

**Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie  
der Universität Würzburg**

**Direktor: Professor Dr. med. dent. Angelika Stellzig-Eisenhauer**

**Werkstoffkundlich vergleichende Untersuchung mechanischer Eigenschaften von  
Alginaten und Alginatersatzmaterialien**

**Inaugural-Dissertation**

**zur Erlangung der Doktorwürde der**

**Medizinischen Fakultät**

**der**

**Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

**vorgelegt von**

**Thomas Steffen Beyer**

**aus Treuchtlingen**

**Würzburg, Oktober 2014**

Referentin: Professor Dr. med. dent. Angelika Stellzig-Eisenhauer

Korreferent: Priv.-Doz. Dr. med. dent. Stefan Fickl

Dekan: Prof. Dr. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Mai 2015

Der Promovend ist Zahnarzt.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	1
2. Literaturüberblick.....	2
2.1 Geschichtlicher Überblick.....	3
2.2 Alginat.....	6
2.2.1 Zusammensetzung.....	6
2.2.2 Eigenschaften .....	7
2.3 Additionsvernetzende Silikone als Alginatsubstitute.....	9
2.3.1 Zusammensetzung.....	9
2.3.2 Eigenschaften .....	10
2.3.3 A-Silikone in ihrer Eigenschaft als Alginatersatzmaterialien .....	12
3. Ziel der Arbeit .....	14
4. Material und Methoden .....	15
4.1 Verwendete Abformmaterialien .....	15
4.2 Untersuchungsmethoden .....	17
4.2.1 Verformung unter Druck.....	18
4.2.1.1 Probekörperherstellung .....	19
4.2.1.2 Versuchsaufbau und –durchführung .....	19
4.2.1.3 Einschränkungen .....	20
4.2.1.4 Berechnung der Ergebnisse.....	20
4.2.2 Elastische Rückstellung nach Verformung .....	21
4.2.2.1 Probekörperherstellung .....	21
4.2.2.2 Versuchsaufbau und –durchführung .....	21
4.2.2.3 Einschränkungen .....	23
4.2.2.4 Berechnung der Ergebnisse.....	23
4.2.3 Detailwiedergabegenauigkeit.....	24
4.2.3.1 Probekörperherstellung .....	24
4.2.3.2 Versuchsaufbau und -durchführung.....	25

4.2.3.3 Einschränkungen .....	25
4.2.4 Dimensionsänderung .....	25
4.2.4.1 Probekörperherstellung .....	26
4.2.4.2 Versuchsaufbau und –durchführung .....	26
4.2.4.3 Einschränkungen .....	27
4.2.4.4 Berechnung der Ergebnisse .....	27
4.2.5 Zugversuch .....	28
4.2.5.1 Probekörperherstellung .....	28
4.2.5.2 Versuchsaufbau und –durchführung .....	28
4.2.5.3 Einschränkungen .....	29
4.2.5.4 Bestimmung der einzelnen Parameter .....	29
4.2.5.4.1 Reißfestigkeit .....	29
4.2.5.4.2 Reißdehnung .....	30
4.2.5.4.3 Reißenergie und Toughness .....	30
4.2.5.4.4 E-Modul .....	32
4.2.6 Homogenität .....	32
4.2.6.1 Probekörperherstellung .....	33
4.2.6.2 Versuchsaufbau und –durchführung .....	33
4.2.6.3 Einschränkungen .....	34
5. Ergebnisse und Diskussion .....	36
5.1 Verformung unter Druck .....	37
5.1.1 Ergebnisse .....	37
5.1.2 Diskussion .....	39
5.2 Elastische Rückstellung nach Verformung .....	41
5.2.1 Ergebnisse .....	41
5.2.2 Diskussion .....	43
5.3 Detailwiedergabegenauigkeit .....	46
5.3.1 Ergebnisse .....	46

5.3.2 Diskussion .....	48
5.4 Dimensionsänderung .....	49
5.4.1 Ergebnisse .....	49
5.4.2 Diskussion .....	62
5.5 Zugversuch .....	65
5.5.1 Reißfestigkeit .....	67
5.5.1.1 Ergebnisse .....	67
5.5.1.2 Diskussion .....	69
5.5.2 Reißdehnung .....	71
5.5.2.1 Ergebnisse .....	71
5.5.2.2 Diskussion .....	73
5.5.3 Reißenergie und Toughness .....	74
5.5.3.1 Ergebnisse .....	74
5.5.3.2 Diskussion .....	78
5.5.4 E-Modul .....	79
5.5.4.1 Ergebnisse .....	79
5.5.4.2 Diskussion .....	80
5.6 Homogenität .....	82
5.6.1 Ergebnisse .....	82
5.6.2 Diskussion .....	84
6. Zusammenfassung .....	86
7. Ausblick .....	93
Anhang .....	94
Literaturverzeichnis .....	95
Danksagung .....	100
Lebenslauf .....	101

## Abkürzungsverzeichnis

AN C	AlgiNot FS Cartridge
AN V	AlgiNot FS Volume
AX	AlginX Ultra Cartridge
PP	Position Penta
SI	Silginat
SB	Status Blue
X C	Xantasil Cartridge fast set
X D	Xantasil Dynamix fast set
AP	Alginoplast regular set
BX	Blueprint XCreme
J	Jeltrate regular set
XA	Xantalgin select fast set
MW	Mittelwert
STABW	Standardabweichung
N	Anzahl Messungen

