenden Beschleunigungsaufgaben ist. Entsprechend findet man keine oder nur sehr schwache Korrelationen zwischen den Beschleunigungsitems und den Kraftitems.

6.5.2.3 Ergebnisse der Treatmentgruppe im Vergleich

Bei den Krafttextaufgaben konnten sich die 211 Schüler der Treatmentgruppe bei jedem Item vom Vortest (11 % bis 18 % richtige Antworten, im Mittel 16 %) bis zum Nachtest verbessern (30 % bis 52 %, im Mittel 39 %) und erreichen damit geringe relative Zugewinne (22 % bis 34 %, im Mittel

27 %) (siehe Tab. 6.28, rechter Teil). Sie sind damit bei jedem Item etwas besser als die Kontrollgruppe 1 (Nachttest: 16 % bis 50 %, im Mittel 32 %). Unter der Annahme, dass diese Schüler mit traditionellem Unterricht gleiche Vortestergebnisse erreicht hätten wie die 373 von WILHELM befragten Schüler, schafft der traditionelle Unterricht bei den richtigen Angaben ja nach Aufgabe einen relativer Zugewinn von nur 7 % bis 29 %, im Mittel 20 % (siehe Tab. 6.28, linker Teil). Die Treatmentgruppe ist also sowohl beim Nachttestergebnis als auch beim relativen Zugewinn besser. Als Messgrößen für den Lernerfolg wird der Anteil aller sieben richtig gelösten Items genommen. Die stets recht hohen Reliabilitäten (0,8 bis 0,9) sprechen dafür, dass hiermit jeweils die Fähigkeit ermittelt wurde, zu einer beschriebenen Bewegung die passende Kraft anzugeben. Ein Mann-Whitney-U-Test ergibt, dass der Unterschied zwischen der Kontrollgruppe 1 (1994) und der Treatmentgruppe beim Nachttestergebnis auf dem 5 %-Niveau (einseitig) signifikant ist.

Aufgaben- gruppe	Traditioneller Unterricht			Unterricht nach Konzept, <i>Treatmentgruppe</i> , 2001 - 2004		
	<i>vor</i> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 373, 18 Klassen)	<i>nach trad.</i> Unterricht, 1994, WILHELM (N = 188, 10 Klassen)	relativer Zugewinn g	<i>vor</i> der 11. Klasse, 2001-2003, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)	<i>nach</i> Unterricht, 2002-2004, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)	relativer Zugewinn g
7 Textaufgaben mit Schlitten	14 %	32 %	(20 %)	16 %	39 % *	27 %
Reliabilität	0,80	0,87	-	0,80	0,89	-
7 F(t)-Aufgaben (ohne Ruhe, oh- ne links langs.)	9 %	21 %	(14 %)	11 %	34 % *	26 %
Reliabilität	0,85	0,90	-	0,80	0,94	-

Tab. 6.28: Anteil richtiger Lösungen bei den Aufgaben zur Kraft bei traditionellem Unterricht und nach dem Unterrichtskonzept. Die Nachttestergebnisse wurden auf signifikante Unterschiede untersucht (Mann-Whitney-U-Test, 5 %-Niveau, einseitig). Quelle: Eigene Erhebung.

Bei den Aufgaben mit Kraftgrapheninterpretation konnten sich die 211 Schüler der Treatmentgruppe ebenso bei jedem Item vom Vortest (8 % bis 21 % richtige Antworten (abgesehen vom ruhenden Auto), im Mittel 11 %) bis zum Nachttest verbessern (28 % bis 40 %, im Mittel 34 %) und erreichen damit geringe relative Zugewinne (20 % bis 33 %, im Mittel 26 %) (siehe Tab. 6.28, rechter Teil). Sie sind damit bei jedem einzelnen Item deutlich besser als die Kontrollgruppe 1 (Nachttest: 14 % bis 27 %, im Mittel 21 %). Unter der Annahme, dass diese Schüler mit traditionellem Unterricht gleiche Vortestergebnisse erreicht hätten wie die 373 von WILHELM befragten Schüler, schafft der traditionelle Unterricht bei den richtigen Angaben einen relativer Zugewinn von im Mittel 14 % (siehe Tab. 6.28, linker Teil). Die Treatmentgruppe ist also sowohl beim Nachttestergebnis als auch beim relativen Zugewinn deutlich besser.

Als Messgrößen für den Lernerfolg wird der Anteil der sieben richtig gelösten Items genommen, die in allen Tests vorkamen. Außer Betrachtung bleibt das Item zur ruhenden Bewegung, die fast immer richtig gelöst wurde (bereits beim Vortest über 94 %). Die sehr hohen Reliabilitäten (0,80 bis 0,95) sprechen dafür, dass hiermit immer die Fähigkeit ermittelt wurde, zu einer beschriebenen

Bewegung den passenden Zeit-Kraft-Graphen zu finden. Ein Mann-Whitney-U-Test ergibt, dass der Unterschied zwischen der Kontrollgruppe 1 (1994) und der Treatmentgruppe beim Nachtestergebnis auf dem 1 %-Niveau signifikant ist.

Allerdings sagt die Tatsache, dass sich die Mittelwerte unterscheiden, noch nicht viel aus. Entscheidend ist, ob der Unterschied auch so groß ist, dass er als relevant betrachtet wird. Bei sehr großem Stichprobenumfang führen schon sehr kleinen Differenzen zu signifikanten Ergebnissen. Deshalb werden hier (im Nachhinein) die Effektstärken berechnet. Bei den Krafttextaufgaben ergibt sich bei den Nachtestwerten eine Effektstärke von $d = 0,20$ (siehe Tab. 6.29). Bei den Kraftgraphenaufgaben liegt die Effektstärke dagegen bei $d = 0,34$. HÄUBLER ET AL. (1998, S. 158 f.) sprechen bei d zwischen 0,20 und 0,40 von bescheidener Effektivität gegenüber dem Normalunterricht.

Aufgaben- gruppe	Anzahl berück- sichtig- ter Items	<i>Kontrollgruppe 1,</i> <i>nach trad.</i> Unterricht, 1994, WILHELM (N = 188, 10 Kl.)		<i>Treatmentgruppe,</i> <i>nach dem Konzept,</i> WILHELM (N = 211, 10 Kl.)		Effekt- stärke d
		Mittelwert	Standardab- weichung	Mittelwert	Standard- abweichung	
Krafttextaufga- be (Schlitten)	7	0,32	0,34	0,39	0,38	0,20 schwach
<i>F(t)</i> -Aufgaben (ohne Ruhe)	7	0,21	0,32	0,34	0,40	0,34 mittel

Tab. 6.29: Effektstärke der Treatmentgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe 1 von 1994 (Quelle: Eigene Erhebung)

Eine bessere Lösung wäre bereits vor der Untersuchung eine gewünschte Effektstärke festzulegen (sowie die Fehler 1. und 2. Art α und β) und dazu die optimale Stichprobenlänge zu berechnen (Beispiel: Mittlerer Effekt $d = 0,5$, Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ und Teststärke $1-\beta = 0,8$ ergibt optimale Stichprobenlänge von $N = 50$) (Bortz, 1993, S. 135). Findet man dann in der Untersuchung diese Effektstärke und (trotz der kleinen Probandenzahl) Signifikanz, geht man davon aus, dass der gewünschte Effekt vorliegt, die Größe des Unterschieds ist auf dem 5 %-Niveau signifikant. Ideal wäre, wenn sich Test- und Kontrollgruppe in Motivation, Vorwissen, dem unterrichtenden Lehrer und weiterer Größen nicht unterscheiden würden, sondern nur im gewählten Unterrichtskonzept. Da in dieser Feldstudie die Klassen und Lehrer jedoch recht verschieden sind, sind im Gegensatz zu obigen Vorschlag eine gewisse Anzahl von Klassen und damit eine gewisse Schüleranzahl nötig.

Bei einer gewünschten schwachen Effektstärke von $d = 0,2$, einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$, und der Teststärke $1-\beta = 0,8$ gibt es eine optimale Stichprobenlänge von $N = 310$ (Bortz, 1993, S. 135). Sowohl bei den Krafttextaufgaben als auch bei den Kraftgraphenaufgaben findet man mindestens diese Effektstärke und trotz kleinerer Anzahl N Signifikanz. Damit wäre auf dem 5 %-Niveau gezeigt, dass sich die beiden Gruppen mindestens um die Effektstärke $d = 0,2$ unterscheiden.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen von BLASCHKE ergibt bei den Krafttextaufgaben eine Effektstärke von $d = 0,24$ und bei den Kraftgraphenaufgaben von $d = 0,25$ (siehe Tab. 6.30).

Die Hypothese, dass die Treatmentgruppe besser ist als die Kontrollgruppen, kann also bestätigt werden. Allerdings wurde ein größerer Effekt erwartet, als tatsächlich vorhanden ist.

Aufgaben- gruppe	Anzahl berück- sichtig- ter Items	<i>Kontrollgruppe 2, nach trad.</i> Unterricht, 1997, BLASCHKE (N = 363 bzw. 433)	<i>Treatmentgruppe, nach dem Konzept,</i> 2002-2004, WILHELM (N = 211, 10 Klassen)		Effekt- stärke d
		Mittelwert	Mittelwert	Standard- abweichung	
Krafttextaufgabe (Schlitten)	7	0,30	0,39	0,38	0,24 schwach
$F(t)$ -Aufgaben (ohne Ruhe, ohne links langs.)	7	0,24	0,34	0,40	0,25 schwach

Tab. 6.30: Effektstärke der Treatmentgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe 2 von BLASCHKE (1999)

Aufgrund der Erfahrungen aus der Interventionsstudie zur Modellbildung (siehe Kapitel 4) könnte man vermuten, dass auch hier die Modellbildung einen Beitrag zu dem aufgetretenen Effekt geleistet hat. Deshalb wurde eine getrennte Auswertung der Klassen der Treatmentgruppe vorgenommen - je nachdem, ob Modellbildung eingesetzt wurde oder nicht (siehe Tab. 6.31). Mittels eines Mann-Whitney-U-Test wurde festgestellt, dass sich die Gruppe mit Modellbildung (Effektstärke $d = 0,57$ bzw. $d = 0,51$) bei beiden Nachtestwerten signifikant von der Kontrollgruppe von 1994 unterscheidet (5 %-Niveau einseitig), während sich die Gruppe ohne Modellbildung ($d = 0,14$ bzw. $d = 0,21$) nicht signifikant unterscheidet. Es ist allerdings nicht sicher, dass der Unterschied zwischen den beiden Treatmentuntergruppen wirklich auf die Modellbildung zurückgeht. Denn die Klassen mit Modellbildung gehörten alle zum mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig, während die ohne Modellbildung überwiegend zu anderen Schulzweigen gehören und so evtl. weniger Unterrichtszeit für die Kinematik und Dynamik hatten (obwohl laut Lehrplan alle Zweige bei diesem Thema mit gleicher Stundenzahl unterrichtet werden sollen).

Schülergruppe Nachtest Aufgaben- gruppe	Traditioneller Unterricht	Unterricht nach Konzept, <i>Treatmentgruppe</i> , 2001 - 2004		nur z.T. nach Konzept oder ohne Seminar, 2002-2003
	Bayern 1994 (N = 188, 10 Klassen)	mit Modellbild. 2002-2004 (N = 103, 5 Klassen)	ohne Modellbild., 2003-2004 (N = 108, 5 Klassen)	verschiedene Länder 2003 (N = 79, 4 Klassen)
7 Textaufgaben mit Schlitten	$\mu = 32\%$ ($g = 20\%$)	$\mu = 41\% *$ $g = 29\%$	$\mu = 36\%$ $g = 24\%$	$\mu = 12\% *$ $g = 6\%$
7 $F(t)$ -Aufgaben (ohne Ruhe, ohne links langs.)	$\mu = 21\%$ ($g = 14\%$)	$\mu = 40\% *$ $g = 31\%$	$\mu = 29\%$ $g = 21\%$	$\mu = 11\% *$ $g = 10\%$

Tab. 6.31: Anteile μ richtiger Lösungen und relative Gruppenzugewinne g bei den Aufgaben zur Kraft bei verschiedenen Gruppen; Signifikante Unterschiede im Nachtestergebnis im Vergleich zur Kontrollgruppe mit traditionellem Unterricht sind mit einem Stern markiert (5 %-Niveau einseitig).

Die vier Klassen bzw. Kurse, deren Lehrer zwar wertvolle Erfahrungen mit dem Unterrichtskonzept machten, aber nicht konsequent danach unterrichteten bzw. nicht am Seminar teilnahmen, sind signifikant schlechter. Hier wurden jedoch vier sehr unterschiedliche Klassen zusammengefasst. Zwei Klassen sind aus anderen Bundesländern mit anderen Lehrplänen und eine dieser Klasse ist nur ein Physik-Grundkurs; die bayerischen Klassen sind nicht aus dem mathematisch-naturwissenschaft-

lichen Zweig. In drei Klassen hat man sich in der Dynamik im Gegensatz zur Kinematik nur sehr wenig an das Unterrichtskonzept gehalten.

Da Vortest- und Nachtestergebnisse bei den traditionell unterrichteten Schülern nicht von den gleichen Schülern vorliegen, können keine Zusammenhänge zwischen z.B. Vortestergebnissen und dem relativen Zugewinnen berechnet werden. Bei der Treatmentgruppe konnte jedoch gezeigt werden, dass die Schüler, die im Vortest schon mindestens eine Beschleunigungsaufgabe richtig lösten bzw. mindestens eine Krafttextaufgabe bzw. mindestens eine Kraftgraphenaufgabe richtig lösten, auch signifikant größere (individuelle) relative Zugewinne im Gesamttest haben (Mann-Whitney-U-Test, 0,001-Niveau).

Mit diesem Test wurde natürlich kein umfassendes Kraftverständnis abgeprüft, sondern nur das erste und zweite newtonsches Gesetz bei nur eindimensionaler Bewegung, wobei nur zwei verschiedene Aufgabentypen verwendet wurden. Die Interpretation von Graphen ist dabei eine Fähigkeit, die möglicherweise im konventionellen Unterricht mehr geübt wird als in diesem Unterrichtskonzept, in dem qualitatives Verständnis mehr betont wurde. Deshalb ist der interessantere Test der FCI-Test, der ein qualitatives Verständnis ohne Grapheninterpretation abprüft.

6.5.3 Concept Maps aus Treatmentklassen

In der Interventionsstudie zur Modellbildung (Kapitel 4) wurde in sechs Unterrichtsstunden mit graphischer Modellbildung gearbeitet und gleich anschließend ein Concept Map (Begriffsnetz) verlangt, in dem die Schüler Zusammenhänge zwischen verschiedenen Begriffen nach ihren eigenen Vorstellungen angeben sollten. Dabei zeigte sich eine deutliche Veränderung im Wissen über die physikalischen Zusammenhänge. In einigen Treatmentklassen, in denen nach dem hier entwickelten Konzept unterrichtet wurde, wurden ebenso die gleichen Modellbildungen durchgeführt – allerdings nicht in einem Block, sondern jeweils an den Stellen, an denen es in den Unterricht passte. Die Frage war nun, ob sich durch diese Verteilung über einen langen Zeitraum ein geringerer Lerneffekt einstellt oder sogar ein höherer Lerneffekt, da auch der sonstige Unterricht anders als konventioneller Unterricht war (anderer Zugang zur Kinematik, andere Schwerpunktsetzung in der Dynamik), entsprechende Zusammenhänge betont wurden und auf Verständnis Wert gelegt wurde.

In drei Klassen, die die Modellbildung einsetzten, gab es die Möglichkeit, von den Schülern ein Concept Map anfertigen zu lassen, wobei wie in Kapitel 4.5.3.2 vorgegangen wurde. In zwei dieser Klassen wurde genau nach dem vorgeschlagenen Stoffverteilungsplan unterrichtet, in einer Klasse etwas mehr Zeit investiert. In einer Klasse wurde dieses Concept Map kurz nach dem Dynamikunterricht erstellt, wobei allerdings nur 10 Schüler anwesend waren. In den anderen beiden Testklassen (53 Schüler) wurden die Maps erst gegen Ende des Schuljahres im Juni erstellt, wobei aber Modellbildung jeweils noch einmal außerhalb der Dynamik eingesetzt wurde. Diese Schüler sind folglich im Vergleich zu allen Schülern der Interventionsstudie dadurch im Nachteil, dass das abgefragte Themengebiet Dynamik bei ihnen schon länger zurückliegt und somit sicher manches wieder vergessen wurde.

Wie im Kapitel 4.5.3.3 beschrieben, wurde aus den individuellen Maps ein Map mit den am häufigsten genannten Verbindungen erstellt. Dieses Modalmap der drei Treatmentklassen (siehe Abb.

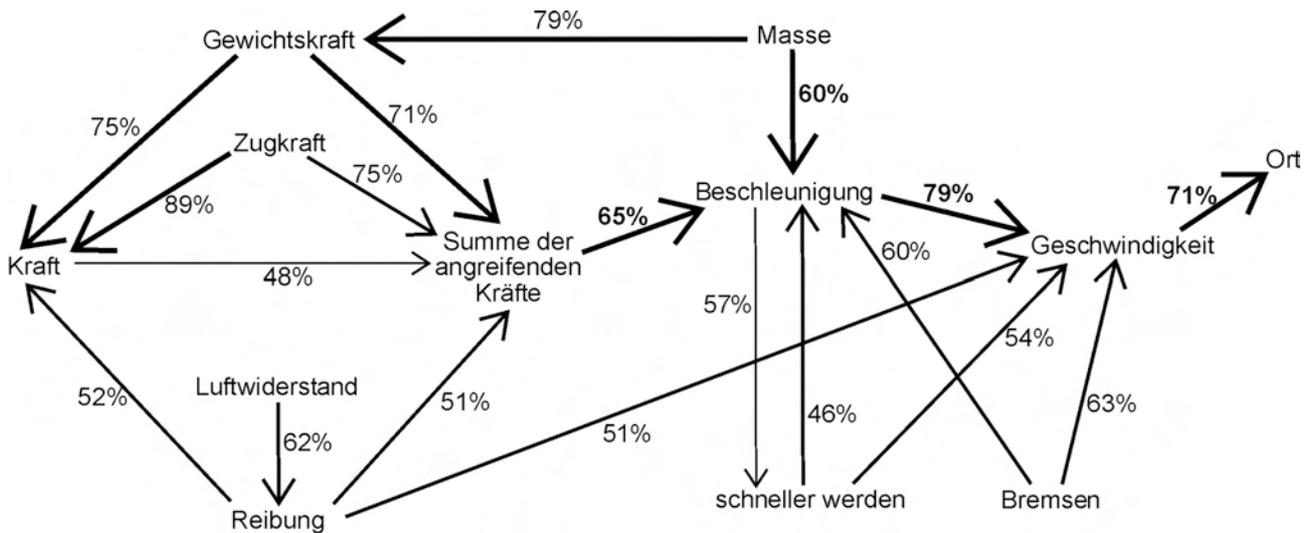


Abb. 6.10: Modalmap von drei Klassen (Versuchsklassen) nach dem Dynamikunterricht, die nach dem Konzept und mit Modellbildung unterrichtet wurden

6.10) unterscheidet sich deutlich von dem der traditionell unterrichteten Klassen (siehe Abb. 4.17a oder Abb. 6.13) und stimmt strukturell mit dem Modalmap der drei Klassen nach der Modellbildungsintervention überein (siehe Abb. 6.11). Allerdings wurden fast alle der physikalisch richtigen Verbindungen von den Versuchsklassen häufiger gewählt, so dass diese Klassen nun am Jahresende noch besser waren als die Interventionsklassen direkt nach der Intervention. Die durchschnittliche Anzahl von Pfeilen pro Schüler lag außerdem höher (19,4 statt 17,4), was mit mehr Wissen interpretiert werden kann.

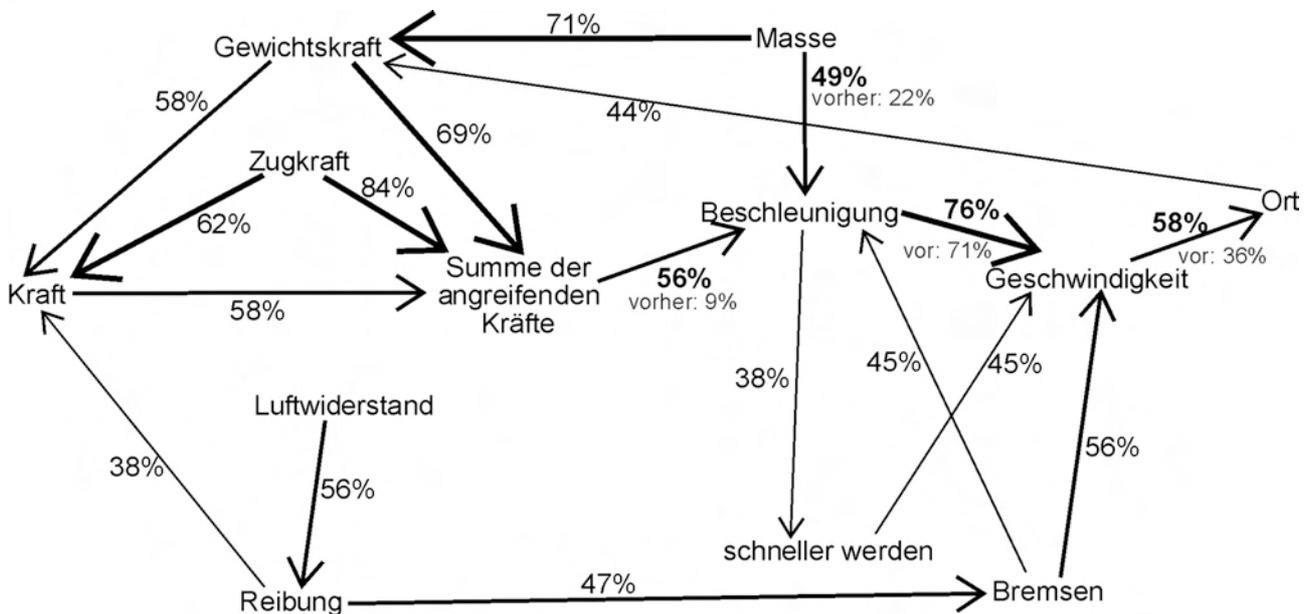


Abb. 6.11: Modalmap von drei Klassen (Interventionsklassen) nach der Intervention mit Modellbildung, die vorher traditionell unterrichtet wurden.

In den Treatmentklassen (63 Schüler) finden sich in dem Test kaum falsche Aussagen; sie sind deutlich seltener als in den konventionell unterrichteten Klassen, z.B. „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ (5 % statt 29 % nach nur traditionellem Unterricht bzw. 11 % nach zusätzlichem Interventionsunterricht), „Masse beeinflusst Kraft“ (11 % statt 27 % bzw. 13 %), „Kraft wirkt auf Masse“

(10% statt 20 % bzw. 5 %) und „Bremsen ist Kraft“ (5 % statt 27 % bzw. 11 %) (siehe Tab. 7.9 in Kapitel 7.3.3.7).

Die meisten der aus Expertensicht wesentlichen Verbindungen kamen dagegen deutlich häufiger als bei konventionellem Unterricht vor und häufiger als direkt nach der Modellbildungsphase in der Interventionsstudie (siehe Tab. 6.32 oder Tab. 7.9): $\Sigma F \rightarrow a$ (65 % statt 9 % bzw. 56 %), $a \rightarrow v$ (79 % statt 71 % bzw. 76 %), $v \rightarrow x$ (71 % statt 36 % bzw. 58 %) und $m \rightarrow a$ (60 % statt 22 % bzw. 49 %).

	$\Sigma F \rightarrow a$	$m \rightarrow a$	$a \rightarrow v$	$v \rightarrow x$	$\Sigma F \rightarrow a$ $\rightarrow v \rightarrow x$	$\Sigma F \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$ + $m \rightarrow a$
Direkt nach traditionellem Unterricht ohne Modellbildung (Durchschnitt drei Klassen, 55 Schüler)	9%	22%	71%	36%	4 %	0 %
Direkt nach Intervention mit zusätzlichen sechs Stunden Modellbildung (Durchschnitt drei Klassen, 55 Schüler)	56%	49%	76%	58%	42 %	27 %
Lange Zeit nach dem Konzept einschließlich Modellbildung (Durchschnitt drei Klassen, 63 Schüler)	65%	60%	79%	71%	46 %	38 %

Tab. 6.32: Vergleich der Häufigkeiten wichtiger Verbindungen in den Concept Maps verschiedener Gruppen

Ansonsten fallen im Modalmap dieser drei Treatmentklassen kleine Unterschiede zum Map nach der Modellbildungsintervention auf: Positiv ist, dass mehr Schüler die Verbindungen „Gewichtskraft \rightarrow Kraft“ (75 % statt 58 %), „Zugkraft \rightarrow Kraft“ (89 % statt 62 %) „Reibung \rightarrow Kraft“ (52 % statt 38 %) und „Luftwiderstand \rightarrow Kraft“ (32 % statt 16 %) sowie „Gewichtskraft \rightarrow Summe der Kräfte“ (71 % statt 69 %) und „Reibung \rightarrow Summe der Kräfte“ (51 % statt 25 %) angaben. Die Aussage „Reibung \rightarrow Geschwindigkeit“ (51 % statt 35 %) ist zwar richtig, doch wünscht man sich, dass die Wirkung nur über die Summe der Kräfte und der Beschleunigung angegeben wird. Diese Verbindung erklärt sich jedoch durch die Beschreibung an der Kante: Nur ein Drittel gibt nämlich eine Wirkung an (meist „ändert“ oder „beeinflusst“), während die anderen zwei Drittel „Reibung wirkt entgegen Geschwindigkeit“ schreibt, was als Erfolg des Unterrichts gewertet werden kann, in dem dies besonders thematisiert wurde.

Nicht positiv ist, dass noch 57 % „Beschleunigung \rightarrow schneller werden“ angeben (statt 80 % nach traditionellem Unterricht und 38 % nach der Intervention). Obwohl 29 % (statt 15 % nach U. und 5% nach I.) genauso „Beschleunigung \rightarrow Bremsen“ angeben, ist dies doch enttäuschend, da in der Kinematik betont wurde, dass die Physik im Gegensatz zur Alltagssprache jede Veränderung der Geschwindigkeit (schneller, langsamer und Richtungsänderung) als Beschleunigung bezeichnet. Richtig sind deshalb die hier auftauchenden 46 % für „schneller werden \rightarrow Beschleunigung“ (statt 16% nach U. und 27 % nach I.) und „Bremsen \rightarrow Beschleunigung“ (60 % statt 45 % nach U. und nach I.).

Insgesamt kann man sagen, dass diese drei Klassen der Treatmentgruppe nicht nur deutlich besser sind als konventionell unterrichtete Klassen, sondern nun am Ende des Schuljahres sogar besser als die drei Interventionsklassen direkt nach dem Modellbildungsunterricht. Das wird daran liegen,

dass außer Modellbildung auch noch andere Maßnahmen unternommen wurden, wie z.B. die Formulierung des zweiten newtonschen Gesetzes in der Form $a = \Sigma F / m$ und komplexe Versuche mit mehreren Kräften und dynamisch ikonische Repräsentationen. Dass das Ergebnis lange nach dem Dynamikunterricht so ausfällt, kann man als Erfolg werten und passt dazu, dass bei der Interventionsstudie der Lerneffekt auch bis zum Ende des Jahres erhalten blieb.

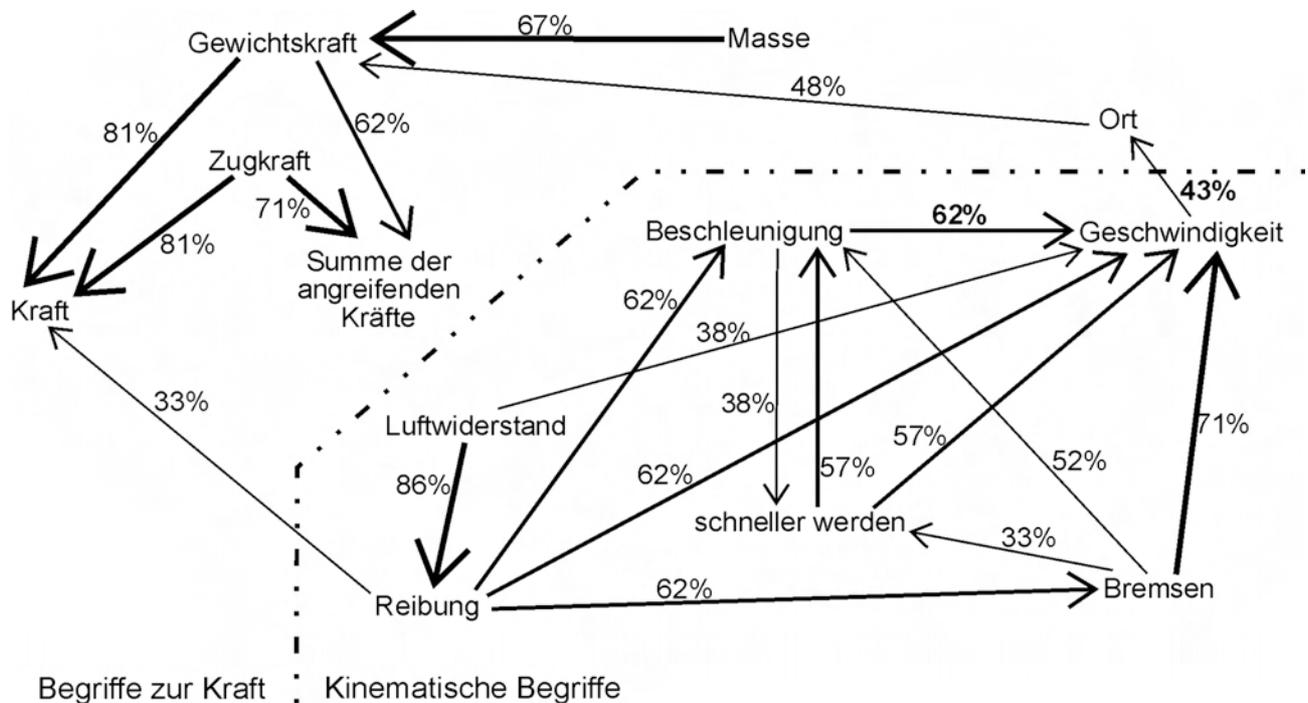


Abb. 6.12: Modalmap von einer Klasse (Versuchsklasse) nach dem Dynamikunterricht, die nach dem Konzept, aber nicht mit Modellbildung unterrichtet wurde

Hier stellt sich die Frage, ob dieser Effekt auch durch den veränderten Unterricht ohne Modellbildung erreichbar gewesen wäre. Deshalb wurden am Ende des Schuljahres Concept Maps von einer Klasse erstellt, die nach dem neuen Konzept zur Kinematik und Dynamik, aber ohne Modellbildung unterrichtet wurde (siehe Abb. 6.12). Als Vergleichsdaten dienen die Maps aus den drei konventionell unterrichteten elften Klassen (insbesondere vor der Modellbildungsintervention) (siehe Abb. 6.13). Die Schüler sind allerdings auch dadurch im Nachteil, dass das abgefragte Themengebiet Dynamik bei ihnen schon länger zurückliegt und somit sicher manches wieder vergessen wurde.

In dieser Klasse finden sich in dem Test aber falsche Aussagen deutlich seltener als in den konventionell unterrichteten Klassen direkt nach dem Unterricht (vor Intervention mit Modellbildung), wie z.B. „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ (14 % statt 29 % nach trad. Unterricht (bzw. 11 % nach Intervention)), „Kraft wirkt auf Masse“ (5 % statt 20 % (bzw. 5 %)) und „Bremsen ist Kraft“ (0 % statt 27 % (bzw. 11 %)). Genauso häufig kam die Aussage „Masse beeinflusst Kraft“ (29 % statt 27% (bzw. 13 %)).

Die meisten der aus Expertensicht wesentlichen Verbindungen kamen zwar seltener als beim Einsatz von Modellbildung, aber häufiger als bei konventionellem Unterricht vor: $\Sigma F \rightarrow a$ (24 % statt 9% (nach Intervention: 56 %)), $v \rightarrow x$ (43 % statt 36 % (nach I.: 56 %)) und $m \rightarrow a$ (29 % statt 22 % (nach I.: 49 %)). Seltener jedoch war $a \rightarrow v$ (62 % statt 71 % (nach I.: 76 %)). Als Lehrer wünscht

man sich natürlich ein noch häufigeres Vorkommen dieser wesentlichen Verbindungen. So zerfällt das Modalmap wie bei den traditionellen Klassen aus graphentheoretischer Sicht in zwei Teile: Begriffe zur Kraft und kinematische Begriffe, wobei Reibung und Luftwiderstand mit den kinematischen Begriffen verknüpft ist.

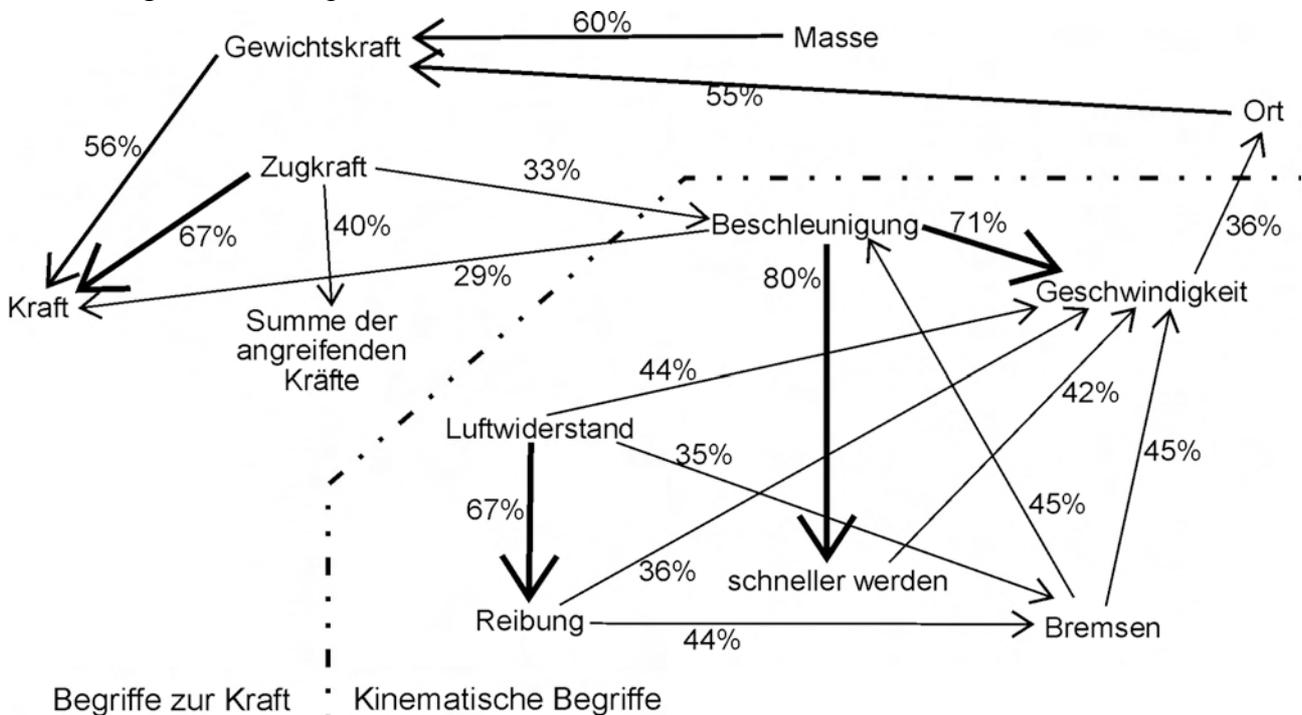


Abb. 6.13: Modalmap von drei Klassen (Vergleichsklassen) nach dem Dynamikunterricht, die vorher traditionell unterrichtet wurden.

Ansonsten fallen im Modalmap dieser Klasse noch etliche Unterschiede zum Map der traditionell unterrichteten Klassen auf: Positiv ist, dass mehr Schüler die Verbindungen „Gewichtskraft→Kraft“ (81 % statt 56 %), „Zugkraft→Kraft“ (81 % statt 67 %) und „Reibung→Kraft“ (33 % statt 25 %) sowie „Gewichtskraft→Summe der Kräfte“ (62 % statt 25 %), „Zugkraft→Summe der Kräfte“ (71 % statt 40 %) und „Reibung→Summe der Kräfte“ (24 % statt 13 %) angaben (siehe auch Tab. 7.9. in Kapitel 7.3.3.7). Positiv ist, dass nur 38 % „Beschleunigung→schneller werden“ angeben (statt 80 % nach trad. Unterricht und 38 % nach Intervention) und stattdessen 57 % „schneller werden→Beschleunigung“ (statt 16 % bzw. 27 % nach I.) und „Bremsen→Beschleunigung“ (52 % statt 45 % bzw. 45 % nach I.). Die Klasse hat also von dem veränderten Kinematikkonzept profitiert.

In Bezug auf die Dynamik kann man zusammenfassend sagen, dass diese eine Klasse am Jahresende trotz des langen zeitlichen Abstandes besser ist als konventionell unterrichtete Klassen nach dem Dynamikunterricht, aber nicht so gut wie die Klassen, in denen zusätzlich Modellbildung eingesetzt wurde. Deshalb kann vermutet werden, dass gerade die Modellbildung hilft, Zusammenhänge zu verstehen und dauerhaft zu verankern, was weiter untersucht werden muss.

6.6 Schülerstudien zu Vorstellungen über Physiklernen

6.6.1 Epistemologische Tests und der MPEX-Test

Ziel des entwickelten Unterrichtskonzeptes war, die Vorstellungen der Schüler über physikalische Begriffe wie „Geschwindigkeit“, „Beschleunigung“ oder „Kraft“ und deren Zusammenhänge zu verändern. Es war hingegen nicht die Aufgabe, die Vorstellungen über die Natur der Naturwissenschaften zu verändern bzw. die Vorstellungen, wie man Physik am Besten lernt. Das hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Es wäre aber durchaus möglich, Aspekte der Wissenschaftstheorie explizit zu unterrichten oder auf eine immanente Weise im Unterricht zu integrieren (Priemer, 2003, S. 162). PRIEMER meint z.B., dass Schüler, die eigenständig Hypothesen aufstellen und diese unter Umständen falsifizieren müssen, weniger geneigt sind, Wissen als exakt und absolut zu bezeichnen. In dem hier evaluierten Unterricht sollten die Schüler sehr häufig Hypothesen über Versuchsabläufe aufstellen und waren dann häufig gezwungen, diese selbst zu falsifizieren (siehe Kapitel 5.4.4). So sollten bei ihnen aktive Lernprozesse angestoßen werden. Alltagsvorstellungen wurden nicht ignoriert, sondern als ein mögliches (aber weniger weit tragendes) Denkmodell dargestellt. Es wurde insbesondere versucht, die physikalischen Vorstellungen als ein zusammenhängendes Konzept darzustellen und weniger Einzelfakten zu betonen. Schließlich wurde versucht, die Relevanz der behandelten Themen für die Alltagswelt zu zeigen. Somit ist es denkbar, dass dieser Unterricht auch Vorstellungen über die Physik bzw. das Lernen der Physik anders beeinflusste als traditioneller Unterricht.

Einen geschichtlichen Überblick über die Erforschung epistemologischer Überzeugungen geben URHAHNE und HOPF (2004, S. 72 – 74). Zu den Messverfahren gehören qualitative Interviews und Fragebögen. Die paper-and-pencil-Tests sind besonders geeignet, wenn nicht die Vorstellungen in großer Tiefe erforscht werden sollen, sondern mehrere bekannte Dimensionen erhoben werden sollen. LEDERMAN ET AL. (1998, S. 332 – 343) geben einen Überblick über solche Tests, die zwischen 1954 und 1995 verwendet wurden, und über ihre Schwierigkeiten. An neueren Tests seien hier beispielhaft genannt: „Views About Science Survey“ (VASS), „Epistemological Beliefs Assessment for Physical Science“ (EBAPS) und „Maryland Physics Expectations Survey“ (MPEX).