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Abformmaterialien .....	2
Abbildung 2: Abbindereaktion von A-Silikonem .....	10
Abbildung 3: Dynamix-Speed Mischgerät.....	16
Abbildung 4: Mischpistole .....	16
Abbildung 5: Hauschild Mischgerät .....	17
Abbildung 6: Alginateprobekörper in Exsikkatoren .....	17
Abbildung 7: Negativform der zylinderförmigen Probekörper .....	19
Abbildung 8: Prüfvorrichtung Verformung unter Druck .....	20
Abbildung 9: Prüfvorrichtung elastische Rückstellung.....	22
Abbildung 10: Probekörpernegativform Detailwiedergabegenauigkeit, Dimensionsstabilität ...	24
Abbildung 11: Messverfahren Dimensionsstabilität .....	26
Abbildung 12: Ergebnisse für Verformung unter Druck.....	38
Abbildung 13: Beanspruchung von Abformwerkstoffen bei Entfernung aus Unterschnitten.....	40
Abbildung 14: Ergebnisse für elastische Rückstellung.....	42
Abbildung 15: Systematische Darstellung des Druckversuchs und der Gesamtverformung.....	44
Abbildung 16: Abhängigkeit der elastischen Rückstellung von Kraft und Materialstärke .....	45
Abbildung 17: Ergebnisse für Detailwiedergabegenauigkeit.....	47
Abbildung 18: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 1 .....	51
Abbildung 19: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 2 .....	53
Abbildung 20: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 5 .....	55
Abbildung 21: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 7 .....	57
Abbildung 22: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 14, ohne Alginate .....	59
Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der Dimensionsänderungen .....	61
Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm .....	65
Abbildung 25: Schematische Darstellung im Zugversuch gemessener Materialeigenschaften ..	66
Abbildung 26: Ergebnisse für Reißfestigkeit .....	68
Abbildung 27: Ergebnisse für Reißdehnung .....	72
Abbildung 28: Ergebnisse für Reißenergie .....	75
Abbildung 29: Ergebnisse für Toughness .....	77
Abbildung 30: Ergebnisse für E-Modul .....	80

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über Eigenschaften von Alginaten .....	9
Tabelle 2: Überblick über Eigenschaften von Polyvinylsiloxanen .....	12
Tabelle 3: Auflistung der getesteten Abformmaterialien .....	15
Tabelle 4: Alginatdosierungen .....	17
Tabelle 5: Versuchsablauf Verformung unter Druck .....	19
Tabelle 6: Versuchsablauf elastische Rückstellung .....	22
Tabelle 7: Deskriptive Statistik Verformung unter Druck .....	37
Tabelle 8: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Verformung unter Druck .....	38
Tabelle 9: Deskriptive Statistik Elastische Rückstellung nach Verformung.....	41
Tabelle 10: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Elastische Rückstellung nach Verformung.....	42
Tabelle 11: Deskriptive Statistik Detailwiedergabegenauigkeit .....	46
Tabelle 12: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Detailwiedergabegenauigkeit.....	47
Tabelle 13: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 1 .....	50
Tabelle 14: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 1 .....	50
Tabelle 15: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 2 .....	52
Tabelle 16: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 2 .....	52
Tabelle 17: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 5 .....	54
Tabelle 18: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 5 .....	54
Tabelle 19: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 7 .....	56
Tabelle 20: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 7 .....	56
Tabelle 21: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 14.....	58
Tabelle 22: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 14 .....	58
Tabelle 23: Deskriptive Statistik Dimensionsstabilität im Verlauf.....	60
Tabelle 24: Deskriptive Statistik Reißfestigkeit.....	67
Tabelle 25: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Reißfestigkeit.....	68
Tabelle 26: Deskriptive Statistik Reißdehnung.....	71
Tabelle 27: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Reißdehnung.....	71
Tabelle 28: Deskriptive Statistik Reißenergie.....	74
Tabelle 29: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Reißenergie.....	74
Tabelle 30: Deskriptive Statistik Toughness.....	76
Tabelle 31: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Toughness.....	76
Tabelle 32: Deskriptive Statistik E-Modul.....	79
Tabelle 33: p-Werte aus dem Post-hoc-Test E-Modul.....	79
Tabelle 34: Beurteilung der Homogenität 1/4.....	82



Tabelle 35: Beurteilung der Homogenität 2/4.....	82
Tabelle 36: Beurteilung der Homogenität 3/4.....	83
Tabelle 37: Beurteilung der Homogenität 4/4.....	83

## 1. Einleitung

„Die Abformung ist das wichtigste Bindeglied zwischen der Arbeit des Zahnarztes und der des Zahntechnikers. Fehler, die bei der Abformung gemacht werden, lassen sich durch nachfolgende Arbeitsschritte in der Regel nicht wieder korrigieren. Nur eine einwandfreie Abformung erlaubt es dem Zahntechniker, ein gutes Modell und darauf einen exakt passenden Zahnersatz herzustellen.“

(Schulz & Schwickerath 1989, S. 9)

Aussagen wie die von Schulz und Schwickerath finden sich in nahezu jeder Einführung in die zahnärztliche Werkstoffkunde. Abdruckmaterialien nehmen bei der Herstellung von Modellen im zahnärztlichen Alltag eine zentrale Rolle ein. Da sie die Situation im Mund des Patienten so genau wie möglich wiedergeben sollen, müssen sie sehr hohen Materialanforderungen gerecht werden. Fortwährend kommen in diesem Bereich neue Produkte auf den Markt, weshalb unabhängige Prüfungen unerlässlich sind, um – abseits der Werbekampagnen von Dentalfirmen – unabhängige Bewertungen abgeben und entsprechende Empfehlungen für den Einsatz in der Praxis geben zu können.

Solch eine Untersuchung stellt die vorliegende Arbeit dar. Dabei soll in Kapitel 2 zunächst die geschichtliche Entwicklung der Abformmaterialien beleuchtet werden, bevor es danach gilt, die Eigenschaften von Alginaten und Silikonen als Alginatersatzmaterialien kurz darzustellen.

Nach den Materialbeschreibungen werden in Kapitel 3 die Indikation von Alginatabformungen und die Verbesserung erläutert, die durch Alginatsubstitute erzielt werden sollen. Im Anschluss werden die Forschungsfragen vorgestellt, die sich im Einzelnen aus der Thematik ergeben.

Kapitel 4 enthält eine Beschreibung der getesteten Materialien, Hilfsmittel und Prüfbedingungen sowie der einzelnen Prüfverfahren und -vorrichtungen.

Daran schließt sich die Präsentation der Ergebnisse und ihre jeweilige Interpretation in Kapitel 5 an. Zu Beginn der Diskussion werden dabei jeweils zunächst Werkstoffeigenschaften definiert, bevor ihr Bezug zur klinischen Situation dargestellt wird.

Die Zusammenfassung greift die Forschungsfragen wieder auf und versucht, sie zu beantworten, bevor ein abschließender Vergleich von Alginaten und Alginatsubstituten auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse vorgenommen wird.