Der Test „Views About Science Survey“ (VASS) (siehe CD im Anhang) wurde von HALLOUN entwickelt sowie auf Validität und Reliabilität überprüft und schließlich von PRIEMER ins Deutsche übersetzt (Priemer, 2003, S. 164). Es werden die Ansichten der Schüler zur Physik in den Dimensionen 1. Struktur (zusammenhängendes Konstrukt von Wissen contra lose Sammlung von Fakten), 2. Methoden (systematisch und personunabhängig, Mathematik als Werkzeug contra Mathematik als Quelle von Wissen) und 3. Gültigkeit (Wissen ist näherungsweise und vorübergehend gültig contra exakt und endgültig wahr) erfasst. Außerdem werden die Ansichten der Schüler zum Lernen der Physik in den Dimensionen 1. Lernbarkeit (Physik kann von jedem gelernt werden contra nur von besonders Talentierten), 2. reflektierendes Denken (auf Methoden stützen contra Fakten auswendig lernen, Probleme aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten contra vorgegebenen Ansatz verfolgen, Unstimmigkeiten im eigenen Wissen suchen contra Neues dazulernen, Neues auf eigene Art strukturieren contra auswendig lernen) und 3. persönliche Relevanz (Physik hat im Leben Rele-

vanz contra nur für Wissenschaftler wichtig) erhoben. Jedes der gewerteten 33 Items besteht aus zwei konträren Aussagen, bei denen sich die Schüler entweder für eine entscheiden müssen oder angeben, wie stark sie welcher Antwort zustimmen. Antworten erhalten dann je nach Übereinstimmung mit der (angeblichen) Expertenantworten Punkte und jeder Schüler wird je nach erreichter Gesamtpunktzahl einem von vier Typen zugeordnet, der den Expertisegrad angibt. Der Test wurde in den USA mit über 2000 High-School-Schülern, in Deutschland aber bisher nur mit 45 Leistungskurs-Schülern (nicht repräsentativ) durchgeführt.

Der „Epistemological Beliefs Assessment for Physical Science“ (EBAPS) (siehe CD im Anhang) wurde von einem Team an der Berkeley-Universität von Kalifornien entwickelt (Elby, 2001) (<http://www2.physics.umd.edu/~elby/EBAPS/home.htm>) und ist für die High-School und Physik-Einführungskurse an Colleges gedacht. Der Test enthält neben 17 Aussagen, die auf einer fünfstufigen Skala abgelehnt oder bestätigt werden sollen, noch 13 Multiple-Choice-Aufgaben, z.T. in der Form kurzer Debatten zwischen zwei Schülern. Während der Test „Views About Science Survey“ (VASS) und der Test „Maryland Physics Expectations Survey“ (MPEX) sowohl epistemologische Vorstellungen über Physik als auch kursspezifische Erwartungen ermitteln, was auch kaum getrennt werden kann, meint ELBY, dass sich der EBAPS nur auf epistemologische Vorstellungen über Physik und Chemie konzentriert (<http://www2.physics.umd.edu/~elby/EBAPS/idea.htm>). Der Test testet laut ELBY fünf Dimensionen: 1. die Struktur von wissenschaftlichem Wissen (lose Sammlung von Wissensstücken contra ein zusammenhängendes strukturiertes Ganzes), 2. die Natur von Wissen und Lernen (Lernen ist Informationsaufnahme contra Lernen ist die Konstruktion eines eigenen Verständnisses durch aktivem Überdenken von Neuem und eigenem Verstehen), 3. die Anwendbarkeit im realen Leben (Anwendbarkeit im wirklichen Leben contra nur im Labor), 4. der Ursprung für die Lernfähigkeit (Erfolg beim Physiklernen ist naturgegeben oder kann von den meisten erreicht werden) sowie 5. ob wissenschaftliches Wissen als absolut oder extrem relativ gesehen wird.

Der Test „Maryland Physics Expectations Survey“ (MPEX) (siehe CD im Anhang) wurde von REDISH, SAUL und STEINBERG (1998) entwickelt und ist für einführende Physikkurse an amerikanischen Universitäten und Colleges gedacht. Es werden sechs Dimensionen geprüft: 1. Unabhängigkeit (Schüler übernimmt für die eigene Wissenskonstruktion Verantwortung contra übernimmt Gegebenes ohne Überprüfung), 2. Zusammenhang (Schüler sieht Physik als ein verbundenes logisches Gefüge contra sieht Physik als einzelne Wissensstücke an), 3. Konzepte (Schüler betont das Verständnis zugrunde liegender Ideen contra konzentriert sich auf Auswendiglernen und Formeln), 4. Realitätsbezug (die in Physik gelernten Ideen sind in vielen realen Kontexten relevant contra haben wenig Bezug zu Geschehnissen außerhalb des Klassenzimmers), 5. Mathematik-Verbindung (Schüler betrachtet die Mathematik als geeignete Art, physikalische Phänomene darzustellen, contra sieht wenig Beziehungen zwischen Physik und Mathematik) und 6. Anstrengung (Schüler versucht die vorhandenen Informationen zu nutzen contra versucht es nicht). Der englischsprachige Test wurde ausführlich validiert und von über 1500 Studenten an amerikanischen Colleges und Universitäten zu Beginn und am Ende des ersten Semesters (bzw. Trimesters) durchgeführt (Redish et al., 1998, S. 214), so dass hier etliche Vergleichswerte vorliegen. REDISH ET AL. (1998, S. 213) legen dar, dass

Physiklehrer auch Ziele haben bezüglich der Einstellung der Schüler, was sie lernen werden und welche Fähigkeiten im Unterricht erforderlich sind (Teil des „geheimen Lehrplans“). Sie glauben, dass der Test indirekt auch darüber etwas aussagt.

Die Kritik von LEDERMAN ET AL. (1998, S. 332), dass sich viele Testinstrumente auf die Begabung und die Fertigkeit der Studenten konzentriert, sich mit Wissenschaftsvorgängen zu beschäftigen (z.B. Beurteilung von Daten), trifft auf diesen Test nicht zu. Außerdem liegt der Schwerpunkt auch nicht auf dem affektiven Bereich (Werte und Gefühle). LEDERMAN ET AL. (1998, S. 345) geben weiterhin zu bedenken, dass paper-and-pencil-Tests zwar einiges über die Vorstellungen der Schüler über die Natur der Naturwissenschaften aufdecken können, aber nicht zeigen können, wie dieses Verständnis das Verhalten beeinflusst. Der MPEX-Test versucht hier zum Teil, Verhaltensweisen der Schüler abzufragen. Dennoch ist klar, dass es bei solchen Tests Unterschiede gibt zwischen der Interpretation der schriftlichen Schülerantworten und der Interpretation von Schülerinterviews (Lederman et al., 1998, S. 345).

Die Schüler müssen bei diesem Test 34 Items auf einer fünfstufigen Skala zustimmen oder ablehnen. Als förderlich bzw. unförderlich für Physiklernen wird gewertet, ob die Schüler den Items entsprechend der Expertenmeinung zustimmen bzw. ablehnen, so dass jeweils der Anteil förderlicher und unförderlicher Antworten bestimmt wird. D.h. die fünfstufige Antwortskala wird auf drei Stufen (förderlich/neutral/unförderlich) reduziert. In Anlehnung an REDISH ET AL. (1998) und ELBY (2001) wurden hier in der statistischen Auswertung meist nur dichotome Auswertungen vorgenommen (förderlich: ja/nein, unförderlich: ja/nein).

Je vier bis sechs einzelne Items werden zu einem Cluster zusammengefasst, wobei REDISH ET AL. (1998, S. 214) bemerken, dass es sich bei diesen Dimensionen nicht um unabhängige Variablen handelt. Bei der Auswertung ist zu beachten, dass REDISH (2001) z.T. andere Empfehlungen gibt als REDISH ET AL. (1998). Um einen Vergleich mit den amerikanischen Werten zu ermöglichen, wurden im Folgenden die Vorgaben von REDISH ET AL. (1998) übernommen. Kriterien der Clusterbildung werden von REDISH ET AL. (1998) nicht angegeben, sowie die Funktion der Items, die keinem Cluster zugeordnet werden. Die Werte aus Amerika liegen von drei großen staatlichen Universitäten und von drei kleinen Colleges vor, wobei jeweils verschiedene Dozenten beteiligt waren (nur bei zwei Colleges waren nur wenige Dozenten bzw. Studenten beteiligt).

Als „Experten“ wurden Physikdozenten amerikanischer Universitäten gewählt, die ein großes Interesse an unterrichtsrelevanten Fragen und ein großes Feingefühl für Studenten haben (Redish et al., 1998, S. 216), aber keine Erkenntnistheoretiker oder Lernpsychologen. Es ist davon auszugehen, dass die Physikexperten einen kritischen Realismus vertreten. Bis auf drei der 34 Items stimmten diese in über 80% der Fälle darüber überein, was förderlich bzw. unförderlich ist.

Eine deutsche Version des „Maryland Physics Expectations Survey“ wurde im Rahmen dieser Arbeit von WILHELM erstellt (siehe CD im Anhang). Eine Überprüfung der Güte der deutschen Fassung des Tests muss noch geleistet werden, so dass es sich bei der deutschen Version noch nicht um ein standardisiertes Testinstrument handelt. Eine Möglichkeit der Überprüfung wäre z.B. eine Rückübersetzung ins Englische und ein anschließender Vergleich mit dem Original. Wünschenswert wäre auch, Schüler im Interview nach ihrem Verständnis der Items zu befragen. Neben dem

Problem, dass beim Übersetzen die Intension nicht verschoben wird, ist zu beachten, dass in Amerika an Highschools und Universitäten anders als an deutschen Gymnasien gelernt wird. Eine Validierung der deutschen Fassung war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

6.6.2 Ergebnisse traditioneller Vergleichsklassen

Die deutsche Version des „Maryland Physics Expectations Survey“ haben 17 herkömmlich unterrichtete bayerische elfte Klassen (336 Schüler) im Schuljahr 2003/2004 zu Beginn des Schuljahres und nach dem Dynamikunterricht (ca. April/Mai) beantwortet. Außerdem wurde er von sechs Klassen (125 Schüler), die nach dem Unterrichtskonzept dieser Arbeit unterrichtet wurden, vor und nach der Kinematik/Dynamik ausgefüllt. Des Weiteren liegen von zwölf Klassen (226 Schüler) nur die Vortestergebnisse zu Beginn der elften Jahrgangsstufe vor (Vortest insgesamt: 687 Schüler). Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die traditionell unterrichteten Klassen, die einen Vor- und Nachtest abgegeben haben, wobei nur Schüler (336) hinzugenommen wurden, die beide Tests ablegten. Die einzelnen elften Klassen unterscheiden sich z.T. erheblich voneinander in der Ausgangslage (siehe Tab. 6.34 rechter Teil) und in den Veränderungen während des Mechanikunterrichts.

Eine Analyse der Schülerantworten bei den 336 bayerischen Schülern ergibt, dass die einzelnen Items (bei fünfstufiger, dreistufiger und dichotomer Skala) nicht oder allenfalls schwach miteinander korrelieren. Bei einer Faktorenanalyse ergeben sich (ebenso unabhängig von der gewählten Skala sowie bei Vor- und Nachtest) nur drei Faktoren, die - bis auf einen Faktor mit vielen Items zur „Anstrengung“ - nicht interpretierbar sind und fast nichts mit den gewählten Clustern zu tun haben (nur im Nachtest entspricht ein Faktor z.T. dem Cluster „Realitätsbezug“). Selbst wenn zur Faktorenanalyse weit mehr Antwortbögen hinzugenommen werden (Vor- und Nachtest, Vergleichs- und Treatmentgruppen) ergibt sich auch bei 1181 ausgefüllten Testbögen das gleiche Bild.

Reliabilitäten Cronbachs α	Anzahl Items	Vortest		Nachtest	
		förderliche Antworten	unförderliche Antworten	förderliche Antworten	unförderliche Antworten
Unabhängigkeit	6	0,29	0,22	0,30	0,36
Zusammenhang	5	0,32	0,21	0,39	0,21
Konzept	5	0,26	0,11	0,21	0,28
Realitätsbezug	4	0,46	0,38	0,56	0,55
Mathematikbezug	5	0,47	0,47	0,55	0,54
Anstrengung	5	0,40	0,43	0,47	0,51
Gesamtwert	34	0,75	0,75	0,79	0,80

Tab. 6.33: Reliabilitäten der einzelnen Cluster bei 336 traditionell unterrichteten bayerischen Elftklässler bei jeweils dichotomer Auswertungen (förderlich: ja/nein, unförderlich: ja/nein) (fett, wenn über 0,7)

Eine Bestimmung der Reliabilitäten ergibt sowohl bei einer dreistufigen Skala (förderlich/neutral/unförderlich) als auch bei dichotomer Auswertung (siehe Tab. 6.33) nur geringe Cronbachs Alphas. Insbesondere die Cluster „Unabhängigkeit“, „Zusammenhang“ und „Konzept“ haben sehr geringe Cronbachs Alpha-Werte. Lediglich der Gesamtwert liegt deutlich über der üblichen Grenze von 0,7. Das spricht zwar für den Test als Ganzes, aber die Ergebnisse der einzelnen Cluster kön-

nen nur mit Vorsicht interpretiert werden. Nach URHAHNE und HOPF (2004, S. 74) ergeben sich bei Fragebögen zu diesem Thema häufig Probleme mit der Reliabilität. Als möglichen Grund geben sie die mangelnde Explikation, d.h. dass diese Vorstellungen nicht explizit im Unterricht diskutiert werden, an (Urhahne, Hopf, 2004, S. 81) und die Ichferne der Überzeugungen, wobei aber beim MPEX-Test im Gegensatz zu anderen Tests in vielen Items konkrete, ichbezogene Informationen abgefragt werden. Denkbar ist beim vorliegenden Test auch, dass Übersetzungsschwierigkeiten zu einer geringeren Reliabilität beitragen.

Anteil förderlicher / unförderlicher Antworten in %	3 Unis, USA, N = 1357		17 Klassen, Bayern, N = 336		Vortestergebnis 2 extreme bayr. Klassen	
	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest	Klasse A	Klasse B
Unabhängigkeit	55 / 23	51 / 25	33 / 46	33 / 44	22 / 64	49 / 36
Zusammenhang	54 / 22	52 / 23	43 / 31	42 / 33	38 / 39	63 / 18
Konzept	41 / 33	42 / 32	29 / 45*	28 / 48*	29 / 53	39 / 41
Realitätsbezug	66 / 11	60 / 15	42 / 33	42 / 34	30 / 47	50 / 19
Mathematikbezug	68 / 14	62 / 17	38 / 38*	35 / 42*	20 / 65	60 / 18
Anstrengung	68 / 13	52 / 24	39* / 37*	32* / 42*	38 / 44	48 / 20
Gesamtwert	55 / 21	50 / 24	37* / 38*	35* / 41*	27 / 52	51 / 26

Tab. 6.34: Anteile förderlicher bzw. unförderlicher Antworten in Prozent, Mittelwert aus den Mittelwerten dreier amerikanischer Universitäten und Mittelwert aus 17 bayerischen elften Klassen (Sterne bei signifikanten Unterschieden zwischen Vor- und Nachtest, 5 %-Niveau). Außerdem Vortestwerte der zwei extremsten bayerischen Klassen (Quelle: REDISH ET AL. (1998) und eigene Erhebung)

Die Anteile förderlicher und unförderlicher Antworten bei den drei amerikanischen Universitäten beim amerikanischen Originaltest und bei den 17 bayerischen Gymnasialklassen bei der deutschen Version sind in Tab. 6.34 und in Abb. 6.14 für Vor- und Nachtest aufgelistet. Zusätzlich werden in Tab. 6.34 die Vortestergebnisse zweier extremer Klassen dargelegt.

Das Cluster „Unabhängigkeit“ (Items 1, 8, 13, 14, 17, 27) soll nach REDISH ET AL. (1998) testen, ob die

Schüler glauben, physikalisches Wissen wird von einer Autorität vorgegeben und vom Schüler einfach hingenommen und erinnert (unförderlich) oder ob sie sich selbst unabhängig von Autoritäten

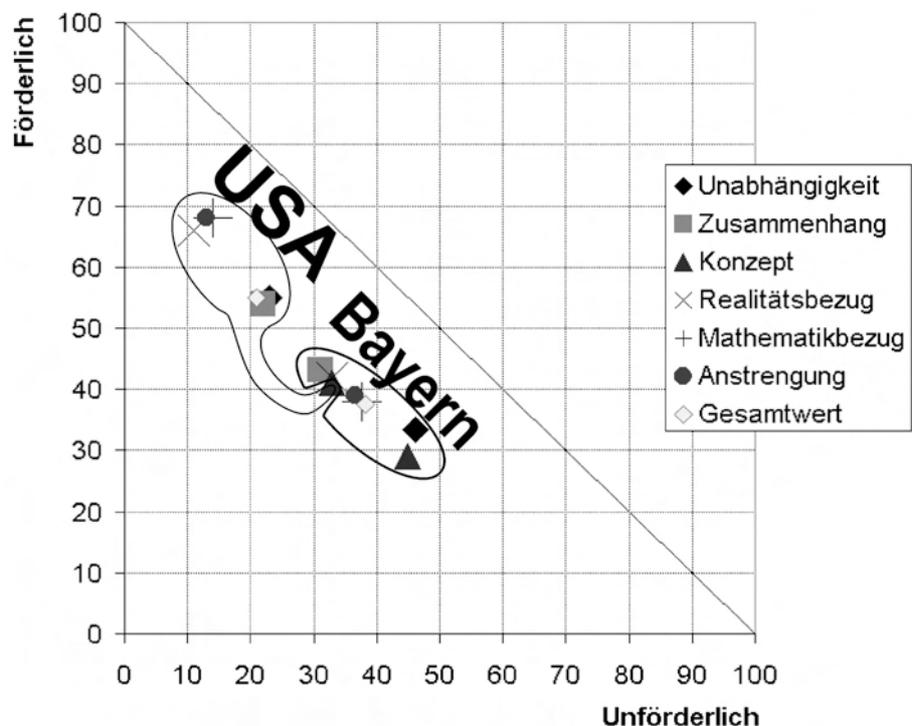


Abb. 6.14: Anteile förderlicher bzw. unförderlicher Antworten in Prozent entsprechend der Tabelle (jeweils Vortestwerte). Ergebnisse amerikanischer Studenten bei der englischen Originalversion und Ergebnisse bayerischer Gymnasiasten bei der deutschen Version.

um Einsicht bemühen (förderlich). Dieses Cluster entspricht in Teilen etwa der Dimension „Quelle des Wissens“ in dem vierdimensionalen Modell von HOFER und PINTRICH und gehört zu dem Bereich „Vorstellungen über die Struktur des Wissenserwerbs“ (Urhahne, Hopf, 2004, S. 74). An den drei einbezogenen amerikanischen Universitäten haben zu Beginn des Studiums ca. 55 % der Studenten förderliche und ca. 23 % unförderliche Antworten abgegeben (während es an den Colleges zwischen 41% und 62 % förderlichen und 14 % bis 29 % unförderlichen Antworten schwankte) (Redish et al., 1998, S. 217). Während dem ersten Semester bzw. Trimester kam es fast überall zu einer leichten Verschlechterung. Die bayerischen Elftklässler haben mit 33 % förderlichen und 46% unförderlichen Antworten deutlich schlechtere Werte als die amerikanischen Studenten. So stimmen insbesondere 65 % der Schüler der Aussage zu *„Alles, was ich tun muss, um die meisten grundlegenden Ideen in diesem Fach zu verstehen, ist einfach, die Texte lesen, die meisten Aufgaben bearbeiten und/oder im Unterricht aufmerksam sein.“* und 60 % der Aussage *„Physiklernen ist eine Sache des Erwerbs von Wissen, das sich speziell in Gesetzen, Prinzipien und Gleichungen findet, die im Unterricht und/oder im Schulbuch vorgegeben werden.“* Durch den Mechanikunterricht trat bei diesem Aufgabencluster praktisch keine Veränderung ein (Nachttest: 33 % förderlich bzw. 44 % unförderlich (jeweils nicht signifikanter Unterschied)) (im Gegensatz zu ELBY (2001) wurden die Unterschiede mit einem abhängigen t-Test nicht nur bei den förderlichen, sondern auch bei den unförderlichen Antworten auf Signifikanz geprüft).

Das Cluster „Zusammenhang“ (Items 12, 15, 16, 21, 29) soll angeblich überprüfen, ob die Schüler physikalisches Wissen als viele einzelne Informationsstücke ansehen, die man auswendig lernt (unförderlich), oder ob sie Physik als verbundenes logisches Gebäude ansehen (förderlich). Dieses Cluster entspricht in etwa der Dimension „Komplexität des Wissens“ in dem vierdimensionalen Modell von HOFER und PINTRICH und gehört zu dem Bereich „Vorstellungen über die Struktur des Wissens“ (Urhahne, Hopf, 2004, S. 73 f.). An den drei amerikanischen Universitäten wurden zu Beginn des Studiums ca. 54 % förderliche und ca. 22 % unförderliche Antworten abgegeben (Colleges: 50 % - 58 % förderliche und 17 % bis 26 % unförderliche Antworten) (Redish et al., 1998, S. 217). Während der ersten Studieneinheit kam es meistens zu einer leichten Verschlechterung. Die bayerischen Schüler haben mit 43 % förderlichen und 31 % unförderlichen Antworten deutlich schlechtere Werte als die amerikanischen Studenten. Durch den Mechanikunterricht fand eine minimale Verschlechterung statt (Nachttest: 42 % bzw. 33 % (Veränderung jeweils nicht signifikant)).

Das Cluster „Konzepte“ (Items 4, 19, 26, 27, 32) betrifft nach Meinung von REDISH ET AL. (1998) den Inhalt physikalischen Wissens und testet, ob die Schüler physikalische Probleme als mathematisches Kalkül auffassen (unförderlich), oder ob sie den zugrunde liegenden Ideen Achtung schenken (förderlich). An den drei einbezogenen Universitäten wurden zu Beginn des Studiums ca. 41 % förderliche und ca. 33 % unförderliche Antworten abgegeben (Colleges: 30 % - 47 % förderliche, 23 % bis 42 % unförderlichen Antworten) (Redish et al., 1998, S. 217). Die getesteten Elftklässler haben mit 29 % förderlichen und 45 % unförderlichen Antworten erneut deutlich schlechtere Werte als die amerikanischen Studenten. Während an fast allen amerikanischen Universitäten und Colleges durch den Mechanikunterricht eine geringe Verbesserung stattfand (Unis: 42 % bzw. 32 %), waren in Bayern nach dem Mechanikunterricht die Werte leicht schlechter (Nachttest: 28 % (nicht

signifikant) bzw. 48 % (signifikant)). Am deutlichsten von allen Items fiel die Antwort beim Item „*Am Entscheidendsten beim Lösen einer physikalischen Aufgabe ist, die richtige Gleichung zu finden, um sie anzuwenden.*“ mit nur 6 % förderlichen (= Ablehnung) und 83 % unförderlichen Antworten (= Zustimmung) aus, während in Amerika hier zwischen 13 % und 31 % förderliche Antworten gegeben werden. Außerdem verbesserten sich bei diesem Item alle amerikanischen Gruppen im Gegensatz zur bayerischen Gruppe (Nachtest Bayern unverändert bei 7 % bzw. 83 %).

Das Cluster „Realitätsbezug“ (Items 10, 18, 22, 25) soll überprüfen, ob die Schüler glauben, dass persönliche Erfahrungen in der realen Welt für den Physikunterricht relevant sind und umgekehrt (förderlich), oder ob sie nichts miteinander zu tun haben (unförderlich). An den sechs amerikanischen Ausbildungsstätten haben zu Beginn des Studiums ca. 70 % der Studenten (61 % bis 76 %) förderliche und ca. 11 % (4 % bis 16 %) unförderliche Antworten abgegeben (Redish et al., 1998, S. 217). Während der ersten Studieneinheit kommt es aber überall zu einer deutlichen Verschlechterung (Durchschnitt der sechs Orte: 61 % förderlich, 16 % unförderlich). Die getesteten Schüler haben mit 42 % förderlichen und 33 % unförderlichen Antworten erheblich schlechtere Werte als die amerikanischen Studenten. Dafür bleiben diese im Durchschnitt ungefähr erhalten (Nachtest: 42 % bzw. 34 % (jeweils nicht signifikant)). Beim Cluster „Realitätsbezug“ treten außerdem die größten Streuungen bei den Schülerantworten auf (Beispiel Vortest förderl. Antworten: $\mu = 0,42$, $\sigma = 0,30$).

Das Cluster zur Rolle der Mathematik (Items 2, 6, 8, 16, 20) soll nach REDISH ET AL. (1998) testen, ob die Schüler Gleichungen nur auswendig lernen und zum kalkülhaften Manipulieren von Zahlen benutzen (unförderlich) oder ob Gleichungen physikalische Phänomene repräsentieren, also die Schüler die tieferen physikalischen Beziehungen darin sehen (förderlich). An den amerikanischen Ausbildungsstätten gibt es zu Beginn des Studiums zwischen 58 % und 74 % förderliche und zwischen 10 % und 17 % unförderliche Antworten (Redish et al., 1998, S. 217). Nach der ersten Studieneinheit sind die Durchschnittswerte an drei Orten unverändert, während es an den drei anderen deutliche Verschlechterungen gab. Die bayerischen Schüler haben mit 38 % förderlichen und 38 % unförderlichen Antworten weit schlechtere Werte als die amerikanischen Studenten und sie haben sich im Laufe der elften Jahrgangsstufe auch noch etwas verschlechtert (Nachtest: 35 % nicht signifikant bzw. 42 % signifikant). Beispielsweise sind 46 % (nachher 49 %) der Schüler überzeugt, dass die Herleitung einer Gleichung nur den Sinn hat zu zeigen, dass sie richtig ist und benutzt werden darf, während ein guter Lehrer mit der Herleitung die dahinter liegende physikalische Struktur und den physikalischen Grund für die Gleichung zeigen will. Außerdem meinen 46 % (nachher 48 %), dass man Gleichungen erinnern muss und nicht erschließen kann. Bei diesem Cluster finden sich die größten Unterschiede zwischen den amerikanischen und den bayerischen Ergebnissen.

Das Cluster „Anstrengung“ (Items 3, 6, 7, 24, 31) soll überprüfen, ob die Schüler die angebotenen Informationen effektiv nutzen. Hier können die Daten aber nur sehr vorsichtig interpretiert werden. Einige Items beziehen sich auf Anstrengungen, die traditionell an Universitäten, insbesondere in Physik-Einführungskursen an amerikanischen Universitäten, gefordert werden (Texte und Beispiele durcharbeiten, Hefteinträge durchgehen, Herleitungen nachvollziehen); gerade in Physik sehr gute Gymnasiasten verzichten aber häufig darauf. Anstrengungen, die ein aktives Durchdenken und Vergleichen betreffen, werden dagegen nicht explizit abgefragt. In den USA starten die Studenten

ihr Studium hier mit vorbildlichen Werten (66 % bis 80 % förderlich, 7 % bis 16 % unförderlich), die sich bis zum Ende der ersten Studieneinheit drastisch verschlechtern (44 % bis 65 % förderlich, 16 % bis 30 % unförderlich) (Redish et al., 1998, S. 217). REDISH (2001, S. 2) meint, dass vor dem Kurs Optimismus vorlag, was man tun wird, und nach dem Kurs eine Überprüfung an der Realität stattfand, was man tatsächlich getan hat; also die Studenten zwar gute Absichten haben, aber aus Zeitnot nicht entsprechend handeln. Im bayerischen Gymnasium beginnt aber mit der elften Klasse kein neuer Abschnitt (Kurssystem bisher erst ab Klasse 12). Hier werden 39 % angeblich förderliche und 37 % angeblich unförderliche Antworten gegeben. Während des Mechanikunterrichts verschlechtern sich diese Werte deutlich auf 32 % bzw. 42 %. Die Veränderung ist dabei jeweils hoch signifikant. Hier spielt sicher auch eine Rolle, dass viele Schüler in Bayern Physik nach der elften Klasse ablegen, so dass dadurch auch die Bereitschaft, sich in diesem Fach anzustrengen, im Laufe des Schuljahres sinkt.

Schließlich wird noch ein Gesamtwert berechnet. REDISH (2001, S. 2) empfiehlt diesen ohne die 5 Items zur Anstrengung zu berechnen, aber REDISH ET AL. (1998, S. 216 + 218) nehmen alle Items hinzu, was allerdings bei den bayerischen Werten praktisch keinen Unterschied macht ($\leq 0,5$ Prozentpunkte). Die Universitätsstudenten verschlechtern sich von 55 % bzw. 21 % auf 50 % bzw. 24%. Die bayerischen Schüler-Klassen verschlechtern sich ebenso von 37 % bzw. 38 % auf 35 % bzw. 41 % (siehe Tab. 6.34), wobei die Verschlechterung jeweils hoch signifikant ist.

Insgesamt kann man sagen, dass die Gymnasiasten eine andere Sicht von der Natur physikalischen Wissens und von der Natur des Lernens physikalischen Wissens haben als Experten. Diese Sicht verschlechtert sich im Mittel sogar noch leicht (teilweise signifikant) durch den Mechanikunterricht. Auffällig ist aber insbesondere ein Unterschied zwischen den Zahlenwerten für die Oberstufe des bayerischen Gymnasiums und für die amerikanischen Universitäten bzw. Colleges. Da zwei getestete Leistungskurse der elften Jahrgangsstufe (siehe Kapitel 7.3.3.8) aus Rheinland-Pfalz sogar etwas besser als die amerikanischen Studenten abschneiden, kann es nicht in erster Linie an der Übersetzung liegen. Es ist sicher auch auf einen andersartigen Physikunterricht an bayerischen Gymnasien und amerikanischen Highschools zurückzuführen. Außerdem haben die amerikanischen Highschoolschüler Wahlmöglichkeiten bei den Schulfächern, so dass nicht alle Schüler eines Jahrgangs getestet wurden. Dass der Unterricht viel bewirken kann, zeigte ELBY (2001), der einen Mechanikunterricht entwarf, der speziell die epistemologische Sicht der Schüler verändern sollte. Er zeigte, dass er es damit an einer Highschool in Virginia (55 Schüler) schaffte, alle Cluster des MPEX-Tests (außer „Anstrengung“) signifikant zu verbessern; der Anteil förderlicher Antworten stieg während dem Schuljahr je nach Cluster signifikant um 11 bis 27 Prozentpunkte (Elby, 2001, S. S56).

Es stellt sich die Frage, ob die Schüler ihre ungünstige Sicht zum Physiklernen schon mit in den Unterricht bringen, also z.B. Erfahrungen aus anderen Fächern einbringen, oder ob diese erst durch den Physikunterricht erzeugt werden (so wie dieser die Sicht während des Mechanikunterrichts verschlechtert). Damit aber die Fragen des MPEX-Tests überhaupt beantwortet werden können, ist ein gewisser Umfang an Physikunterricht nötig. Deshalb wurde der Test in zwei achten Klassen (46 Schüler) nach dem ersten Halbjahr eingesetzt, da Physik in Bayern am Gymnasium bisher in der achten Jahrgangsstufe mit einer phänomenologischen Einführung und einem Überblick über ver-

schiedene Physikbereiche beginnt. Dabei ergaben sich leicht schlechtere Werte als in der elften Klasse, wobei der Unterschied nur in zwei Fällen signifikant ist: Der Anteil förderlicher Antworten zum Cluster „Mathematik“ ist bei den Achtklässlern kleiner (29 % statt 38 %). Möglicherweise liegt das daran, dass bei den bis dahin einfachen Rechnungen die Schüler noch nicht erlebt haben, dass Gleichungen auswendig lernen und Zahlen einsetzen zum Auflösen nicht genügt. Der Anteil unförderlicher Antworten zum Cluster „Unabhängigkeit“ ist außerdem bei den Achtklässlern kleiner (38 % statt 46 %). Das heißt noch nicht so viele Schüler halten physikalisches Wissen für vorgegeben, das einfach hingenommen werden muss. Insgesamt bleibt aber das Ergebnis, dass im Anfangsunterricht schon ähnlich ungünstige Vorstellungen zum Physiklernen vorhanden sind wie zu Beginn der Oberstufe.

<i>Anteil förderlicher / unförderlicher Antworten in %</i>	weibliche Elfklässler (N = 156)		männliche Elfklässler (N = 113)	
	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest
Unabhängigkeit	32 / 47	32 / 45	36 / 42	35 / 41
Zusammenhang	43 / 32	40 / 34	44 / 29	45 / 32
Konzept	28 / 47*	26 / 47	31 / 41*	31 / 44
Realitätsbezug	36* / 38*	35* / 38*	51* / 25*	54* / 23*
Mathematikbezug	38 / 39	35 / 43	40 / 33	39 / 38
Anstrengung	44 [°] / 32 [°]	36 [°] / 39 [°]	36 [°] / 40*	29 [°] / 43
Gesamtwert	36 [°] / 40*	34 [°] / 41*	40* / 35*	39* / 37*

Tab. 6.35: Vergleich der Anteile förderlicher bzw. unförderlicher Ansichten bayerischer Gymnasiasten in Prozent aufgeteilt nach Geschlecht, jeweils vor und nach dem Mechanikunterricht. Signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern sind mit einem Stern * und fett markiert (Unabhängiger t-Test bzw. Mann-Whitney-U-Test, 0,05-Niveau). Signifikante Veränderungen von Vor- zu Nachtest sind mit einem Kreis [°] markiert (Abhängiger t-Test bzw. Wilcoxon-Test, 0,05-Niveau.)

Interessant ist nun noch, dass es gewisse Geschlechterunterschiede gibt (siehe Tab. 6.35). Von den 336 herkömmlich unterrichteten bayerischen Schülern haben 156 Schülerinnen und 113 männliche Schüler ihr Geschlecht angegeben. Die größten Unterschiede gibt hier es bei dem Cluster „Realitätsbezug“. Sowohl vor als auch nach dem Unterricht haben die Jungen deutlich und signifikant mehr förderliche und weniger unförderliche Antworten gegeben. Die Jungen halten den Physikunterricht also für das tägliche Leben in der realen Welt für relevanter als die Mädchen. Das führt zu der bekannten These, dass im Physikunterricht zu viele für Jungen interessante Kontexte gewählt werden und der Unterricht sich mehr an den Interessensgebiete der Mädchen orientieren sollte. Beim Cluster „Anstrengung“ haben dagegen (wie zu erwarten war) die Mädchen beim Vortest signifikant mehr förderliche und weniger unförderliche Einstellungen gezeigt als die Jungen. Durch den Unterricht verschlechtern sich die Werte beim Cluster „Anstrengung“ bei den Schülerinnen signifikant und ebenso der Anteil förderlicher Antworten bei den männlichen Schülern, so dass auch nach dem Unterricht die Schülerinnen noch signifikant mehr förderliche Antworten geben. Beim Gesamtwert haben die Jungen sowohl vor als auch nach dem Unterricht bei sowohl dem Anteil förderlicher als auch unförderlicher Antworten signifikant günstigere Werte. Hier macht sich wohl vor allem der große Unterschied bei der Ansicht zum Realitätsbezug bemerkbar.

6.6.3 Ergebnisse in Treatmentklassen

In sechs Klassen (125 Schüler) haben Lehrer, die nach dem vorgestellten Konzept unterrichteten und am Begleitseminar teilnahmen, die deutsche Version des „Maryland Physics Expectations Survey“ (MPEX) ihren Schülern (N = 125) gestellt. In drei dieser sechs Klassen wurde dabei auch Modellbildung eingesetzt, während die andere Hälfte darauf verzichtete. Wie man aus Tab. 6.36 entnehmen kann, unterscheiden sich die Ergebnisse im Vortest wenig von herkömmlich unterrichteten Klassen, die Werte sind etwas günstiger (in der Hälfte der Fälle aber signifikant günstiger). Vom Vortest zum Nachtest gibt es ebenso wie bei den Vergleichsklassen nur minimale Veränderungen – fast immer Veränderungen zum Schlechteren. Die Veränderungen in den meisten Clustern sind dabei aber nicht signifikant (Ausnahme: Cluster „Anstrengung“ und Mathematikbezug“). Man kann also festhalten, dass der Unterricht nach dem Unterrichtskonzept im Durchschnitt bezüglich den Dimensionen des MPEX-Tests keinen positiven Effekt hat. Ziel war aber auch eine Veränderung der Schülervorstellungen zu physikalischen Begriffen, nicht eine Veränderung der epistemologischen Vorstellungen bzw. der Vorstellungen über Physiklernen.

<i>Anteil förderlicher / unförderlicher Antworten in %</i>	traditioneller Unterricht, 17 Klassen		Konzept, Lehrer mit Seminar, 6 Klassen		Konzept mit Modellbildung 3 Klassen	
	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest
Unabhängigkeit	33 / 46	33 / 44	37 / 39*	37 / 38*	37 / 37*	40* / 32*
Zusammenhang	43 / 31	42 / 33	47 / 27	44 / 30	45 / 29*	48* / 25*
Konzept	29 / 45°	28 / 48°	35* / 39*	32* / 40*	33 / 45°	31 / 33°*
Realitätsbezug	42 / 33	42 / 34	48* / 29	50* / 26*	46° / 30°	56°* / 19°*
Mathematikbezug	38 / 38°	35 / 42°	40 / 31°*	39 / 39°	39 / 32	43* / 31*
Anstrengung	39° / 37°	32° / 42°	34°* / 40°	28° / 48°*	32* / 45*	29 / 46
Gesamtwert	37° / 38°	35° / 41°	40 / 35*	38 / 38	39 / 37°	41* / 32°*

Tab. 6.36: Vergleich der Anteile förderlicher bzw. unförderlicher Ansichten bayerischer Gymnasiasten in Prozent bei verschiedenem Unterricht, jeweils vor und nach dem Mechanikunterricht. Signifikante Unterschiede der Treatmentklassen im Vergleich zur Vergleichsgruppe sind mit einem Stern * markiert (Unabhängiger t-Test bzw. Mann-Whitney-U-Test, 0,05-Niveau). Signifikante Veränderungen von Vor- zu Nachtest sind mit einem Kreis ° und fett markiert (Abhängiger t-Test bzw. Wilcoxon-Test, 0,05- Niveau.)

Betrachtet man aber nur die drei der sechs Klassen, die auch Modellbildung intensiv einsetzten, erhält man ein deutlich anderes Bild: Im Vortest gibt es kaum signifikante Unterschiede zur Vergleichsgruppe, beim Cluster „Anstrengung“ sind die Schülerantworten signifikant ungünstiger. Bei fast allen Clustern hat aber der Anteil der förderlichen Ansichten von Vor- zu Nachtest zugenommen und der unförderlichen Ansichten abgenommen. Allerdings ist bei den förderlichen Antworten die Zunahme nur beim Cluster „Realitätsbezug“ signifikant (wegen der geringen Probandenanzahl N = 66) und bei den unförderlichen Antworten bei den Clustern „Konzept“, „Realitätsbezug“ und „Gesamtwert“. Bei allen Clustern außer „Anstrengung“ unterschieden sich die Schüler damit im Nachtest signifikant von der Vergleichsgruppe. Es wäre denkbar, dass dieser Effekt nur an den beteiligten Lehrern liegt, da bei dieser Treatmentgruppe nur über drei Lehrer gemittelt wurde. Außerdem ist zu bedenken, dass alle drei Klassen dem mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig angehören, in dem mehr Unterrichtszeit zur Verfügung steht. Bei WANG, HAERTEL und WALBERG

(1993) kommen in der Rangliste des Einflusses auf den Lernerfolg die „Klassenführung durch den Lehrer“ auf Platz 2 und die Quantität des Unterrichts auf Platz 7 (zitiert nach Meyer, 2004, S.35). Es kann aber auch vermutet werden, dass dies – insbesondere beim Cluster „Realitätsbezug“ - ein Ergebnis der Modellbildung ist, mit der nicht nur gezeigt wurde, dass komplexe Probleme gelöst werden können, sondern insbesondere Abläufe mit Gleitreibung und Luftreibung berechnet wurden. Damit wäre dies ein weiterer Hinweis auf den Nutzen von Modellbildung im Mechanikunterricht. Die größten positiven Veränderungen fanden in der Klasse statt, die vom Autor des Unterrichtskonzeptes und dieser Arbeit unterrichtet wurde, wobei nur Verbesserungen beim Realitätsbezug (von 44 % auf 63 % förderliche Antworten), bei „Konzepte“ (von 43 % auf 25 % unförderliche Antworten), „Anstrengung“ (von 58 % auf 34 % unförderliche Antworten) und „Gesamt“ (von 38 % auf 28% unförderliche Antworten) signifikant sind. Möglicherweise wurde bei dem veränderten Vorgehen den Schülern auch Grundsätzliches zur Physik und zum Lernen bewusst, was aber offensichtlich nicht aus den Materialien für die anderen Lehrer ersichtlich wird, da in deren Klassen nicht der gleiche Effekt auftritt.

6.6.4 Zusammenhang zwischen MPEX-Ergebnis und Physikverständnis

Von den herkömmlich unterrichteten Klassen haben acht Klassen sowohl am FCI-Test als auch am Maryland Expectation Survey“ (MPEX) teilgenommen. Insgesamt haben damit 144 bayerische Gymnasiasten der Jahrgangsstufe 11 bei beiden Tests den Vor- und Nachtest bearbeitet. Bei diesen wurde die These überprüft, dass Vorstellungen über die Natur der Physik und über das Lernen der Physik ein erfolgreiches Lernen physikalischer Inhalte unterstützt. Dazu wurde der Gesamtscore beim FCI-Test (Vor- und Nachtest) und der Anteil förderlicher bzw. unförderlicher Antworten beim MPEX-Test (Vor- und Nachtest) ermittelt.

Zunächst kann man feststellen, dass zwischen dem Ergebnis beim FCI-Vortest und dem beim MPEX-Vor- und -Nachtest schwache, aber signifikante (0,01-Niveau) Korrelationen bestehen (ca. 0,27). Das Ergebnis beim FCI-Nachtest korreliert ebenso signifikant (0,01-Niveau) mit den MPEX-Nachtestergebnissen (ca. 0,25), aber schwächer mit dem MPEX-Vortestergebnissen. Allerdings korrelieren die relativen Zugewinne der Schüler beim FCI-Test nicht mit den MPEX-Testergebnissen!

Schließlich wurden die Schüler anhand der Anteile förderlicher Antworten im MPEX-Nachtest in zwei gleich große Gruppen geteilt: Die schlechtere Gruppe (Anteil förderlicher Antworten unter 33%) erreichte im FCI-Nachtest nur 37 % (relativer Zugewinn: 15 %), während die bessere Hälfte (Anteil förderlicher Antworten über 33 %) einen FCI-Wert von 45 % erreichte (relativer Zugewinn: 19 %). Der Unterschied bei den Nachtestwerten ist auf dem Niveau von 0,001 signifikant (t-Test). Aber der Unterschied bei den relativen Zugewinnen ist nicht signifikant (t-Test, 0,05-Niveau).

Außerdem haben die 20 Schüler, die die FCI-Grenze von 60 % (17 von 29 Items) erreichen, beim MPEX-Nachtest einen durchschnittlichen Anteil von 42 % förderlichen Antworten, während die anderen 124 Schüler nur auf 33 % kommen, wobei der Unterschied auf dem 0,05-Niveau signifikant ist.

Es kann also ein gewisser Zusammenhang zwischen einerseits den Vorstellungen über die Natur der Physik bzw. über das Lernen der Physik und andererseits mit dem Verständnis des newtonschen Kraftkonzeptes festgestellt werden. Damit ist keine kausale Aussage getroffen; es ist unklar, was hier Ursache und was Folge ist bzw. wovon beide Fähigkeiten abhängen. Allerdings kann kein Zusammenhang zwischen einerseits den Vorstellungen über die Natur der Physik bzw. über das Lernen der Physik und andererseits mit dem relativen Lernzuwachs in der newtonschen Mechanik festgestellt werden.

7 Weiterer Einsatz von Teilen des Gesamtkonzeptes

Obwohl das Kinematik-/Dynamik-Unterrichtskonzept ursprünglich im Hinblick auf einen lehrergeführten Physikunterricht in bayerischen Gymnasialklassen entwickelt wurde, lassen sich die Ideen und Materialien auch leicht unter anderen Bedingungen einsetzen. Auch dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Erfahrungen gesammelt.

7.1 Verwendung im BMBF-Projekt „Vernetztes Studium Chemie“

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) genehmigte das Projekt „Vernetztes Studium – Chemie“, in dem unter Federführung des Fachinformationszentrums (FIZ) Chemie in Berlin die Projektpartner aus 16 Hochschulen gemeinsam ein Netz von internetbasierten, interaktiv-multimedialen Wissensmodulen erarbeiteten (Gößwein et al., 2003, S. 16). Das Teilprojekt Physik wurde unter Leitung von Prof. Heuer an der Universität Würzburg durchgeführt. Bei den Modulen¹¹ „Kinematik“ und „Dynamik“ (<http://www.vs-c.de/beispiele/Physik/Mechanik>) fand eine Beratung durch den Autor dieser Arbeit statt, indem dieser die Autoren der beiden Module u.a. in einem eigens eingerichteten Seminar über Schülervorstellungen und die bisher in der Literatur vorgeschlagenen Mittel und Wege zu deren Veränderung informierte. Insbesondere beim Erstellen des Lernmoduls „Kinematik“ hat man sich dann bei einzelnen Teilen an dem Unterrichtskonzept orientiert, das hier für den Physikunterricht in bayerischen Gymnasialklassen entwickelt wurde und Erfahrungen aus der ersten Durchführung des Unterrichtskonzeptes genutzt. So werden die Größen „Ort“ und „Ortsänderung“ sowie „Geschwindigkeit“ und schließlich „Geschwindigkeitsänderung“ und „Beschleunigung“ stets an einer zweidimensionalen Simulation eines Ballfluges eingeführt, die mit einer Animation mit dynamisch ikonischen Repräsentationen dargestellt wird. Erst nach dieser allgemeinen vektoriellen Einführung der Größen wird jeweils auf eine eindimensionale Bewegung spezialisiert. Dynamisch ikonische Repräsentationen in der Form von Vektoren sowie die Betrachtung der Änderungen in einem bestimmten Zeitintervall spielen eine wichtige Rolle. Des Weiteren wird bereits bei einfachen kinematischen Problemstellungen eine graphisch-orientierte Modellbildung eingesetzt. Eigenaktivität wird durch die Verwendung der Computermaus zur Aufnahme zweidimensionaler Bewegungen erreicht.

Eine Evaluation der erstellten Module war in diesem Projekt weder vorgesehen noch möglich, ist aber eine noch wünschenswerte Aufgabe. Die Modul wurden lediglich im Rahmen einer kleinen formativen Evaluation von zwei Studenten durchgearbeitet, die dabei angeben sollten, was attraktiv bzw. weniger attraktiv ist und wo Verständnisschwierigkeiten auftauchen und wo die Formatierung

¹¹ Die Projektgruppe am Lehrstuhl für Didaktik der Physik der Universität Würzburg war damit beauftragt, einen Teil der Inhalte der Vorlesungen zur Einführung in die Physik für Chemiestudenten in zehn Module umzusetzen. In den ersten beiden Projektjahren wurde das Softwaretool JPAKMA entwickelt, mit dem ähnlich wie im Windows-Programm PAKMA Realmessungen (über die serielle Schnittstelle oder über die Computermaus) und insbesondere Simulationen - über eine graphische Modellbildung oder skriptgesteuert - möglich sind. Für die Darstellung stehen neben Graphen (2D und 3D) auch Animationen und dynamisch ikonische Repräsentationen zur Verfügung. JPAKMA ist nicht an ein Betriebssystem gebunden, sondern läuft auf jeder Plattform, die den Ablauf von Java-Applets unterstützt (Schönberger, Heuer, 2002).

noch geeigneter gewählt werden kann (Federlein, 2003, S. 16 ff.). Kritikpunkte bezogen sich vor allem auf Schwächen der Software JPAKMA und der verwendeten Ablaufumgebung, was hier nicht weiter interessant ist. Es zeigte sich auch, dass die beiden Studenten nicht motiviert waren, sich die Anleitung zur Modellbildung durchzulesen, und hier statt Text eine andere Form der Darstellung zu wählen ist. Dennoch zeigt dieses Modul, dass das in dieser Arbeit für den Kinematikunterricht verwendete Konzept auch für Selbstlerneinheiten nutzbar ist und entsprechend verändert werden kann.

7.2 Einsatz in einer Vorlesung für Lehramtsstudenten (Hauptschule)

7.2.1 Beschreibung der Veranstaltung

Im Wintersemester 2002/2003 wurde vom Autor ein Teil der Vorlesung „Schulphysik I und ihre fachwissenschaftlichen Grundlagen (mit Übungen) (Studium der Didaktik einer Fächergruppe der Hauptschule)“ übernommen. An dieser Veranstaltung nahmen sieben Studenten mit den Studienfächern Lehramt an Grund-, Haupt- oder Förderschulen teil. Ziel dieser Veranstaltung ist, den Studenten die fachwissenschaftlichen Grundlagen für den Physikunterricht zu geben, den diese einmal halten werden. Dabei soll die Physik etwa auf Gymnasialniveau (Grundkurs) dargestellt werden, wobei es aber um die Kenntnis der Zusammenhänge geht und quantitatives Rechnen keine Rolle spielt. Man kann zwar davon ausgehen, dass die Studenten die Inhalte schon in ihrer eigenen Schulzeit gelehrt bekommen haben, aber man kann nicht davon ausgehen, dass sie dies verstanden haben bzw. noch wissen. Dabei kann nur von geringeren physikalischen Fähigkeiten ausgegangen werden, da es sich um Studenten handelt, die nicht Physik als Hauptfach gewählt haben.

Vorgegeben war, dass in fünf Doppelstunden die Statik, die ein- und zweidimensionale Kinematik und die ein- und zweidimensionale Dynamik einschließlich Fall- und Wurfbewegungen behandelt werden sollten. Erhaltungsgrößen wurden erst anschließend unterrichtet. In den zusätzlichen fünf Übungsstunden sollten vor allem einfache Schulversuche ohne Computer, die auch bei geringer Ausstattung einer Schule möglich sind, von den Studenten mit den zur Verfügung gestellten Mitteln durchgeführt werden.

In dieser Vorlesung wurde das Gesamtkonzept genutzt, wobei auf wichtige Aspekte wie Vorhersagen machen, Diskutieren, Modellbildung und qualitative und quantitative Übungsaufgaben sowie auf manche Versuche bzw. Inhalte verzichtet werden musste. Die Statik wurde als Spezialfall der Dynamik erst nach der Dynamik behandelt. In der ersten Doppelstunde wurden die Begriffe „Ort“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ anhand zweidimensionaler Bewegungen der PC-Maus eingeführt und auf eindimensionale Bewegungen spezialisiert. In der zweiten Doppelstunde wurden das zweite newtonsche Gesetz mit der Verallgemeinerung (d.h. mehrere Kräfte und Reibungskräfte) und das erste newtonsche Gesetz behandelt. In der dritten Doppelstunde folgten das dritte newtonsche Gesetz sowie Anwendungen des zweiten newtonschen Gesetzes, z.B. Fallbewegungen, und in der nächsten Doppelstunde der waagrechte Wurf, Kräfte bei der Kreisbewegung und die Gravitation. Erst in der fünften Doppelstunde wurde die Statik, wie das Hookesche Gesetz, Kraftwandler, der Hebel und Kräfteaddition und -zerlegung behandelt.

Die erste Übung zur Kinematik fand am Computer statt. Die Studenten sollten selbst verschiedene Mausbewegungen auf dem Tisch durchführen und mit dem Computer Bahnkurven aufnehmen und Ortsänderungs- und Geschwindigkeitsvektoren betrachten sowie Geschwindigkeitsänderungs- und Beschleunigungsvektoren. In der zweiten Übung zur eindimensionalen gleichmäßig beschleunigten Bewegung wurde mit dem Zeit-Registriergerät von Phywe (Bestellnummer 11607.00) gearbeitet, bei dem der Wagen einen Streifen Thermopapier mitzieht und ein Taktgeber 50 Punkte pro Sekunde auf das Papier zeichnet. Damit konnte passend zum Gesamtkonzept das Arbeiten mit Δx und Δv und die Definitionsgleichungen $v = \Delta x / \Delta t$ und $a = \Delta v / \Delta t$ betont werden. Durch Abmessen der Punkte kann man zunächst ein Zeit-Ort-Diagramm erstellen. Um ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm einfach zu erhalten, wurde der Papierstreifen bei jeder n-ten Zeitmarke (z.B. $n = 2$) durchgeschnitten und die erhaltenen Ortsänderungen Δx nebeneinander als Säulen aufgeklebt. Dabei wird auch deutlich, dass der zurückgelegte Weg der Fläche unter dem Zeit-Ort-Graphen entspricht. Aus $\Delta v / \Delta t$ erhält man mittlere Beschleunigungen, die geringer sind als man nach $a = F_{\text{Zug}} / m_{\text{gesamt}}$ erwarten würde, was zu diskutieren ist. Eine weitere Übungsstunde beschäftigte sich mit Reibungskräften, wobei neben Haft-, Gleit- und Rollreibung auch Erfahrungen mit Luftreibung bei Fallkegeln zu machen waren. Schließlich wurde noch die Fallbeschleunigung mit verschiedenen Versuchsaufbauten bestimmt und das Dehnungsverhalten eines Gummiringes sowie einer weichen und einer harten Feder ausgemessen.

7.2.2 Erfahrungen und Testergebnisse

In dieser Veranstaltung wurde eine Vorlesungsumfrage durchgeführt, bei der die Studenten auf einer fünfstufigen Skala zwischen zwei extremen Aussagen wählen konnten. Alle Studenten gaben an, dass das Niveau genau richtig war. Die physikalischen Inhalte wurden tendenziell eher als vertraut bezeichnet. Die Anzahl der Versuche wurde als passend und die Versuche selbst als überzeugend angeführt. Interessant ist, dass es für gut befunden wurde, dass komplexe Versuche als Videos und als Reproduktionen gezeigt wurden. Die gleiche Meinung hatten nach Lehreraussage auch die Schüler (siehe Kapitel 6.3.2). Überraschend war andererseits, dass die Darstellung der Messergebnisse in Animationen und mit Pfeilen weder als verwirrend noch als hilfreich bezeichnet wurde, obwohl aufgrund der Erfahrungen in der Schule mit „hilfreich“ gerechnet wurde. Der Grund hierfür könnte sein, dass mit den Pfeilen zu wenig gearbeitet wurde. Um deren Potential wirklich zu nutzen, ist es nicht nur wichtig, detaillierte Vorhersagen zu den Pfeilen zu verlangen, sondern auch sich langsam, z.B. in Einzelschritten, das Verhalten der Pfeile anzuschauen. Es sollte immer mit recht beschränkten Darstellungen begonnen werden und weitere Darstellungen schrittweise dazugeblendet werden, was Zeit kostet. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Zeit wurde hierfür zu wenig Zeit investiert und zu schnell neue Codierungen gezeigt.

Speziell wurden die Studenten gefragt, ob sich ihr Verständnis von den Begriffen „Geschwindigkeit“, „Beschleunigung“ und „Kraft“ geändert hat. Während bei Geschwindigkeit und Kraft eine eher geringere Veränderung angegeben wurde, wurde bei der Beschleunigung deutlicher eine Veränderung gesehen, was auch im Gespräch von einigen betont wurde. So wurde erklärt, dass „Be-

schleunigung“ vorher nur als skalare Größe im Sinne von „langsamer werden /schneller werden“ gesehen wurde.

Die Übungen, die als interessant bezeichnet wurden, trugen angeblich zum Verständnis bei. Insbesondere die erste Übung am PC wurde besonders gelobt, die für das Verständnis als hilfreich betrachtet wurde. Eine Studentin, die angab, dass sich ihre Vorstellung von Geschwindigkeit und Beschleunigung deutlich veränderte, behauptete, dass die erste Übung am PC viel zum Verständnis beitrug, während die anderen Übungen nur sehr wenig dazu beitrugen. Insbesondere meinte sie mit der hilfreichen Übung die PAKMA-„Projekte“ zur Beschleunigung – zum einen die Beschleunigung bei einer zweidimensionalen Mausbewegung, zum anderen eine Simulation zum Landen einer Rakete, bei der eine Rakete möglichst schnell mit geringer Geschwindigkeit auf dem Mond aufsetzen sollte, man aber nur die Beschleunigung einstellen konnte.

Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl und der geringen zur Verfügung stehenden Zeit war es nicht sinnvoll, einen Verständniszuwachs mit mehreren Tests zu erheben. Um sowohl zur Kinematik als auch zur Dynamik einige Testergebnisse zu haben, wurde der Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ eingesetzt (Kapitel 6.4.2.1). Wie die Evaluation des Schulunterrichts nach dem entworfenen Konzept zeigt (Kapitel 6.3 – 6.5), war dies eine ungünstige Entscheidung, da mit diesem Konzept zwar qualitatives Verständnis gefördert wurde, aber sich dies bei diesen sehr speziellen Aufgaben nur wenig zeigt. Geeigneter wäre die Aufgabe zur zweidimensionalen Kinematik (Kapitel 6.4.1) oder der FCI-Test gewesen (Kapitel 6.5.1).

Aufgaben- gruppe	Anzahl berück- sichtigter Items	<i>Vorlesung Schulphysik (N = 8)</i>			<i>Traditioneller Schulunterricht</i>		
		Mittel- wert vorher	Mittel- wert nachher	rel. Zuge- winn	Mittel- wert vorher	Mittel- wert nachher	rel. Zuge- winn
<i>a(t)</i> -Aufgaben nach WILHELM	6	33 %	69 % *	53 %	9 %	47 % *	42 %
Krafttextaufga- ben (Schlitten)	7	25 %	48 %	31 %	14 %	32 %	20 %
<i>F(t)</i> -Aufgaben	7	11 %	23 % *	14 %	9 %	21 % *	14 %

Tab. 7.1: Anteile richtiger Lösungen beim Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ bei der Vorlesung „Schulphysik I“ und bei traditionellem Schulunterricht. Ein Stern zeigt, dass sich die entsprechenden Verteilungen beim Nachtest signifikant unterscheiden (Mann-Whitney-U-Test, 5 %-Niveau, einseitig).

In die Auswertung wurden nur die acht Studenten einbezogen, die an Vor- und Nachtest und an einem größeren Teil der Vorlesung teilnahmen. Wie Tab. 7.1 zeigt, waren die Studenten zu Beginn der Vorlesung im Durchschnitt schlechter als Gymnasiasten nach dem konventionellen Unterricht (Kapitel 6.4.2.3 und 6.5.2), obwohl sie auch entsprechenden Schulunterricht als Schüler hatten. Das ist aber nicht verwunderlich: Zum einen liegt der entsprechende Schulunterricht einige Jahre zurück, zum anderen ist zu bedenken, dass sich diese Studenten nicht für Physik als Hauptfach entschieden haben (ein Großteil hatte sich für Sonderpädagogik entschieden). Beim Nachtest kamen die Studenten dagegen im Durchschnitt auf bessere Werte als die Gymnasiasten nach ihrem herkömmlichen Dynamikunterricht. Ein Mann-Whitney-U-Test ergibt, dass sich die (nicht normalverteilten) Verteilungen bei dem Gesamtwert der Beschleunigungsgraphenaufgaben und der Kraftgra-

phenaufgaben signifikant (5 %-Niveau, einseitig) unterscheiden, nicht aber bei den Krafttextaufgaben.

Betrachtet man dagegen die relativen Zugewinne der beiden Gruppen, haben die Lehramtsstudenten bei den Beschleunigungsgraphenaufgaben und bei den Krafttextaufgaben deutlich höhere Werte, nicht aber bei den Kraftgraphenaufgaben. Da beim traditionellen Schulunterricht die Vor- und Nachtestergebnisse von verschiedenen Schülern sind, können keine individuellen relativen Zugewinne berechnet werden und diese auch nicht in einem Signifikanztest mit den Studenten verglichen werden.

Für einen Vergleich wurde der gleiche Test in der gleichen Veranstaltung zwei Jahre später anderen Studenten vorgelegt, die traditionell unterrichtet wurden. Allerdings wurden keine Intelligenztests durchgeführt, um gleich kognitive Kompetenzen sicherzustellen. Die entsprechenden Verteilungen beim Nachtest bei den drei Subgruppen unterscheiden sich aufgrund der kleinen Teilnehmerzahl nicht signifikant (Mann-Whitney-U-Test, 5 %-Niveau zweiseitig) (siehe Tab. 7.2). Insbesondere bei den Kraftaufgaben waren die Unterschiede nicht groß. Anders ist es bei den Beschleunigungsgraphenaufgaben, bei denen in der Treatmentgruppe durchschnittlich mehr als doppelt so viele Items richtig beantwortet wurden (ca. zwei Drittel statt ein Drittel) und eine hohe Effektstärke von $d = 0,94$ vorliegt (bei einseitiger Fragestellung auf dem Niveau von 6 % wäre dieser Unterschied signifikant). Interessant ist hier eine genauere Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Items. Bei den Items mit konstanter Geschwindigkeit oder beschleunigter Bewegung nach rechts sind die Unterschiede nicht signifikant (im Durchschnitt 75 % statt 46 %). Aber bei beschleunigten Bewegungen nach links liegen große Unterschiede vor (56 % statt 8 %, signifikant bei Mann-Whitney-U-Test, 5%-Niveau einseitig), was eine extrem große Effektstärke von $d = 4,7$ ergibt. Das bedeutet, in der Kontrollgruppe praktisch nur gemäß den Vorstellungen „Beschleunigung proportional Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung ist Änderung des Geschwindigkeitsbetrages“ geantwortet wird, während in der Treatmentgruppe über die Hälfte der Studenten eine Richtungsvorstellung haben. Dies ist sicher ein Erfolg des verwendeten Kinematikkonzeptes.

Aufgaben- gruppe	Anzahl Items	<i>Kontrollgruppe</i> nach traditioneller Vorlesung (2004, N = 6)	<i>Treatmentgruppe</i> nach Vorlesung (2002, N = 8)	Effekt- stärke d
<i>a(t)</i> -Aufgaben nach WILHELM	6	33 %	69 %	0,94
Krafttextaufga- ben (Schlitten)	7	38 %	48 %	0,38
<i>F(t)</i> -Aufgaben	7	33 %	23 %	-0,44

Tab. 7.2: Anteile richtiger Lösungen beim Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ bei der Vorlesung „Schulphysik I“ nach einer traditionellen Vorlesung und nach einer Vorlesung mit Elementen des Unterrichtskonzeptes.

7.3 Umsetzung im MultiMechanics Project

7.3.1 Projektbeschreibung

In Folge eines Workshops zu Coach 5 auf der Veranstaltung „Physics on Stage 2“ haben zwei sehr engagierte und didaktisch interessierte Lehrer (T. Poth, S. Gröber) aus Rheinland-Pfalz beschlossen, viele der in der Didaktik für den Mechanikunterricht vorgeschlagenen Aspekte im Schuljahr 2003/2004 in zwei Physik-Leistungskursen aus insgesamt 34 Schülern (27 männlich, 7 weiblich) mit der Software Coach 5 umzusetzen. Ein Ziel war dabei die Integration multimedialer Elemente in den Physikunterricht, wie ein Messwerterfassungssystem, ein Videoanalysesystem, ein Modellbildungssystem und Simulationen (Gröber, Poth, 2004). Dahinter steht die Erkenntnis, dass Schülern zu selten die Möglichkeit gegeben wird, mentale Repräsentationen von Wirkungszusammenhängen zu bilden und zu erproben und zu schnell mathematisiert wird und stattdessen der qualitative Ansatz mehr betont werden muss. Ein anderes Ziel war ein schülerorientierter, entdeckender und handlungsorientierter Unterricht durch konsequente Integration von Gruppenarbeitsphasen, in denen experimentiert, ausgewertet und modelliert wird. Selbstgesteuertes Lernen oder Just-in-Time-Teaching (JiTT) sollten realisiert werden (Novak et al., 1999; Poth et al., 2006). Um beide Aspekte – Schülerzentrierung und Multimedia-Einsatz – umsetzen zu können, wurden die Schüler in elf Dreiergruppen eingeteilt und für jede Gruppe ein Laptop mit einem Messwerterfassungssystem angeschafft, wozu regionale und überregionale Firmen als Sponsoren gewonnen wurden. Außerdem unterstützte das Landesmedienzentrum Rheinland-Pfalz in Koblenz das Projekt durch eine Abordnung von 10 Deputats-Wochenstunden.

Überlegungen zur Messhardware führten dazu, dass man sich für eine deutsche Beta-version von Coach 5 entschied, bei dem Messwerterfassung, Videoanalyse, Modellbildung und Links zu Internetseiten unter einer Oberfläche integrierbar sind. Coach 5 allerdings auch leichter bedienbar als PAKMA (aufgrund der Offenheit und der vielfältigen Möglichkeiten von PAKMA) und deshalb für diesen stark schülerzentrierten Unterricht besser geeignet. Allerdings bedauerten die Lehrer, damit nicht die Möglichkeit zur Darstellung dynamisch ikonischer Repräsentationen insbesondere von Vektorpfeilen zu haben. Als Ersatz wurden Vektoren als statische ikonische Repräsentationen per Hand in ausgedruckte Koordinatensysteme gezeichnet (Gröber, Poth, Wilhelm, 2006). Die Einführung in die Software Coach 5 erfolgte außerhalb des normalen Unterrichts an drei Tagen in einer Jugendherberge, was von der Robert-Bosch-Stiftung im Rahmen des Projektes NaT-Working finanziert wurde. Entsprechend dem Ziel der Schülerorientierung bekamen die Schüler dabei nur wenig Einweisung in die Software, sondern erhielten Arbeitsaufträge, bei deren Durchführung sie die Software kennen lernten. Gleichzeitig sollten sie sich dabei eine Programmanleitung mit Hilfe bereits ausgedruckter Screenshots selbst erstellen.

In der Vorbereitung des Projektes nahmen die Lehrer Kontakt zum Autor dieser Arbeit auf, von dem sie beraten wurden und der Tests zur Evaluation durchführte und auswertete. Den beiden Lehrern stand die CD zur Verfügung, die eine ausführliche Beschreibung eines Unterrichts nach dem hier erörterten Konzept, vielfältige Materialien und didaktische Begründungen enthält. Die fachli-

che Vorgehensweise und die Reihenfolge der behandelten Themen wurden davon beeinflusst. Insbesondere das Kinematik-Konzept orientiert sich stark an dem hier dargestellten Konzept. Die kinematischen Begriffe Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung werden also an allgemeinen zweidimensionalen Bewegungen eingeführt und erst danach auf eindimensionale Bewegungen spezialisiert (Gröber, Poth, Wilhelm, 2006). Dabei werden die Größen als Vektoren dargestellt und die Änderungen betont. Außerdem wird auch schon in der Kinematik Modellbildung eingesetzt. Da den Lehrern weder die Möglichkeit zur Verfügung stand, dass die Schüler eigene Bewegungen mit der PC-Maus analysieren, noch die dynamische Darstellung der Größen mit Pfeilen (außer in einigen Applets), mussten sie Alternativen einsetzen. Deshalb begannen sie mit der Videoanalyse einer zweidimensionalen Bewegung, nämlich einem Basketballwurf (ähnlich wie im BMBF-Projekt „Vernetztes Studium Chemie“, siehe Kapitel 7.1). Auf einem Ausdruck der Bahnkurve mit Zeitmarken sollen die Schüler dann selbst die Vektoren konstruieren. Aus der Tabelle der x - und y -Komponenten der Geschwindigkeit wurde auch mit Hilfe des Satzes von Pythagoras die Bahnschnelligkeit berechnet. In einem weiteren Beispiel wurde ausgehend von einem Video eines Rotors einer Windkraftanlage mittels Videoanalyse die Beschleunigung der Rotorspitze konstruiert. Von Vorteil bei diesem Vorgehen ist, dass Bewegungen aus der Alltagswelt statt Bewegungen auf dem Labortisch untersucht wurden. Für die Behandlung der eindimensionalen Bewegung wurde ebenfalls die Videoanalyse sowie Physlets verwendet, die auch dynamisch ikonische Repräsentationen nutzen. Insgesamt wurden also weniger dynamisch ikonische Repräsentationen wie in dem Konzept dieser Arbeit (Kapitel 5.3) genutzt, sondern mehr statische Darstellungen, obwohl zweidimensional in die Kinematik eingestiegen und mit Pfeilen gearbeitet wurde.

In der Dynamik wurden in dem größeren Kurs (entgegen der bayerischen Tradition) zuerst der Impuls und die Impulserhaltung eingeführt. Dies ist auch sinnvoll, denn viele Schülervorstellungen zum Begriff „Kraft“ entsprechen teilweise dem physikalischen Impulsbegriff. THIJS meint, dass damit der Impuls als Alternative zur Impetustheorie angeboten wird und dass die Schüler so mit der Bewegung eines Körpers von vorneherein Impuls statt Kraft verbinden (Thijs, 1992). Zumindest kann man beim Auftreten entsprechender Vorstellungen auf dem Impuls verweisen. Wie in dem hier dargestellten Konzept wurde das erste newtonsche Konzept als Spezialfall des zweiten dargestellt werden und beim dritten newtonschen Gesetz viele Alltagsphänomene betrachtet werden. Beim zweiten newtonschen Gesetz wird auch die graphische Modellbildung mit der Betonung der Summe aller angreifenden Kräfte eingesetzt.

Trotz gleicher Grundideen unterschied sich der Unterricht in den beiden Kursen. Sehr ähnlich war der Unterricht bezüglich der Sozialformen (Schwerpunkt auf Gruppenarbeit in Dreier-Gruppen, Vertrauen in das Interesse der Schüler an Physik und in die Eigenaktivität und Selbständigkeit). Recht unterschiedlich war die Häufigkeit des Einsatzes der vier Computeranwendungen Videoanalyse, Modellbildung, Realexperimente und Just-in-Time-Teaching mit Physlets: Im kleineren Kurs (11 Schüler) dominierte die Videoanalyse. Im größeren Kurs (23 Schüler) wurde intensiv Realexperimente und Physlets/Just-in-Time-Teaching eingesetzt. Die Schüler hatten hier zu Hause Aufgaben in Webformularen zu bearbeiten, von denen viele (ca. zwei Drittel) Physlets mit Animationen und dynamisch ikonischen Repräsentationen enthielten. Die Antworten wurden gemäß dem Verfahren

des „Just in Time Teaching“ dem Lehrer als Rückkopplung per E-Mail zugesandt. Der Lehrer berücksichtigte dies in seiner Unterrichtsplanung, indem er z.B. interessante Lösungen auf Folie kopierte und im Unterricht diskutierte.

7.3.2 Schulpraktische Erfahrungen der Lehrer

Die hier dargestellten schulpraktischen Erfahrungen der beiden Lehrer beruhen auf schriftliche Formulierungen der Lehrer und aus Gesprächen mit diesen. Diese Zusammenfassung wurde den Lehrern (wie das gesamte Kapitel 7.3) vorgelegt, die bestätigten, dass ihre wesentlichen Erfahrungen damit richtig erfasst wurden.

Die beiden Lehrer waren von der Idee, die kinematischen Größen anhand zweidimensionaler Bewegungen einzuführen, sehr begeistert, da der ganze Mechanikunterricht als konsistenter angesehen wurde, wenn von Anfang an der vektorielle Charakter der Größen herausgestellt wird. Als ideales Werkzeug wurde dabei die Videoanalyse angesehen, mit dem sich insbesondere zweidimensionale Bewegungen analysieren lassen und mit dem die Schüler selbst die Bewegungsanalyse durchführen können.

Die Erfahrung des Lehrers, der intensiv Just-in-Time-Teaching-Verfahrens (JiTT) mit Physlets einsetzte, ist, dass der Lehrer durch die schriftliche Rückmeldung der Schüler etwas über Präkonzepte der Schüler erfährt. Das ermöglicht dem Lehrer eine gründlichere Bearbeitung von Schülerkommentaren, eine bessere, schülerorientiertere Unterrichtsplanung, die Förderung des öffentlichen Diskurses und eine neue Hausaufgabenform. Bei den Schülern gibt dies eine starke Motivationssteigerung und eine Veränderung des Kommunikationsverhaltens in der Gruppe, so dass alternative Sichtweisen der anderen Schüler eher gehört und ernst genommen werden. Dies ist also eine Möglichkeit, Schülervorstellungen ernst zu nehmen und aufzuarbeiten.

Nach den Erfahrungen der Lehrer ist es sinnvoll, als erstes Medium die Videoanalyse zu benutzen, da es ein universelles Messverfahren ist, das auch affektiv anspricht. Ihrer Meinung nach sollte man ein Medium als Leitmedium längere Zeit benutzen, damit die Schüler es beherrschen und auch Ideen im Umgang mit dem Medium entwickeln können. Ein solches Leitmedium könnte die Videoanalyse sein. Die Einführung der Schüler in die Benutzung aller verwendeten Physikmedien wurde vor Kursbeginn an einem Wochenende in einer Jugendherberge durchgeführt, kann aber nach Ansicht der Lehrer auch erst jeweils bei Bedarf erfolgen.

Nach Einschätzung der Lehrer basiert allgemein die Motivation der Schüler durch den Computer als Werkzeug nicht auf den Neuigkeitseffekt. Es war angeblich eine durchgehende Motivation vorhanden, mit dem PC zu arbeiten und bei den Schülern ein selbst gesteuerter Zugriff zu beobachten. Die Schüler sahen den PC-Einsatz als sinnvoll an.

Der Aufwand bei der ersten Durchführung eines solchen Unterrichts wird von den beiden Lehrern als sehr hoch bewertet, da dazu die Beschaffung der Ausstattung, die Umstellung des Unterrichts und die Vorbereitung der Medien und Arbeitsblätter gehört. Denn hier fehlte eine solch intensive Unterstützung durch eine Hochschule wie in dem in dieser Arbeit durchgeführten Forschungsprojekt (siehe Kapitel 5.5 und 6.1). Bei einer zweiten Durchführung sehen die Lehrer aber eine drasti-

sche Reduktion der notwendigen Zeit. Der Lehrer traue dann den Schülern mehr zu und organisiert den Unterricht effektiver.

In der Gruppenarbeit war eine hohe Selbsttätigkeit der Schüler zu beobachten, die miteinander redeten und eher ihre Vorstellungen äußerten, wobei falsche Aussagen häufig in der Gruppe korrigiert wurden. So wird eine selbst gesteuerte Lerndynamik möglich und Teamerfahrungen für den Beruf gesammelt. Die Lehrer mussten die Gruppendynamik anerkennen und hatten keine unmittelbare Kontrolle des Lernens mehr; sie wurden mehr Berater und stiller Beobachter. Die Schüler stellten erst dann Fragen, wenn sie wirklich welche hatten.

Das MultiMechanics Project zeigt insgesamt, dass es gut möglich ist, neue Medien und schülerorientierten Unterricht zu verbinden und dass dies im alltäglichen Unterricht eingesetzt werden kann.

7.3.3 Testergebnisse

Mit Hilfe von Tests sollte auch in diesem Projekt ermittelt werden, ob Verständnis bei den Schülern erzeugt und Vorstellungen verändert wurden, wobei die Rahmenbedingungen nur paper-and-pencil-Tests erlaubten. Indem die gleichen Tests wie in Kapitel 6 verwendet wurden, können Vergleiche zu traditionell unterrichtete Gymnasiasten in Bayern und zu den Schülern der bayerischen Treatmentgruppe durchgeführt werden.

Während allerdings in Bayern in der elften Klasse noch kein Kurssystem existiert, sondern ganze Klassen unterrichtet werden, und nur zwei bzw. drei Wochenstunden Physik stattfinden, handelt es sich beim MultiMechanics Project um zwei Leistungskurse aus Rheinland-Pfalz mit fünf Wochenstunden Physik. So hatten diese Projektschüler mehr Unterrichtszeit: Es wurden ca. 29 Unterrichtsstunden für die Kinematik, ca. 18 Unterrichtsstunden für Kraft, ca. 8 für Impuls und ca. 8 für Schwingungen aufgewandt, während der bayerische Lehrplan nur ca. 11 Unterrichtsstunden für die ein- und zweidimensionale Kinematik, ebenso ca. 18 für Kraft, aber nur ca. 5 für Impuls und ca. 2 für Schwingungen vorsieht. Wünschenswert wäre gewesen, Vergleichswerte von herkömmlich unterrichteten Leistungskursen aus Rheinland-Pfalz zu haben, was nicht vorliegt.

Gute Rahmenbedingungen waren beim MultiMechanics Project auch dadurch gegeben, dass es sich bei den Schülern um sehr motivierte, leistungswillige und disziplinierte Schüler handelte. Der größere Kurs war aus einer kleinen, evangelischen Landschule, was das Unterrichtsklima positiv beeinflusste. Die Schüler dieses Kurses hatte außerdem bereits in der Mittelstufe langjährige Erfahrung mit intensiver, selbstverantwortlicher Gruppenarbeit gemacht.

7.3.3.1 Beschleunigungspfeile

Bei einer Aufgabe (siehe Abb. 6.4) sollten die Schüler die Beschleunigungsrichtungen bei Kurven- und Geradeausfahrten einzeichnen, wobei das Tempo des Autos konstant war oder größer oder kleiner wurde (siehe Kapitel 6.4.1). Dieser Test wurde nur von dem kleineren der beiden Leistungskurse bearbeitet.

Bei der Subgruppe aus den beiden Items mit Geradeausfahrt ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den drei betrachteten Schülergruppen (MultiMechanics Project, traditioneller Unterricht in Bayern, Unterricht nach Konzept) (Mann-Whitney-U-Test, 0,05-Niveau zweiseitig). Bei

der Subgruppe mit drei Items zur Kurvenfahrt unterscheiden sich jedoch alle drei Schülergruppen paarweise signifikant (Mann-Whitney-U-Test, 0,01-Niveau zweiseitig) (siehe Tab. 7.3). Während nur zwischen 6 % und 12 % der 217 bayerischen Schüler diese Aufgaben richtig lösten und stattdessen meist die tangentielle Beschleunigungskomponente einzeichneten, haben 73 % der Schüler

	Unterricht im MultiMechanics Project	traditioneller Unterricht in Bayern	Unterricht nach Konzept in Bayern
	Test am Jahresende (8 Monate nach Unterr.)	Test am Jahresende (kurz nach Unterr.)	Test am Jahresende (8 Monate nach Unterr.)
	1 LK, 11 Schüler	12 Klassen, 217 Schüler	2 Klassen, 35 Schüler
Subgruppe „geradeaus“	95 %	90 %	97 %
Subgruppe „Kurve“	48 % *	9 % *	77 % *

Tab. 7.3: Vergleich der Ergebnisse der Subgruppen beim Test zu Beschleunigungspfeile, Quelle: Eigene Erhebung

des Projektes das Item mit Kurvenfahrt mit konstantem Tempo und je 36 % die Items mit schneller werdender und langsamer werdender Kurvenfahrt richtig gelöst - allerdings bei mehr als doppelt so viel Unterrichtszeit für die Kinematik. Die bayerische Treatmentgruppe erreichte bei den Items mit schneller werdender und langsamer werdender Kurvenfahrt dagegen 66 % bzw. 80 % richtige Lösungen.

Dennoch zeigt sich hier der Vorteil eines Unterrichts, der in die Kinematik über zweidimensionale Bewegungen mit Hilfe der Videoanalyse einsteigt und Größen zunächst als Vektorpfeile darstellt. Werden die Vektorpfeile jedoch von der Software erzeugt und müssen nicht jedes Mal von den Schülern konstruiert werden, können in kürzerer Zeit mehr Varianten betrachtet werden. Möglicherweise erklärt dies den Vorsprung der beiden bayerischen Klassen, die nach dem vorgelegten Konzept unterrichtet wurden. Eine derartige Funktion wäre in Videoanalyseprogrammen wünschenswert.

7.3.3.2 Graphen zur eindimensionalen Kinematik

Um das kinematische Verständnis im Zusammenhang mit Grapheninterpretation bei eindimensionalen Bewegungen abzutesten, wurde der Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ (in Anlehnung an einen Fragebogen des Amerikaners THORNTON) eingesetzt (siehe Kapitel 6.4.2). Wenn die Schüler zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen je den passenden Zeit-Geschwindigkeits-Graphen auswählen sollten, waren sie schlechter als die beiden Vergleichsgruppen bei geringerem relativen Zugewinn (siehe Tab. 7.4, die Werte der herkömmlich unterrichteten bayerischen Schüler müssen vorsichtig interpretiert werden, da es sich um verschiedene Schülergruppen aus verschiedenen Jahren handelt). Die Unterschiede bei den Nachtestwerten sind auf dem 0,05-Niveau signifikant (Mann-Whitney-U-Test, zweiseitig). Allerdings können hier auch Deckeneffekte eine Rolle spielen. Anders sieht es aus, wenn die Schüler zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen je den passenden Zeit-Beschleunigungs-Graphen auswählen sollten: Hier waren die MultiMechanics-Project-Schüler besser als die bayerischen Elftklässler (Treatment-Effektstärke beim Nachtest 0,47) und als die Schüler der Konzept-Treatmentgruppe (Effektstärke 0,45). Bei den sechs Items nach WILHELM

ist dieser Unterschied bei den Nachtestwerten jeweils auf dem 0,05-Niveau signifikant (Mann-Whitney-U-Test, zweiseitig).