Die Arbeit schließt mit einem kurzen Ausblick auf die sich immer stärker ausbreitende digitale Abformung.

## 2. Literaturüberblick

Seit Einführung der Abformung und der Entwicklung des Abformlöffels im 18. Jahrhundert sind die heute Prinzipien der Abformung gleich geblieben und gelten bis heute (vgl. Stoll 2001, S. 8). Laut Schulz & Schwickerath (1989, S. 11) hat die Abformung die Aufgabe, die Hart- und Weichgewebe im Mund detail- und dimensionsgetreu wiederzugeben. Bis zum heutigen Zeitpunkt wurde eine Vielzahl an teils sehr unterschiedlichen Abformmaterialien mit verschiedensten Eigenschaften entwickelt. In Abbildung 1 sind die bekanntesten Abformmaterialien dargestellt, geordnet nach ihrem Verhalten im abgebundenen Zustand.

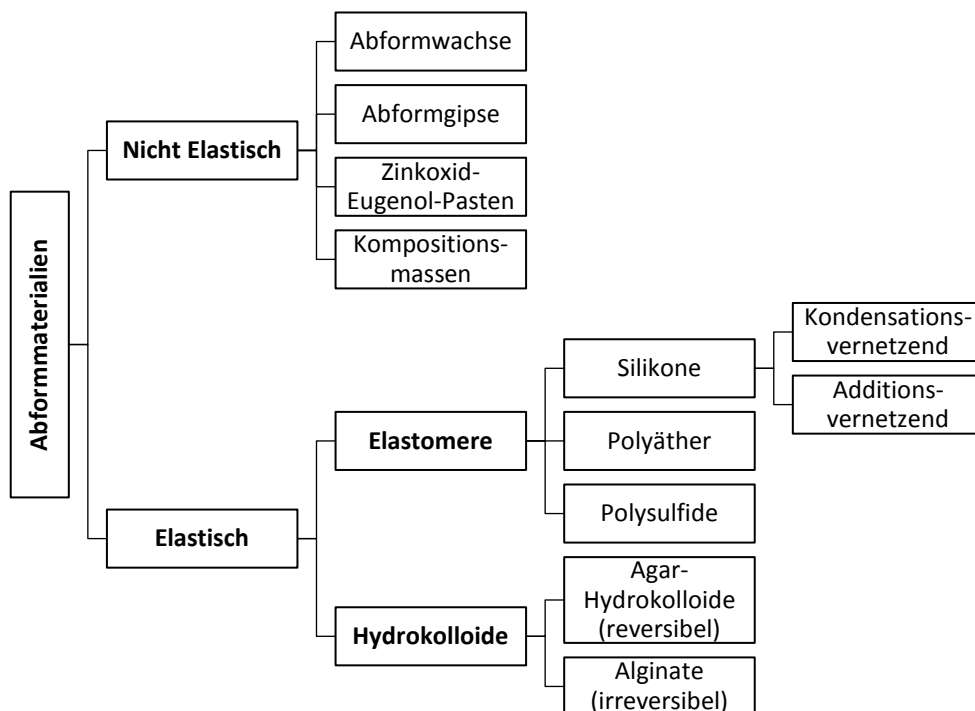


Abbildung 1: Einteilung der Abformmaterialien, modifiziert nach O'Brien (2008, S. 380), Lehner & Schärrer (1991, S. 630) und Arnetzl (2010)

Dieses breite Spektrum an verschiedenen Abformmassen hat seinen Ursprung in ihrer geschichtlichen Entwicklung, die im Folgenden in Auszügen dargestellt wird.

## 2.1 Geschichtlicher Überblick

Es gibt keine Aufzeichnungen über Zahnabformungen in der Antike, jedoch deuten einzelne Funde aus Ägypten und Phönizien auf die Anfänge der Zahnheilkunde zu dieser Zeit hin (vgl. Verweyen 1978, S. 13). Die ersten Überlegungen zur Herstellung passgenauer Prothesen mithilfe von Wachsmodellen stellte der deutsche Chirurg Matthäus Purmann (1648-1711) an. Philipp Pfaff (1713-1766), Hofzahnarzt Friedrichs des Großen, war der Erste der 1756 eine Abformung zur Herstellung von Zahnersatz mittels Siegelwachs sowie die Modellherstellung mit Gips beschrieb (vgl. Borchers 1996, S. 2f; Glenner 1997, S. 127). Borchers (1996, S. 2) schreibt, dass es Pfaffs bahnbrechende Idee war, die den Aufschwung der zahnärztlichen Prothetik erst ermöglichte.

Der Leibzahnarzt Ludwigs des 18., C. F. Delabarre, entwickelte 1820 den ersten Abdrucklöffel, wodurch deutlich bessere Abdruckergebnisse erzielt werden konnten (vgl. Verweyen 1978, S. 20). Zur Darstellung von Unterschnitten behalf sich Delabarre sogenannter „Vérificateurs“, kleinen separaten Wachsabdrücken, die er im Nachhinein wieder zusammensetzte (vgl. Jaeggi 1960, S. 18). William Henry Dwinelle (1819-1896) verwendete Gipsabdrücke und forcierte ihre Verbreitung, nachdem es ihm und seinen Kollegen um 1840 gelungen war, das Abbindeverhalten von Gips durch Salzzusätze zu beschleunigen (vgl. Rehberg 1978, S. 16f; Hoffmann-Axthelm 1985, S. 300). Allerdings mussten die Gipsabdrücke aufgrund ihrer Starrheit zunächst im Mund zerbrochen und danach wieder mit Klebewachs zusammengesetzt werden (vgl. Strübig 1989, S. 120; Glenner 1997, S. 129).