Itemgruppe	Schülergruppe	vorher	nachher	relativer Zugewinn
4 $v(t)$ -Aufgaben nach THORNTON	MultiMechanics Project (N = 30)	83 %	86 % ♠♥	15 %
	Tradit. Bayern (N divers)	89 %	96 % ♠	66 %
	nach Konzept (N = 211)	89 %	95 % ♥	51 %
7 $v(t)$ -Aufgaben nach BLASCHKE (mit Beschleunigungsitems)	MultiMechanics Project (N = 30)	69 %	72 % ♥	9 %
	Tradit. Bayern (N divers)	69 %	(76 %)	(21 %)
	nach Konzept (N = 211)	71 %	85 % ♥	47 %
6 $a(t)$ -Aufgaben nach WILHELM	MultiMechanics Project (N = 30)	16 %	64 % ♠♥	58 %
	Tradit. Bayern (N divers)	9 %	47 % ♠	42 %
	nach Konzept (N = 211)	12 %	47 % ♥	40 %
8 $a(t)$ -Aufgaben nach BLASCHKE (mit 2 Items mit Mehrfachantwort)	MultiMechanics Project (N = 30)	17 %	58 %	50 %
	Tradit. Bayern (N divers)	9 %	(38 %)	(32 %)
	nach Konzept (N = 211)	12 %	48 %	41 %

Tab. 7.4: Vergleich der Ergebnisse von Subgruppen beim Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“. Werte mit gleichem Symbol (♠ bzw. ♥) unterscheiden sich signifikant (0,05-Niveau). Bei den Werten in Klammern wurden Ergebnisse von BLASCHKE mit nicht identischer Testformulierung verwendet.

7.3.3.3 Test „Beschleunigung beim Münzwurf“

Ein weiterer Test zum Verständnis der Beschleunigung ist die Aufgabe, bei der die Beschleunigung einer senkrecht nach oben geworfenen Münze angegeben werden soll – während dem Aufsteigen, am höchsten Punkt und beim Hinunterfallen (siehe Kapitel 6.4.3).

Die Leistungskursschüler des Projektes sind dabei besser als die Klassen der bayerischen Kontrollgruppe (siehe Tab. 7.5). Der Anteil richtiger Lösungen (beim Vorzeichen und bei den Pfeilen) unterscheidet sich nach einem χ^2 -Test auf dem 1 %-Niveau. Andererseits sind die 33 Schüler des MultiMechanics Project geringfügig schlechter als die 151 Schüler, die entsprechend dem Unterrichtskonzept unterrichtet wurden. Dieser Unterschied ist nur an einer Stelle signifikant: der Anteil von Pfeil-Antworten, die der Geschwindigkeit entsprechen. Aufgrund der größeren Unterrichtszeit in der Kinematik hätte man jedoch auch bei dieser Aufgabe bessere Ergebnisse im MultiMechanics Project erwartet.

Untersuchung Antwort	<i>Treatmentgruppe 2</i> <i>MultiMechanicsProject,</i> 2004, N = 33, 2 Leistungskurse Rheinland-Pfalz	<i>Kontrollgruppe</i> WILHELM 1994, <i>nach trad.</i> Unterricht, N = 188, 10 bayerische Klassen	<i>Treatmentgruppe 1</i> WILHELM 2003, <i>nach Konzept,</i> N = 151, 7 bayerische Klassen
Vorzeichen richtig	36 % ♠	7 % ♥ ♠	39 % ♥
Vorzeichen fast-richtig	6 %	10 %	10 %
+ := "schneller" - := "langsamer"	15 %	36 % ♥	14 % ♥
Vorzeichen entsprechend \bar{v} statt \bar{a}	36 %	41 % ♥	25 % ♥
restliche Vorzeichen- kombinationen	6 %	6 %	12 %
Pfeile richtig: ↓↓↓	36 % ♠	9 % ♥ ♠	42 % ♥
Pfeile fast-richtig: ↓0↓	9 %	19 %	18 %
Pfeile entsprechend der +/- Antwort: ↓0↑	3 %	4 %	7 %
Pfeile entsprechend \bar{v} statt \bar{a} : ↑0↓	52 % ♣	62 % ♥	27 % ♥ ♣
restliche Pfeil- kombinationen	0 %	6 %	6 %

Tab. 7.5: Auswahlhäufigkeiten bei der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ vor und nach konventionellem Unterricht, Quelle: Eigene Erhebung. Werte mit gleichem Symbol (♥, ♠ bzw. ♣) unterscheiden sich signifikant (χ^2 -Test, 0,01-Niveau).

7.3.3.4 Aufgaben zur eindimensionalen Dynamik

Um das Verständnis des newtonschen Kraftbegriffes bzw. des zweiten newtonschen Gesetzes abzu- prüfen, wurde ebenso der Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ eingesetzt (siehe Kapitel 6.4.2.1 und 6.5.1), bei dem nur eindimensionale Bewegungen betrachtet werden. Beim Vortest waren die Leistungskursschüler zwar wie erwartet besser als die bayerischen Schüler, aber die Unterschiede in allen Fällen sind nicht signifikant (5 %-Niveau).

Wenn die möglichen Antworten als Text formuliert waren, waren die Ergebnisse der Schüler der beiden Kurse beim Nachtest signifikant besser als bei konventionell unterrichteten bayerischen Elftklässlern (50 % statt 32 %, Effektstärke $d = 0,53$) (siehe Tab. 7.6). Der Unterschied zur bayerischen Treatmentgruppe ist dagegen auch beim Nachtest nicht signifikant. Wenn die Schüler zu beschriebenen Bewegungen dagegen je den passenden Zeit-Kraftgraphen auswählen sollten, waren die MultiMechanics-Project-Schüler im Nachtest sowohl signifikant besser als die herkömmlich unterrichteten Elftklässler (53 % statt 21 %, Effektstärke $d = 0,95$) als auch signifikant besser als die Schüler der Treatmentgruppe (53 % statt 34 %, Effektstärke $d = 0,48$). Berechnet man die individuellen relativen Zugewinne der Schüler, so sind die Unterschiede auch hier signifikant.

Bei den Schülern der beiden Leistungskurse liegt außerdem der Fall vor, dass die Kraftitems mit Grapheninterpretation leicht (aber nicht signifikant) besser als die Kraftitems mit Textantworten gelöst werden, was nur sehr selten bei einzelnen Klassen auftritt. Bei den anderen beiden Schülergruppen werden die Graphenaufgaben signifikant schlechter beantwortet. Die MultiMechanics-Project-Schüler scheinen also auch in schwierigen Kontexten keine Probleme mit Grapheninterpre-

tation zu haben und die falschen Antworten gehen unabhängig von der Darstellung auf falsche Vorstellungen zurück.

Itemgruppe	Schülergruppe	vorher	nachher	rel. Zugewinn
7 Textaufgaben (zum Schlitten)	MultiMechanics Project (N = 30)	24 %	50 % ♠	34 %
	Tradit. Bayern (N: 373 bzw. 188)	14 %	32 % ♥ ♠	(20 %)
	nach Konzept (N = 211)	16 %	39 % ♥	27 %
7 $F(t)$ -Aufgaben	MultiMechanics Project (N = 30)	16 %	53 % ♠ ♣	45 % ♣
	Tradit. Bayern (N: 373 bzw. 188)	9 %	21 % ♥ ♠	(14 %)
	nach Konzept (N = 211)	11 %	34 % ♥ ♣	26 % ♣

Tab. 7.6: Vergleich der Ergebnisse der Kraft-Subgruppen beim Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“. Werte mit gleichem Symbol (♥, ♠ bzw. ♣) unterscheiden sich signifikant (Mann-Whitney-U-Test, 5 %-Niveau zweiseitig)

7.3.3.5 Ergebnisse beim FCI-Test

Trotz einiger Kritik an dem FCI-Test kann der Gesamtwert des international bekannten und genutzten Tests zur Erhebung des Verständnisses des newtonschen Kraftkonzeptes verwendet werden (siehe Kapitel 6.5.1). Vergleichswerte von deutschen Physikleistungskursen sind allerdings nur sehr wenige bekannt: SCHECKER und GERDES (1999, S. 80) geben Vor- und Nachtestwerte von zwei konventionell unterrichteten Leistungskursen aus Bremen an (sowie von zwei Leistungskursen der DFG-Studie „Physiklernen mit Modellbildungssystemen“, die im Durchschnitt geringere Nachtestwerte erreichten). Unabhängig davon, ob man die Schüler des MultiMechanics Project nun mit diesen Bremer Leistungskursen, mit konventionell unterrichteten bayerischen Klassen (siehe Kapitel 6.5.1.2) oder mit den Klassen des Projektes „Innovativer Kinematik-/Dynamikunterricht“ (siehe Kapitel 6.5.1.3) vergleicht, ergibt sich: Die Schüler haben nicht nur die höchsten Vortestwerte, sondern auch die höchsten Nachtestwerte und den größten relativen Zugewinn (siehe Tab. 7.7). Der Unterschied zu den herkömmlich unterrichteten bayerischen Klassen ist dabei bei Vortest, Nachtest und relativen Zugewinn signifikant (0,001-Niveau). Der Unterschied zu den bayerischen Klassen der Treatmentgruppe ist ebenso bei Vortest und Nachtest signifikant (0,05-Niveau), aber nicht beim relativen Zugewinn. Dass beim relativen Zugewinn zwischen diesen beiden Gruppen kein signifikanter Unterschied ist, obwohl im MultiMechanics Project mehr Zeit im Leistungskurs zur Verfügung stand, gibt Anlass zu der Vermutung, dass das schülerorientierte Vorgehen mit viel Gruppenarbeit keinen wesentlichen Vorteil gegenüber lehrergeleiteten Vorgehen in Bezug auf das Verständnis des newtonschen Kraftbegriffes ergibt, sondern didaktische Vorgehensweisen entscheidender sind.

Als weitere Vergleichsmöglichkeit bietet sich an zu schauen, wie Studenten naturwissenschaftlicher bzw. technischer Studiengänge zu Beginn ihres Studiums, also nach einem Mechanik-Schulunterricht, beim FCI-Test abschneiden. Zu bedenken ist allerdings, dass der entsprechende Unterricht hier einige Jahre zurückliegt und nur ein Teil der Studenten einen Physikleistungskurs besucht

hat. Die Untersuchung von GIRWIDZ, KURZ und KAUTZ (2003, S. 3) (FCI-Version 2) ergibt für die meisten Studiengänge zu Studienbeginn geringere Werte: Ingenieursstudiengänge in Esslingen (N = 523): $\mu = 46 \%$, Studiengang technische Chemie in Mannheim (N = 30): $\mu = 34 \%$, Medizin in Würzburg: $\mu = 37 \%$, Nanostrukturtechnik in Würzburg (N = 85): $\mu = 59 \%$. Nur die Studenten, die Diplom-Physik studieren wollten (N = 91), erreichten

	Vortest	Nachtest	rel. Zugewinn
MultiMechanics Project (N = 31, 2 LKs)	41 %	62 %	37 %
traditioneller LK-Unterricht Bremen (N = 25, 2 LKs)	32 %	52 %	32 %
traditioneller Unterricht Bayern (N = 258, 13 Klassen)	28 %	41 %	18 %
Treatmentgruppe Bayern (N = 138, 7 Klassen)	34 %	53 %	31 %
Studenten technische Chemie FH Mannheim (N = 23)	36 %	51 %	24 %
Maschinenbaustudenten FH Esslingen (N = 52)	47 %	57 %	20 %
Elektrotechnikstudenten FH Esslingen (N = 80)	53 %	66 %	28 %
Physikstudenten Würzburg (N = 49)	75 %	87 %	47 %

Tab. 7.7: FCI-Gesamtscore bei verschiedenen Gruppen (Signifikanzen siehe Text). Quelle: Kapitel 6.5.2, SCHECKER, GERDES (1999, S. 80), GIRWIDZ ET AL. (2003, S. 6)

beim Studienbeginn höhere Werte als die MultiMechanics-Schüler: $\mu = 69 \%$. Die Studenten der Fachhochschulen Esslingen und Mannheim erreichen selbst durch das Studium kaum höhere Nachtestwerte bei deutlich geringeren relativen Zugewinnen. Die Physikstudenten der Universität Würzburg (Diplom-Physik, Nanostrukturtechnik und Lehramt Physik) kommen dagegen bei höheren relativen Zugewinnen auch auf deutlich höhere Nachtestwerte.

Ein genauerer Vergleich der Ergebnisse des MultiMechanics Project mit den Ergebnissen der beiden herkömmlich unterrichteten Bremer Leistungskursen (Schecker, Gerdes, 1999, S. 80 + 83) ergibt, dass sich die Nachtestwerte beim Gesamtwert und bei der Subskala „Zweites newtonsches Gesetz“ um mehr als eine halbe Standardabweichung unterschieden (siehe Tab. 7.8), was als mittel bzw. als schon relevant bezeichnet werden kann.

Aufgaben- gruppe	Traditioneller Unterricht in Bremen (N = 25, 2 Leistungskurse)			Unterricht im MultiMechanics Project (N = 31, 2 Leistungskurse)			Effekt- stärke
	Vortest	Nachtest	rel. Zu- gewinn g	Vortest	Nachtest	rel. Zu- gewinn g	beim Nachtest
Gesamt	32 %	52 %	32 %	41 % $\pm 16 \%$	62 % $\pm 18 \%$	37 % $\pm 27 \%$	0,55
Kinematik	-	-	-	45 %	56 %	21 %	-
1. Newton	-	-	-	46 %	73 %	50 %	-
2. Newton	29 %	42 %	19 %	39 %	52 %	22 %	0,55
3. Newton	-	-	-	27 %	60 %	46 %	-
Superposition	-	-	-	32 %	59 %	39 %	-
Arten von Kräften	-	-	-	37 %	54 %	27 %	-
Kraftverständnis	-	-	-	23 %	49 %	34 %	-

Tab. 7.8: Mittelwerte von Vortest, Nachtest und relativen Zugewinn bei den einzelnen Subskalen, Vergleich zwischen dem MultiMechanics Project und bei traditioneller Unterricht in Bremen.

Im Vergleich zu konventionell unterrichteten bayerischen Schülern sind die Unterschiede am größten bei den Subskalen „1. Newton“, „2. Newton“, „3. Newton“ und vor allem bei der Subskala „Superposition“. Der Unterschied bei der Subskala „Superposition“ hat sicher damit zu tun, dass bereits in die Kinematik anhand zweidimensionaler Bewegungen mit Hilfe der Videoanalyse eingeführt wurde. Die guten Ergebnisse bei der Subskala „drittes newtonsches Axiom“ kommen nur von einem der beiden Kurse, in denen die Schüler wie im Unterrichtskonzept dieser Arbeit (Projekt „Innovativer Kinematik-/Dynamikunterricht“) nach der Einführung des Gesetzes das Prinzip an vielen Alltagssituationen anhand von Bildern anwenden mussten (siehe Kapitel 5.3.5). Bemerkenswert sei noch, dass der Anteil der Schüler, die 17 oder mehr Fragen richtig beantwortet haben ($\geq 58,6\%$), von 16% im Vortest auf nachher 58 % stieg, was einen hohen relativen Zugewinn von 50 % darstellt.

7.3.3.6 Fragebogen zur Modellbildung

In den beiden Kursen wurde auch Modellbildung mit der Software Coach 5 durchgeführt. Zwar wurden nicht viele Vorgänge modelliert, aber die Schüler haben selbst am Laptop die Modelle gebildet. Neben Modellbildung zur Kinematik (gleichmäßig beschleunigte Bewegung, ein Überholvorgang) wurde bis zur Stellung des Fragebogens wie in der Interventionsstudie in Kapitel 4 der Fall mit Luftreibung behandelt (Fall eines Papierkegels bzw. Fall eines Regentropfens). Die 34 Schüler sollten mit den gleichen Fragebogen wie in Kapitel 4.5 ihre Einschätzung der Modellbildung angeben. Problematisch ist, dass die Schüler mit der gleichen Software auch Messwerterfassung und Videoanalyse durchführten und nicht sichergestellt ist, dass sie die Fragen nur auf die Modellbildung bezogen haben; vereinzelte Schülerangaben lassen darauf schließen, dass diese Schüler auch an die Videoanalyse dachten. Die Ergebnisse der beiden Kurse unterscheiden sich bei diesem Fragebogen nicht signifikant.

Obwohl es sich bei diesen Schülern um ganz andere unterrichtete Schüler handelt, die eine andere Software benutzten und mehr eigenständig waren, stellt man auf den ersten Blick ähnliche Ergebnisse wie in der Interventionsstudie (Kapitel 4) fest: Die Modellbildung wird von den Schülern sehr positiv eingeschätzt. Nur wenn diese gegen weitere zusätzliche Versuche und weitere Rechenaufgaben abgewägt werden soll, fällt das Ergebnis nicht so eindeutig aus. Vergleicht man aber die Mittelwerte der Schüler dieses Projektes genauer mit den Mittelwerten der bayerischen Schüler aus der Interventionsstudie stellt man Unterschiede bei den Mittelwerten der Items zur Einschätzung des Modellbildungsunterrichts fest. Auf die Unterschiede, die signifikant (Unabhängiger t-Test bzw. Mann-Whitney-U-Test, $p = 0.05$) sind, soll hier kurz eingegangen werden. Bei den Leistungskurschülern ist nach deren Angaben die Bereitschaft, sich zu beteiligen (Mittelwert $\mu = 2,00$ statt 2,48), das Interesse, über physikalische Probleme nachzudenken ($\mu = 2,09$ statt 2,67), und die Lernbereitschaft ($\mu = 1,44$ statt 1,69) höher und bei der Wahl zwischen „Zusammenhänge überlegen“ und „Aufgaben rechnen“ fällt die Entscheidung deutlicher für das Überlegen ($\mu = 1,74$ statt 2,36). Da die Schüler sich bewusst für einen Physikleistungskurs entschieden, während die bayerischen Schüler Physik machen müssen, war dies auch zu erwarten. Außerdem sind diese Schüler mehr der Meinung, mit der Modellbildung etwas Sinnvolles gelernt zu haben ($\mu = 1,65$ statt 2,40) und dass der Unterricht

damit interessant war ($\mu = 1,62$ statt $2,29$). Auch die Behandlung realistischer Situationen durch die Modellbildung wurde mehr geschätzt ($\mu = 1,71$ statt $2,36$).

7.3.3.7 Concept Maps

In den beiden Leistungskursen des MultiMechanics Projects haben 31 Schüler nach dem Dynamikunterricht Concept Maps wie in der Interventionsstudie zur Modellbildung (Kapitel 4) erstellt, die genauso ausgewertet wurden (siehe Kapitel 4.5.3.3). Das Modalmap der Leistungskurse (siehe Abb. 7.1) unterscheidet sich strukturell deutlich von dem traditionell unterrichteter Klassen nach dem Unterricht (siehe Abb. 4.16 oder Abb. 4.17a). Es hat eine sehr ähnliche Struktur wie das Modalmap der drei Klassen nach der Modellbildungsintervention (siehe Abb. 4.17b) bzw. der Klassen, die nach dem Unterrichtskonzept unterrichtet wurden (siehe Kapitel 6.5.3 und Abb. 6.10). Ein wesentlicher Unterschied zu diesen beiden Modalmaps ist jedoch, dass die wichtige Verbindung $m \rightarrow a$ fehlt und die Verbindung Kraft \rightarrow Beschleunigung zusätzlich auftaucht, die insofern bedenklich ist, dass die Summe aller angreifenden Kräfte die Beschleunigung bestimmt, nicht eine einzelne Kraft. Die Vorstellung ist für den Spezialfall richtig, dass nur eine einzige Kraft wirkt.

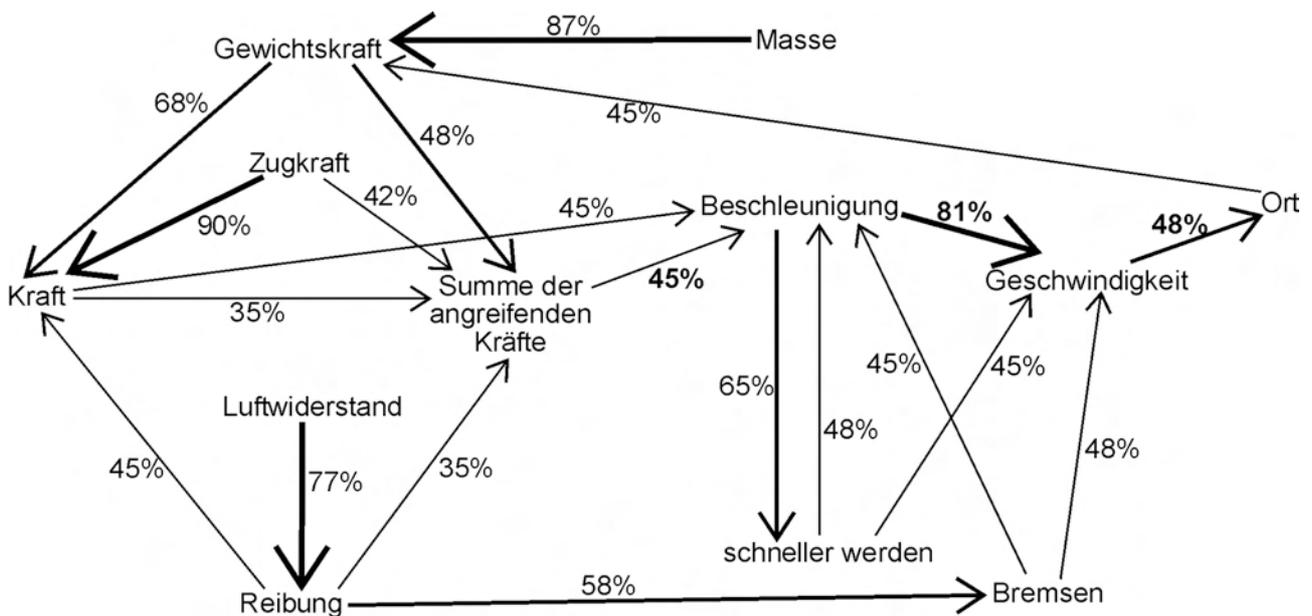


Abb. 7.1: Modalmap der beiden Leistungskurse im MultiMechanics Project nach dem Unterricht

Die meisten der aus Expertensicht wesentlichen Verbindungen (wie $\Sigma F \rightarrow a$, $a \rightarrow v$, $v \rightarrow x$ und $m \rightarrow a$) wurden häufiger als bei konventionellem Unterricht gewählt (siehe Tab. 7.9), allerdings seltener als nach der Modellbildungsintervention oder bei den Klassen mit dem gesamten Unterrichtskonzept. Eine Ausnahme bildet die Verbindung $a \rightarrow v$, die erfreulicherweise von 81 % der Schüler angegeben wurde. Die vollständige Newton-Maschine ($\Sigma F \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$ und $m \rightarrow a$) findet sich nur bei einem Schüler des MultiMechanics Project (3 %), während es in der Treatmentgruppe des Gesamtunterrichtskonzeptes bei über einem Drittel der Schüler (38 %) vorkommt.

Außerdem findet man einige falsche Aussagen fast so häufig wie in den konventionell unterrichteten Klassen, z.B. „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ (19 % versus 29 %), „Masse beeinflusst Kraft“

(26 % v. 27 %), „Kraft wirkt auf Masse“ (19 % v. 20 %), „Bremsen ist Kraft“ (6 % v. 27 %). Nicht positiv ist, dass 65 % „Beschleunigung→schneller werden“ angeben (versus 80 % nach traditionellem Unterricht) (und nur 16 % „Beschleunigung→Bremsen“).

Concept Map nach folgendem Unterricht erstellt:	traditionell	Zusätzlich 6 Std. Modellbildung	Konzept mit Modellbildung	Konzept ohne Modellbildung	MultiMechanics Project
Anzahl Klassen	3	3	3	1	2 LKs
Anzahl Schüler	55	55	63	21	31
Kapitel in der Arbeit	4.5.3.3	4.5.3.3	6.5.4	6.5.4	7.3.3.7
Wichtige Verbindungen:					
Gewichtskraft→ ΣF	<u>25 %</u>	69 %	71 %	62 %	48 %
Zugkraft → ΣF	<u>40 %</u>	84 %	75 %	71 %	<u>42 %</u>
Reibung → ΣF	20 %	25 %	51 %	24 %	35 %
Kraft → ΣF	<u>22 %</u>	58 %	48 %	<u>19 %</u>	35 %
$\Sigma F \rightarrow a$	<u>9 %</u>	56 %	65 %	24 %	45 %
$m \rightarrow a$	<u>22 %</u>	49 %	60 %	29 %	<u>19 %</u>
$a \rightarrow v$	71 %	76 %	79 %	<u>62 %</u>	81 %
$v \rightarrow x$	<u>36 %</u>	58 %	71 %	43 %	48 %
$\Sigma F \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$	<u>4 %</u>	42 %	46 %	14 %	29 %
$\Sigma F \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x + m \rightarrow a$	<u>0 %</u>	27 %	38 %	10 %	3 %
Falsche Verbindungen:					
$a \rightarrow F$	<u>29 %</u>	11 %	5 %	14 %	19 %
$m \rightarrow F$	<u>27 %</u>	13 %	11 %	<u>29 %</u>	<u>26 %</u>
$F \rightarrow m$	<u>20 %</u>	5 %	10 %	5 %	<u>19 %</u>
Bremsen → Kraft	<u>27 %</u>	11 %	5 %	0 %	6 %
$a \rightarrow$ schneller werden	<u>80 %</u>	38 %	57 %	38 %	65 %

Tab. 7.9: Vergleich der Häufigkeit einiger Verbindungen in den Concept Maps bei verschiedenen Untersuchungen (bester Wert fett, schlechtester kursiv und unterstrichen)

Insgesamt kann man sagen, dass die Kurse besser sind als konventionell unterrichtete Klassen. Das zeigt, dass mit Modellbildung etwas zu erreichen ist, auch bei dem schülerorientierten Gruppenunterricht und der Software Coach 5. Allerdings sind die Ergebnisse nicht so gut wie die drei Interventionsklassen bzw. die drei Klassen aus dem Würzburger Forschungsprojekt dieser Arbeit, was nicht den Erwartungen entsprach. Für ein besseres Ergebnis als in allen bayerischen Klassen hätte gesprochen, dass die Schüler deutlich interessierter und lernwilliger sind und im Leistungskurs auch mehr Zeit mit dem Thema Kinematik/Dynamik verbringen (bei fünf Wochenstunden gegenüber zwei oder drei in Bayern). Durch die Unterrichtsform, bei der die Schüler selbsttätig am Computer arbeiten, müssen sie sich eigentlich viel intensiver und aktiver mit den Problemen auseinandersetzen, was zu besseren Ergebnissen führen könnte.

Es stellt sich nun die Frage, warum das nicht eintrat. Der Zeitpunkt der Erstellung des Concept Maps dürfte keine Rolle spielen, denn es wurde bereits gezeigt, dass nach den Concept Maps der Lerneffekt durch Modellbildung bis zum Ende des Jahres erhalten bleibt (siehe Kapitel 4.5.3.3 und 6.5.4). Zu den Ursachen lassen sich nur spekulativ Hypothesen aufstellen. Zunächst muss man jedoch feststellen, dass diese Kurse im Rahmen der Dynamik nur einen Vorgang modelliert haben

gegenüber vier Vorgängen aus der Dynamik in den beiden anderen Modellbildungsgruppen. Dass die Schüler die Verbindung „*Summe der Kräfte*“ $\rightarrow a$ weniger angeben, dafür aber mehr *Kraft* $\rightarrow a$ angeben, könnte deshalb daran liegen, dass in diesen Kursen nur ein Vorgang behandelt wurde, bei dem mehr als eine einzige Kraft die Beschleunigung bestimmte (gegenüber drei solcher Vorgänge in den beiden anderen Modellbildungsgruppen). Dass ihnen die Verbindung $m \rightarrow a$ nicht so wichtig ist, könnte außerdem daher kommen, dass sie gegenüber den beiden anderen Modellbildungsgruppen keinen Vorgang modellierten, bei dem zwei Massen zu berücksichtigen sind oder sich die Masse ändert. Das spräche für mehr Modellbildung im Unterricht. Denkbar wäre auch, dass die Schüler trotz der leichten Bedienung von Coach 5 noch viel mit der Bedienung der Software beschäftigt waren (cognitive load), während in den anderen beiden Modellbildungsgruppen sich die Schüler ganz auf die Physik konzentrieren konnten, da die Eingabe durch einen erfahrenen Lehrer geschah. Eine weitere Hypothese betrifft die graphische Anordnung. Es ist nicht bekannt, wie unübersichtlich oder chaotisch die Wirkungsgefüge der Schüler aussehen, während die Wirkungsgefüge der Lehrer nach einem stets gleichen Prinzip und immer übersichtlich angeordnet waren, um so das Lernen zu unterstützen. So gab es in jeder dieser Klassen stets ein paar Schüler, die Teile dieser Anordnung (z.B. die zentrale horizontale Anordnung der Newton-Maschine: $\Sigma F \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$) in ihre Concept Maps übernahmen, während dies bei den Schülern des MultiMechanics Projects nicht vorkam. Schließlich haben die Schüler des MultiMechanics Projects bei der Simulation des Modells nur Graphen zur Verfügung gehabt und keine dynamisch ikonischen Repräsentationen.

Anscheinend bewirkte also auch ein Unterricht mit Modellbildung, bei der nur gemeinsam in einen Computer eingegeben wird (Interventionsstudie und bayerische Treatmentklassen), dass die Schüler aktiv mitdachten. Dies wurde sicher mit dadurch ermöglicht, dass entsprechend den Schüleräußerungen auch Falsches ohne Bewertung durch den Lehrer eingegeben wurde und viele Vorhersagen verlangt wurden. Der lehrergeleitete Modellbildungsunterricht hat jedenfalls gegenüber dem Gruppenunterricht den Vorteil, dass in kürzerer Zeit mehr Beispiele behandelt werden können und jeder Schüler mehr typische Fehlvorstellungen sieht.

Schließlich lässt sich aber vermuten, dass mit den Concept Maps ein anderes Wissen oder Verständnis als mit dem FCI-Test oder dem Test „Fragen zu Kraft und Bewegung“ abgefragt wird. Denn in diesen beiden Tests schneiden die Kurse des MultiMechanicsProjects besser ab als die bayerischen Klassen nach dem Unterrichtskonzept, nicht aber bei den Concept Maps. Hier könnte die Unterscheidung von FRIEGE und LIND sinnvoll sein, die von zwei Arten des Verstehens ausgehen (Friege, Lind, 2004, S. 265): ein strukturelles Verständnis (Fähigkeit ein Gebiet zu überblicken) und ein situatives Verständnis (anwendungsbezogen, Problemlösefähigkeit). Demnach wurde in der Interventionsstudie und in den bayerischen Treatmentklassen mehr strukturelles Verständnis erzielt als im MultiMechanics Project, wo weniger Bewusstsein über Strukturen vorhanden ist. Dagegen wurde in den Leistungskursen des MultiMechanics Project mehr situatives Verständnis erreicht.

7.3.3.8 Testergebnisse zu Vorstellungen über Physiklernen

Um Vorstellungen der Schüler über Physik und über das Lernen von Physik zu erheben, wurde die deutsche Version des „Maryland Physics Expectations Survey“ (MPEX) eingesetzt (siehe Kapitel 6.6), wobei 31 Schüler (25 männliche, 6 weibliche) am Vor- und Nachtest teilnahmen.

<i>Anteil förderlicher/ unförderlicher Antworten in %</i>	MultiMechanics Project, 2 Leistungskurse, Rheinland-Pfalz, N = 31		Konventioneller Unter- richt, 17 Klassen, Bayern N = 336		Vorlesungen, 3 Unis, USA, N = 1357	
	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest
Unabhängigkeit	50* / 27 ^o *	56* / 20 ^o *	33* / 46*	33* / 44*	55 / 23	51 / 25
Zusammenhang	49 ^o / 20*	62 ^o * / 23*	43 / 31*	42* / 33*	54 / 22	52 / 23
Konzept	51* / 24 ^o *	56* / 15 ^o *	29* / 45 ^o *	28* / 48 ^o *	41 / 33	42 / 32
Realitätsbezug	73* / 6*	79* / 6*	42* / 33*	42* / 34*	66 / 11	60 / 15
Mathebezug	55* / 19*	60* / 18*	38* / 38 ^o *	35* / 42 ^o *	68 / 14	62 / 17
Anstrengung	43 ^o / 33	31 ^o / 35	39 ^o / 37 ^o	32 ^o / 42 ^o	68 / 13	52 / 24
Gesamtwert	54* / 21*	58* / 18*	37 ^o * / 38 ^o *	35 ^o * / 41 ^o *	55 / 21	50 / 24

Tab. 7.10: Vergleich der Anteile förderlicher bzw. unförderlicher Ansichten bayerischer Gymnasiasten in Prozent bei verschiedenem Unterricht, jeweils vor und nach dem Mechanikunterricht. Mittelwert aus den Mittelwerten dreier amerikanischer Universitäten und Mittelwert aus 17 bayerischen elften Klassen. Signifikante Unterschiede des MultiMechanics Project im Vergleich zur Vergleichsgruppe sind mit einem Stern * markiert (Unabhängiger t-Test bzw. Mann-Whitney-U-Test, 0,05-Niveau). Signifikante Veränderungen von Vor- zu Nachtest sind mit einem Kreis ^o markiert (Abhängiger t-Test bzw. Wilcoxon-Test, 0,05- Niveau.)

Beim Vergleich mit herkömmlich unterrichteten bayerischen Klassen fällt zunächst auf, dass die Werte des MultiMechanics Projects vor dem Unterricht bei jedem Cluster wesentlich besser sind (Tab. 7.10). Diese Unterschiede sind außerdem fast überall signifikant (Ausnahme: Anstrengung). Am größten ist der Unterschied beim Cluster „Realitätsbezug“. Diese Unterschiede können daran liegen, dass sich vor allem die guten Schüler für einen Leistungskurs entscheiden, die auch beim MPEX-Test bessere Werte erreichen (siehe Kapitel 6.6.4). Eine weitere Ursache könnte darin liegen, dass in diesen Kursen nur ein Fünftel der Schüler weiblich sind und männliche Schüler im Durchschnitt bessere Ergebnisse liefern (siehe Kapitel 6.6.2). Nicht feststellbar ist, ob sich Unterschiede in den Lehrplänen und Lehrtraditionen der beiden Bundesländer hier auswirken. Eine Ursache ist vermutlich darin begründet, dass die Schüler des größeren Kurses, der auch wesentlich bessere Vortestergebnisse hatte, bereits einige Jahre von der gleichen Lehrkraft sehr schülerzentriert unterrichtet wurde und im Unterricht bestimmte Schwerpunkte gesetzt wurden.

Bei den bayerischen Klassen fand durch den Mechanikunterricht je nach Cluster keine Veränderung oder geringe bis signifikante Verschlechterungen statt. Bei den Leistungskurschülern gibt es dagegen bei den Clustern „Unabhängigkeit“, „Zusammenhang“ und „Konzept“ signifikante Verbesserungen bis zum Nachtest. Bei den Clustern „Realitätsbezug“, „Mathematikbezug“ und „Gesamtwert“ treten außerdem nicht signifikante Verbesserungen auf. Lediglich beim Cluster „Anstrengung“ gibt es wie in Bayern und den amerikanischen Universitäten Verschlechterungen. Bei dieser überraschenden weiteren Verbesserung des Testergebnisses im Laufe des Schuljahres liegt sicher auch ein kausaler Zusammenhang mit dem Unterricht vor, in dem die Schüler selbst Wissen „erzeugen“ sollten und nicht Gegebenes übernehmen sollten. Diese Schüler achten z.B. mehr auf das

Verständnis der zugrunde liegenden Ideen, während die bayerischen Vergleichsschüler sich auf Formeln konzentrieren.

Am Ende des Mechanikunterrichtes liegt damit ein großer Unterschied zwischen den Kursschülern und der Vergleichsgruppe vor, der in allen Clustern außer dem Cluster „Anstrengung“ signifikant ist (siehe Abb. 7.2). So haben z.B. bei den Clustern „Konzept“ und „Realitätsbezug“ ca. doppelt so viele Kursschüler förderliche Einstellungen und weit weniger unförderliche Einstellungen.

Interessant ist nun hier ein Vergleich der Leistungskursschüler mit Studenten an amerikanischen Universitäten, die wesentlich günstiger als die bayerischen Schüler antworteten. Die Kursschüler haben bei dem Clustern „Konzept“ und „Realitätsbezug“ sowohl im

Vor- als auch im Nachtest im Durchschnitt günstiger Einstellungen als die Studenten. Bei den Items zum Cluster „Anstrengung“, die typisch universitäre Aktivitäten abfragen, sind dagegen die amerikanischen Studenten im Vor- und Nachtest vorbildlicher. Bei den Clustern „Unabhängigkeit“ und „Zusammenhang“ verbessern sich die Leistungskursschüler so, dass im Nachtest (im Gegensatz zum Vortest) der Anteil förderlicher Antworten größer als bei den Studenten ist, die sich minimal verschlechtern.

7.3.3.9 Zusammenfassung der Testergebnisse

Die drei Tests zur Kinematik (Kapitel 7.3.3.1 – 7.3.3.3) zeigen insgesamt, dass – bei allerdings deutlich mehr Unterrichtszeit - mehr Verständnis für die Beschleunigung als im konventionellen Unterricht erreicht wurde, da weniger Schüler nach \vec{v} statt \vec{a} antworten und seltener Beschleunigung nur als Änderung des Geschwindigkeitsbetrages aufgefasst wird. Im Vergleich zu den Schülern der bayerischen Treatmentgruppe nach dem vorgelegten Unterrichtskonzept sind die Schüler zwar bei Beschleunigungsaufgaben mit Grapheninterpretation signifikant besser, nicht aber, wenn die Beschleunigung als Pfeil dargestellt werden soll. Dies ist sicher darauf zurückzuführen, dass bei der bayerischen Treatmentgruppe wesentlich mehr mit Pfeilen als ikonische Repräsentation gearbeitet wurde, aber dafür die Grapheninterpretation weniger geübt wurde.

Auch bei dynamischen Fragestellungen sind die Leistungskurs-Schüler des MultiMechanics Project bei beiden Tests („Fragen zu Kraft und Bewegung“, FCI) sowohl beim Nachtestergebnis als auch beim relativen Zugewinn signifikant besser als herkömmlich unterrichtete bayerische Klassen.

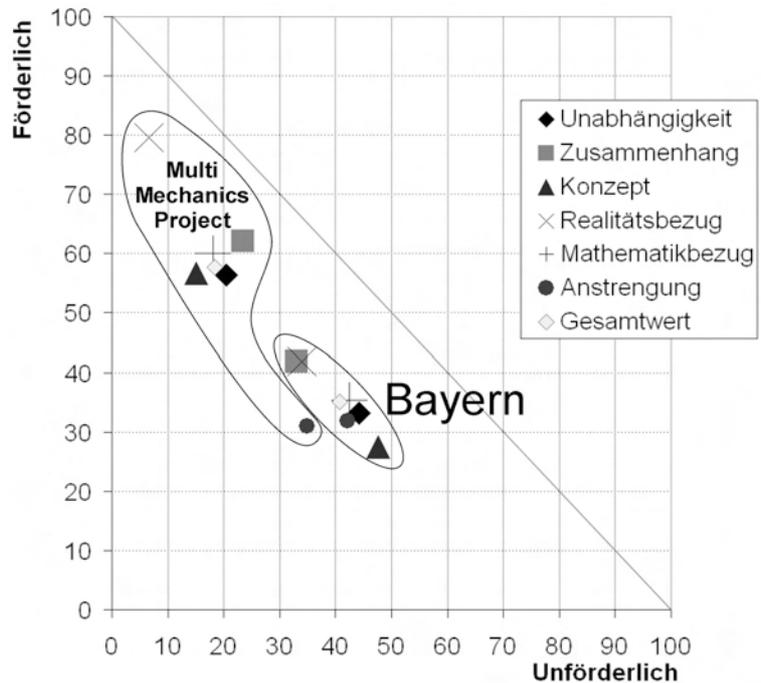


Abb. 7.2: Anteile förderlicher und unförderlicher Antworten in Prozent beim Nachtest beim MultiMechanics Project und bei konventionell unterrichteten bayerischen Klassen

Beim FCI-Test sind sie außerdem besser als Bremer Leistungskursschüler und halten mit Ingenieursstudenten mit. Dies spricht für ein hohes Verständnis des newtonschen Kraftkonzeptes.