Neben Wachs und Gips wurden auch reine Guttapercha und Kompositionsabformmassen verwendet. Stent stellte 1857 in London eine Kompositionsmasse vor, die er durch verschiedene Zusätze aus Guttapercha entwickelt hatte. Dieses thermoplastische Material ist bis heute unter dem Namen „Stentsmasse“ bekannt (vgl. Strübig 1989, S. 120; Glenner 1997, S. 128; Schulein 2005, S. 67). Gemein ist all diesen Materialien ihre mangelnde Elastizität. Bei Gips führt dies zu einem Zerbrechen der Abdrücke und bei der Verwendung von Wachs, Guttapercha und Stentsmasse können Unterschnitte nach der Entnahme aus dem Mund, wenn überhaupt, nur mangelhaft dargestellt werden (vgl. Glenner 1997, S. 129; Schulein 2005, S. 68). Craig (1988, S. 51f) schreibt, dass die Verwendung starrer Abformmaterialien, insbesondere der Stentsmassen, rapide und im selben Maß abnahm, in dem die Verwendung elastischer Abformmaterialien anstieg.

Das erste elastische Abformmaterial erfand der Österreicher Alphons Poller im Jahr 1925. Sein "Negocoll" war das erste reversible Hydrokolloid auf Basis von Agar, einem pflanzlichen Hydrokolloid aus Algen, und wurde 1931 unter dem Namen "Dentocoll" für zahnärztliche Abformungen vorgestellt. Erstmals konnten damit auch unter sich gehende Bereiche dargestellt werden. Hydrokolloide verflüssigen sich beim Erhitzen und erstarren bei Abkühlung, wodurch sie wiederverwendbar sind. Allerdings sind spezielle Apparaturen und Löffel mit Kühl- bzw. Heizfunktion zur Anwendung notwendig (vgl. Verweyen 1978, S. 34–38).

Die Hydrokolloide wurden zunächst ausschließlich aus Algen gewonnen, die vor den Küsten Japans wachsen. Wegen der kriegerischen Auseinandersetzung mit Japan wurde in den USA um 1940 ein Abformmaterial aus den wasserlöslichen Salzen der Braunalge, der Alginsäure, entwickelt. Nach dem Krieg wurden die so entstandenen irreversiblen Hydrokolloide, die Alginat, dann 1949 auch in Deutschland eingeführt (vgl. Strübig 1989, S. 120f; Glenner 1997, S. 129f; Schulein 2005, S. 68).

Zur Weiterentwicklung der Alginat in den 1980ern schreibt Craig (1988, S. 51), dass die Reißfestigkeit erhöht wurde und es gelang, das Gesundheitsrisiko durch giftige Bestandteile im Staub, wie bspw. Blei, Zink, Barium oder Kadmium, für Patienten und Personal zu minimieren. Die staubfreien Alginat enthalten Stoffe, u. a. Glykol, die wie eine Schutzschicht wirken (vgl. Craig 1988, S. 53).

Lange Zeit stellten die Hydrokolloide das einzige ausreichend elastische Abformmaterial dar. Erst ab den 1950ern kamen weitere elastische Abformmaterialien auf den Markt, die sog. Elastomere. Zunächst wurden die Polysulfide entwickelt, die jedoch heute kaum noch eine Rolle spielen (vgl. Breustedt & Lenz 1985, S. 31), u. a. wegen unterlegenen Materialeigenschaften und einer gewissen Toxizität (vgl. Wöstmann 1998, S. 35). 1955 wurden dann die kondensationsvernetzenden Polysiloxane, auch als konventionelle Silikone bezeichnet, vorgestellt (vgl. Welker & Mehner 1979, S. 392; Schulein 2005, S. 68). Diese wurden mittlerweile jedoch durch modernere Materialien vielfach verdrängt. Die Polyäther schließlich wurden 1964 in den Markt eingeführt und verfügen über exzellente Hydrophilie, weshalb sie sich trotz einiger Nachteile (u. a. ihr unangenehmer Geschmack und eine hohe Rigidität) als Mittel der Wahl vieler Anwender etablieren konnten (vgl. Lehner & Schärer 1991, S. 629; Schulein 2005, S. 62–73).

Die additionsvernetzenden Silikone, auch A-Silikone oder Polyvinylsiloxane genannt, wurden 1975 auf den Markt gebracht (vgl. Lehner & Schärer 1991, S. 629). Craig (1988, S. 55) bezeichnet die Entwicklung der A-Silikone als den vielleicht wichtigsten Schritt in der Entwicklung der elastomeren Abformmassen. Zunächst waren Silikone nur in der Konsistenz „normal fließend“ erhältlich. Durch die Veränderung des Füllstoffgehaltes konnten zwischen 1960 und 1970 auch Konsistenzen von ultradünn fließend bis knetbar angeboten werden. Die verschiedenen Konsistenzen erweiterten die klinische Methodik, die Indikationsbereiche und ermöglichten die Rationalisierung von Behandlungsabläufen (vgl. Viohl 1996, S. 282). Im Jahr 1985 erschienen schließlich die weiterentwickelten hydrophileren A-Silikone auf dem Dentalmarkt (vgl. Lehner & Schärer 1991, S. 629).

Neben den Abformmassen selbst wurden auch die Darreichungsformen und Mischsysteme ständig weiterentwickelt. So wurde 1985 von der Firma 3M eine Mischpistole präsentiert, die ein exaktes Mischungsverhältnis zwischen Katalysator- und Basispaste gewährleistet. Mit der Mischpistole können dosier- und mischbedingte Werkstoffmängel minimiert werden. Die Gleichmäßigkeit des Mischvorgangs kann visuell durch die unterschiedlich gefärbten Einzelkomponenten überprüft werden. Das praxistaugliche maschinelle Dosieren und Mischen, auch schwer fließender Massen, wurde erstmals 1993 mit dem Pentamix Gerät auf der Dentalschau in der Schweiz vorgestellt. Sowohl Polyäther, als auch Polyvinylsiloxane können mit dem Gerät verwendet werden. (vgl. Heller & Kern 1996, S. 1342; Handschuck 2007, S. 7f) Die Einführung von automatischen Mischmaschinen trägt neben der Vereinfachung des Mischens dazu bei, sowohl die Anzahl an Blasen als auch die Menge an Müll, die bei jedem Mischprozess anfällt, zu verringern (vgl. Craig 1988, S. 51).

Der Blick auf die historische Entwicklung der Abformmaterialien zeigt vor allem ihre große Vielfalt. Trotzdem haben sich im tagtäglichen Gebrauch nur einige wenige Abformmaterialien bewährt: Hydrokolloide, Alginate, K-Silikone, A-Silikone und Polyäther sind die momentan gebräuchlichen elastischen Abformmassen (vgl. O'Brien 2008, S. 379). Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Alginaten und ihrem Indikationsbereich sowie Silikone als Alginatersatzmaterialien, weshalb diese beiden Materialgruppen im Folgenden genauer betrachtet werden sollen.