Nicht so eindeutig ist in der Dynamik der Vergleich zur Treatmentgruppe, die nach dem entwickelten Gesamtkonzept unterrichtet wurde. Bei Kraftgraphenaufgaben sind die Leistungskursschüler beim Nachtest und beim relativen Zugewinn signifikant besser. Bei Krafttextaufgaben zu eindimensionalen Bewegungen sind die Unterschiede dagegen nicht signifikant. Beim FCI-Test sind die Kursschüler zwar bei Vor- und Nachtest signifikant besser, aber nicht beim relativen Zugewinn. Bei Concept Maps sind dagegen die bayerischen Schüler der Treatmentgruppe wesentlich besser. Beide Konzepte haben wohl das Verständnis der Schüler mehr als konventioneller Unterricht gefördert. Unterschiede bestehen aber anscheinend darin, welche Art von Fähigkeiten bzw. welche Art von Verständnis mehr gefördert wurde.

Auch wenn bei den Testergebnissen noch Vergleichswerte aus herkömmlich unterrichteten Leistungskursen fehlen, zeigt sich doch, dass die getesteten Leistungskursschüler gute Ergebnisse erzielten. Als besonders positiv kann eine günstige Einstellung über die Physik und zum Physiklernen gewertet werden. Die hauptsächlichen Faktoren hierfür können durch die erhobenen Daten nicht analysiert werden.

8 Zusammenfassung

Auch nach dem herkömmlichen Mechanikunterricht in der Oberstufe verfügen viele Schüler nicht über angemessene physikalische Vorstellungen über die verwendeten physikalischen Begriffe und deren Zusammenhänge. Einführend wurden in dieser Arbeit allgemeine Aspekte zu Schülervorstellungen (Kapitel 2.1) sowie konkrete Schülervorstellungen zur Mechanik (Kapitel 2.2) und relevante Lehrervorstellungen (Kapitel 2.3) dargelegt. Ein Ziel dieser Arbeit war, ein Gesamtkonzept für einen veränderten Kinematik- und Dynamikunterricht ein- und zweidimensionaler Bewegungen in der Jahrgangsstufe 11 des Gymnasiums zu entwickeln, das möglichst vielen Schülern hilft, möglichst viele Fehlvorstellungen zur Mechanik aufzuarbeiten. Dazu wurden u.a. computergestützte Experimente und die Visualisierung der physikalischen Größen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen (siehe Kapitel 3.2) eingesetzt, was neue Elementarisierungen und neue Unterrichtsstrategien ermöglichte (siehe Kapitel 8.2 oder Kapitel 5). Um gute Chancen zu haben, dass dieses Konzept den Schulalltag erreicht, wurde es lehrplankonform zum bayerischen Lehrplan konzipiert.

Eine erste Zielsetzung der summativen Evaluation war festzustellen, inwieweit das gesamte Unterrichtskonzept von verschiedenen Lehrern durchführbar ist und wie diese es einschätzen (siehe Kapitel 8.4 oder Kapitel 6.3). Ein wichtiges Ziel war dann, mit Hilfe von Tests festzustellen, inwieweit es Veränderungen in den Schülervorstellungen gab (Vor-/Nachtest-Design) und diese Veränderungen mit konventionell unterrichteten Klassen zu vergleichen (Trainings-/Kontrollgruppen-Design) (konventionelle Klassen: Kapitel 8.1; Vergleich: Kapitel 8.5; Kapitel 6.4 + 6.5). Dazu wurden hauptsächlich bereits vorliegende paper-pencil-Tests verwendet, da eine Testneuentwicklung im Rahmen der Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Da diese Tests verschiedene Schwächen haben, wurden mehrere verschiedene Tests gleichzeitig eingesetzt, die sich gegenseitig ergänzen.

Die graphische Modellbildung in Verbindung mit Animationen ist ein fakultativer Teil dieses Unterrichtskonzeptes. Hierzu wurde zusätzlich eine eigene Interventionsstudie durchgeführt (siehe Kapitel 8.3 und Kapitel 4).

8.1 Testergebnisse über Schülervorstellungen in konventionell unterrichteten Klassen

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Tests ergab sich, wie zu erwarten war, dass ein großer Anteil der Schüler auch nach dem herkömmlichen Mechanikunterricht in der Oberstufe des Gymnasiums (in Bayern) bei qualitativen Aufgaben noch entsprechend den bekannten Schülervorstellungen zum Begriff „Beschleunigung“ und zum Begriff „Kraft“ antwortet und nicht nach der physikalischen Vorstellung (Kapitel 6.4 – 6.6). Außerdem wurde gezeigt, dass es außer vom Kontext auch von der Art der Aufgabenstellung, von der Aufgabenformulierung, von der Bewegungsart und sogar von der Bewegungsrichtung abhängt, welche Vorstellung benutzt wird.

Bei Aufgaben, in denen zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen jeweils der passende Zeit-Geschwindigkeits-Graph gewählt werden soll, lösen schon zu Beginn der elften Jahrgangsstufe die Schüler diese Aufgaben zu 89 % richtig (Anzahl Schüler $N = 373$), so dass der Sinn einer intensi-

ven Grapheninterpretation von Geschwindigkeitsgraphen bei eindimensionalen Bewegungen in Frage zu stellen ist (Kapitel 6.4.2.2). Deutlich anders ist die Situation, wenn zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen jeweils der passende Zeit-Beschleunigungs-Graph gewählt werden soll. Hier werden die Aufgaben zu Beginn der elften Jahrgangsstufe nur von durchschnittlich 12 % der Schüler richtig gelöst ($N = 373$), während durchschnittlich 71 % so antworten als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden (Kapitel 6.4.2.3). Nach einem traditionellen Unterricht antworten durchschnittlich 47 % der Schüler richtig ($N = 188$) und 37 % noch als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden. Bei Bewegungen nach links antworten durchschnittlich 7 % so, als wäre die Beschleunigung die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages („+“ = schneller, „-“ = langsamer). Items mit Bewegungen nach rechts werden häufiger richtig beantwortet als Items mit Bewegungen nach links. Innerhalb einer Bewegungsrichtung werden außerdem Items mit Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit am häufigsten richtig beantwortet gefolgt von Items mit schnellerwerdenden Bewegungen, während die Items mit langsamerwerdenden Bewegungen am schlechtesten ausfallen (Kapitel 6.4.2.3).

Ähnliche Ergebnisse gibt es bei einer Aufgabe zur Beschleunigung beim senkrechten Münzwurf, bei der das Vorzeichen der Beschleunigung bei gegebenem Koordinatensystem angegeben werden soll. Nur 7 % der Schüler ($N = 188$) geben nach dem Unterricht für alle drei Phasen (hoch, oben, herunter) die richtige Antwort, weitere 10 % wenigstens für die Auf- und Abwärtsphase (Kapitel 6.4.3.1). Eine Antwort, die der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages entspricht, geben 36 % der Schüler, und die Aufgabe, die Richtung als Pfeil zu zeichnen, ist für viele dieser Schüler ein Problem. 41 % geben eine der Geschwindigkeit entsprechende Antwort (Kapitel 6.4.3.1).

So kann man sagen, dass in beiden Aufgabentypen zur Beschleunigung (Graphen und Münzwurf) ca. 40 % der Schüler nur der Geschwindigkeit entsprechend antworten und ca. 50 % ein gewisses Verständnis der Beschleunigung haben, häufig aber nur der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages $a = \Delta|\vec{v}| / \Delta t$ entsprechend.

Schließlich wurden noch Aufgaben gestellt, bei denen die Beschleunigung ausschließlich als Pfeil angegeben werden sollte und kein Koordinatensystem definiert war, so dass die Schüler nicht „+“ bei Schnellerwerden und „-“ bei Langsamerwerden angeben konnten. Bei geradlinigen Bewegungen geben nach dem Mechanikunterricht durchschnittlich 90 % der Schüler eine richtige Lösung ($N = 217$), während bei Kurvenfahrten (konstantes Tempo, schneller- und langsamerwerdend) nur durchschnittlich 9 % die richtige Lösung angeben (Kapitel 6.4.1.1). Dagegen geben durchschnittlich 59 % einen Pfeil an, der mehr oder weniger die tangentielle Beschleunigung angibt (evtl. gebogener Pfeil), wobei man annehmen kann, dass häufig eine „Schneller-/Langsamer-Vorstellung“ in Pfeile umgesetzt wurde.

Insgesamt kann man also folgern, dass im herkömmlichen Unterricht nur wenige Schüler ein physikalisch angemessenes Verständnis der Beschleunigung erreichen, das ihnen ermöglicht, qualitative Aufgaben zur Beschleunigung – auch bei Richtungsumkehr oder im zweidimensionalen Fall – konsequent richtig zu lösen.

Der bekannte FCI-Test zum physikalischen Kraftkonzept wurde im Gegensatz zu den USA in Deutschland bisher nur in wenigen Klassen und einer großen Anzahl von Studenten gestellt, während er im Rahmen dieser Arbeit erstmals einer größeren Anzahl von Schülern gestellt wurde (erste Testversion). Die Schüler lösen am Beginn der elften Jahrgangsstufe 28 % der 29 qualitativen Items richtig und nach dem Mechanikunterricht 41 % ($N = 258$), was ein relativer Zugewinn von nur 18% ist (Kapitel 6.5.1.2). Besonders geringe relative Zugewinne liegen bei den Subskalen „zweites newtonsches Axiom“ und „Superposition“ vor. Hier macht sich auch bemerkbar, dass im herkömmlichen Unterricht fast nur eindimensionale Bewegungen betrachtet werden. Korrelationen, Faktorenanalyse und Reliabilitäten bestätigen allerdings die in der Literatur geäußerte Kritik an dem FCI-Test, d.h. an der Einteilung in die einzelnen Subskalen (siehe Kapitel 6.5.1.1 und 6.5.1.2).

Zum Verständnis des ersten und zweiten newtonschen Gesetzes bei eindimensionalen Bewegungen wurden speziellere Testaufgaben gestellt, bei denen Schüler in mehreren Items jeweils die Kraft heraussuchen, die eine beschriebene Bewegung bewirkt. Sind die Kräfte mit Worten beschrieben, geben durchschnittlich 14 % der herkömmlich unterrichteten Schüler vor dem Unterricht der Oberstufe eine richtige Antwort ($N = 373$) und nur durchschnittlich 32 % nach dem Mechanikunterricht ($N = 188$) (Kapitel 6.5.2.1). Dagegen geben zu Beginn der elften Jahrgangsstufe durchschnittlich 63% der Schüler eine Antwort, bei der sich die Kraft wie die Geschwindigkeit verhält („aristotelische“ Antwort), und nach dem Dynamikunterricht noch 51 % der Schüler. Werden dagegen die möglichen Antworten statt als Text mit Zeit-Kraft-Graphen beschrieben, geben deutlich weniger Schüler eine newtonsche Antwort. Der Wert steigt hier von durchschnittlich 9 % vor dem Unterricht ($N = 373$) auf nur 21 % nach dem Unterricht ($N = 188$) (Kapitel 6.5.2.2). Der Anteil von „aristotelischen“ Antworten fällt dagegen kaum von im Durchschnitt 69 % auf nur 65 %. Obwohl die Schüler bei Zeit-Geschwindigkeits-Graphen bewiesen haben, dass sie Graphen lesen können, ist das Ergebnis hier deutlich schlechter, als wenn die Antworten in Textform vorgegeben sind. Die Kombination aus Grapheninterpretation und Überlegung der richtigen Kraft ist offensichtlich deutlich schwerer als jede dieser Aufgaben allein (cognitive overload). Bei beiden Darstellungen der Antwort werden Items mit Bewegungen nach rechts häufiger richtig beantwortet als Items mit Bewegungen nach links. Deshalb sollte diese Bewegungsrichtung im Unterricht nicht überbetont werden (Kapitel 6.5.2.1 und 6.5.2.2).

Schüler wurden auch gebeten, nach dem Dynamikunterricht Concept Maps (Begriffsnetze) mit vorgegebenen kinematischen und dynamischen Begriffen zu erstellen ($N = 55$). Als zentralste Größe wurde dabei von den Schülern die Geschwindigkeit verwendet, während die Beschleunigung erst an zweiter Stelle kommt (Kapitel 4.5.3.3). Die Kraftgrößen und die Bewegungsgrößen sind wenig miteinander vernetzt, wobei Luftwiderstand und Reibung anscheinend nicht als Kräfte angesehen werden, sondern im kinematischen Zusammenhang mit Geschwindigkeit verwendet werden. Mit dem Begriff „Summe aller angreifenden Kräfte“ können die Schüler nichts anfangen; nur ein Zehntel gibt an, dass diese die Beschleunigung bestimmt. Nur ein Drittel gibt an, dass die Beschleunigung von der Zugkraft abhängt, und nur ein Fünftel, dass sie von der Masse abhängt. Dagegen findet sich bei einem Drittel der Schüler die falsche Aussage „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ und bei fast

ebenso vielen „Masse beeinflusst Kraft“. D.h. diese Schüler haben das zweite newtonsche Gesetz nicht verstanden, sondern nur die Formel $F = m \cdot a$ gelernt.

Mit Hilfe des „Maryland Physics Expectations Survey“ wurde festgestellt, dass die Gymnasiasten (N = 336) eine deutlich andere Sicht von der Natur physikalischen Wissens und von der Natur des Lernens physikalischen Wissens haben als Experten (Kapitel 6.6.2). Diese Sicht verschlechtert sich im Mittel sogar noch leicht (teilweise signifikant) durch den Mechanikunterricht. Auffällig ist auch, dass Schüler aus der Oberstufe des bayerischen Gymnasiums bei der deutschen Testversion deutlich ungünstigere Ansichten äußern als Studenten aus amerikanischen Universitäten bzw. Colleges beim amerikanischen Originaltest. Am größten ist der Unterschied bei der Rolle der Mathematik, denn bei den bayerischen Schülern hat ein größerer Anteil die Ansicht, dass Gleichungen für das Aufgabenlösen einfach hingenommen und gelernt werden müssen. 83 % der Schüler stimmen außerdem der Aussage zu, dass es bei physikalischen Aufgaben darum geht, die richtige Gleichung zu finden. Die Einteilung der Items in die einzelnen Subskalen kann allerdings aufgrund von Faktorenanalyse und Reliabilitätsanalyse kritisch gesehen werden. Es wurde ferner festgestellt, dass ein gewisser Zusammenhang zwischen den Vorstellungen über die Natur der Physik bzw. über das Lernen der Physik und dem Verständnis des newtonschen Kraftkonzeptes besteht, aber kein Zusammenhang zwischen diesen Vorstellungen und dem relativen Lernzuwachs in der newtonschen Mechanik (Kapitel 6.6.4).

Insgesamt heißt das, dass der herkömmliche Mechanikunterricht weit hinter den gestellten Erwartungen zurückbleibt und nur wenig qualitatives Verständnis erreicht.

8.2 Ideen des entwickelten Unterrichtskonzeptes

Dynamisch ikonische Repräsentationen als bildhafte, bewegte Darstellungen physikalischer Größen ermöglichen es dem Lehrer, physikalische Größen und Aussagen auf verschiedene Arten zu veranschaulichen (Kapitel 3.2). Sowohl der zeitliche Verlauf einer Größe als auch die Beziehungen zwischen verschiedenen Größen können auf verschiedenen Abstraktionsniveaus gezeigt werden. In dem entwickelten Unterrichtskonzept wurden dynamisch ikonische Repräsentationen als Hilfe zur Veränderung von Schülervorstellungen genutzt, insbesondere die Darstellung vektorieller Größen durch Vektorpfeile.

Dadurch wird ein Einstieg in die Kinematik über eine allgemeine zweidimensionale Bewegung möglich, an der die kinematischen Größen eingeführt werden (Kapitel 5.3.1 – 5.3.2). So werden die Schüler von Anfang an mit dem vektoriellen Charakter der Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung vertraut. Die Betrachtung des Geschwindigkeitsänderungsvektors $\Delta \vec{v}$ kann außerdem als Elementarisierung des Beschleunigungsvektors gesehen werden. Zur Messwerterfassung zweidimensionaler Bewegungen werden vier verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen (Kapitel 5.3.3), wobei in der unterrichtlichen Umsetzung vor allem die PC-Maus, auch in Schülerübungen, verwendet wurde.

In der Dynamik kann mit dieser Darstellung und mit einer kontinuierlichen Messung gezeigt werden, dass das Grundgesetz der Mechanik (= zweites newtonsches Axiom) selbst bei veränderlicher Kraft in jedem Augenblick gilt. Auch Versuche mit mehreren Kräften und Reibungskräften sowie

komplexere Versuche zum dritten newtonschen Gesetz sind möglich (Kapitel 5.3.4 – 5.3.6). Das zweite newtonsche Gesetz wird in der Form $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ behandelt.

Ikonsche Darstellungen können ebenso in qualitativen, Verständnis verlangenden Übungs- und Testaufgaben verwendet werden. Die Darstellungen ermöglichen außerdem, vor der Durchführung der Versuche von den Schülern viele genaue Vorhersagen zu fordern (Schüleraktivitäten), insbesondere über relevante Größen und über die sie darstellenden Pfeile mit ihren Richtungen und ihren Änderungen (Kapitel 5.4.4). Damit können Schüler immer wieder zum aktiven Denken aufgefordert werden.

Eine andere bildhafte Darstellung wird beim Erstellen von Wirkungsnetzen genutzt, um alle Abhängigkeiten der Größen voneinander und damit Strukturzusammenhänge bewusster zu machen (Kapitel 4). Von einer Software zur graphischen Modellbildung können diese Wirkungsnetze automatisch in ein Rechenprogramm umgesetzt und der physikalische Ablauf berechnet werden. Das Erstellen von Modellen zu dynamischen Vorgängen hilft, eigene Vorstellungen über die Strukturzusammenhänge zu klären und der Ablauf mit einer Animation gibt eine Rückkopplung. Damit werden Fehlvorstellungen aufgearbeitet und die wenigen Grundgleichungen der Mechanik betont.

Ein wichtiger Punkt bei der Umsetzung des Unterrichtskonzeptes war aber auch die Lehrerfortbildung, in der den Lehrkräften die vorhandenen Schülervorstellungen vorgestellt und die Ideen des Unterrichtskonzeptes erläutert wurden. Dabei spielten auch die ausführliche Unterrichtsbeschreibung und viele Unterrichtsmaterialien (Kapitel 5.5), die nach Lehrerwünschen gestaltet wurden, eine Rolle. Darin konnten die Lehrer sehen, wie die Ideen umgesetzt werden können, und darin wurden die verschiedenen Maßnahmen nochmals begründet.

8.3 Ergebnisse der Interventionsstudie zur Modellbildung

In einer Interventionsstudie fanden in drei Gymnasialklassen der elften Jahrgangstufe nach Abschluss des Kinematik- und Dynamikunterrichtes noch sechs Unterrichtsstunden mit graphischer Modellbildung statt (Kapitel 4.4). In dieser Studie zur Modellbildung konnten Fehlvorstellungen, die die Schüler auch nach dem herkömmlichen Mechanikunterricht noch hatten bzw. erst durch diesen entstanden sind, aufgedeckt und besprochen werden. Dies geschah u.a. dadurch, dass Eingaben ins Modellbildungssystem entsprechend den geäußerten Schülervorstellungen gemacht wurden und an der danach ablaufenden Animation deutlich erkennbar war, dass dies zu unrealistischen Bewegungsabläufen führt (Kapitel 4.5.1). Eine Bewertung der Modellbildung durch die Schüler mit Hilfe eines Fragebogens ergab, dass die Schüler an der graphischen Modellbildung Interesse haben und diese positiv einschätzen (Kapitel 4.5.2).

Die Schüler der Studie haben vor und nach dem Zusatzunterricht Concept Maps angefertigt, aus denen jeweils als Generalisierung Modal Maps erstellt wurden. Die Maps nach dem Unterricht unterscheiden sich dabei deutlich von den vorhergehenden Maps (Kapitel 4.5.3.3). Die aus physikalischer Sicht wesentlichen Verbindungen kommen nachher häufiger vor, während physikalisch falsche Aussagen deutlich seltener vorkommen. So nimmt die Bedeutung des Begriffes „Summe der angreifenden Kräfte“ durch den Zusatzunterricht stark zu, wohingegen z.B. die Geschwindigkeit nicht mehr als so zentraler Begriff gesehen wird. Während vorher vor allem angegeben wurde, dass

Reibung und Luftwiderstand die Geschwindigkeit beeinflussen, wurden sie nachher mehr als spezielle Kräfte gesehen. So lässt sich zusammenfassend sagen, dass durch die graphische Modellbildung strukturelles Verständnis gefördert wurde.

8.4 Erfahrungen der Lehrer mit dem Gesamtunterrichtskonzept

Nach diesen Ideen wurde ein Gesamt-Unterrichtskonzept entwickelt (Kapitel 5) und insgesamt 13 Lehrer in 17 Klassen haben danach unterrichtet, für die eine vorbereitende und begleitende Fortbildung angeboten wurde (Kapitel 6.1). Die teilnehmenden Lehrer zeigten, dass das Kinematik-Konzept in der vorgeschlagenen Zeit von 14 Unterrichtsstunden für ein- und zweidimensionale Kinematik durchführbar ist (Kapitel 6.3.1). Die Lehrer lobten das Konzept als inhaltlich geschlossen mit erkennbarem roten Faden. Das Herausarbeiten des zentralen Beschleunigungsbegriffes in Abgrenzung zur Geschwindigkeit gelinge hier deutlich besser als beim traditionellen Vorgehen. Im Gegensatz zur Einführung in die Kinematik über eindimensionale Bewegungen seien Ort und Weglänge klar unterscheidbar, ebenso Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsbetrag. Fast alle Lehrer waren überzeugt, dass die Schüler bei diesem Vorgehen die Begriffe Geschwindigkeit und insbesondere Beschleunigung besser als nach traditionellem Vorgehen verstanden hätten. Es schien so, als ob aus Sicht der Lehrer die Einführung der kinematischen Größen anhand zweidimensionaler Bewegungen der wesentliche Unterschied zwischen diesem Unterrichtskonzept und dem traditionellen Vorgehen sei, d.h. der gravierendste, aber auch überzeugendste Unterschied.

Die Lehrer fanden gut, dass beim Grundgesetz der Mechanik in der Form $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ nun die Summe aller angreifenden Kräfte betont wird, da dies realitätsnäher sei und in Wirklichkeit immer mehrere Kräfte angreifen (Kapitel 6.3.2). Insgesamt meinten die Lehrer, dass die Schüler bei diesem Unterrichtskonzept den Begriff „Kraft“ und insbesondere den Zusammenhang mit der Beschleunigung besser als nach einem traditionellen Vorgehen verstanden hätten. Sie waren der Meinung, dass die Visualisierungsmöglichkeiten, insbesondere die Darstellung der Größen und ihrer Änderungen durch Vektoren, also die dynamisch ikonischen Repräsentationen sich positiv auf das Lernen ausgewirkt hätten. Es bestand die Möglichkeit, Videos der Versuche zu zeigen und die Messung in PAKMA als Reproduktion in Echtzeit ablaufen zu lassen, was von den meisten Lehrern bei den wirklich komplexen Versuchen mit guten Erfahrungen genutzt wurde. Dies ist wohl die einzige Möglichkeit, solche neuen, komplexen Versuche, die bisher nicht gemacht werden, effizient und motivierend im Unterricht einzusetzen. Die Videos dienen der Anschauung und verdeutlichen jeweils Versuchsaufbau und -ablauf.

Alle Lehrer, die die graphische Modellbildung einsetzten, waren davon begeistert (Kapitel 6.3.3). Zwei Referendarinnen nutzten die positiven Erfahrungen für eine Schriftliche Hausarbeit zum Zweiten Staatsexamen und zeigten damit, dass der vorgeschlagene Ansatz ein motivierender und erweiterbarer Ansatz ist. Des Weiteren zeigte sich, dass es möglich ist, in Prüfungsaufgaben Wirkungsgefüge erstellen zu lassen.

Das Unterrichtskonzept wurde also von den Lehrern gut angenommen, die auch in Zukunft wieder entsprechend unterrichten werden. Die Kombination aus Materialien-CD und Präsenzveranstaltungen kann damit auch als gelungene Lehrerfortbildung aufgefasst werden.

Die Ideen und Materialien dieses Unterrichtskonzeptes, die ursprünglich im Hinblick auf den Physikunterricht in bayerischen Gymnasialklassen entwickelt wurden, wurden auch in anderem Zusammenhang unter anderen Bedingungen eingesetzt und es wurden dabei einige Erfahrungen gesammelt (Kapitel 7). Auf besonderes Interesse stieß dabei die Einführung der kinematischen Größen anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen, die stets sehr positiv eingeschätzt wurde und die mit unterschiedlicher Software realisiert werden kann (JPAKMA: Kapitel 7.1; Coach 5: Kapitel 7.3). Viele Ideen (zweidimensionale Kinematik, Modellbildung) wurden sowohl im eher lehrerzentrierten Unterricht als auch in einem stark schülerorientierten Unterricht (Kapitel 7.3.1) eingesetzt.

8.5 Empirischer Vergleich der Treatmentgruppe mit Vergleichsgruppen

In der Treatmentgruppe, die nach dem gesamten Konzept unterrichtet wurde, wurden verschiedene paper-pencil-Tests gestellt, wobei zu akzeptieren war, dass nicht alle Klassen an allen Tests teilnahmen, denn es ist für Lehrer aufgrund der Stofffülle schwer möglich, viele zusätzliche Tests in den Unterricht einzubeziehen. Die Testergebnisse wurden mit Ergebnissen aus herkömmlich unterrichteten Klassen verglichen.

In der Treatmentgruppe wurde viel Wert auf das Verständnis der kinematischen Größen gelegt und ausführlich zweidimensionale Bewegungen behandelt, während im herkömmlichen Unterricht intensiv eindimensionale Bewegungen mit Grapheninterpretation behandelt und geübt werden. Bei Aufgaben, in denen zu einer beschriebenen Bewegung der passende Zeit-Geschwindigkeits-Graph oder Zeit-Beschleunigungs-Graph zu wählen ist, ist aber kein signifikanter Unterschied nachweisbar ($N_{\text{Treat}} = 211$, $N_{\text{Kontr}} = 188$) (Kapitel 6.4.2.4). Dass in diesem Konzept eindimensionale Bewegungen weniger als im herkömmlichen Unterricht behandelt wurden und stattdessen das Verständnis für die Größen an zweidimensionalen Bewegungen geschult wurde, wirkt sich also nicht auf das Lösen dieser Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen aus.

Anders sieht es aus, wenn nicht nach Graphen, sondern nach der Richtung der Beschleunigung gefragt wird. Beim senkrechten Münzwurf (mit Richtungsumkehr) wurde nach der Richtung der Beschleunigung in Form von Vorzeichen bei gegebenem Koordinatensystem und in Form von Pfeilen gefragt, so dass sich die Schüler zwischen einer „Schneller/langsamer-Vorstellung“ $a = \Delta|\vec{v}| / \Delta t$ (Beschleunigung als Änderung der Schnelligkeit) und einer Richtungsvorstellung $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ entscheiden mussten. Hier waren die Schüler der Treatmentgruppe hoch signifikant besser ($N_{\text{Treat}} = 151$, $N_{\text{Kontr}} = 188$) (Kapitel 6.4.3.2): Beim Vorzeichen gaben 39 % eine richtige Antwortkombination gegenüber 7 % in der Kontrollgruppe. Bei den Pfeilen gaben 42 % eine richtige Antwortkombination gegenüber 9 % in der Kontrollgruppe. Pfeile, die der Geschwindigkeit entsprechen, wurden nur von 27 % gegenüber 62 % in der Kontrollgruppe angegeben.

Eine angemessenere Richtungsvorstellung zeigte sich bei der Treatmentgruppe auch bei Testaufgaben zur Beschleunigung bei einer zweidimensionalen Bewegung. Die Schüler sollten dabei nur die Beschleunigungsrichtung als Pfeil angeben, wobei die Veränderung der Schnelligkeit mit Worten angegeben war. Bei geradlinigen Bewegungen konnte kein großer Unterschied zwischen der Treat-

mentgruppe und der Kontrollgruppe festgestellt werden. Aber bei Kurvenfahrten ergaben sich sehr große und höchst signifikante Unterschiede: 77 % der getesteten Schüler der Treatmentgruppe ($N_{\text{Treat}} = 35$) gaben im Durchschnitt eine richtige Antwort im Gegensatz zu nur 9 % bei der Kontrollgruppe ($N_{\text{Kontr}} = 217$), was eine Effektstärke von $d = 2,95$ ergibt (Kapitel 6.4.1.2).

Deshalb wird gefolgert, dass in den nach diesem Unterrichtskonzept unterrichteten Klassen mehr Schüler ein physikalisch angemessenes Beschleunigungskonzept erreicht haben und eine Vorstellung von der Richtung der Beschleunigung haben. Dieser Vorteil nützt ihnen aber nichts, wenn es um Grapheninterpretationen bei eindimensionalen Bewegungen geht.

Um das Verständnis des ersten und zweiten newtonschen Gesetzes abzu prüfen, wurden Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen verwendet. Bei Kraftaufgaben, bei denen die Antwortmöglichkeiten im Textformat vorlagen, haben mit 39 % der Schüler ($N_{\text{Treat}} = 188$) signifikant mehr Schüler als in der Kontrollgruppe (32 %) ($N_{\text{Kontr}} = 211$) entsprechend der newtonschen Vorstellung geantwortet (Kapitel 6.5.2.3). Bei Aufgaben, bei denen die Antwortmöglichkeiten als Zeit-Kraft-Graphen vorlagen, haben mit 34 % der Schüler ebenfalls signifikant mehr Schüler als in der Kontrollgruppe (21 %) entsprechend der newtonschen Vorstellung geantwortet (Kapitel 6.5.2.3). Allerdings sind die Effektstärken mit 0,20 bzw. 0,34 nur schwach bis mittel.

Deutlich anders ist das Ergebnis bei dem bekannten FCI-Test, bei dem nur mit qualitativen Aufgaben mehr Aspekte des Kraftbegriffes in mehr unterschiedlichen Kontexten abgeprüft wurden. Im Nachtest wurden hier 53 % der Aufgaben richtig gelöst ($N_{\text{Treat}} = 138$) im Gegensatz zu nur 41 % in der traditionell unterrichteten Vergleichsgruppe ($N_{\text{Kontr}} = 258$), was ein signifikanter Unterschied ist (0,001-Niveau) und eine relativ hohe Effektstärke von $d = 0,77$ ergibt (Kapitel 6.5.1.3). Auch der relative Zugewinn der Schüler ist mit 31 % signifikant höher (0,001-Niveau) als in der Vergleichsgruppe mit 18 % (Effektstärke 0,66). Der Anteil der Schüler, die mehr als ca. 60 % richtig beantworteten (17 oder mehr der 29 Items), was als Schwelle für ein newtonsches Verständnis angesehen werden kann, liegt mit 42 % deutlich höher als in der Vergleichsgruppe mit 16 %. Der größte relative Zugewinn wurde dabei in der Subskala „drittes newtonsches Axiom“ erreicht (43 %). Die größte Effektstärke im Vergleich zur Vergleichsgruppe wurde in der Subskala „Kraftverständnis“ erzielt ($d = 0,77$). Damit kann als nachgewiesen gelten, dass deutlich mehr Schüler der Treatmentgruppe ein qualitatives Verständnis des newtonschen Kraftbegriffes erreicht haben.

Dies wird auch von den Concept Maps bestätigt, die in drei Klassen, die nach dem Unterrichtskonzept einschließlich Modellbildung unterrichtet wurden, angefertigt wurden ($N = 63$) und in denen die Schüler qualitatives Verständnis zur newtonschen Bewegungslehre zeigten. Obwohl die Concept Maps in zwei der drei Klassen erst am Schuljahresende angefertigt wurden, zeigen sie wesentlich mehr Verständnis als bei traditionell unterrichteten Klassen direkt nach dem Dynamikunterricht und sogar mehr Verständnis als traditionelle Klassen nach einer intensiven Intervention mit Modellbildung (Kapitel 6.5.3). Auch eine Klasse, die nach dem neuen Konzept zur Kinematik und Dynamik, aber ohne Modellbildung unterrichtet wurde, war bei den Concept Maps deutlich besser als konventionell unterrichtete Klassen, aber nicht so gut wie Klassen, in denen Modellbildung eingesetzt wurde (Kapitel 6.5.3 und Tab. 7.9 in Kapitel 7.3.3.6). Gerade die Modellbildung hilft wohl, Zusammenhänge zu verstehen und dauerhaft zu verankern.

Schließlich wurde mit Hilfe des MPEX-Tests ($N = 125$) noch erhoben, ob die Schüler, die nach dem Unterrichtskonzept unterrichtet wurden, auch ihre Vorstellungen über die Natur der Physik und ihre Vorstellungen über das Lernen von Physik verändert haben. Es stellt sich jedoch heraus, dass der Unterricht nach dem Unterrichtskonzept im Durchschnitt bezüglich der Dimensionen des MPEX-Tests keinen positiven Effekt hat (Kapitel 6.6.3). Andererseits wurden in den Klassen, in denen auch Modellbildung intensiv eingesetzt wurde, signifikante Veränderungen vor allem beim Cluster „Realitätsbezug“ festgestellt: die für Physiklernen förderlichen Antworten nahmen zu und die unförderlichen ab (Kapitel 6.6.3). D.h. für die Schüler, bei denen Modellbildung unterrichtet wurde, haben persönliche Erfahrungen in der realen Welt und im Physikunterricht mehr miteinander zu tun (Kapitel 6.6.3), was sicherlich auf die Behandlung realer Abläufe mit Reibung mittels der Modellbildung zurückgeführt werden kann.

8.6 Resümee

Dynamisch ikonische Repräsentationen können dem Lehrer neue unterrichtliche Möglichkeiten geben und somit dem Schüler helfen, physikalische Konzepte angemessener zu verstehen: Die Einführung kinematischer Größen anhand zweidimensionaler Bewegungen, die nur mit ikonischen Repräsentationen in Form von Vektorpfeilen sinnvoll ist (geeignete Elementarisierung), führt zu einem physikalischeren Verständnis des Beschleunigungsbegriffes und vermeidet Fehlvorstellungen durch eine ungeeignete Reduktion auf den Spezialfall eindimensionaler Bewegungen. Mehr Schüler konzeptualisieren Beschleunigung wie in der Physik als gerichtete Größe anstelle einer Größe, die die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages angibt und allenfalls tangentielle Richtung haben kann. Auch in der Dynamik sind dadurch hilfreiche Darstellungen und so sinnvolle Veränderungen des Unterrichts möglich: Um wesentliche Strukturen aufzuzeigen, werden komplexere Versuche mit mehreren Kräften und Reibung eingesetzt, was erst durch eine rechnerunterstützte Aufbereitung mit dynamisch ikonischen Repräsentationen ermöglicht wird. Diese Darstellungen ermöglichen auch eine aktive Auseinandersetzung der Schüler mit den Themen, indem von ihnen häufig Vorhersagen gefordert werden (geeignete Unterrichtsstrategie). Graphische Modellbildung als weiterer Einsatz bildlicher Darstellungen kann ebenso eine weitere Verständnishilfe sein. Schüler, die nach dem vorgelegten Unterrichtskonzept unterrichtet wurden, zeigten mehr Verständnis für den newtonschen Kraftbegriff.

Da in dem Unterrichtskonzept mehrere Ideen umgesetzt wurden und zusätzlich ein Lehrertraining stattfand, können die positiven Ergebnisse nicht einer einzelnen Unterrichtsvariable zugeschrieben werden. Da die entwickelten Ideen tatsächlich im Unterricht ankamen und dort Veränderungen bewirkten, kann von einer effektiven Lehrerfortbildung mit Transferwirkung gesprochen werden.

9 Abstract

Even after the traditional mechanics instruction in the senior classes, many students do not have any adequate physical conceptions of the physical terms and definitions used, as well as of their coherencies. This study therefore commences with a presentation of general aspects of students' conceptions (chapter 2.1) as well as precise students' conceptions on mechanics (chapter 2.2) and relevant teachers' conceptions (chapter 2.3). An objective of this study was to develop an overall concept for modified kinematics and dynamics instruction of motions in one and two dimensions in grade 11 of grammar school, aiming at helping as many students as possible to clear as many misconceptions on mechanics as possible. In order to achieve this goal, computer-aided experiments and the visualisation of physical quantities with dynamic-iconic representations (see chapter 3.2) were used, among other things, thus enabling new elementarizations as well as new teaching strategies (see chapter 9.2 or chapter 5). In order to have good chances that this concept reaches the school everyday life, it was conceived curriculum-conformal to the Bavarian curriculum.

The first goal of the summative evaluation was to determine to what extent the entire teaching concept can be implemented by different teachers, and how they assess said concept (see chapter 9.4 or chapter 6.3). Subsequently, an important objective was to ascertain, by means of tests, to which extent the students' conceptions had changed (pre-/post-testing design), and to compare these changes with conventionally taught classes (treatment-/control-group design) (conventional classes: chapter 9.1; comparison: chapter 9.5; chapters 6.4 + 6.5). For that purpose, already existing paper-pencil-tests were mainly used, as a new development of tests would not have been possible in the course of the study. These tests have various shortcomings, so several tests were used at the same time, complementing each other.

Graphic modelling in combination with animations is part of this teaching concept. Additionally, an own intervention study was carried out in this context (see chapter 9.3 and chapter 4).

9.1 Test results on students' conceptions in conventionally taught classes

In the tests carried out in the course of this study it turned out – as expected – that also after the traditional mechanics instruction in senior classes of grammar school (in Bavaria), a large proportion of students still give answers to qualitative problems according to the common students' conceptions regarding the concept “acceleration” and the concept “force”, and not according to the physical conception (chapters 6.4 to 6.6). It was furthermore demonstrated that the kind of conception used depends on the context as well as on the type of problem, the wording of the problem, the type of motion, and even from the direction of motion.

Even students at the beginning of 11th grade solve 89 % of problems, in which the adequate time-velocity graph is to be matched with described motions in one dimension, correctly (number of students $n = 373$). Thus it is to question whether an intensive interpretation of velocity graphs in the context of motions in one dimension makes sense (chapter 6.4.2.2). If the corresponding time-acceleration graph is to be matched with described motions in one dimension, however, the situa-

tion is totally different. In this case, the problems are merely solved by an average of 12 % of students at the beginning of 11th grade ($n = 373$), whereas an average of 71 % give answers as if velocity had been asked for (chapter 6.4.2.3). After traditional instruction, 47 % of the students on average answer correctly ($n = 188$), and 37 % answer as if velocity has been asked for. In case of motions to the left, an average of 7 % answer as if acceleration were the change of the magnitude of velocity (“+” = speeding up, “-” = slowing down). Items with motions to the right are solved correctly more often than items with motions to the left. Within one direction of motion, items with motions at constant velocity are answered correctly most frequently, followed by items with speeding up motions, whereas items with slowing down motions yielded the worst results (chapter 6.4.2.3).

A problem regarding the acceleration when tossing a coin vertically up into the air, for which the algebraic sign for the acceleration with a given coordinate system had to be indicated, produced similar results. After instruction, only 7 % of the students ($n = 188$) give the correct answer for all three phases (upwards, up, downwards), another 10 % at least for the upward phase and the downward phase (chapter 6.4.3.1). 36 % of the students give an answer regarding the change of the magnitude of velocity; the task of drawing an arrow for the direction is a problem for many of these students. 41 % give an answer pertinent to velocity instead of acceleration (chapter 6.4.3.1).

Thus it can be said that in the cases of both types of problems regarding acceleration (graphs and coin toss) approx. 40 % of the students give answers pertinent to velocity, and approx. 50 % showed a certain degree of understanding of acceleration, but often only regarding to the change of the magnitude of velocity $a = \Delta|\vec{v}| / \Delta t$.

Finally problems were set according to which the acceleration had to be given as an arrow only, with no coordinates system being defined, so that the students could not give “+” for speeding up and “-” for slowing down. After mechanics instruction, approximately 90 % of the students provide a correct solution for motions along a straight line ($n = 217$), whereas only an average of 9 % give the correct solution for motions along a curved path (at constant speed, speeding up, and slowing down) (chapter 6.4.1.1). In contrast, an average of 59 % give an arrow representing more or less the tangential acceleration (possibly curved arrow), whereas it can be assumed that often the conception of “speeding up/slowing down” was illustrated with arrows.

All in all, the conclusion can be drawn that in traditional instruction, only few students achieve a physically adequate understanding of acceleration, enabling them to solve problems on acceleration consequently correctly, also in case of change of direction or two-dimensional cases.

In contrast to the US, in Germany only few classes and a large number of university students have done the established FCI test on the physical concept of force up to now, whereas this test has been done for the first time by a larger number of students within the framework of this test (first version of the test). At the beginning of 11th grade, the students solve 28 % of the 29 qualitative items correctly, and 41 % after mechanics instruction ($n = 258$), which makes up a normalized gain (= ratio of average gain to maximum possible average gain) of only 18 % (chapter 6.5.1.2). There are especially low normalized gains with the subscales “Newton’s Second Law” and “superposition”. Here

it is also noticeable that in traditional instruction, motions in one dimension are almost exclusively dealt with. Correlations, factor analysis, and reliabilities, however, only confirm the criticism on the FCI test voiced in literature, i.e. on the graduation into the single subscales (see chapters 6.5.1.1 and 6.5.1.2).

In order to understand Newton's First and Second Laws with motions in one dimension, more specific test problems were posed, in the course of which students search the force effectuating a described motion in several items. If forces are described in words, a correct answer is given by an average of 14 % of the traditionally taught students ($n = 373$) prior to senior classes of grammar school, and only by an average of 32 % after mechanics instruction ($n = 188$) (chapter 6.5.2.1). In contrast, an average of 63 % of the students at the start of the 11th grade give an answer with force behaving like velocity ("Aristotelian" answer), still 51 % of the students after dynamics instruction. If, however, possible answers are described using time-force graphs instead of texts, clearly less students give a Newtonian answer. Here, the value rises from 9 % on average before instruction ($n = 373$) to only 21 % after instruction ($n = 188$) (chapter 6.5.2.2). The rate of „Aristotelian" answers, on the other hand, barely drops from an average of 69 % to only 65 %. Though the students have proved with the time-velocity graph that they are capable of reading graphs, the result in this case is clearly worse than if the answers were given in text form. The combination of interpretation of graphs with the consideration of the correct force is obviously clearly more difficult than each of these problems on its own (cognitive overload). In representations of the answer, items with motions to the right are solved correctly more often than items with motions to the left. Therefore this direction of motion should not be emphasised too much during instruction (chapters 6.5.2.1 and 6.5.2.2).

Students were also asked to draw concept maps with given kinematic and dynamic concepts after the dynamics instruction ($n = 55$). The most central quantity used by the students was velocity, acceleration only came second (chapter 4.5.3.3). The force quantities and motion quantities are only sparsely interlinked, whereas air resistance and friction do not seem to be regarded as forces, but are used in the kinematic connection with velocity. The students can not do anything with the term "sum of all acting forces"; only one tenth specifies that this determines acceleration. Only one third states that acceleration depends on the pulling force, and only one fifth states that it depends on mass. In contrast, one third of the students make the wrong statement „acceleration acts on force", and almost the same number says "mass acts on force". I.e. those students have not understood Newton's Second Law, but simply learned the formula $F = m \cdot a$.

By means of the "Maryland Physics Expectations Survey" it was observed that the grammar school students' view ($n = 336$) of the nature of physical knowledge as well as of the nature of studying physical knowledge clearly differs from the experts' view (chapter 6.6.2). This view even slightly deteriorates on average (partly significantly) due to mechanics instruction. It is also striking that students from senior classes of Bavarian grammar school state clearly more disadvantageous views in the German version of the test than students from American universities or colleges in the American original test. The biggest difference is in the role of mathematics, as the largest part of Bavarian students is of the opinion that equations for solving problems are to be simply put up with and

learned. Moreover, 83 % of the students agree with the statement that the point of a physical problem is finding the correct equation. The graduation of the items into the different subscales can be viewed critically, however, due to factor analysis and reliability analysis. It was furthermore observed that there is a certain coherence between the conception of the nature of physics and of studying physics on the one hand and the understanding of the Newtonian force concept on the other hand, respectively, there is however no coherence between these conceptions and the normalized gain in learning in Newtonian mechanics (chapter 6.6.4).

All in all this means that traditional mechanics instruction underachieves by far and results in only little qualitative understanding.

9.2 Ideas of the developed teaching concept

Dynamic-iconic representations illustrating physical quantities in motion allow the teacher to present physical quantities and statements in different ways (chapter 3.2). The temporal process of a physical quantity as well as the interrelations between different quantities can be displayed on different abstraction levels. Within the developed teaching concept dynamic-iconic representations were used as an auxiliary means to change students' conceptions, especially the representation of vectorial quantities by dint of vector arrows.

This allows for an introduction to kinematics via a general two-dimensional motion, with which kinematic quantities are introduced (chapters 5.3.1 – 5.3.2). Thus the students become acquainted with the vectorial nature of the quantities velocity and acceleration. The examination of the vector “change in velocity” $\Delta\vec{v}$ can furthermore be seen as the elementarization of the acceleration vector. For the acquisition of measured quantities of two-dimensional motions four different possibilities are suggested (chapter 5.3.3), whereas the PC-mouse is mainly used for implementations in class as well as for student exercises.

In dynamics, this representation and continuous measurement can show that the Newton's Second Law applies at all times, even under the condition of variable force. Experiments with several forces and friction forces as well as more complex experiments on Newton's Third Law are also possible (chapters 5.3.4 – 5.3.6). Newton's Second Law is being outlined in the form $\vec{a} = \Sigma\vec{F} / m$.

Iconic representations can also be applied in qualitative exercise- and test problems requisitioning understanding. The representations moreover provide for demanding exact predictions from the students previous to conducting the experiments (student activities), mainly regarding relevant quantities and regarding the arrows representing them, with their directions and changes (chapter 5.4.4). That way, students can be again and again challenged to actively think.

Another iconic representation is used for creating networks of variables and relations (we call them “effect networks”) in order to make all interdependences of the quantities and thus structural interrelations clearer (chapter 4). These networks of variables and relations can be automatically implemented into a computing program by a software for graphic modelling, and the physical progression can be calculated. Creating models on dynamic sequences helps to clarify own conceptions of structural interrelations, and the progression with animations gives feedback. That way, misconceptions are cleared and the few basic equations of mechanics are emphasized.

A decisive point of the implementation of the teaching concept was also the further training of teachers, during which the existent students' conceptions were presented to the teachers and the ideas of the teaching concept were explained. Extensive description of the instructions as well as plenty of teaching material (chapter 5.5), which was formed according to the teachers' wishes, also played a role. For the teachers that was an example of how the ideas could be implemented, and the use of the various measures was supported once again.

9.3 Results of the intervention study on modelling

Within an intervention study, six further lessons with graphic modelling were held in three 11th grade classes on grammar school after completion of the kinematics and dynamics instruction (chapter 4.4). In this study on modelling, misconceptions that students still were under, even after traditional mechanics instruction, or which were even created by this, could be detected and discussed. This was, among other things, done by making entries corresponding to the conceptions given by the students into the modelling system, and that the following animations clearly showed that this would lead to unrealistic motion sequences (chapter 4.5.1). An assessment of the modelling by the students with the aid of a questionnaire showed that the students are interested in graphic modelling and look upon it positively (chapter 4.5.2).

Before and after the supplementary lessons, the students of the study created concept maps, from which modal maps were compiled for generalisation. The post-instruction maps clearly differed from the pre-instruction maps (chapter 4.5.3.3). Afterwards, there were much more of the - from a physical point of view - essential interrelations, whereas there were clearly less physically wrong statements. Thus the term "sum of all acting forces" strongly increases in importance by the additional lessons, whilst e.g. velocity is no longer seen as such a central issue. Before the supplementary instruction, the students mainly stated that friction and air resistance influence velocity; afterwards, those were seen more as specific forces. To sum it up it can be said that structural understanding was enhanced by graphic modelling.

9.4 Teachers' experiences with the overall teaching concept

An overall teaching concept was developed based on these ideas (chapter 5), and all in all 13 teachers, who had been offered preparatory and accompanying further training (chapter 6.1), taught 17 classes according to this concept. The participating teachers showed that the kinematics-concept can be realised within the suggested timeframe of 14 lessons for one- and two-dimensional kinematics (chapter 6.3.1). The teachers praised the concept as coherent in respect of content and with a main thread. The central acceleration concept delimited from velocity could be worked out much better than with the traditional approach. Contrary to the introduction to kinematics via motions in one dimension, position and length of path were clearly distinguishable, the same as velocity and the magnitude of velocity. Almost all teachers were convinced that students had understood the concepts of velocity and particularly of acceleration better than they would have with the traditional approach. It seemed as if from the teachers' points of view the introduction of kinematic quantities

on the basis of two-dimensional motions was the essential difference between this teaching concept and the traditional approach, i.e. the most important, but also the most convincing difference.

The teachers approved that now the sum of all acting forces is emphasised in Newton's Second Law with the form $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$, as this was closer to reality and in reality it is always several forces acting (chapter 6.3.2). At large, the teachers thought that with this teaching concept, students had understood the concept of "force" and mainly the connection with acceleration better than they would have with the traditional approach. They were of the opinion that the visualisation possibilities, especially the representation of quantities and their change through vectors, i.e. the dynamic-iconic representations, influenced learning positively. There was the possibility to show videos of the experiments, and to have the measurements displayed as a real-time reproduction in PAKMA. This was used by most teachers with the really complex experiments, and proved good results. This seems to be the only possibility to efficiently and motivatingly use such new, complex experiments, which have never been made before, in class. The videos are for visualisation purposes and illustrate the respective structure and progress of the experiment.

All teachers who used graphic modelling enthused about it (chapter 6.3.3). Two student teachers used the positive experiences for their written thesis for the *Zweite Staatsexamen* (Second State Examination for teachers), and thus showed that the suggested approach is a motivating and expandable one. Furthermore it turned out to be possible to have networks of variables and relations created in examination questions.

The teaching concept was well accepted by teachers who are going to teach correspondingly in future as well. The combination of CD with materials and live presentation can also be seen as a successful further training event for teachers.

Ideas and materials from this teaching concept, which were originally developed with a view on physics instruction in classes of Bavarian grammar schools, were used in different contexts and under different conditions, and that way experience was gained (chapter 7). The introduction of kinematic quantities by means of general two-dimensional motions attracted great interest and positive evaluation; it can be realised with various software systems (JPAKMA: chapter 7.1; Coach 5: chapter 7.3). Many ideas (two-dimensional kinematics, modelling) were used in teacher-focussed lessons as well as in strongly student-oriented lessons (chapter 7.3.1).

9.5 Empirical comparison of the treatment group with the control groups

Various paper-pencil tests were held in the treatment group, which was instructed pursuant to the overall concept. It had to be accepted, however, that not all classes took all tests, because due to the abundance of subject matter it is difficult for teachers to include a large number of additional tests in the instruction. The test results were compared with results achieved in traditionally instructed classes.

In the treatment group, great store was set by the understanding of kinematic quantities, and two-dimensional motions were dealt with in detail. In traditional instruction, on the other hand, motions in one dimension with interpretations of graphs were intensively dealt with and practised. With problems in which the adequate time-velocity graph or time-acceleration graph was to be attributed

to a described motion, no significant difference could be proved ($n_{\text{treat}} = 211$, $n_{\text{contr}} = 188$) (chapter 6.4.2.4). The fact that within this concept motions in one dimension were dealt with less than in traditional instruction, and instead understanding for quantities was trained using two-dimensional motions does therefore not influence the solution of these problems on motions in one dimension.

Things are quite different when it comes to asking about the direction of acceleration instead of about the graph. In the case of tossing a coin vertically up into the air (with change of direction), the direction of acceleration in the form of algebraic signs with a given coordinate system and in the form of arrows was asked, so that the students had to make a decision between the conception of “speeding up/slowing down” $a = \Delta|\vec{v}|/\Delta t$ (acceleration as a change in speed) and a conception of direction $\vec{a} = \Delta\vec{v}/\Delta t$. In this instance, the students of the treatment performed highly significantly better ($n_{\text{treat}} = 151$, $n_{\text{contr}} = 188$) (chapter 6.4.3.2): 39 % gave a correct answer combination referring to the algebraic sign, compared to 7 % in the control group. 42 % gave a correct answer combination with regards to the arrows, compared to 9 % in the control group. Arrows corresponding to velocity were given by only 27 % compared to 62 % in the control group.

The treatment group also showed a more adequate conception of direction in test questions on acceleration in a two-dimensional motion. In this case, the students were only supposed to give the direction of acceleration as an arrow, whereas the change in speed was explained in words. In case of motions along a straight line, no great difference could be observed between treatment group and control group. With motions along a curved path, however, there were great and highly significant differences: 77 % of the tested students in the treatment group ($n_{\text{treat}} = 35$) gave a correct answer on average, as opposed to only 9 % of the control group ($n_{\text{contr}} = 217$), resulting in an effect size of $d = 2.95$ (chapter 6.4.1.2).

Thus the conclusion is drawn that in those classes taught according to this teaching concept, more students have gained a physically adequate conception of acceleration and have an idea of the direction of acceleration. This advantage, however, is of no use to them if it comes to interpreting graphs in motions in one dimension.

In order to test the understanding of Newton’s First and Second Law, problems on motions in one dimension were used. With problems regarding force, where the answer options were given as texts, significantly more students, namely 39 % ($n_{\text{treat}} = 188$), than in the control group (32 %) ($n_{\text{contr}} = 211$) answered corresponding with the Newtonian conception (chapter 6.5.2.3). Significantly more students, namely 34 %, than in the control group (21 %) answered problems, where the answer options were given as time-force graphs, corresponding to the Newtonian conception (chapter 6.5.2.3). At any rate, with 0.20 and 0.34, respectively, the effect sizes are only weak to medium.

The established FCI test, in which more aspects of the force concept in more variable contexts were tested with qualitative problems only, yielded a clearly different result. In the post-test, 53 % of the items were answered correctly ($n_{\text{treat}} = 138$), in contrast to only 41 % in the traditionally taught control group ($n_{\text{contr}} = 258$). This is a significant difference (0.001 scale) with a relatively big effect size of $d = 0.77$ (chapter 6.5.1.3). With 31 %, the normalized gain of the students is also significantly higher (0.001 scale) than in the control group with 18 % (effect size 0.66). The proportion of stu-

dents who answered more than approx. 60 % correctly (17 or more of the 29 items), what can be seen as the threshold for Newtonian understanding, is with 42 % clearly larger than in the control group with 16 %. The largest normalized gain was achieved in the subscale “Newton’s Third Law” (43 %). The biggest effect size in comparison to the control group was attained in the subscale “understanding of force” ($d = 0.77$). Thus it can be reckoned proven that clearly more students of the treatment group have gained qualitative understanding of Newton’s concept of force.

The concept maps, which were prepared in three classes who were instructed according to the teaching concept including modelling ($n = 63$), also prove that. In these concept maps students showed qualitative understanding of Newton’s motion laws. Although two of the three classes only prepared the concept maps at the end of the school year, these maps show fundamentally more understanding than those of traditionally taught classes directly after dynamics instruction, and even more understanding than traditionally instructed classes after an intensive intervention with modelling (chapter 6.5.3). A class, which was taught following the new concept on kinematics and dynamics, but without modelling, performed clearly better with the concept maps than traditionally instructed classes, but not as well as classes that had dealt with modelling (chapters 6.5.3 and chart 7.9 under chapter 7.3.3.6). Especially modelling seems to help understand connections and to lastingly embed them.

Finally the MPEX test ($n = 125$) was used to determine whether the students taught according to the teaching concept had also changed their conceptions of the nature of physics, as well as their conceptions of the way of learning physics. It turned out, however, that on average the instruction pursuant to the teaching concept had no positive effect with regard to the dimensions of the MPEX test (chapter 6.6.3). On the other hand, significant changes, mainly in the cluster “relation to reality”, were observed in classes in which modelling was intensively dealt with: answers favorable to learning of physics increased, and there was a decrease in the unfavorable answers (chapter 6.6.3). I.e. for those students who were taught modelling, personal experience in the real world and in physics instruction have more in common (chapter 6.6.3). This can be certainly ascribed to addressing real processes with friction via modelling.

9.6 Summary

Dynamic-iconic representations can provide teachers with new teaching possibilities and thus help students to adequately understand physical concepts. An introduction of kinematic quantities with the aid of two-dimensional motions, which makes only sense with iconic representations in the form of vector arrows (suitable elementarization), leads to a more physical understanding of the acceleration concept and avoids misconceptions due to an inept reduction to the special case of motions in one dimension. More students conceptualize acceleration – like in physics – as a directed quantity instead of a quantity indicating the change of the magnitude of velocity and having at best tangential direction.

This renders possible helpful representations for and thus reasonable changes of dynamics instruction as well: In order to illustrate essential structures, more complex experiments with several forces and friction are used, which is only feasible because of a computer-aided preparation with dynamic-

iconic representations. These representations also allow for the students to actively deal with the subject by often asking them to make predictions (suitable teaching strategy). Graphic modelling as another application of iconic representations can also further understanding. Students who were instructed pursuant to the teaching concept on hand showed a greater understanding of Newton's concept of force.

As several ideas were implemented in the teaching concept and an additional teacher training took place, the positive results can not be attributed to one single teaching variable. As the developed ideas were in fact well received in class and caused changes there, it can be called an effective further teacher training with a transfer effect.

10 Literaturverzeichnis

- AESCHLIMANN, U. (1997):** *Werkstatt-Unterricht zum Thema „Spiegel“* – In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik 8*, Nr. 37, S. 15 – 19
- ALBERT, U. (1997):** *Das 3. Newtonsche Gesetz – ein experimentell orientiertes Unterrichtskonzept*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- ANDERSON, B. (1986):** *The experiential gestalt of causation: a common core to pupils' preconceptions in science* – In: *European Journal of Science Education 8 (2)*, S. 155 - 171
- ARONS, A. (1981):** *Thinking, reasoning and understanding in introductory physics courses* – In: *The physics teacher 19*, S. 166 – 172
- ATKINS, K. R. (1986):** *Physik. Die Grundlagen des physikalischen Weltbildes*, 2. Auflage, de Gruyter, Berlin, New York
- AUFSCHNAIDER, C. V.; AUFSCHNAITER, S. V. (2001):** *Eine neue Aufgabenkultur für den Physikunterricht* – In: *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht 54*, Heft 7, S. 409 – 416
- BACKHAUS, U. (2001):** *Die Kraft ist ein Zwillingsspaar. Beispiele zur Einführung des Wechselwirkungsprinzips in der Schule* – In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik 12*, Nr. 65, S. 12 (186) – 14 (188)
- BACKHAUS, U. (2005):** *Alltagsmechanik mit GPS* – In: **NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.):** *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Berlin 2005*, Berlin
- BADER, F.; DORN, F. (Hrsg.) (1998):** *Dorn · Bader, Physik 11 Ausgabe A Gymnasium Sek II*, Schroedel Verlag, Hannover
- BAMBEY, J.; BRAUNER, R.; DMOCH, N.; GRIMM, W.; HEUER, D.; HÖRTER, C.; ILMBERGER, F.; KREß, K.; LOTTERMOSER, J.; MEHLIG, R.; SCHRÖDER, H.; VEIT, U. (1980):** *Grundzüge der Physik Sekundarstufe I Elektrik/Atomistik/Mechanik 2/Schwingungen und Wellen*, Verlag Moritz Diesterweg/Otto Saale Verlag, Frankfurt am Main
- BAO, L.; HOGG, K.; ZOLLMANN, D. (2002):** *Model analysis of fine structures of student models: An example with Newton's third law* - In: *American Journal of Physics 70*, Nr. 7, S. 766 - 778
- BARUK, S. (1989):** *Wie alt ist der Kapitän? Über den Irrtum in der Mathematik*, Birkhäuser Verlag, Basel
- BAUMERT, J.; KÖLLER, O. (2000a):** *Motivation, Fachwahlen, selbstreguliertes Lernen und Fachleistungen im Mathematik- und Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe* – In: **BAUMERT, J.; BOS, W.; LEHMANN, R. (HRSG.):** *TIMSS/III Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie - Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn, Band 2 Mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung am Ende der gymnasialen Oberstufe*, Leske + Budrich, Opladen, S. 181 - 213
- BAUMERT, J.; KÖLLER, O. (2000b):** *Unterrichtsgestaltung, verständnisvolles Lernen und multiple Zielerreichung im Mathematik- und Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe* – In: **BAUMERT, J.; BOS, W.; LEHMANN, R. (HRSG.):** *TIMSS/III Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie - Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn, Band 2 Mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung am Ende der gymnasialen Oberstufe*, Leske + Budrich, Opladen, S. 271 - 315
- BAUMERT, J.; LEHMANN, R. UND ANDERE (1997):** *TIMSS - Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich. Deskriptive Befunde*, Leske + Budrich, Opladen
- BEHRENDT, H.; DAHNCKE, H.; REISKA, P. (2000):** *Einsatz und computergestützte Auswertung von Concept Maps mit modalen Netzen und Bereichsdiagrammen* – In: **FISCHLER, H.; PEUCKERT, J. (Hrsg.):** *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*, Studien zum Physiklernen, Band 1, Logos-Verlag, Berlin S. 117 - 145
- BERG, C.; SMITH, P. (1994):** *Assessing students' abilities to construct and interpret line graphs: Disparities between multiple-choice and free-response instruments*, *Science Education 78*, S. 527 - 554

- BERGMANN, L. (1952):** *Der Nachweis elektrischer Wechselspannung mittels Staubfiguren* - In: Praxis der Physik / Chemie und Photographie im Unterricht der Schulen 1, Aulis Verlag Frankenberg/Eder, S. 6 - 9
- BETHGE, T. (1992):** *Mechanik in der Sekundarstufe II - Ein Kurskonzept unter Nutzung von Software-Werkzeugen* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg, September 1991*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDPC), Leuchtturm-Verlag, S. 152 – 154
- BLASCHKE, K. (1999):** *Dynamik-Lernen mit multimedial experimentell unterstütztem Werkstatt (MEW)-Unterricht – Konzepte, Umsetzung, Evaluierung*, Dissertation, Universität Würzburg
- BLASCHKE, K.; HEUER, D. (2000):** *Dynamik-Lernen mit multimedial-experimentell unterstütztem Werkstatt-Unterricht. Erfahrungen mit einem Unterrichtskonzept* –In: Physik in der Schule 38, Nr. 2, S. 86 – 91
- BLISS, J. (1994):** *Causality and Common Sense Reasoning* – In: MELLAR, H.; BLISS, J.; BOOHAN, R.; OGBORN, J.; TOMPSETT, C. (Hrsg.): *Learning with Artificial Worlds: Computer-based Modelling in the Curriculum*, The Falmer Press, London, S. 117 - 127
- BLISS, J.; MELLAR, H.; OGBURN, J.; NASH, C. (1993):** *Tools for Exploratory Learning Programme - Technical Report 2 "Semi-Quantitative-Reasoning-Expressive"*, London, University of London, King's College
- BORTZ, J. (1993):** *Statistik für Sozialwissenschaftler*, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- BORTZ, J.; DÖRING, N. (2002):** *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- BOSEL, H. (1992):** *Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*, Vieweg-Verlag, Braunschweig, Wiesbaden
- BRAUNSCHMIDT, H. (1972):** *Versuche zum 3. Newtonschen Gesetz* – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik, Nr. 2, S. 53
- BRESGES, A.; BUSSE, A. (2004):** *Multimedia im Physikunterricht soll den Verkehrstod junger Autofahrer verhindern helfen* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004*, Berlin
- BUND-LÄNDER-KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (1997):** *Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"* - In: Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung, Heft 60, Bonn, <http://www.blk-bonn.de/papers/heft60.pdf>, S. 1 – 39
- BUSSE, A. (2003):** *Mechanik und Verkehr – Ein Projekt zur Entwicklung multimedialer Lernsoftware zur Verkehrserziehung* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, Nr. 3, S. 29 – 34 und S. VI
- CHAMPAGNE, A.; KLOPFER, L.; ANDERSON, J. (1980):** *Factors influencing learning of classical mechanics* – In: American Journal of Physics 48, S. 1074 - 1079
- CHANDLER, P.; SWELLER, J. (1991):** *Cognitive load theory and the format of instruction* - In: Cognition and Instruction, 8, Nr. 4, S. 293 – 332
- CIMANDER, W. (1999):** *Das graphische Modellbildungssystem VisEdit für PAKMA - Konzeption, Realisierung und Referenz*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- CLEMENT, J. (1982):** *Student's preconceptions in introductory mechanics* – In: American Journal of Physics 50, Nr. 1, S. 66 - 71
- CROMBIE, A. (1959):** *Von Augustinus bis Galilei. Die Emanzipation der Naturwissenschaft*, Verlag Kiepenheuer & Witsch, Köln, Berlin
- DEMIDOW, I.; LICHTFELD, M.; USSOWA, A. (1997):** *Präkonzepte von russischen Schülern und Studenten in der Mechanik – andere als in Deutschland* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1997 - Berlin*, S. 194 - 199
- DIJKSTERHUIS, E. J. (1983):** *Die Mechanisierung des Weltbildes*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

- DITTMANN, H.; NÄPFEL, H.; SCHNEIDER, W. B. (1988):** *Die zerrechnete Physik* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 389 - 394 - Ebenso in: SCHNEIDER, W. B. (Hrsg.): *Wege in der Physikdidaktik - Sammlung aktueller Beiträge aus der Forschung*, Palm und Enke-Verlag, Erlangen, 1989 - Und in: *Physik und Didaktik* 18, 1990, Nr. 4, S. 287 - 292
- DOMELLEN, D.; HEUVELEN, A. (2002):** *The effects of a concept-construction lab course on FCI performance* - In: *American Journal of Physics* 70, Nr. 7, S. 779 - 780
- DORN, F.; BADER, F. (Hrsg.) (1975):** *Dorn - Bader, Physik – Oberstufe. Band MS*, Schroedel Verlag, Hannover
- DREYFUS, A.; JUNGWIRTH, E.; ELIOVITH, R. (1990):** *Applying the 'Cognitive Conflict' strategy for Conceptual Change - Some Implications, Difficulties, and Problems* - In: WOLLMANN, W. T. (Abschnitt-Hrsg.): *Science Education* 74, Nr. 5, S. 555 - 569
- DUIT, R. (1976):** *Zum Kraftbegriff in der Sekundarstufe I* – In: *Der Physikunterricht* 10, Ernst-Klett-Verlag, Stuttgart, Nr. 1, S. 5 - 23
- DUIT, R. (1989):** *Vorstellung und Experiment – von der eingeschränkten Überzeugungskraft experimenteller Beobachtungen* – In: *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik/Chemie* 37, Nr. 48, S. 37 (319)- 39 (321) [abgedruckt auch in: MÜLLER, R.; WODZINSKI, R.; HOPF, M. (Hrsg.) (2004): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis Verlag Deubner, Köln, S. 20 - 22]
- DUIT, R. (1990):** *Trends der Forschung zum naturwissenschaftlichen Denken - von Alltagsvorstellungen zur konstruktivistischen Sichtweise* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Kassel, September 1989*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 112 - 131
- DUIT, R. (1992):** *Vorstellung und Physiklernen - Zu den Ursachen vieler Lernschwierigkeiten* - In: *Physik in der Schule* 30, Nr. 9, S. 282 – 285
- DUIT, R. (1993a):** *Schülervorstellungen – von Lerndefiziten zu neuen Unterrichtsansätzen* – In: *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 4, Nr. 16, S. 4 – 10 [abgedruckt auch in: MÜLLER, R.; WODZINSKI, R.; HOPF, M. (Hrsg.) (2004): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis Verlag Deubner, Köln, S. 8 – 14]
- DUIT, R. (1993b):** *Schülervorstellungen und neue Unterrichtsansätze* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHAUSSCHUß DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1993 - Esslingen*, S. 183 – 194
- DUIT, R. (1996):** *Lernen als Konzeptwechsel im naturwissenschaftlichen Unterricht* – In: DUIT, R.; RHÖNECK, C. v. (Hrsg.): *Lernen in den Naturwissenschaften*, Kiel, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, S. 145 - 162
- DUIT, R. (2002):** *Alltagsvorstellungen und Physik lernen* – In: KIRCHER, E; SCHNEIDER, W. (Hrsg.): *Physikdidaktik in der Praxis*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 4 – 26
- DUIT, R. (2004):** *Bibliography – STCSE. Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*, IPN, Kiel, <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>
- DUIT, R.; FISCHER, H.; FISCHLER, H. (2001):** *Untersuchungen zum Lehrern und Lernen im Physikunterricht im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms „Bildungsqualität von Schule“* - In: BRECHEL, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Berlin, September 2000*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 303 - 311
- DWYER, F. M. (1982):** *The program of systematic evaluation - A brief review* – In: *International Journal of Instructional Media* 10, Heft 1, Baywood Publishing Co., Flemingdale, S. 23 - 38
- DYKSTRA, D. (1991):** *Studying Conceptual Change: Constructing New Understandings* - In: DUIT, R.; GOLDBERG, F.; NIEDDERER, H. (Hrsg.): *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop held at the University of Bremen. March 4-8, 1991*, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, Kiel, S. 40 - 58
- DYKSTRA, D.I.; BOYLE, C. F.; MONARCH, I. A. (1992):** *Studying conceptual change in learning physics* – In: *Science Education* 76 (6), S. 615 - 652

- DZIARSTEK, C.; HILSCHER, H. (1998):** *Physik im Alltag: Bewegungsabläufe auf Video festgehalten und per Computer analysiert. Videoanalyse-Programm DIVA und 61 ausgewertete Videoclips für den Kinematik-Unterricht auf CD-ROM* – In: Physik in der Schule 36, Nr. 1, S. 25 - 30
- ELBY, A. (2001):** *Helping physics students learn how to learn* - In: Physics Education Research, American Journal of Physics Supplement 69, Nr. 7, S. S54 – S64
- ENGELHARDT, P.; WIESNER, H. (1983):** *Lernschwierigkeiten in der Mechanik und unterrichtliche Konsequenzen* - In: Der Physikunterricht 17, Ernst Klett-Verlag, Stuttgart, Nr. 1, S. 15 - 34
- ESSLER, W. (1971):** *Wissenschaftstheorie II, Theorie und Erfahrung*, Freiburg, München, Verlag Karl Alber
- FEDERLEIN, A. (2003):** *Erstellung eines Lernmoduls zum Themengebiet Kinematik im Rahmen des Projektes „Vernetztes Studium Chemie“ mit anschließender formativer Evaluation*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- FEUERLEIN, R.; NÄPFEL, H. (1992):** *bsv Physik 1*, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München
- FEUERLEIN, R.; NÄPFEL, H.; SCHEDL, E. (1993):** *Physik mechanik*, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München
- FISCHER, H. (1992):** *Empirische Untersuchungen von Lernprozessen* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg, September 1991*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 55 – 77
- FISCHLER, H. (1970):** *Der Informelle Test im Physikunterricht: Konstruktion, Durchführung, Auswertung und Revision* - In: Der Physikunterricht 4, Ernst Klett-Verlag, Stuttgart, Nr. 2, S. 12 - 47
- FISCHLER, H. (2000):** *Über den Einfluß von Unterrichtserfahrungen auf die Vorstellungen vom Lehrer und Lernen bei Lehrerstudenten der Physik. Teil 1: Stand der Forschung sowie Ziele und Methoden einer Untersuchung* - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 6, S. 27 - 36
- FISCHLER, H. (2001):** *Verfahren zur Erfassung von Lehrer-Vorstellungen zum Lehren und lernen in den Naturwissenschaften* - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 7, S. 105 – 120
- FISCHLER, H.; PEUCKERT, J. (1999):** *Concept Mapping als Forschungsinstrument (Workshop)* – In: BRECHEL, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Essen, September 1998*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 334 - 336
- FISCHLER, H.; PEUCKERT, J. (2000):** *Concept Mapping in Forschungszusammenhängen* – In: FISCHLER, H.; PEUCKERT, J. (Hrsg.): *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*, Studien zum Physiklernen, Band 1, Logos-Verlag, Berlin, S. 1 - 21
- FLORES, S.; KANIM, S.; KAUTZ, C. (2004):** *Student use of vectors in introductory mechanics* - In: American Journal of Physics 72, Nr. 4, S. 460 - 468
- FRIEGE, G.; LIND, G. (2000):** *Begriffsnetze und Expertise* – In: FISCHLER, H.; PEUCKERT, J. (Hrsg.): *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*, Studien zum Physiklernen, Band 1, Logos-Verlag, Berlin, S. 147 - 178
- FRIEGE, G.; LIND, G. (2004):** *Leistungsmessung im Leistungskurs* - In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 57, Heft 5, S. 259 - 265
- GAITZSCH, R., ET AL. (1996):** *Hammer · Knauth · Kühnel, Physik Jahrgangsstufe 11 Mechanik Fundamentum*, Oldenbourg-Verlag
- GALILI, I.; KAPLAN, D. (2002):** *Die Schülerinterpretation – Orientierung einer Wasseroberfläche und Trägheitskräfte im Physik-Lehrplan* – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 51, Nr. 7, S. 2 - 11
- GALMBACHER, M. (1997):** *Ein Lehrtext zum computergestützten Unterrichtsprojekt: Kinematik, Dynamik – Theoretische Überlegungen und Umsetzung*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- GALMBACHER, M.; HEUER, D.; LIPPITSCH, S.; SCHERRER, S.; PLÖTZNER, R. (2005a):** *Erwerb qualitativ physikalischer Konzepte durch dynamisch-ikonische Repräsentationen von Strukturzusammenhängen* – In: PITTON, A. (Hrsg.): *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung, Jahres-*

tagung der GDGP in Heidelberg 2004, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 25, Lit-Verlag, Münster

- GALMBACHER, M.; HEUER, D.; PLÖTZNER, R.; LIPPITSCH, S. (2005b):** *Lernen mit dynamisch-ikonischen Repräsentationen in Abhängigkeit von Lernvoraussetzungen beim Schüler* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Berlin 2005*, Berlin
- GEIPEL, R.; REUSCH, W. (2005):** *Physik 8 I*, C.C.Buchners Verlag, Bamberg
- GEIBLER, T. (1999):** *Das graphische Modellbildungssystem VisEdit für PAKMA - Grundlagen, Bedienungsanleitung und Anwendungsbeispiele*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- GERDES, J.; SCHECKER, H. (1998):** *Physiklernen mit Modellbildungssystemen – Erste Ergebnisse* - In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 227 – 229
- GERDES, J.; SCHECKER, H. (1999):** *Der Force Concept Inventory - Ein diagnostischer Test zu Schülervorstellungen in der Mechanik* - In: *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht* 52, Heft 5, S. 283 - 288
- GIGLIOLA, S. (2003):** *Modellbildung im Physikunterricht der 11. Jahrgangsstufe - Erarbeitung und Erprobung einer Unterrichtseinheit zum Thema „Trampolinsprung“*, Schriftliche Hausarbeit für die Zweite Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, unveröffentlicht
- GIRWIDZ, R. (2001):** *Bildmedien im Physikunterricht*, Habilitationsschrift, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- GIRWIDZ, R.; KURZ, G.; KAUTZ, C. (2003):** *Zum Verständnis der newtonschen Mechanik bei Studienanfängern – der Test ‚Force Concept Inventory – FCI‘* – In: NORDMEIER, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung der DPG – Augsburg 2003*, Berlin
- GIRWIDZ, R.; RUBITZKO, T. (2003):** *Entwicklung und Evaluation von Multimediaanwendungen für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht* – In: NORDMEIER, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung der DPG – Augsburg 2003*, Berlin
- GIRWIDZ, R.; RUBITZKO, T.; SPANNAGEL, C. (2004):** *Animationen in multimedialen Lernumgebungen* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004*, Berlin
- GOLDBERG, F. (1994):** *Overview of Physics Education Research in the United States and Development of Interactive Multimedia Programs in Geometrical Optics* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1994 - Hamburg*, S. 37 - 57
- GOLDKUHLE, P. (1997):** *Modellbildung und Simulation mit dem Computer im Physikunterricht*, Praxis Schriftenreihe Physik Band 54, Aulis Verlag Deubner, Köln
- GÖBWEIN, O.; HEUER, D.; SULEDER, M. (2002):** *Modellbildung und Präsentation mit JPAKMA* – In: NORDMEIER, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig 2002*, Münster
- GÖBWEIN, O.; SULEDER, M.; HEUER, D. (2003):** *Multimediale Lernmodule zur Physik* - In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 52, Nr. 3, S. 16 - 21
- GREHN, J.; KRAUSE, J. (HRSG.) (1998):** *Metzler Physik*, Schroedel Verlag, Hannover
- GROB, K.; MENSCHEL, H.; REICHE, H.; RHÖNECK, C. v.; SCHREIER, U. (1993):** *Schülervorstellungen und neue Ansätze für den Physikunterricht* - In: *Physik in der Schule* 31, Nr. 11, S. 362 - 368
- GRÖBER, S. (2005):** *Konzeption einer Fortbildung mittels Blended Learning zu Neuen Medien im Physikunterricht*, Master-Arbeit an der Universität Rostock, unveröffentlicht
- GRÖBER, S.; POTH, T. (2004):** *Das MultiMechanics Project* - In: <http://physik.bildung-rp.de/unterrichtphy/MMP/MMP.htm>
- GRÖBER, S.; POTH, T.; WILHELM, T. (2006):** *Zweidimensional-vektorielle Kinematik mit Videoanalyse. Vorstellung eines Unterrichtsganges im MultiMechanics Project* - In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 53, Veröffentlichung geplant