## **2.2 Alginate**

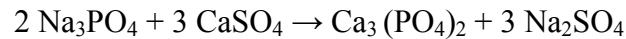
Alginate sind irreversible Hydrokolloide, die als effektive und zuverlässige Abformmaterialien gelten und bei vielen Anwendern beliebt sind. Seit einigen Jahren werden auch Alginatsubstitute angeboten, mit denen die Nachteile der Alginat, wie bspw. kurze Aufbewahrungszeiten, überwunden werden sollen, allerdings haben diese Produkte laut Christensen (2008) den Nachteil, dass ihr Preis drei- bis fünfmal so hoch ist wie der von Alginaten (vgl. Bryant & Blank 2009, S. 24f). Alginate bewähren sich, trotz der Einführung weiterentwickelter und genauerer elastomerer Abformmaterialien bis heute (vgl. Nandini et al. 2008, S. 37–41). Bereits Hosoda & Fusayama (1959, S. 932) schrieben, dass Alginate einfach in der Anwendung sind, und vertraten die Meinung, dass es von großem Vorteil sei, wenn mit Alginaten auch hochpräzise Modelle hergestellt werden könnten.

Alginate sind das weitverbreitetste zahnärztliche Abformmaterial. Sie werden für Provisoriumsabdrücke, zur Herstellung von Arbeitsmodellen für Klammerprothesen, für die Herstellung von Vormodellen für individuelle Löffel und für Situationsabformungen in allen Bereichen der Zahnmedizin verwendet (vgl. Marxkors & Meiners 2005, S. 93; O'Brien 2008, S. 399).

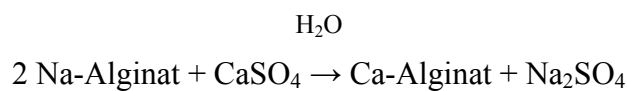
### **2.2.1 Zusammensetzung**

Die Grundsubstanz, aus der Alginate zum Großteil bestehen, sind die wasserlöslichen Salze der Alginsäure (vgl. Wöstmann 1998, S. 23). Alginate werden meist in Pulverform angeboten. Das Pulver enthält Alginat, in Form von Natrium-, Ammonium- oder Kaliumalginat, mit Anteilen von 12-15 % und Kalziumsulfat in Konzentrationen von 8-12 % als reaktive Bestandteile. Natriumphosphat ist zu circa 2 % als Verzögerer enthalten. Zur Stabilisierung des Alginats sind Füllkörper wie Diatomeenerde zu ca. 70 % enthalten, um die Steifigkeit des abbindenden Gels zu erhöhen. Kaliumsulfat oder alkalische Zinkfluoride (ca. 10 %) werden für den Erhalt guter Gipsoberflächen hinzugefügt. Außerdem sind auch Farb- und Geschmacksstoffe enthalten. Über die Menge an Natriumphosphat kann die Geschwindigkeit, mit der ein Alginat abbindet, eingestellt werden (vgl. Buchan & Peggie 1966, S. 1128; Wöstmann 1998, S. 26; O'Brien 2008, S. 400f). Das Pulver wird durch das Mischen mit Wasser zu einer gelartigen Masse. Dabei finden zwei Reaktionen statt. Als erstes reagieren der Verzögerer Natriumphosphat und

Calciumsulfat aus dem Reaktor. Dies führt zu einer Verzögerung des Abbindeprozesses und einer verlängerten Verarbeitungszeit:



Nachdem alles Natriumphosphat verbraucht ist, reagiert das verbliebene Calciumsulfat in einer zweiten Reaktion mit Natriumalginat, wodurch unlösliches Calciumalginat entsteht. Dieses Calciumalginat bildet, wenn es mit Wasser gemischt wird, ein elastisches Gel, in dessen Maschennetz sich neben Produkten der Verzögerungsreaktion auch ein großer Anteil an Wasser befindet:



(vgl. u. a. O'Brien 2008, S. 400f)

Da beim Einsatz der Alginat der ersten Generation Gesundheitsprobleme auftraten, wurden die Pulver der Alginat bspw. mit Glykol benetzt, um die Inhalation von Alginatstaub zu vermeiden. Diese sog. staubfreien Alginat gibt es seit 1980 (vgl. Breustedt & Lenz 1985, S. 19; O'Brien 2008, S. 401).

Einige Alginat enthalten auch Stoffe wie Ammonium-Chlorid oder Chlorhexidin zur chemischen Desinfektion. Die Ammoniumverbindungen verbessern die Detailreproduktion und die Kompatibilität mit Gips. Dennoch müssen auch diese Alginat noch desinfiziert werden (vgl. Buchan & Peggie 1966, S. 1128; O'Brien 2008, S. 401).

### 2.2.2 Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften von Alginaten sind sehr stark von der Verarbeitungstechnik, d.h. Faktoren wie dem Wasser-Pulver-Verhältnis sowie der Mischzeit und -technik, abhängig. So führen Abweichungen von den Verarbeitungsvorgaben der Hersteller u. a. zu veränderter Konsistenz, Dimensionsstabilität und Reißfestigkeit der abgebundenen Masse. Bspw. verzögert kaltes Wasser den Abbindevorgang, während warmes Wasser die Abbindung beschleunigt (vgl. O'Brien 2008, S. 402). Vor jedem Mischen sollte das Alginatpulver durch Schütteln homogen durchmischt werden. Bei langer Lagerung kommt es zur Entmischung der einzelnen Bestandteile des Pulvers und schwerere Teilchen sinken auf den Boden des Alginatbehälters ab (vgl. Rehberg 1978,