- GROENEVELD, J. (1968):** *Messungen mit Staubfiguren und Metallschriftspuren*, August Lax Verlagsbuchhandlung, Hildesheim
- GRYGIER, P.; GÜNTHER, J.; KIRCHER, E. (2004):** *Über Naturwissenschaften lernen. Vermittlung von Wissenschaftsverständnis in der Grundschule*, Schneider Verlag, Hohengehren, Baltmannsweiler
- GÜNTHER, J.; GRYGIER, P.; KIRCHER, E.; THOERMER, C.; SODIAN, B. (2003):** *Epistemologische Überzeugungen von SchülerInnen und LehrerInnen* – In: PITTON, A. (Hrsg.): *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung, Jahrestagung der GDGP in Flensburg 2002*, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 23, Lit-Verlag, Münster, S. 150 - 152
- HAENISCH, H. (1994):** *Wie Lehrerfortbildung Schule und Unterricht verändern kann. Eine empirische Untersuchung zu den Bedingungen der Übertragbarkeit von Fortbildungserfahrungen in die Praxis*, Arbeitsberichte zur Curriculumentwicklung, Schul- und Unterrichtsforschung, Nr. 26, Landesinstitut für Schule und Weiterbildung, Soest, http://www.lfs.nrw.de/lfb_schule_veraendern.pdf
- HAKE, R. (1998):** *Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses* - In: American Journal of Physics 66, Nr. 1, S. 64 – 74
- HALLOUN, I.; HAKE, R.; MOSCA, E.; HESTENES D. (1997):** *Force Concept Inventory (revised 1995)* - In: MAZUR, E. (HRSG.): *Peer Instruction: A User's Manual*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, S. 45 - 58
- HALLOUN, I.; HESTENES, D. (1985a):** *Common sense concepts about motion* - In: American Journal of Physics 53, Nr. 11, S. 1056 - 1065
- HALLOUN, I.; HESTENES, D. (1985b):** *The initial knowledge state of college physics students* - In: American Journal of Physics 53, Nr. 11, S. 1043 – 1055
- HARTMANN, S. (2004):** *Erklärungsvielfalt*, Studien zum Physiklernen, Band 37, Logos-Verlag, Berlin
- HARTMANN, S.; NIEDDERER, H. (2003):** *Wie vielfältig erklären Schüler und Schülerinnen Bewegungen? Eine Untersuchung zu kognitiven Schichten im Bereich Mechanik* – In: NORDMEIER, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung der DPG – Augsburg 2003*, Berlin
- HARTMANN, S.; NIEDDERER, H. (2004):** *Erklärungsvielfalt- Bildungschance oder Gefahr?* – In: PITTON, A. (Hrsg.): *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung, Jahrestagung der GDGP in Berlin 2003*, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 24, Lit-Verlag, Münster, S. 117 - 119
- HASSELL, D. J. (1987):** *The roll of modelling activities in the humanities curriculum, with special reference to geography: an investigate study*, Dissertation for Associateship for Education, London, King's College
- HÄUBLER, P.; BÜNDER, W.; DUIT, R.; GRÄBER, W; MAYER, J. (1998):** *Naturwissenschaftsdidaktische Forschung. Perspektiven für die Unterrichtspraxis*, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel
- HÄUBLER, P.; HOFFMANN, L.; ROST, J. (1987):** *Langzeitwirkungen von Physikunterricht* - In: Physik und Didaktik 15, Nr. 4, S. 326 – 328
- HÄUBLER, P.; LIND, G. (2000):** „Aufgabenkultur“ – Was ist das? – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 49, Nr. 4, S. 2 – 10
- HEEGE, R. (1981):** *Konvergente Beschreibungen von Bewegungsphänomenen bei Aristoteles und bei Kindern* - In: SCHARMANN, A; HOFSTAETTER, A; KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1981 Gießen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 93 – 99
- HELLER, P; HUFFMAN, D. (1995):** *Interpreting the Force Concept Inventory. A Reply to Hestenes and Halloun* – In: The Physics Teacher 33, S. 503 + 507 – 511
- HENDERSON, C. (2002):** *Common Concerns About the Force Concept Inventory* - In: The Physics Teacher 40, S. 542 – 547
- HENSE, J.; MANDL, H.; KRUPPA, K.; GRÄSEL, C. (2002):** *Concept, Realisation, and Evaluation of SEMIK* - In: WATSON, D.; ANDERSON, J. (Hrsg.): *Networking the learner: computers in education*, Kluwer Academic Publishers, Boston, S. 777 – 786
- HERICKS, U. (1993):** *Über das Verstehen von Physik Physikalische Theoriebildung bei Schülern der Sekundarstufe II*, Waxmann Verlag GmbH, Münster/New York

- HESTENES, D. (1998):** *Who needs Physics Education Research!?* - In: American Journal of Physics 66, S. 465 - 467
- HESTENES, D.; HALLOUN, I. (1995):** *Interpreting the Force Concept Inventory. A Response to March 1995 Critique by Huffman and Heller* – In: The Physics Teacher 33, S. 502 + 504 -506
- HESTENES, D.; WELLS, M. (1992):** *A Mechanics Baseline Test* – In: The physics teacher 30, S. 159 - 166
- HESTENES, D.; WELLS, M.; SWACKHAMER, G. (1992):** *Force Concept Inventory* – In: The physics teacher 30, S. 141 – 158
- HEUER, D. (1980):** *Überlagerung von Bewegungen. Methodisch-didaktische Überlegungen zu einer Unterrichtssequenz mit Vorschlägen für geeignete Versuche* – In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 28, Nr. 3, S. 65 – 78
- HEUER, D. (1988):** *Computer-Versuchs-Analyse, Messen und Analysieren von Versuchsabläufe mit der Programmierumgebung PAKMA* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen*, Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik, S. 304 - 309
- HEUER, D. (1992a):** *Bewegungen „haargenau“ messen mit Sonarmeter oder Laufrad* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 41, Nr. 4, S. 4 – 8
- HEUER, D. (1992b):** *Offene Programmierumgebung zum Messen, Analysieren und Modellieren Ein Werkzeug, physikalische Kompetenz zu fördern* - In: Physik in der Schule 30, Nr. 10, S. 352 – 357
- HEUER, D. (1993a):** *Computerunterstütztes Experimentieren - eine realistische Chance, Physik-Verstehen zu fördern* - In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Erfurt, September 1992*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 130 - 132
- HEUER, D. (1993b):** *Dynamische Physik-Repräsentationen als Brückenschlag zwischen realen Experimenten und inneren Bildern* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHAUSSCHUß DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1993 - Esslingen*, S. 367 - 370
- HEUER, D. (1993c):** *Dynamische Physik-Repräsentationen in Realexperimenten - innere Bilder, eine Hilfe zur Konzeptionalisierung* - In: SCHNEIDER, W. B. (Hrsg.): *Wege in der Physikdidaktik - Band 3 Rückblick und Perspektive*, Palm und Enke, Erlangen, S. 424 – 436
- HEUER, D. (1993d):** *Dynamische Physik-Repräsentationen in Realexperimenten Beispiele* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHAUSSCHUß DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1993 - Esslingen*, S. 371 - 378
- HEUER, D. (1996a):** *Dynamische Repräsentationen. Verständnishilfe für Physikalische Experimente* - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 45, Nr. 4, S. 12 – 18
- HEUER, D. (1996b):** *Konzepte für Systemsoftware zum Physikverstehen* - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 45, Nr. 4, S. 2 – 11
- HEUER, D. (2003a):** *Physikunterricht, gestaltet mit Multimedia-Elementen* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, Nr. 3, S. 2 – 15
- HEUER, D. (2003b):** *Spannungen und Ströme in elektrischen Stromkreisen – mit interaktiven Modellbildungs-Simulationen vertieft* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, Nr. 7, S. 27 - 34
- HEUER, D.; VOß, B.; GEBNER, T. (2002):** *Anfahren, Rollen und Bremsen eines Fahrrades – Experimente mit Datenerfassung über Handfunkgerät und Modellbildung* – In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 51, Heft 5, S. 14 - 19
- HEUER, D.; WILHELM T. (1997):** *Aristoteles siegt immer noch über Newton. Unzulängliches Dynamikverstehen in Klasse 11* - In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 50, Nr. 5, S. 280 – 285
- HEUER, D.; WILHELM, T. (2003):** *Physikalische Abläufe verständlich machen durch Visualisierung von Strukturaussagen mit Hilfe des Computers* – In: SAUTER, F. C.; SCHNEIDER, W.; BÜTTNER, G. (Hrsg.): *Schulwirklichkeit und Wissenschaft – Ausgewählte Kongressbeiträge von Didaktikern, Pädagogen, Psychologen*, Verlag Dr. Kovač, Hamburg, S. 101 – 121
- HÖTTECKE, D. (2001):** *Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*, Studien zum Physiklernen, Band 16, Logos-Verlag, Berlin

- HÖTTECKE, D. (2004):** *Schülervorstellungen über die „Natur der Naturwissenschaften“* – In: HÖBLE, C.; HÖTTECKE, D.; KIRCHER, E. (Hrsg.): *Lehren und lernen über die Natur der Naturwissenschaften*, Schneider Verlag Hohengehren, Baltmannsweiler, S. 264 - 277
- HUCKE, L.; FISCHER, H. E. (1998):** *Lernen im Praktikum traditionell und computergestützt* - In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 313 - 315
- HUCKE, L.; FISCHER, H. E. (1999):** *Die Verbindung von Theorie und Praxis in traditionellen und in computergestützten Praktikumsexperimenten. Fallstudien zur Effektivität des physikalischen Anfängerpraktikums* - In: BRECHEL, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Essen, September 1998*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 250 – 252
- HUFFMAN, D.; HELLER, P. (1995):** *What Does the Force Concept Inventory Actually Measure?* - In: *The Physics Teacher* 33, S. 138 - 143
- ISSING, L. J. (1983):** *Bilder als didaktische Medien* - In: ISSING, L. J.; HANNEMANN, J. (Hrsg.): *Lernen mit Bildern*, Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht, Grünewald, S. 9 - 39
- ISSING, L. J. (1994):** *Wissenserwerb mit bildlichen Analogien* – In: WEIDENMANN, B. (Hrsg.): *Wissenserwerb mit Bildern. Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computerprogrammen*, Bern, Verlag Hans Huber, S. 149-176
- ISSING, L. J.; STRZEBKOWSKI, R. (1997):** *Lernen mit Multimedia aus psychologisch-didaktischer Sicht* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1997 - Berlin*, S. 47 - 68
- JÄGER, R. (1996):** *Konzept eines rechnerunterstützten Dynamikunterrichts zur Bildung adäquater mentaler Modelle*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- JÄGER, R. (1999):** *Das Modell des harmonischen Oszillators im Physikunterricht der 11. Jahrgangsstufe - Modellbildung und experimentelle -überprüfung durch den Einsatz des Computers*, Schriftliche Hausarbeit für die zweite Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Alexander-von-Humboldt-Gymnasium Schweinfurt, unveröffentlicht
- JUNG, W. (1980a):** *Allgemeine Ergebnisse von Erhebungen über Schülervorstellungen zur Mechanik* - In.: SCHARMANN, A.; HOFSTAETTER, A.; KUHN, W. (Hrsg.): *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1980 Gießen*, S. 110 - 115
- JUNG, W. (1980b):** *Mechanik für die Sekundarstufe I*, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, Berlin, München
- JUNG, W.; REUL, H.; SCHWEDES H. (1977):** *Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3 – 6*, Beiträge zur Methodik und Didaktik der Physik, Diesterweg, Frankfurt am Main
- JUNG, W.; WIESNER, H. (1980):** *Lernschwierigkeiten in der Mechanik bei Schülern der NGO* -In: SCHARMANN, A.; HOFSTAETTER, A.; KUHN, W. (Hrsg.): *Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1980, Gießen*, S. 116 - 121
- JUNG, W.; WIESNER, H. (1981):** *Verständnisschwierigkeiten beim physikalischen Kraftbegriff Eine Untersuchung zum Kraftbegriff bei Physikstudenten* - In: *Physik und Didaktik* 9, Nr. 2, S. 111 - 122
- JUNG, W.; WIESNER, H.; ENGELHARDT, P. (1981):** *Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik. Empirische Untersuchungen und Ansätze zu didaktisch-methodischen Folgerungen*, Didaktischer Dienst Franzbecker, Bad Salzdetfurth
- KALYUGA, S.; CHANDLER, P.; SWELLER, J. (1999):** *Managing Split-attention and Redundancy in Multimedia Instruction* – In: *Applied Cognitive Psychology* 13 (4), S. 351 – 371
- KANDERS, M.; RÖSNER, E.; ROLFF, H.-G. (1996):** *Das Bild der Schule aus der Sicht von Schülern und Lehrern. Ergebnisse zweier IFS-Repräsentativbefragungen* – In: ROLFF, H.-G.; BAUER, K.-O.; KLEMM, K.; PFEIFFER, H. (Hrsg.): *Jahrbuch der Schulentwicklung Daten, Beispiele und Perspektiven*, Band 9, Juventa Verlag, Weinheim, München
- KIRCHER, E. (1995):** *Studien zur Physikdidaktik. Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen*, IPN, Kiel

- KIRCHER, E.; GIRWIDZ, R.; HÄUBLER, P. (2000):** *Physikdidaktik. Eine Einführung in Theorie und Praxis*, Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg
- KLIEME, E.; MAICHLE, U. (1994):** *Modellbildung und Simulation im Unterricht der Sekundarstufe I – Auswertung von Unterrichtsversuchen mit dem Modellbildungssystem MODUS*, Institut für Bildungsforschung, Bonn
- KOLLER, M. (1997):** *Empirische Erhebung zu einem rechnergestützten Dynamikunterricht*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- KÖLLER, O.; BAUMERT, J.; NEUBRAND, J. (2000):** *Epistemologische Überzeugungen und Fachverständnis im Mathematik- und Physikunterricht* - In: BAUMERT, J.; BOS, W.; LEHMANN, R. (HRSG.): *TIMSS/III Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie - Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn, Band 2 Mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung am Ende der gymnasialen Oberstufe*, Leske + Budrich, Opladen
- KRAHMER, P.; HEUER, D. (1992):** *Lernchancen durch Parallelität von Bewegungsabläufen und Graphik* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg, September 1991*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDPC), Leuchtturm-Verlag, S. 166 - 168
- KRAHMER, P.; WINTER, R.; MIKELSKIS, H. (1997):** *Der Computer – ein multimediales Werkzeug zum Lernen von Physik. Das Projekt „Galileo“ – Videoanalyse von Bewegungsvorgängen (2)* – In: *Physik in der Schule* 35, Nr. 7/8, S. 274 – 277
- KUHN, D. (1989):** Children and Adults as Intuitive Scientists – In: *Psychological Review* 96, Nr. 4, S. 674 - 689
- KUHN, T. S. (1976):** *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, 2. revidierte und um das Postskriptum von 1969 ergänzte Auflage, Suhrkamp-Verlag, Taschenbuch Wissenschaft Band 25, Frankfurt am Main
- KUHN, W. (2001):** *Ideengeschichte der Physik. Eine Analyse der Entwicklung der Physik im historischen Kontext*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden
- LABUDDE, P. (1997):** *Selbstständig lernen. Eine Chance für den Physikunterricht* – In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 8, Nr. 37, S. 4 – 9
- LABUDDE, P. (2002):** *Gespielte Physik – Spielerische Physik* – In: KIRCHER, E.; SCHNEIDER, W. (Hrsg.): *Physikdidaktik in der Praxis*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 266 - 282
- LABUDDE, P.; REIF, F.; QUINN, L. (1988):** *Facilitation of scientific concept learning by interpretation procedures and diagnosis* - In: *International Journal of Science Education*, Vol. 10, S. 81 - 98
- LEBOUTET-BARELL, L. (1976):** *Concepts of mechanics among young people* – In: *Physics Education* 11, S. 462 - 466
- LEDERMAN, N.; WADE, P.; BELL, R. (1998):** *Assessing Understanding of the Nature of Science: A Historical Perspective* - In: McCOMAS, W. (Hrsg.): *The Nature of Science in Science Education. Rationales and Strategies*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, S. 331 - 350
- LEVIN, J. R. (1981):** *On functions of pictures in prose* – In: PIROZZOLO, F. J.; WITTROCK, M. C. (Hrsg.): *Neuropsychological and cognitive processes in reading*, Academic Press, New York, S. 203 - 228
- LEVIN, J. R.; ANGLIN, G. J.; CARNEY, R. N. (1987):** *On empirically validating functions of pictures in prose* – In: WILLOWS, D. M.; HOUGHTON, H. A. (Hrsg.): *The psychology of illustration*, Vol. I: Basic Research, New York, Springer, S. 51 – 85
- MACH, E. (1921):** *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*, 8. Auflage, Brockhaus, Leipzig
- MANDL, H.; GRUBER, H.; RENKL, A. (1993a):** *Lernen im Physikunterricht - Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1993 Esslingen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 21 - 36
- MANDL, H.; GRUBER, H.; RENKL, A. (1993b):** *Misconceptions and knowledge compartmentalization* - In: STRUBE, G. (Hrsg.): *The Cognitive Psychology of Knowledge*, Elsevier Science Publishers B. V., S. 161 - 176
- MANDL, H.; REINMANN-ROTHMEIER, G.; GRÄSEL, C. (1998):** *Gutachten zur Vorbereitung des Programms „Systematische Einbeziehung von Medien, Informations- und Kommunikationstechnologien in Lehr- und*

Lernprozesse“, *Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung, Heft 66*, Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung, ISBN 3-9806109-7-7

- MASON, C. L. (1992):** *Concept Mapping: A Tool to Develop Reflective Science Instruction* – In: *Science Education* 76, Nr. 1, S. 51 – 63
- MAY, L.-P.; KAYSER, F. (2003):** *Wie kommt der Wasserspringer in den Physiksaal? Das Mainzer Videomess- und Präsentationssystem ViMPS* - In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 52, Nr. 2, S. 8 - 12
- MAYER, R. E. (1997):** *Multimedia Learning: Are We Asking the Right Questions?* – In: *Educational Psychologist* 32, Heft 1, Lawrence Erlbaum Associates, S. 1 - 19
- McCLOSKEY, M. (1983):** *Irrwege der Intuition in der Physik-* In: *Spektrum der Wissenschaft*, Juni-Heft, S. 88 - 99
- McCULLOUGH, L.; MELTZER, D. (2001):** *Differences in male/female response patterns on alternative-format versions of FCI items* - In FRANKLIN, S.; MARX, J.; CUMMINGS, K. (Hrsg.): *Proceedings of the 2001 Physics Education Research Conference*, Rochester, NY, S. 103 – 106
- MEADOWS, D.; MEADOWS, D.; ZAHN, E.; MILLING P. (1973):** *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Ausgabe 316.-330. Tausend Juli 1978, Reinbeck bei Hamburg
- MERZYN, G. (1994):** *Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht: Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer*, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel
- MEYER, H. (2004):** *Was ist guter Unterricht?*, Cornelsen Verlag Scriptor, Berlin
- MEYLING, H. (1990):** *Wissenschaftstheorie im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe*, Dissertation Universität Bremen
- MIETZEL, G. (1993):** *Psychologie in unterricht und Erziehung. Einführung in die Pädagogische Psychologie für Pädagogen und Psychologen*, Hogrefe Verlag für Psychologie, Göttingen
- MIKELSKIS, H. (2004):** *Multimedialernen im naturwissenschaftlichen Unterricht 1: Ansätze eines Forschungsparadigmas zwischen Fachdidaktik und Psychologie* – In: PITTON, A. (Hrsg.): *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung, Jahrestagung der GDCP in Berlin 2003*, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 24, Lit-Verlag, Münster, S. 108 - 110
- MIKELSKIS-SEIFERT, S. (2002):** *Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern, Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mit Hilfe eines Systems multipler Repräsentationsarten*, Studien zum Physiklernen, Band 22, Logos-Verlag, Berlin
- MINSTRELL, J. (1991):** *Facets of students' knowledge and relevant instructions* - In: DUIT, R.; GOLDBERG, F.; NIEDDERER, H. (Hrsg.): *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop held at the University of Bremen. March 4-8, 1991*, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, Kiel, S. 110 - 128
- MNU (2001):** *Physikunterricht und naturwissenschaftliche Bildung - aktuelle Anforderungen. Empfehlungen zur Gestaltung von Lehrplänen bzw. Richtlinien für den Physikunterricht* - In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 54, Heft 3, S. I - XVI
- MÜLLER, R.; WODZINSKI, R.; HOPF, M. (Hrsg.) (2004):** *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis Verlag Deubner, Köln
- NACHTIGALL, D. (1981):** *Vorstellung von Fünfklasslern über den freien Fall* - In: SCHARMANN, A.; HOFSTAETTER, A.; KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1981 Gießen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 70 – 86
- NACHTIGALL, D. (1987):** *Skizzen zur Physikdidaktik*, Verlag Peter Lang GmbH, Frankfurt am Main, Bern, New York, Paris
- NACHTIGALL, D. (1992):** *Zum Verstehen von Physik im Unterricht* - In: *Physik in der Schule* 30, Nr. 1, S. 10 – 13
- NEUNZIGER, M.; HOFFMANN, P.; WEGNER, W.; WESTHOFF, M.; UNGER, C. (2002):** *Fortbildung in der Ausbildung: Ein Projekt zur Lehrerweiterbildung in der zweiten Ausbildungsphase* – In: NORDMEIER, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig 2002*, Münster

- NEWTON, I. (1963):** *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*, herausgegeben von J. P. WOLFERS, unveränderter fotomechanischer Nachdruck der Ausgabe Berlin 1872, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- NIEDDERER, H. (1988):** *Schülervorverständnis und historisch-genetisches Lernen mit Beispielen aus dem Physikunterricht* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Nürnberg, September 1987*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 76 – 107
- NIEDDERER, H. (1999):** *Physiklernen als kognitive Entwicklung* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1999 – Ludwigsburg*, S. 49 - 66
- NIEDDERER, H.; SCHECKER, H. (1992a):** *Förderung der Kreativität durch einen am Schülervorverständnis orientierten Physikunterricht - Mit einer Unterrichtsfallstudie aus der Mechanik im 11. Jahrgang* - In: *Physik in der Schule* 30, 1992, Nr. 1, S. 14 – 18
- NIEDDERER, H.; SCHECKER, H. (1992b):** *Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning* – In: DUIT, R.; GOLDBERG, F.; NIEDDERER, H. (Hrsg.): *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies; proceedings of an international workshop*, Kiel, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, S. 74 – 98
- NIEDDERER, H.; SCHECKER, H. (2004):** *Physik lernen und das Vorverständnis der Schüler* – In: HÖBLE, C.; HÖTTECKE, D.; KIRCHER, E. (Hrsg.): *Lehren und lernen über die Natur der Naturwissenschaften*, Schneider Verlag Hohengehren, Baltmannsweiler, S. 248 - 263
- NORDMEIER, V. (2002):** *Videoanalyse von Bewegungen mit dem Computer* – In: *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik* 13, Nr. 69, S. 27 – 30
- NOVAK, G.; GAVRIN, A., CHRISTIAN, W., PATTERSON, E. (1999):** *Just-in-time teaching: blending active learning with web technology*, Upper Saddle River, NJ
- NOVAK, J. D.; GOWIN, R. (1984):** *Learning How to Learn*, Cambridge University Press, New York
- OPITZ, R. (1997):** *Ist Unkenntnis über Physik oft nur Unkenntnis der verwendeten Sprache? – Erste Ergebnisse einer Umfrage zum Kraftbegriff* - In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1997 - Berlin*, S. 206 – 211
- OSSIMITZ, G. (1996):** *Können Schüler im Mathematikunterricht systemisch denken lernen?* – In: MÜLLER, K. P. (Hrsg.): *Beiträge zum Mathematikunterricht – Vorträge auf der 30. Bundestagung für Didaktik der Mathematik vom 4. bis 8. März 1996 in Regensburg*, Franzbecker-Verlag, Hildesheim, S. 337 – 340
- PAIVIO, A. (1986):** *Mental representations. A dual coding approach*, New York, Oxford University Press
- PERKINS, D. N.; SIMMONS, R. (1988):** *Patterns of misunderstanding: An integrative model of science, math, and programming* - In: *Review of Educational Research* 58, S. 303 - 326
- PEUCKERT, J. (1999a):** *Concept Mapping – Lernen wir unsere Schüler kennen! Teil 1: Grundlagen des Concept Mapping* – In: *Physik in der Schule* 37, Nr. 1, S. 47 – 55
- PEUCKERT, J. (1999b):** *Schulische Wissensdiagnose mittels Concept Mapping* – In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT (DPG), FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1999 – Ludwigsburg*, S. 215 - 220
- PEUCKERT, J.; FISCHLER, H. (2000):** *Concept Maps als Diagnose- und Auswertungsinstrument in einer Studie zur Stabilität und Ausprägung von Schülervorstellungen* – In: FISCHLER, H.; PEUCKERT, J. (Hrsg.): *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*, Studien zum Physiklernen, Band 1, Logos-Verlag, Berlin, S. 91 – 116
- PEUCKERT, J.; ROTHENHAGEN, A.; SYLVESTER, U. (1999):** *Concept Mapping – Lernen wir unsere Schüler kennen! Teil 2: Diagnose von Wissensentwicklungen mittels Concept Mapping: ein Bericht aus der Praxis* – In: *Physik in der Schule* 37, Nr. 2, S. 122 - 128
- POHL, R. W. (1944):** *Mechanik, Akustik und Wärmelehre*, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- POSNER, G. J.; STRIKE, K.A.; HEWSON, P.W.; GERTZOG, W. A. (1982):** *Accommodation of a scientific conception: Towards a theory of conceptual change* – In: *Science Education*, 66, S. 211 - 227

- POTH, T.; GRÖBER, S. (2006):** Maßgeschneiderter Unterricht durch Just-in-Time-Teaching. Vorstellung eines Unterrichtsverfahrens im MultiMechanics Project - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 53, Veröffentlichung geplant
- PRIEMER, B. (2003):** Ein diagnostischer Test zu Schüleransichten über Physik und Lernen von Physik – eine deutsche Version des Tests „Views About Science Survey“ - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 9, S. 160 - 178
- REDISH, E. (2001):** Student Expectations in University Physics: Using The Maryland Physics Expectations Survey – In: <http://www.physics.umd.edu/perg/expect/usempex.pdf>
- REDISH, E.; SAUL, J.; STEINBERG, R. (1998):** Student Expectations in Introductory Physics - In: American Journal of Physics 66, Nr. 3, S. 212 – 224
- REIF, F. (1985):** Acquiring an effective understanding of scientific concepts – In: WEST, L. H. T.; PINES, A. L. (Hrsg.): Cognitive structure and conceptual change, Academic Press, Orlando, S. 133 - 151
- REIF, F. (1995):** Understanding Basic Mechanics – Text, Verlag John Wiley & Sons, USA
- REIF, F., ALLEN, S. (1992):** Cognition for interpreting scientific concepts: A study of acceleration – In: Cognition and Instruction 9, S. 1 - 44
- RENKL, A. (2002):** Lehren und Lernen – In: TIPPELT, R. (Hrsg.): Handbuch der Bildungsforschung, Leske + Budrich, Opladen, S. 589 - 602
- REUSCH, W. (1997):** Lernerfahrungen mit 2-dimensionalen Bewegungen - In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Bremen, September 1996, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 195 – 197
- REUSCH, W.; GÖBWEIN, O.; HEUER, D. (2000):** Grafisch unterstütztes Modellieren und Messen – VisEdit und PAKMA – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49, Nr. 6, S. 32 - 36
- REUSCH, W.; GÖBWEIN, O.; KAHMANN, C.; HEUER, D. (2000a):** Computerunterstützte Schülerversuche zur Mechanik mit der Computermaus als Low-Cost-Bewegungssensor – In: Physik in der Schule 38, Nr. 4, S. 269 – 273
- REUSCH, W.; GÖBWEIN, O.; KAHMANN, C.; HEUER, D. (2000b):** Mechanikversuche mit der PC-Maus – Ein präziser Low-Cost-Bewegungssensor – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49, Nr. 6, S. 5 - 8
- REUSCH, W.; HEUER, D. (1998):** Zweidimensionale Bewegungen – Unterrichtseinsatz mit Schülerversuchen - In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 233 – 235
- REUSCH, W.; HEUER, D. (1999a):** Förderung des Physiklernens durch Visualisierung und Interaktivität im Bereich der 2-dimensionalen Kinematik/Dynamik - In: BRECHEL, R. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Essen, September 1998, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 182 - 184
- REUSCH, W.; HEUER, D. (1999b):** Improving instruction of 2-dimensional kinematics and dynamics by means of visualisation and interactivity - In: KOMOREK, M.; BEHRENDT, H.; DAHNCKE, H.; DUIT, R.; GRÄBER, W.; KROSS, A. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Conference of the European Science Education Research (E.S.E.R.A.). Research in Science Education Past, Present, Future, Volume 1, S. 30 - 32
- REUSCH, W.; HEUER, D. (2000):** Zweidimensionale Kinematik und Dynamik - ein Zugang mit rechnerunterstützten „Experimenten“ – In: BRECHEL, R. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in München, September 1999, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 349 – 351
- RHÖNECK, C. v. (1971):** Gütekriterien und Merkmale der lernzielorientierten Tests des IPN Curriculum Physik - In: Der Physikunterricht 5, Ernst Klett-Verlag, Stuttgart, Nr. 2, S. 71 - 83
- RHÖNECK, C. v. (1983):** Der Geschwindigkeitsbegriff von Fünftklässlern und didaktische Hilfen auf dem Weg zu $v=s/t$ - In: SCHARMANN, A.; HOFSTAETTER, A.; KUHN, W. (Hrsg.): Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1983, Gießen, S. 232 - 237

- RHÖNECK, C. v. (1991):** *10 Jahre Untersuchungen von Schülervorstellungen - Ertrag und Perspektiven* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1991 Erlangen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 90 - 108
- RUBITZKO, T.; GIRWIDZ, R. (2004):** *Kognitive Flexibilität durch verschiedene externe Repräsentationen. Multimediaanwendungen zur Wärmelehre* - In: PITTON, A. (Hrsg.): *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung, Jahrestagung der GDGP in Berlin 2003*, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 24, Lit-Verlag, Münster, S. 262 - 264
- SAMBURSKY, S. (1975):** *Der Weg der Physik*, Artemis Verlag, Zürich und München
- SANDER, F. (2000):** *Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. Eine Empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*, Logos-Verlag (Studien zum Physiklernen, Band 13), Berlin
- SANDER, F; NIEDDERER, H. (1998):** *Einsatz des Computers im physikalischen Praktikum - Lernprozessstudie* - In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 316 - 318
- SANDER, F; NIEDDERER, H.; SCHECKER, H. (1999):** Handeln und Lernen im physikalischen Praktikum - Studie zum Computereinsatz - In: BRECHEL, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Essen, September 1998*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 361 - 363
- SANDER, F; SCHECKER, H.; NIEDDERER, H. (2001):** *Wirkungen des Einsatzes grafikorientierter Modellbildung im physikalischen Praktikum* - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 7, S. 147 - 165
- SAVINAINEN, A; SCOTT, P. (2002a):** *The Force Concept Inventory: a tool for monitoring student learning* - In: Physics Education 37 (1), S. 45 - 52
- SAVINAINEN, A; SCOTT, P. (2002b):** *Using the Force Concept Inventory to monitor student learning and to plan teaching* - In: Physics Education 37 (1), S. 53 - 58
- SCHECKER, H. (1984a):** *Eigenständige Schülerprozesse in Mechanik (SII)* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1984 Münster* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 179 - 184
- SCHECKER, H. (1984b):** *Schülerinteressen und Schülervorstellungen zur Mechanik (SII)* - In: MIKALSKIS, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Siegen, September 1983*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 194 - 196
- SCHECKER, H. (1985):** *Das Schülervorverständnis zur Mechanik, Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte*, Dissertation, Universität Bremen
- SCHECKER, H. (1987):** *Zur Universalität des Kraftbegriffs aus historischer Sicht und aus Schülersicht* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1987 Berlin* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 469 - 474
- SCHECKER, H. (1992):** *Computer als Werkzeuge im Physikunterricht* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg, September 1991*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 149 - 151
- SCHECKER, H. (1993):** *The Didactic Potential of Computer Aided Modeling for Physics Education* - In: FERGUSON, D. L. (Hrsg.): *Advanced educational technologies for mathematics and science* NATO ASI Series, Serie F: Computer and Systems Sciences, Vol. 107, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 165 - 207
- SCHECKER, H. (1998a):** *Physiklernen mit Modellbildungssystemen - Forschungskonzeptionen* - In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 230 - 232
- SCHECKER, H. (1998b):** *Physik-Modellieren. Grafikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht*, Klett-Verlag, Stuttgart

- SCHECKER, H.; GERDES, J. (1998):** *Interviews über Experimente zu Bewegungsvorgängen* – In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 4, Heft 3, S. 61 – 74
- SCHECKER, H.; GERDES, J. (1999):** *Messung der Konzeptualisierungsfähigkeit in der Mechanik – Zur Aussagekraft des Force Concept Inventory* – In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 5, Heft 1, S. 75 – 89
- SCHECKER, H.; KLIEME, E. (2000):** *Erfassung physikalischer Kompetenz durch Concept-Mapping-Verfahren* – In: FISCHLER, H.; PEUCKERT, J. (Hrsg.): *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*, Studien zum Physiklernen, Band 1, Logos-Verlag, Berlin, S. 23 - 55
- SCHECKER, H.; KLIEME, E. (2001):** *Mehr Denken, weniger Rechnen. Konsequenzen aus der internationalen Vergleichsstudie TIMSS für den Physikunterricht* – In: Physikalische Blätter 57, Nr. 7/8, S. 113 - 116
- SCHECKER, H.; KLIEME, E.; NIEDDERER, H.; EBACH, J.; GERDES, J. (1999):** *Physiklernen mit Modellbildungssystemen. Förderung physikalischer Kompetenz und systemischen Denkens durch computergestützte Modellbildungssysteme*, Abschlussbericht zum DFG-Projekt, Institut für Didaktik der Physik an der Universität Bremen und Max-Planck-Institut für Bildungsforschung Berlin
- SCHECKER, H.; NIEDDERER, H. (1991):** *Über den Beitrag des Computereinsatzes zur Entwicklung physikalischer Kompetenz* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Weingarten, September 1990*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDCP), Leuchtturm-Verlag, S. 147 - 149
- SCHECKER, H.; NIEDDERER, H.; BETHGE, T. (1989):** *Computerunterstützte Modellbildung im Physikunterricht* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1989 Bonn* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 360 - 364
- SCHENK, B. (1984):** *Entwicklung von Schülertheorien zur Mechanik in der Sekundarstufe II* - In: *physica didactica* 31, S. 113 – 125
- SCHENK, B.; HASLER, N.; NOTHOLD, K.; THOL, K. (1982):** *Bericht I der Physik-Studie: Die vier Evaluationsaufgaben als Testinstrument der Entwicklung physikalisch-technologischer Kompetenz. Wissenschaftliche Begleitung Kollegschule Nordrhein-Westfalen*, Münster
- SCHLICHTING, H. J. (1991):** *Zwischen common sense und physikalischer Theorie – wissenschaftstheoretische Probleme beim Physiklernen* – In: *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht* 44, S. 74 - 80
- SCHNOTZ, W. (1994):** *Wissenserwerb mit logischen Bildern* – In: WEIDENMANN, B. (Hrsg.): *Wissenserwerb mit Bildern. Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computerprogrammen*, Bern, Verlag Hans Huber, S. 95 - 147
- SCHNOTZ, W.; BANNERT, M. (1999):** *Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text- und Bildverstehen* – In: *Zeitschrift für experimentelle Psychologie* 46, Heft 3, Hogrefe Verlag für Psychologie, Göttingen, S. 217 – 236
- SCHÖN, L. (1992):** *Die sinnliche Erfahrung als Grundlage für das Verstehen von Physik - Beispiele aus der Mechanik* - In: WIEBEL K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg, September 1991*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDCP), Leuchtturm-Verlag, S. 259 - 261
- SCHÖNBERGER, S.; HEUER, D. (2002):** *JPAKMA – plattformunabhängige Modellbildung*– In: NORDMEIER, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig 2002*, Münster
- SCHWARZE, H. (2003):** *Elektrische Schaltungen in der Simulation – Das Programm Crocodile Physics als methodische Alternative* - In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 52, Nr. 7, S. 19 - 26
- SEGRÈ, E. (2002):** *Die großen Physiker und ihre Entdeckungen. Von Galilei bis Boltzmann*, 2. Auflage, Piper Verlag, München, Zürich
- SEIFERT, S.; MIKELSKIS, H.; WINTER, R. (1997):** *Der Computer – ein multimediales Werkzeug zum Lernen von Physik. Videoanalyse von Schlag- und Stoßvorgängen im Sport mit VIDEOPOINT und DAVID (4)* – In: *Physik in der Schule* 35, Nr. 10, S. 352 - 356
- SOKOLOFF, D.; THORNTON, R. (1997):** *Using Interactive Lecture Demonstrations to Create an Active Learning Environment* – In: *The Physics Teacher* 35, S. 340 – 347

- SONNENTAG, S. (1996):** *Multimedia-Systeme* – In: STRUBE, G. (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*, Klett-Cotta, Stuttgart, S. 415 - 416
- SPILL, L.; WIESNER, H. (1988):** *Zur Einführung des dynamischen Kraftbegriffs in der Sekundarstufe I. Bericht über Unterrichtsversuche* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachauschuß Didaktik der Physik), S. 412 – 417
- SPIRO, R. J.; COULSON, R. L.; FELTOVICH, P. J.; ANDERSON, D. K. (1988):** *Cognitive flexibility theory: Advanced knowledge acquisition in ill-structured domains* - In: PATEL, V. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th annual conference of the Cognitive Science Society*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J., S. 375 - 383
- STARAUSSCHECK, E. (2001):** *Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. Ergebnisse einer Evaluationsstudie* – In: NIEDDERER, H.; FISCHLER, H. (Hrsg.): *Studien zum Physiklernen*, Band 20, Logos Verlag, Berlin
- STARAUSSCHECK, E. (2002):** *Ergebnisse einer Evaluationsstudie zum Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs* – In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 8, S. 7 – 21
- STEGMÜLLER, W. (1970):** *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie, Band II, Theorie und Erfahrung. Studienausgabe, Teil A: Erfahrung, Festsetzung, Hypothese und Einfachheit in der wissenschaftlichen Begriffs- und Theorienbildung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1970
- STRIKE, K.A.; POSNER, G. J. (1985):** *A conceptual change view of learning and understanding* – In: WEST, L. H. T.; PINES, A. L. (Hrsg.): *Cognitive structure and conceptual change*, Academic press, New York
- SULEDER, M.; HEUER, D. (2002):** *Automatische Videoanalyse*– In: NORDMEIER, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig 2002*, Münster
- SULEDER, M.; HEUER, D. (2004):** *Neue Medien als Werkzeug* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004*, Berlin
- SULEDER, M.; WILHELM, T.; HEUER, D. (2004):** *Neue Möglichkeiten durch Kombination von Videoanalyse und Modellbildung* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004*, Berlin
- SWELLER, J. (1994):** *Cognitive load theory, learning difficulties, and instructional design* - In: *Learning and instruction* 4, Heft 4, S. 295 - 312
- THEIS, W. R. (2002):** *Nachhaltiger Physikunterricht – am Beispiel der Einführung in die Mechanik* – In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 51, Nr. 7, S. 17 – 23
- THEISMANN, S. (2003):** *Rechnergestützte Modellbildung und Messwerterfassung im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe am Beispiel von mechanischen Schwingung*, Hausarbeit im Rahmen der Zweiten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien, Studienseminar für das Lehramt für die Sekundarstufe II Rheine, unveröffentlicht
- THIJS, G. (1992):** *Evaluation of an Introductory Course on “Force” Considering Students’ Preconceptions* - In: WOLLMANN, W. T. (Abschnitt-Hrsg.): *Science Education* 76, Nr. 2, S. 155 - 174
- THORNTON, R. (1987):** *Tools for scientific thinking - microcomputer-based laboratories for physics teaching* - In: *Physical Education* 22, S. 230 – 238
- THORNTON, R. (1990):** *Tools for Scientific Thinking: Learning Physical Concepts with Real-Time Laboratory Measurement Tools* - In: Redish, E. F.; Risley, J. S. (Hrsg.): *The Conference on Computers in Physics Instruction: proceedings*, Addison-Wesley Publishing Company, S. 177 - 189
- THORNTON, R. (1992):** *Enhancing and Evaluating Students’ Learning of Motion Concepts* - In: Tiberghien, A.; Mandl, H. (Hrsg.): *Intelligent Learning Environments and Knowledge Acquisition in Physics*, NATO ASI Series, Serie F: Computer and Systems Sciences, Vol. 86, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 265 - 283
- THORNTON, R. (1996):** *Using Large-Scale Classroom Research to Study Conceptual Learning in Mechanics and to Develop New Approaches to Learning* – In: Tinker, R. F. (Hrsg.): *Microcomputer-Based Labs: Educational Research and Standards*, NATO ASI Series, Serie F: Computer and Systems Sciences, Vol. 156, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 89 - 114