S. 65f; Schulz & Schwickerath 1989, S. 37). Da Alginate Wasser einlagern und schnell austrocknen, müssen die Abdrücke umgehend ausgegossen werden. Laut Schulz & Schwickerath (1989, S. 37) muss das Ausgießen spätestens nach 20 Minuten erfolgen, um ein so detail- und dimensionsgenau Modell zu erhalten, wie es mit einem Alginat-Abdruck möglich ist. In der Literatur besteht weitgehend die Meinung, dass Abdrücke auch bis zu 24 Stunden in sogenannten Hygrophoren bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit, allerdings mit leichten Einbußen der Dimensionsstabilität, gelagert werden können (vgl. Wirz 1981, S. 299; Breustedt & Lenz 1985, S. 24; Marxkors & Meiners 2005, S. 24, 93). Gambardella & Johnson (2010, S. 5) schreiben, dass sogar eine Lagerung von bis zu 30 Tagen in bestimmten Lösungen möglich sein soll, allerdings ist die Genauigkeit nach 30 Tagen nicht beschrieben. Trotz solcher Berichte ist es erwiesen, dass Alginate nicht dimensionsstabil sind, d. h. sie schrumpfen oder quellen auf. O'Brien (2008, S. 403) schreibt, dass die Lagerung an Luft oder in Wasser mit signifikanten Dimensionsveränderungen einhergeht, wohingegen eine Lagerung bei 100 % - iger Luftfeuchtigkeit die geringste Dimensionsänderung zur Folge habe. Modelle sollten vor dem Austrocknen des Alginats entformt werden, da ausgetrocknetes Alginat eine kreideartige Konsistenz aufweist und nicht mehr elastisch ist. Fehler bei der Modellherstellung resultieren darin, dass die komplette Abformung wiederholt werden muss, da Abdrücke nur einmal ausgegossen werden können (vgl. Breustedt & Lenz 1985, S. 21; Bryant & Blank 2009, S. 24f). Da Alginate die Abbindung von Gips verzögern, wird ihnen zum Ausgleich Kaliumsulfat zugemischt, um diesen Effekt zu neutralisieren. Kaliumsulfat führt außerdem zur Bildung glatterer und stabilerer Gipsoberflächen (vgl. O'Brien 2008, S. 403). Marxkors & Meiners (2005, S. 93) schreiben, dass Fluoride einen ähnlichen Effekt haben und zur Vermeidung einer minderwertigen Gipsoberfläche beitragen können. Zur Desinfizierbarkeit schreibt Wöstmann (1998, S. 40), dass ein kurzfristiges Einlegen einer Alginatabformung in ein Desinfektionsbad vertretbar sei. Außerdem sollten Alginatabdrücke vor dem Ausgießen noch mit Trimmerwasser von Speichelresten befreit werden, da diese die Oberflächenqualität beeinflussen können (vgl. Schulz & Schwickerath 1989, S. 37).

Alginate besitzen eine geringere elastische Rückstellung als Silikone, im Schnitt mit 97,3 %. Der Widerstand gegen Druckbelastung und die Reißfestigkeit nehmen mit zunehmender Deformation zu, allerdings besitzen Alginate ein eher geringes Rückstell-

vermögen und es kann zum Ausreißen von interdentalen Anteilen kommen. Die Detailwiedergabegenauigkeit von Alginaten ist aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit und Dimensionsstabilität geringer als die von Silikonen (vgl. Rehberg 1978, S. 68f; Viohl 1996, S. 281; Marxkors & Meiners 2005, S. 93; O'Brien 2008, S. 401f, 404).

In Tabelle 1 sind vor und nachteilig Materialeigenschaften von Alginaten aufgelistet.

Tabelle 1: Überblick über die Eigenschaften von Alginaten (vgl. O'Brien 2008, S. 405)

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
Billig	Geringe Reißfestigkeit
Relativ einfache Anwendung	Nicht dimensionsstabil und müssen deshalb umgehend ausgegossen werden
Angenehmer Geschmack	Nur einmal ausgießbar
Blut und andere Körperflüssigkeiten können verdrängt werden	Niedrigere Wiedergabegenauigkeit und rauere Oberfläche
Hydrophilie	
Gut kompatibel mit Gips	
Mit konfektionierten Abformlöffeln anwendbar	

### **2.3 Additionsvernetzende Silikone als Alginatsubstitute**

Additionsvernetzende Silikone (A-Silikone) werden aufgrund der Verbindungsart auch als Polyvinylsiloxane (PVS) oder Vinylpolysiloxane (VPS) bezeichnet. Die Anwendungsbereiche für diese Abformmaterialien sind sehr vielfältig, so dass A-Silikone aus werkstoffkundlicher Sicht nahezu universell einsetzbar sind. PVS sollen die beste Detailwiedergabegenauigkeit und elastische Rückstellung von allen Abformmaterialien besitzen (vgl. Hamalian et al. 2011).

Die sog. Alginatsubstitute sind A-Silikone, die einen geringeren Preis und geringgradig schlechtere, grundsätzlich jedoch ähnliche Eigenschaften besitzen, wie die teureren A-Silikone, die für Zahnersatzabformungen zum Einsatz kommen (vgl. Boksmann & Toussaint 2010, S. 58).

#### **2.3.1 Zusammensetzung**

Polyvinylsiloxane sind aufgrund der Additionsreaktion, die die Siloxane unter dem Einfluss eines Platinkatalysators verbindet, dimensionsstabil. Die ersten A-Silikone setzten

nach dem Abbindeprozess noch Wasserstoff frei, der den Zeitpunkt zum Ausgießen der Abdrücke, wegen negativen Wechselwirkung für den Gips, verzögerte (vgl. Craig 1988, S. 51). Die meisten A-Silikone wurden jedoch durch die Beimischung von Platinum oder Palladium so modifiziert, dass kein gasförmiger Wasserstoff mehr austrat. Der Wasserstoff führt zu Blasen im Gipsmodell und beeinträchtigte den Abbindeprozess des Gipses (vgl. Hamalian et al. 2011).

A-Silikone bestehen aus Polysiloxanen mit endständigen Vinyl- und Wasserstoffseitenketten, die durch die Additionsreaktion polymerisieren (Abbildung 2). Zwei Pasten werden vermischt, wobei die eine Vinylpolysiloxane und die zweite Polysiloxane mit Wasserstoff als Seitenkette enthält. Außerdem sind in der Katalysatorpaste organische Platinverbindungen enthalten, die den Ablauf der Vernetzungsreaktion erst ermöglichen.

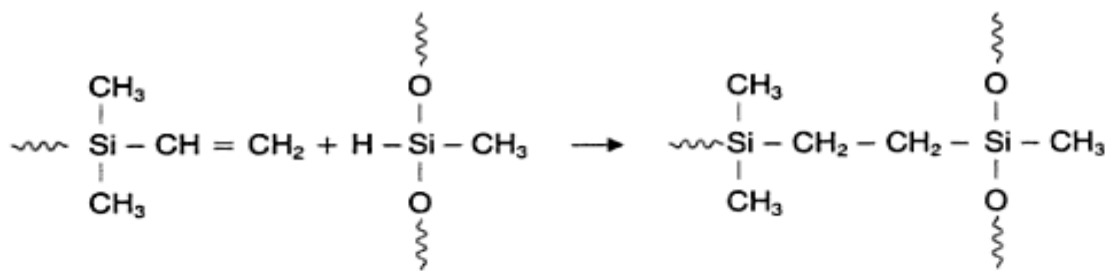


Abbildung 2: Abbindereaktion von A-Silikonem (Marxkors & Meiners 2005, S. 19)

### 2.3.2 Eigenschaften

A-Silikone schrumpfen nur in sehr geringem Maß, da bei der Additionsreaktion keine niedermolekularen, flüchtigen Nebenprodukte entstehen (vgl. Brown 2009). Deshalb besitzen A-Silikone eine sehr gute Dimensionsstabilität (vgl. O'Brien 2008, S. 421f). Abformungen können daher über mehrere Wochen gelagert und mehrfach ausgegossen werden, ohne dass es zu Einbußen der Genauigkeit der Modelle kommt (vgl. Wöstmann 1998, S. 29; Hamalian et al. 2011). Welker, D. & Mehner, M. (1979, S. 399) gehen sogar soweit, dass sie PVS-Abformungen eine praktisch unbegrenzt lange Haltbarkeit zuschreiben, und viele Autoren sind der Meinung, dass Polyvinylsiloxane die besten Werte bezüglich der Dimensionsstabilität von allen Abformmaterialien besitzen (vgl. u. a. Karthikeyan & Annapurni 2007, S. 24). Laut Wöstmann (1998, S. 29) weisen die meisten A-Silikone Dimensionsänderungen von weniger als 0,5 % auf (vgl. Yeh et al. 1980; O'Brien 2008, S. 422f).

A-Silikone sind nach dem Abbinden relativ rigide und besitzen eine adäquate Reißfestigkeit, sodass sie leichter aus dem Mund entnommen werden können, als Polyäther (vgl. Brown 2009; Hamalian et al. 2011). Sie sind jedoch deutlich unnachgiebiger als Alginat. Ihre Reißfestigkeit ist ebenfalls deutlich höher als die von Alginaten (vgl. Nguyen et al. 2005). A-Silikone weisen ein stark elastisches Verhalten und ein hohes Rückstellvermögen auf, so dass nahezu keine bleibende Verformung bei der Entnahme auftritt (vgl. Brown 2009). Aufgrund ihrer hohen Wiedergabegenauigkeit, sind A-Silikone sehr gut für alle Arten von Abformung geeignet (vgl. O'Brien 2008, S. 420f), da sie jedoch relativ teuer sind, werden sie normalerweise nur für Abformungen zur Anfertigung von Zahnersatz verwendet.

Polyvinylsiloxane gibt es in vier verschiedenen Viskositätsgraden, leicht, medium, schwer und Putty, je nach ihrem Gehalt an Siliziumfüllkörpern. Verschiedene Farben der Einzelkomponenten erlauben es, den Vermischungsgrad zu bestimmen (vgl. Hamalian et al. 2011, S. 157).

Die Silikone haben den großen Nachteil, dass sie extrem hydrophob sind. Durch die Zumischung von Tensiden zur besseren Benetzung wurden in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hydrophilisierte Silikone entwickelt (vgl. Marxkors & Meiners 2005, S. 19; O'Brien 2008, S. 421). Allerdings können auch mit diesen Materialien nur unter trockenen Bedingungen gute Abformungen erzielt werden. Die verbesserte Hydrophilie erleichtert jedoch das Ausgießen der Abformungen mit Gips (vgl. Brown 2009).

A-Silikone sind anfällig für Wechselwirkungen mit Schwefelverbindungen, wie sie in Latexhandschuhe oder Kofferdämmen vorkommen. Eine Abformung mit Silikon, das derart verunreinigt ist, kann Imperfektionen aufweisen, die zu Verzerrungen in der Abformung führen, da der Kontakt von unpolymerisierten PVS und Latex zur direkten Hemmung des Polymerisationsprozesses führt (vgl. Wöstmann 1998, S. 29).

A-Silikone haben gute Arbeits- und Abbindezeiten, die durch den Einsatz von sog. Verzögerern vom Hersteller genau eingestellt werden können. Die Abbindezeit beträgt in der Regel zwischen vier und fünf Minuten (vgl. Brown 2009). Der Polymerisationsprozess ist temperaturabhängig, da die Abbindegeschwindigkeit proportional mit der Umgebungstemperatur ansteigt. Die Verarbeitungszeit kann durch vorherige Kühlung um etwa eineinhalb Minuten verlängert werden, ohne dass dadurch die Abformgenauigkeit

beeinträchtigt wird. Dieses Vorgehen kann v. a. bei Abformungen eines kompletten Zahnbogens von Vorteil sein.

Die PVS können mit den meisten Desinfektionsmitteln dekontaminiert werden und sind sauber, geruchs- und geschmackslos, sowie einfach in der Handhabung. Vor dem Ausgießen sollten Abformungen wegen der verzögerten Rückstellung eine Stunde ruhen. Die Verwendung von Automatismischer ist der Handmischung vorzuziehen, da sie schnell und effizient ist und nahezu blasenfrei mischt (vgl. O'Brien 2008, S. 423; Hamalian et al. 2011).

In Tabelle 2 sind vor und nachteilig Materialeigenschaften von A-Silikonen aufgelistet.