- THORNTON, R.; SOKOLOFF, D. (1990):** *Learning motion concepts using real-time micro-computer-based laboratory tools* - In: American Journal of Physics 58, Nr. 9, S. 858 – 867
- TINKER, R. F. (1993):** *Modelling and Theory Building: Technology in Support of Student Theorizing* – In: FERGUSON, D. L. (Hrsg.): *Advanced educational technologies for mathematics and science* NATO ASI Series, Serie F: Computer and Systems Sciences, Vol. 107, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 91 – 113
- TINKER, R. F.; NEMIROVSKY, R.; MOKROS, J.; BARCLAY, W.T. (1990):** *Measuring and modeling project - First year annual report*, Cambridge, MA: Technical Education Research Center
- TREFFER, R. (1989):** *Schülerexperimente zur Kinematik mit dem Computer, Bericht über erste Testergebnisse und Art des Unterrichts* - In: KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1989 Bonn (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik)*, S. 229 - 235
- TREFFER, R. (1990):** *Fehlkonzepte erkennen durch Faktoranalyse von Multiple-Choice-Fragen - Eine schnelle Möglichkeit zur Kontrolle von Lernerfolgen* - In: WIEBEL, K. H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Kassel, September 1989*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 314 - 316
- TREITZ, N. (2000):** *cliXX Physik in bewegten Bildern*, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt am Main
- TREITZ, N. (2003):** *Brücke zur Physik*, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main
- TROWBRIDGE, D.; McDERMOTT, L. (1980):** *Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension* - In: American Journal of Physics 48, Nr. 12, S. 1020 - 1028
- TROWBRIDGE, D.; McDERMOTT, L. (1981):** *Investigation of student understanding of the concept of acceleration* - In: American Journal of Physics 49, S. 242 - 253
- URHAHNE, D.; HOPF, M. (2004):** *Epistemologische Überzeugungen in den Naturwissenschaften und ihre Zusammenhänge mit Motivation, Selbstkonzept und Lernstrategien* – In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 10, S. 71 - 87
- URHAHNE, D.; PRENZEL, M.; DAVIER, M.; SENKBEIL, M.; BLESCHKE, M. (2000):** *Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ein Überblick über die pädagogisch-psychologischen Grundlagen und ihre Anwendung* – In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 6, S. 157 - 186
- VIENNOT, L. (1979):** *Spontaneous reasoning in elementary dynamics* – In: European Journal of Science Education 1, S. 205 - 221
- VILLANI, A. (1992):** *Conceptual Change in Science and Science Education* - In: AIKENHEAD, G. (Abschitt-Hrsg.): *Science Education* 76, 1992, Nr. 2, S. 223 – 237
- WANG, M.; HAERTEL, G.; WALBERG, H. (1993):** *Toward a knowledge base für school learning* – In: Review of Educational Research 63, S. 249 - 294
- WARREN, J. (1979):** *Understanding Force*, Murray, London
- WATTS, D. (1983):** *A study of schoolchildren's alternative frameworks of the concept of force* – In: European Journal of Science Education 5, S. 217 - 230
- WEBER, K. (1985):** *Zur Problematik umgangssprachlicher und fachsprachlicher Begriffe im Stoffgebiet Mechanik Klasse 6* - In: Physik in der Schule 23, Nr. 7/8, S. 280 - 286
- WEBER, K. (1989):** *Schülervorstellungen über Bewegung und Kraft* - In: Physik in der Schule 27, Nr. 1/2, S. 19 - 24
- WEDEKIND, J.; WALSER, W. (HRSG.) (1992):** *Modellbildungssysteme. Konzepte und Realisierungen*, CoMet-Verlag für Unterrichtssoftware, Duisburg
- WEIDENMANN, B. (1991):** *Lernen mit Bildmedien: Psychologische und didaktische Grundlagen*, Weinheim, Basel, Beltz-Verlag (= WILL, H. (HRSG.) (2005): *Mit den Augen lernen*, Seminareinheit 1, Beltz Weiterbildung)
- WEIDENMANN, B. (1994):** *Informierende Bilder* – In: WEIDENMANN, B. (Hrsg.): *Wissenserwerb mit Bildern. Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computerprogrammen*, Bern, Verlag Hans Huber, S. 9 - 58

- WEIZSÄCKER, C. (1978):** *Deutlichkeit. Beiträge zu politischen und religiösen Gegenwartsfragen*, Deutscher Taschenbuch-Verlag, München
- WELTNER, K. (2002):** *Flugphysik – um das Fliegen zu verstehen* – In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 55, Nr. 7, S. 388 – 396
- WESTPHAL, W. H. (1967):** *Die Grundlagen der Dynamik und Newtons 2. Axiom*, *Physikalische Blätter* 23, S. 558 – 561
- WHITAKER, R. (1983):** *Aristotle is not dead: Student understanding of trajectory motion* – In: *American Journal of Physics* 51, S. 352 – 357
- WIESNER, H. (1992):** *Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Optik (1). Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten* – In: *Physik in der Schule* 30, Nr. 9, S. 286 – 290
- WIESNER, H. (1994):** *Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Folgerungen* – In: *Physik in der Schule* 32, Nr. 4, S. 122 – 127 [abgedruckt auch in: MÜLLER, R.; WODZINSKI, R.; HOPF, M. (Hrsg.) (2004): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis Verlag Deubner, Köln, S. 114 – 119]
- WILHELM, T. (1994):** *Lernen der Dynamik geradliniger Bewegungen – Empirische Erhebungen und Vorschlag für ein neues Unterrichtskonzept*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht
- WILHELM, T. (2000):** *Der alte Fallkegel - modern behandelt* – In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 49, Nr. 7, S. 28 – 31
- WILHELM, T.; GEBNER, T.; SULEDER, M.; HEUER, D. (2003):** *Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet* – In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 52, Nr. 2, S. 23 – 30
- WILHELM, T.; HEUER, D. (1995):** *Lernen von Konzepten zur Dynamik - dynamische Physikrepräsentation am Computer zur Visualisierung* – In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Freiburg i.Br., September 1994*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDCCP), Leuchtturm-Verlag, S. 163 – 165
- WILHELM, T.; HEUER, D. (2002a):** *Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung* – In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 51, Nr. 7, S. 29 – 34
- WILHELM, T.; HEUER, D. (2002b):** *Interesse fördern, Fehlvorstellungen abbauen - dynamisch ikonische Repräsentationen in der Dynamik* – In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 51, Nr. 8, S. 2 – 11
- WILHELM, T.; HEUER, D. (2004):** *Experimente zum dritten Newtonschen Gesetz zur Veränderung von Schülervorstellungen* – In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 53, 2004, Nr. 3, S. 17 – 22
- WILHELM, T.; HEUER, D.; PHAN-GIA, A.-V. (1997):** *Kinematik- und Dynamiklernen am Fahrrad* – In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 46, Nr. 4, S. 2 – 8
- WILHELM, T.; KOCH, C. (2004):** *Die alte Schwefelplatte neu genutzt. Qualitative Schülerübungen zur Kinematik* – In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 53, Nr. 2, S. 32 – 37
- WILLER, J. (2003):** *Didaktik des Physikunterrichts*, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main
- WINN, W. (1993):** *Perception Principles* – In: FLEMING, M.; LEVIE, W. H. (Hrsg.): *Instructional Message Design : Principles from the Behavioral and Cognitive Sciences*, Educational Technology Publications, Englewood Cliffs, New Jersey, 2. Auflage, S. 55 – 126
- WODZINSKI, R. (1995):** *Untersuchungen von Lernprozessen bei der Einführung in die Newtonsche Dynamik – Untersuchungskonzeption und erste Ergebnisse* – In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Freiburg i.Br., September 1994*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDCCP), Leuchtturm-Verlag, S. 247 – 249
- WODZINSKI, R. (1996):** *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht*, Lit Verlag, Münster

- WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994a):** *Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen* – In: Physik in der Schule 32, Nr. 5, S. 164 - 169
- WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994b):** *Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung* – In: Physik in der Schule 32, Nr. 6, S. 202 – 207
- WOLFF, M. (1978):** *Geschichte der Impetustheorie - Untersuchungen zum Ursprung der klassischen Mechanik*, 1. Auflage, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main
- ZEYER, G. (1981):** *Vorstellungen von Erwachsenen zum freien Fall* - In: SCHARMANN, A; HOFSTAETTER, A; KUHN, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1981 Gießen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 87 – 92
- ZUMANN, J. P.; WEAVER, S. L. (1988):** *Tools for teaching problem solving: An evaluation of a modelling and systems thinking approach*, Paper presented at the 1988 Annual NARST Conference, Lake Ozark

11 Anhang

11.1 Technische Realisierungen verschiedener Messverfahren

11.1.1 Die zweidimensionalen Mausmessung

11.1.1.1 Mausmessung über den Windows-Maustreiber

Wie bereits dargelegt (siehe Kapitel 5.3.1 - 5.3.3.1) ist eine normale PC-Maus ein leistungsfähiges, präzises und kostengünstiges Messgerät zur Erfassung von **zweidimensionalen** Bewegungen. Die von einer von Windows erkannten Maus gesendeten Daten werden vom Windows-Maustreiber bearbeitet und allen Anwendungsprogrammen zur Verfügung gestellt. Deshalb kann die Maus sowohl als Messgerät für ein- als auch für zweidimensionale Bewegungen genutzt werden. Hier soll es jedoch nur um Messmöglichkeiten für zweidimensionale Bewegungen gehen. Informationen zur Messung eindimensionaler Bewegungen findet man im Kapitel 11.1.3.

Zweidimensionale Bewegungen mit der Maus auf dem Versuchstisch sind mit geeigneter Software, PAKMA (ab Version 2.5) ohne jegliche Zusatzhardware und Experimentieranordnungen und ohne Umbau der Maus realisierbar, so dass damit auch Schülerversuche zur zweidimensionalen Bewegungen in einem Computer-Pool sehr leicht durchgeführt werden können. Bei diesen Versuchen dient die Computermouse gleichzeitig zur Bedienung der Software und während des Programmablaufs als bewegtes Objekt mit Sensoreigenschaften zum Messen. Es können alle Mäuse unabhängig vom Anschluss (serielle, PS/2- und USB-Mäuse), unabhängig von der Übertragung (Kabel-, Funk-, und Infrarotmäuse) und unabhängig vom Messprinzip (Kugel- oder optische Mäuse) verwendet werden.

Eine Einschränkung betrifft die „Fahrweise“ mit der Maus. Damit die Zuordnung der Koordinaten zu den Sensorachsen der Maus erhalten bleibt, darf die Maus während der „Fahrt“ nicht verdreht werden, da sonst die Richtungsinformation verfälscht wird und Fehlmessungen entstehen. Damit die Mausdaten proportional übertragen und nicht vom Windows-Maustreiber dynamisch in Abhängigkeit der „Fahrweise“ behandelt werden, muss in der Systemsteuerung bei der Einstellung der Maus gegebenenfalls etwas geändert werden. Wenn der Maustreiber die Option „Mausbeschleunigung“ anbietet, muss diese auf „Aus“ gestellt werden. Wenn es diese Option nicht gibt, muss der Schieber für die Mausgeschwindigkeit nach links auf den kleinsten Wert verschoben werden, bei dem eine Bedienung des PC noch problemlos möglich ist.

Während bei der Benutzung eines Zählrades im PAKMA-Kernprogramm durch den Messtyp „zählen“ der richtige Modus eingestellt wird, muss nun stattdessen der Messtyp „mauszählen“ stehen. Messwerte mal Längeneinheit $mes_wp(1)*l_einh$ und $mes_wp(2)*l_einh$ ergeben auch hier die Komponenten dx und dy der Ortsänderung im Zeitintervall dt . Das Aufaddieren der dx und dy im PAKMA-Kernprogramm ergibt die Ortskomponenten x und y . Im PAKMA-Kernprogramm muss dieser Zeitschritt dt ein Vielfaches von 0.025 sein, da die meisten Mäuse alle 25 ms Daten senden. Bei neueren Mäusen, bei denen dieser Wert im Maustreiber eingestellt werden kann, stellt man im

Maustreiber entsprechend 40 Messungen pro Sekunde ein. Schließlich muss die Längeneinheit richtig gewählt werden. Für eine serielle Standardmaus sind 20 bis 60 μm pro Impuls typisch. Der exakte Wert sollte bei jeder Maus durch Messprobeläufe ermittelt werden. Die ermittelte Längeneinheit gilt dann auch nur für diese Kombination von Maus und PC.

Unter Windows 3.1/95/98/ME ist es für die Mausmessung positiv, dass der Maustreiber auch Positionen liefert, die außerhalb des Bildschirms liegen, d.h. der Ort beliebig groß werden kann. Unter Windows NT/2000/XP werden vom Maustreiber nur noch Positionen erlaubt, die auf dem Bildschirm begrenzt sind, d.h. der Ort nicht beliebig groß werden kann. Die Mausmessung in PAKMA wurde deshalb so verändert, dass weiterhin beliebige Orte gemessen werden können (dazu wird die Mausposition intern immer wieder auf kleinere Werte zurückgesetzt). Allerdings führt das zu einer geringeren Messgenauigkeit, so dass bei eindimensionalen Bewegungen zwar für den Ort und die Geschwindigkeit, aber nicht für die Beschleunigung angemessene Messgenauigkeiten erreichbar sind. Aufgrund dieser Unterschiedlichkeit zwischen Windows 3.1/95/98/ME und Windows NT/2000/XP gibt es für PAKMA unterschiedliche Dateien pakmess.dll, die für die Messung zuständig sind. Unter Windows NT/2000/XP ist deshalb darauf zu achten, dass die richtige Datei verwendet wird. Da bei der Behandlung der zweidimensionalen Bewegungen nur Pfeile gezeichnet werden, aber keine Beschleunigungs-Graphen betrachtet werden, ist diese Beschränkung der Messgenauigkeit aber eigentlich kein Problem und unerheblich.

Es gibt zwar eine maximal pro Richtung detektierbare Geschwindigkeitskomponente (bei der Standardmaus typischerweise jenseits von 0,30 m/s). Dies ist jedoch bei zweidimensionalen Bewegungen auf dem Versuchstisch kein Problem, da diese Bewegungen nicht so schnell sind. Außerdem würde eine Verfälschung bei freien Bewegungen (im Gegensatz zu einer Kreis- oder Achter-Bewegung) nicht bemerkt werden. Auch die Tatsache, dass manche Funkmaus die Daten nicht völlig proportional überträgt, ist bei der Messung zweidimensionaler Bewegungen und ihrer qualitativen Auswertung kein Problem.

Das PAKMA-Messprogramm (Kernprogramm) könnte z.B. wie folgt aussehen:

```

dt:=2*0.025; l_einh:=0.000069;           (Voreinstellungen)
Var m: integer;                          (Nummerierung der gemessenen Orte)
mauszählen; s_folg ('i', dt); mes;       (Messtyp: über Windows-Maustreiber)
repeat                                    (Messschleife)
  mes;                                    (Messbefehl)
  dx:=mes_wp (1)*l_einh; dy:=mes_wp (2)*l_einh; (Messwerte: Ortsänderung)
  x:=x+dx; y:=y+dy;                       (aktueller Ort)
  if m MOD 2 =0 then begin x_0:=x; y_0:=y; end; (Ort mit gerader Nummer)
  if m MOD 2 =1 then
  begin
    x_alt:=x_1; y_alt:=y_1;                (alter Ort mit ungerader Nummer)
    x_1:=x; y_1:=y;                        (neuer Ort mit ungerader Nummer)
    vx:=(x_1-x_alt)/(2*dt); vy:=(y_1-y_alt)/(2*dt); (Geschwindigkeit als Differenz
                                                    zwischen den ungeraden Orten)
    x_v:=x_0; y_v:=y_0;                    (Ort des Geschwindigkeitspfeiles: zwischen ungeraden Orten)
    ax:=(vx-vx_alt)/(2*dt); ay:=(vy-vy_alt)/(2*dt); (Beschleunigung)
    vx_alt:=vx; vy_alt:=vy;
  end;

```

```

m:=m+1; t:=t+dt;
ausgabe (t, x, y, vx, vy, x_v, y_v, ax, ay, x_alt, y_alt);
until t>5;

```

(Messzeit 5 Sekunden)

Der Geschwindigkeitsvektor wird in diesem Beispiel jeweils aus den Orten mit ungerader Nummer berechnet und an den dazwischen liegenden Ort mit gerader Nummer gezeichnet. Der Beschleunigungsvektor wird in dem Beispiel jeweils aus zwei Geschwindigkeitsvektoren berechnet und an den dazwischen liegenden Ort mit ungerader Nummer (x_alt , y_alt) gezeichnet.

Möchte man eine glattere Kurve kann man zwischen den zur Berechnung verwendeten Orten noch weitere Orte messen und zeichnen. Dazu können z.B. in obigem Kernprogramm folgende Änderungen umgesetzt werden:

```

dt:=0.025;

```

(Voreinstellungen)

```

if m MOD 4 =0 then begin x_0:=x; y_0:=y; end; (Ort mit gerader Nummer)
if m MOD 4 =2 then
begin
  x_alt:=x_1; y_alt:=y_1;
  x_1:=x; y_1:=y;
  vx:=(x_1-x_alt)/(4*dt); vy:=(y_1-y_alt)/(4*dt);
  x_v:=x_0; y_v:=y_0;
  ax:=(vx-vx_alt)/(4*dt); ay:=(vy-vy_alt)/(4*dt);
  vx_alt:=vx; vy_alt:=vy;
end;

```

(alter Ort mit ungerader Nummer)
(neuer Ort mit ungerader Nummer)

So werden weitere Orte gemessen und gezeichnet, ohne dass sie für die Geschwindigkeitsberechnung verwendet werden (Messungen mit $m \text{ MOD } 4 = 1$ und $m \text{ MOD } 4 = 3$)

11.1.1.2 Graphiktableau über den Windowstreiber

Die Gefahr der Messwertverfälschung durch Verdrehen der Maus besteht nicht, wenn man die Bahnkurven statt mit der Maus auf dem Tisch mit einem entsprechenden Stift auf ein Graphiktableau zeichnet. Es genügt bereits ein billiges, kleines Graphiktableau (4 x 3 oder 5 x 4 Zoll). Die Treibersoftware liefert wie eine PC-Maus an Windows Werte, die die Ortsänderung angeben (nicht den Ort!). Da es also vom Computer wie eine PC-Maus behandelt wird, kann die Bewegung des Stiftes mit geeigneter Software, z.B. mit PAKMA 2002, aufgenommen werden sowie alle gewünschten Vektoren konstruiert werden (siehe Abb. 11.1). Man muss nur die richtige Längeneinheit (in Meter durch Impulse) ermitteln und als Zeitschritt dt ein Vielfaches von 0.025 wählen, da das Graphiktableau wie die Maus alle 25 ms Daten sendet (siehe Kapitel 11.1.1.1). Ein Nachteil von Graphiktableaus ist, dass sie kaum in der für Schülerübungen notwendigen Menge vorhanden sind und in dieser Stückzahl

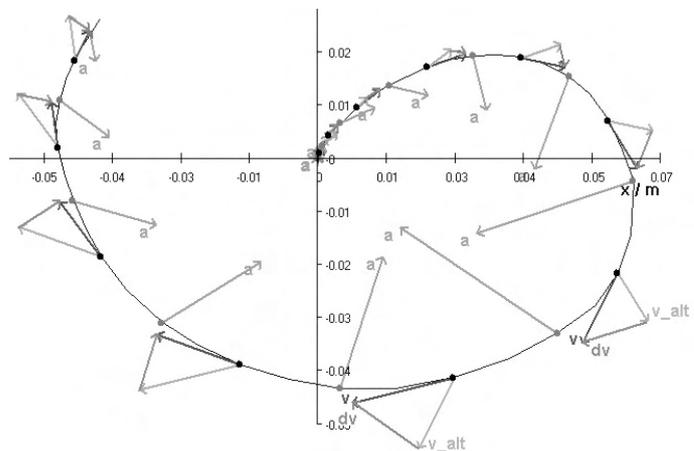


Abb. 11.1: Bahnkurve mit Vektoren, aufgenommen mit einem Graphiktableau. Man sieht wie aus v und v_alt hier dv und a entstehen (Vektoren farblich unterschiedlich). Die Bewegung wird erst schneller, dann wieder langsamer.

Man muss nur die richtige Längeneinheit (in Meter durch Impulse) ermitteln und als Zeitschritt dt ein Vielfaches von 0.025 wählen, da das Graphiktableau wie die Maus alle 25 ms Daten sendet (siehe Kapitel 11.1.1.1). Ein Nachteil von Graphiktableaus ist, dass sie kaum in der für Schülerübungen notwendigen Menge vorhanden sind und in dieser Stückzahl

teuer sind. Solche Graphiktableaus werden inzwischen im Fach Kunsterziehung verwendet, so dass sich eventuell eine gemeinsame Anschaffung lohnt.

11.1.1.3 Maus als serielles Messgerät

Bei der in Kapitel 11.1.1.1 dargestellten Messvariante dient die Computermaus gleichzeitig zur Bedienung der Software und während des Programmablaufs als bewegtes Objekt mit Sensoreigenschaften zum Messen. Wen das stört, der schließt neben einer Maus zur Bedienung noch eine serielle Maus zum Messen an. Am einfachsten schließt man die Maus erst nach dem Systemstart an, damit sie nicht als Bedien-Maus erkannt wird. Falls sie vom System bereits erkannt ist, kann man diese in der Systemsteuerung im Geräte-Manager deaktivieren.

In PAKMA 2002+ kann (je nach Programmversion) diese Maus nun als serielles Messgerät ausgelesen werden, so dass damit Bedienung und Messung voneinander getrennt sind. Damit entfällt auch, dass Einstellungen im Maustreiber vorgenommen werden müssen oder auf das Betriebssystem geachtet werden muss. Außerdem ist die Messgenauigkeit besser. In den PAKMA-Kernprogrammen muss nur der Befehl „mauszählen“ (für die Messung über den Maustreiber) durch den Befehl „Maus_Seriell (1)“ ersetzt werden, wenn der erste COM-Port gewählt wurde.

11.1.2 Messung mit der Spurenplatte

Die Materialien dieses historischen Versuchsgerätes sind noch bestellbar und in manchen Schulen auch noch vorhanden. Dazu gab es von Kröncke (nun bei Elwe oder identisch bei Kronas) eine eloxierte Metallplatte, genannt Spurenplatte (Elwe/Kronas, Bestellnummer 84 05 610), und einen Handschreiber (Elwe/Kronas 84 05 620). Über je einen 1 M Ω -Widerstand wurden früher beide an die zwei Pole der Netzspannung angeschlossen. Der heute kaufbare „Taktgeber und Transformator“ hat zusätzlich einen Sicherheitstrenntrafo gemäß VDE (Elwe/Kronas 84 05 340).

Ansonsten sind die Versuchsmaterialien mit geringem Aufwand leicht zusammenstellbar bzw. nachbaubar. Statt eine schwarz eloxierte Metallplatte zu nehmen, kann man auch eine Aluminiumplatte mattschwarz mit der Sprühdose lackieren. Aus der Chemiesammlung oder der Apotheke erhält man trockenes, gelbes Schwefelpulver (Elwe/Kronas 87 38 515), das man notfalls in einem Tiegel mit einem Mörser fein zerkleinert. Dann braucht man noch einen Pinsel und Stromkabel. Das historische Anschlusskästchen, in dem an Phase und Nullleiter je ein 1 M Ω -Widerstand sitzen, könnte leicht nachgebaut werden, wobei darauf zu achten wäre, dass vor dem 1 M Ω -Widerstand keine offenen Kontakte bestehen. Es würde genügen, die Phase der Netzspannung über diesen 1 M Ω -Widerstand mit der schwarzen Aluminiumplatte zu verbinden und darauf Schwefelpulver mit dem Pinsel zu verteilen. Durch Probieren würde man erfahren, welcher Pol der Steckdose die Phase ist. Aus Sicherheitsgründen muss man heute jedoch unbedingt einen Sicherheitstrenntrafo (Ausgangsspannung 230 V, max. 0,2 mA) verwenden, der als „Taktgeber und Transformator“ von den Lehrmittelfirmen (Elwe/Kronas 84 05 340) passend angeboten wird. Auch hier genügt es, einen Pol an die Spurplatte anzuschließen, und man sollte auch ausprobieren, mit welchem von beiden es besser funktioniert. Vor allem wenn man den anderen Pol in die andere Hand nimmt, spürt man bei sanfter Bewegung des Fingers über die Platte ein leichtes Vibrieren - der Finger wird periodisch

angezogen und abgestoßen. Damit lassen sich zweidimensionale Bewegungen aufnehmen (siehe Kapitel 5.3.3.3).

11.1.3 Die eindimensionale Mausmessung in der Dynamik

11.1.3.1 Maus als Bewegungssensor für eine eindimensionale Bewegung

Die Messung über den Windows-Maustreiber (siehe Kapitel 11.1.1.1) ist bei quantitativen Versuchen zur eindimensionalen Kinematik und Dynamik nur unter Windows 3.1/95/98/ME sinnvoll. Unter Windows NT/2000/XP muss die Maus als seriell Messgerät (siehe Kapitel 11.1.1.3) verwendet werden, da unter Windows NT/2000/XP bei einer Messung über den Windows-Maustreiber für die Beschleunigung keine angemessene Messgenauigkeit erreichbar ist. Daher muss man neben einer PS/2- oder USB-Maus zur Bedienung noch für die Messung eine serielle Maus anschließen und sie als seriell Messgerät auslesen.

Da die Messmaus in jedem Fall ins Experiment eingebaut ist, kann mit ihr der Computer nicht mehr bedient werden. Idealerweise verwendet man einen Computer mit einer PS/2- oder USB-Maus zum Bedienen und einer zusätzlichen seriellen Maus zum Messen. Am unkompliziertesten ist dabei der Einsatz von Mäusen mit Kabel. Bei den kabellosen Mäusen gibt es bemerkenswerte Unterschiede: So eignet sich nicht jede Funkmaus, da manche die Daten nicht gleichmäßig überträgt. Diese Konfiguration mit zwei Mäusen hat nur einen Nachteil, dass die Bedienmaus während der Messung nicht benutzt werden darf. Steht kein zusätzlicher Anschluss für eine zweite Maus zur Verfügung, so ermöglicht ein Umschalter (siehe Abb. 11.2) die wechselseitige Aktivierung zweier serieller Mäuse zum Bedienen

bzw. Messen (REUSCH, GÖBWEIN ET AL., 2000a und 2000b). In diesem Fall muss die Umschaltung auf die jeweils „richtige“ Maus rechtzeitig von Hand erfolgen.

Damit die eindimensionale Bewegung eines Fahrbahnwagens erfasst werden kann, muss die Bewegung des Wagens über einen Faden mit einer Sensorachse in der Maus gekoppelt werden. Dazu wird die Maus geöffnet, die Kugel herausgenommen und der Faden über eine der beiden Achsen geführt (siehe Abb. 11.3). Um den Faden sicher zu führen und um einen Schlupf zu vermeiden, empfiehlt es sich, eine passende Kabeldurchführungsstülle aus Weich-PVC (z.B. Conrad-Elektronik, Best.-Nr. 52 69 08 - 55, Hauptkatalog 2005, S. 1016, 0,10 €) und evtl. einen Schrumpfschlauch

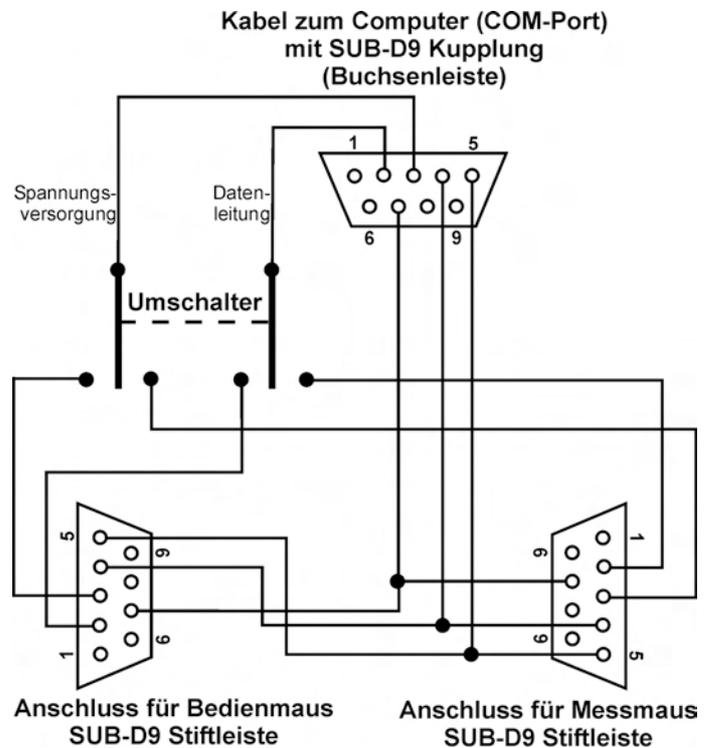


Abb. 11.2: Umschalter zwischen zwei Mäusen, z.B. Bedienmaus und Messmaus, nach REUSCH, GÖBWEIN ET AL. (2000a, S. 271; 2000b, S. 5)

(z.B. Conrad-Elektronik, Hauptkatalog 2005, S. 684) auf die Achse zu schieben und den Faden in der Tülle laufen zu lassen. Außerdem muss unbedingt der störende Einfluss von Umgebungslicht auf die Lichtschranke durch eine Abdeckung (z.B. aus einem PVC-Rohr mit der Länge 15 mm, dem Außendurchmesser 12 mm und dem Innendurchmesser 10 mm sowie aus Gewebeklebeband) verhindert werden.

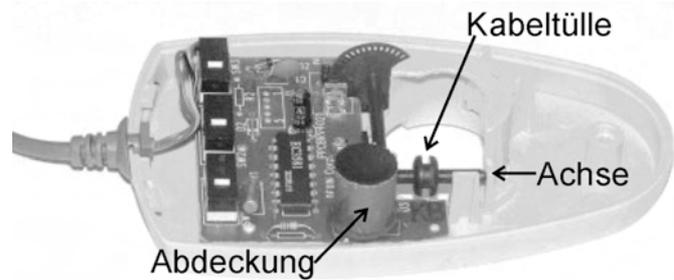


Abb. 11.3: Umgebaute Maus ohne Kugel, mit Kabeltülle und Abdeckung der Lichtschranke

Die Kopplung eines Fahrbahnwagens mit der Mousachse geschieht über einen umlaufenden Faden (siehe Abb. 11.4), der an jedem Ende der Fahrbahn über je ein reibungsarmes spitzengelagertes Laufrad umgelenkt wird. Dieser Faden läuft außerdem über die Kabeldurchführungstülle, die auf eine Achse der PC-Maus gesteckt wurde. Zu

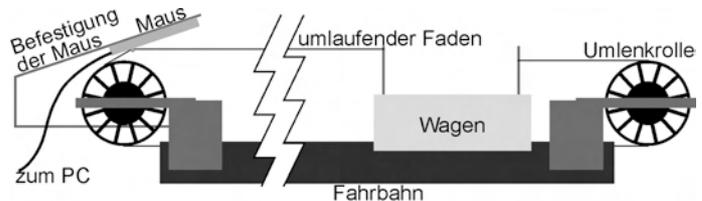


Abb. 11.4: Aufbau zur Messung der Bewegung eines Fahrbahnwagens mit einer Maus und einem umlaufenden Faden

bedenken ist auch, dass in der Maus eine Reibung vorliegt. Wenn die Bewegung möglichst reibungsarm sein soll, dann darf die Mousachse selbst nicht als eine Umlenkrolle verwendet werden, sondern es muss ein zusätzliches Laufrad als Umlenkrolle verwendet werden, so dass an der Maus der Faden nur wenig, z.B. um ca. 30° , umgelenkt wird (siehe Abb. 11.4). Außerdem darf der Faden nicht zu straff gespannt sein. Dann beträgt die Reibung in der Maus nur ca. $0,01\text{ N}$.

Da die Maus alle 25 ms Daten sendet, muss im Programm zur Messdatenerfassung der Zeitschritt Δt unbedingt ein Vielfaches von 0.025 sein. Bei neueren Mäusen, bei denen dieser Wert im Maustreiber eingestellt werden kann, stellt man im Maustreiber entsprechend 40 Messungen pro Sekunde ein. Als Längeneinheit ist für eine serielle Standardmaus mit aufgesetzter Kabeltülle $120\ \mu\text{m}$ pro Impuls typisch, wenn die Mausmessung über den Windows-Maustreiber durchgeführt wird. Der exakte Wert sollte bei jeder Maus in einem Vorversuch ermittelt werden und gilt dann auch nur für diese Kombination von Maus und PC. Damit hat dieses Messsystem etwa eine Auflösung von $0,1\text{ mm}$. Die maximal detektierbare Geschwindigkeit liegt bei der Standardmaus mit oben genannter Kabeltülle typischerweise bei $0,55\text{ m/s}$; treten höhere Geschwindigkeiten auf, wird trotzdem nur $0,55\text{ m/s}$ angezeigt.

11.1.3.2 Maus als Bewegungssensor für zwei eindimensionale Bewegung

Für die Messung von zwei eindimensionalen Bewegungen können zwei identische PC-Mäuse zum Messen verwendet werden. Wie bei der Messung einer Bewegung wird die Maus geöffnet, die Kugel herausgenommen, eine passende Kabeldurchführungstülle aus Weich-PVC und/oder ein Gummischlauch auf die Achse geschoben und der störende Einfluss von Umgebungslicht auf die Licht-

schanke durch eine Abdeckung verhindert. So werden zwei Mäuse umgebaut, wobei einmal die Achse mit Rasterscheibe für die x-Richtung und einmal für die y-Richtung genutzt wird.

Wird die Mausmessung über den Windows-Maustreiber (siehe Kapitel 11.1.1.1) vorgenommen, sollten nicht beide Mäuse gleichzeitig am Computer angeschlossen werden, da dann die Messgenauigkeit nachlässt, sondern eine Maus sollte beide Daten übertragen. So sind im Gegensatz zur Messung einer einzigen eindimensionalen Bewegung hier mehr Umbauarbeiten nötig. Man sollte z.B. der Maus, bei der die y-Richtung genutzt wird („y-Maus“), das Signal des Fototransistors entnehmen und es der anderen Maus (2x-Maus2), deren y-Fototransistor man abgeklemmt hat, einspeisen. So kann diese x-Maus beide Signale umsetzen und als Datenpaket an den Computer senden.

Allerdings müssen beide Mäuse mit Spannung versorgt werden, wozu es drei Möglichkeiten gibt: 1. Die x-Maus wird durch den normalen Anschluss an den PC mit Spannung versorgt, deren y-Fotodiode und y-Fototransistor werden abgeklemmt und die Anschlüsse mit der y-Fotodiode und dem y-Fototransistor der y-Maus verbunden; die x-Maus versorgt also auch die y-Maus. 2. Die Fotodiode der y-Maus wird durch eine externe Spannungsquelle versorgt. 3. Falls der Computer dazu in der Lage ist, werden beide Mäuse mit einer Schaltung nach Abb. 11.5 mit Spannung versorgt, aber nur die x-Maus liefert alle Daten (von ihrem x-Fototransistor und vom y-Fototransistor der y-Maus) an den PC.

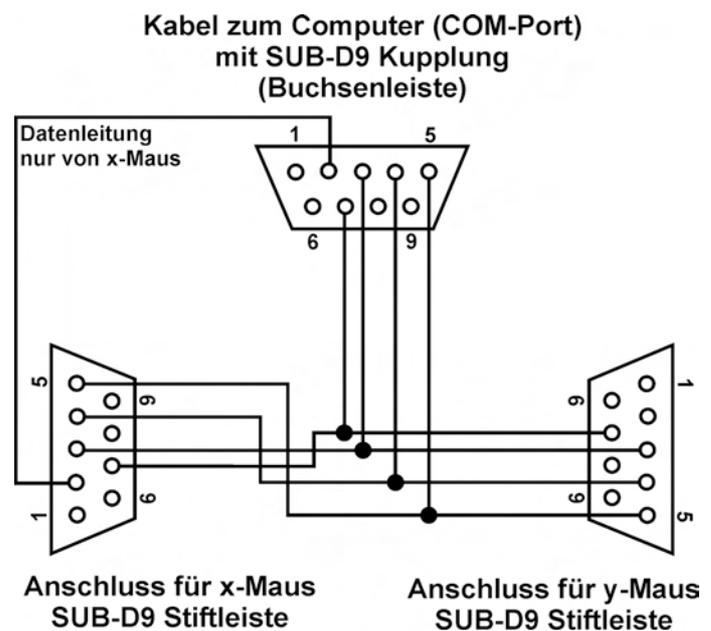


Abb. 11.5: Schaltung zur Spannungsversorgung zweier Mäuse, wobei nur die x-Maus Daten an den PC sendet

Alle Abbildungen der Versuche im Kapitel 5.3.5 wurden z.B. mit zwei Mäusen, einer Schaltung gemäß Abb. 11.4 und mit einem Laptop mit Windows XP und PAKMA 2002+ (Version 4.93.x) aufgenommen, wobei wegen der höheren Messgenauigkeit die serielle Mausmessung (siehe Kapitel 11.1.1.3) verwendet wurde.

11.2 Zur beiliegenden CD

11.2.1 Die Lehrer-CD

Für die Lehrer, die sich bereit erklärten, nach dem entwickelten Unterrichtskonzept in einer elften Jahrgangsstufe zu unterrichten, wurde eine CD erstellt. Diese CD befindet sich auf der CD des Anhangs im Ordner „Lehrer-CD mit Unterrichtsmaterialien“. Zum Betrachten der CD braucht man Word 97 oder höher. Gestartet wird mit der Datei „startseite.doc“, wovon man per Hyperlink zu den weiteren Inhalten kommt.

Von der Startseite aus kann eine Version des Softwaresystems „PAKMA/VisEdit“, eine Version des Acrobat Readers oder des Windows Media Players installiert werden. Des Weiteren können die Prinzipien des Unterrichtskonzeptes, ein vorgeschlagener Stoffverteilungsplan, eine Anleitung zur Testdurchführung, Bemerkungen zu Alternativen zum vorgeschlagenen Hardwareeinsatz, eine Auflistung von Schülervorstellungen zur Kinematik und Dynamik und die Konzeption der Unterrichtsbeschreibung nachgelesen werden. Unter dem Link „zur Unterrichtsbeschreibung über Liste der Stunden“ kommt man zu einem Überblick über den vorgeschlagenen Kursablauf und von da aus zu einer Beschreibung der einzelnen Stunden. An den entsprechenden Stellen in der Unterrichtsbeschreibung finden sich wieder Links zu passenden Unterrichtsmaterialien. Unter „Liste der verwendeten Materialien“ findet man auch direkt eine Liste aller vorhandenen Unterrichtsmaterialien mit einer Kurzbeschreibung (ohne Unterrichtsbeschreibung). Insgesamt enthält diese Lehrer-CD ausführliche Stundenentwürfe (als Vorschläge), einen Stoffverteilungsplan, fast 100 PAKMA-„Projekte“ und ca. 30 VisEdit-Modell-Dateien, 17 verschiedene Videos, über 20 Aufgabenblätter, über 20 weitere Folien, zwei Stegreifaufgaben, zwei Schulaufgaben, sieben Musterlösungen und vieles mehr.

Zusätzlich zu dieser CD erhielten die Lehrer einen Ordner mit Ausdrucken der allgemeinen Hinweise, des Stoffverteilungsplanes, der ausführlichen Unterrichtsbeschreibung und der weiteren Materialien (wie Folien, Arbeitsblätter und Aufgaben), was insgesamt über 200 kopierte Seiten waren. Zu bedenken ist, dass die Lehrer außer der CD auch eine Schulung bekamen. In dieser Fortbildung wurde u.a. auch diese CD vorgestellt.

11.2.2 Die verwendeten Tests

In dem Ordner „Tests und Fragebögen“ befinden sich alle in dieser Arbeit eingesetzten oder erwähnten Tests, wie sie üblicherweise im Anhang einer didaktischen Arbeit abgedruckt werden. Die Unterordner tragen jeweils den Namen des entsprechenden Tests und beginnen mit der Nummer des Kapitels, in dem auf den jeweiligen Test eingegangen wird. Die Tests werden immer als pdf-Datei (Format des Acrobat Readers) und häufig zusätzlich in einem weiteren Dateiformat (z.B. als Word-Datei) wiedergegeben.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei allen Lehrern, die bereit waren, einen Test ihren Schülern zu stellen und dafür Unterrichtszeit zur Verfügung stellten. Gedankt sei aber auch den Schülern, die insgesamt ca. 5.000 Tests bearbeiteten und die diese Tests auch ohne Notendruck nach bestem Können ernsthaft beantworteten.

Besonderer Dank gilt den Lehrern, die bereit waren, sich auf das Unterrichtskonzept einzulassen, danach zu unterrichten und zur Evaluation beizutragen. Danke auch für das kontinuierliche Besuchen des Vorbereitungs- und Begleitseminars.

In diesem Zusammenhang gilt großer Dank der Wilhelm und Else-Heraeus-Stiftung, die die Implementation und Evaluation großzügig finanziell unterstützte. Ohne diese Hilfe wären die Durchführung des Unterrichtsprojektes und die Evaluation nicht in dieser Form möglich gewesen.

Herzlich bedanken möchte ich mich an dieser Stelle insbesondere bei Herrn Prof. Dr. D. Heuer für die Betreuung der Arbeit und für alle Anregungen. Schließlich sei auch allen gedankt, die Teile der Arbeit Korrektur gelesen haben und besonders meiner Frau Angelika für alle Ermutigung. Ganz besonders möchte ich auch Jesus Christus danken, der mir zu dieser Arbeit Mut und Ideen gab sowie die nötige „Kraft“, d.h. die innere Stärke und das Durchhaltevermögen.