Tabelle 2: Überblick über die Eigenschaften von Polyvinylsiloxanen (vgl. O'Brien 2008, S. 423f, 426)

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
Genauere Detailwiedergabe	Teuer
Sehr gute Dimensionsstabilität, die eine Lagerung von mehreren Wochen ermöglicht	Rigide und schwieriger aus Unterschnitten zu entfernen als Alginate
Mehrfach ausgießbar	Hydrophobie
Fast vollständige elastische Rückstellung nach Verformung	Latexhandschuhe und Kofferdamm können die Polymerisation hemmen
Neutraler Geschmack	
Verwendbar mit konventionellen und individuellen Löffeln,	
Sauber	
Hohe Reißfestigkeit	
Gut desinfizierbar	

### **2.3.3 A-Silikone in ihrer Eigenschaft als Alginatersatzmaterialien**

Christensen (2008) beschreibt die Alginatsubstitute als detailgenau und sauber. Sie sind staubfrei, geschmacksneutral und geruchslos, um einen vermehrten Speichelfluss durch Geschmacksstoffe zu vermeiden, und sollen gegenüber Alginaten folgende Vorteile bieten.

Der Zeitpunkt zum Ausgießen einer solcher Abformung ist frei wählbar, es besteht die Möglichkeit die Abformung mehrfach auszugießen und die Genauigkeit und Oberflächengüte wird nicht durch Desinfektionslösungen beeinträchtigt (vgl. Christensen

2008). Allerdings ist ihr Preis laut Christensen (2008) drei- bis fünfmal so hoch wie der der Alginate und vor diesem Hintergrund müssen sich Anwender die Frage stellen, ob die vermeintlich besseren Materialeigenschaften den deutlich höheren Preis bei der Verwendung von Alginatsubstituten rechtfertigen.

Perry (2004) und Boksmann & Tousignant (2010, S. 60) sind der Meinung, dass die materialtechnischen Vorteile der Silikone die höheren Preise mehr als aufwiegen.

Die Anwendungsbereiche für Abformung mit Alginaten bzw. -ersatzmaterialien ergeben sich für folgende Modellarten:

- Situationsmodelle für die Analyse von Zahnformen, Zahnstellungen und Okklusion bzw. zur Unterstützung bei der Behandlungs- und Konstruktionsplanung in allen zahnärztlichen Disziplinen.
- Vormodelle als Arbeitsunterlage für die Anfertigung von individuellen Abformlöffeln, Knirsch- und Bleachingschienen.
- Reparaturmodelle, welche es ermöglichen, Bruchstücke in korrekter Lagebeziehung wieder zusammenzufügen.
- Gegenbissmodelle, welche die Gestaltung okkludierender Flächen in Bezug auf die antagonistischen Verhältnisse ermöglichen.

(vgl. Borchers, L. 1996, S. 1)

Desweiteren können Abformungen mit solchen Materialien als Negative zur Herstellung von provisorischem Zahnersatz verwendet werden.

### 3. Ziel der Arbeit

Obwohl Abformwerkstoffe regelmäßig untersucht werden, machen die permanente Verbesserung und Weiterentwicklung dieser Materialien immer neue werkstoffkundlich-vergleichende Analysen erforderlich.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Alginatersatzmaterialien auf Basis von A-Silikonen mit konventionellen Alginaten zu vergleichen. Verschiedene experimentelle Werkstoffprüfungen wurden durchgeführt, um ausgewählte mechanische Eigenschaften zu testen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Abschließend erfolgt die Bewertung der Ergebnisse. Die Unterschiede von Alginaten und Alginatersatzmaterialien und ihre Relevanz für den klinischen Alltag sollen betrachtet werden, um ein aktuelles Fazit zur Bedeutung von Alginatersatzmaterialien ziehen zu können.

Von besonderem Interesse sind dabei die folgenden Fragen:

- a) Wie unterscheiden sich die Alginate und Alginatsubstitute bezüglich ihrer Materialeigenschaften?
- b) Können durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften Empfehlung für die Anwendungen der beiden Abformmaterialien abgeleitet werden?

Die ermittelten Messwerte wurden statistisch miteinander verglichen, um die Eigenschaften der getesteten Alginate und Silikone zu vergleichen und Unterschiede zwischen den Materialien identifizieren zu können.

Es wird versucht, anhand der Ergebnisse darzustellen, welche Vorteile die Alginatersatzmaterialien bezogen auf die Anwendungsbereiche von Alginatabformungen besitzen.

Zunächst folgt eine Beschreibung der Materialien und Methoden, sowie der Einschränkungen bzw. Limitation der angewandten Normverfahren, bevor die Ergebnisse und deren Interpretationen präsentiert werden.

Alle Fotos in den beiden folgenden Kapiteln, die Probekörperformen, Messgeräte und Versuchsaufbauten zeigen, wurden vom Verfasser während der Messungen zur Dokumentation angefertigt und sind als eigenes Bildmaterial gekennzeichnet.

## 4. Material und Methoden

Nachdem die Zielstellung dieser Arbeit formuliert wurde, geht es in diesem Kapitel um die im Rahmen der Studie verwendeten Materialien. Außerdem werden die Untersuchungsmethoden, Messverfahren und Messgeräte, sowie deren Einschränkungen vorgestellt und beschrieben.

### 4.1 Verwendete Abformmaterialien

In dieser Arbeit wurden vier Alginat- und acht Alginat-substitute, Typ 2-Silikone von mittelfließender Viskosität getestet. In Tabelle 3 sind Produktnamen, Herstellerfirmen, Materialart, Chargennummern, Anmischart und die vom Hersteller angegebenen Abbindezeiten aufgelistet.

Tabelle 3: Auflistung der getesteten Abformmaterialien

Handelsname	Firma	Chargennummer	Materialart	Mischform	Abbindezeit in [min]
Alginoplast Regular Set	Heraeus Kulzer	LOT. 3458167	Alginat	Hauschild Mischgerät	3,0
Blueprint XCreme	Dentsply Caulk	LOT. 1105126962	Alginat	Hauschild Mischgerät	1,85
Jeltrate Regular Set	Dentsply Caulk	LOT. 1109121	Alginat	Hauschild Mischgerät	3,5
Xantalgin select Fast Set	Heraeus Kulzer	LOT. 3258044	Alginat	Hauschild Mischgerät	2,0
AlgiNot FS Cartridge	Kerr	LOT. 1-2301	A-Silikon	Mischpistole	2,5
AlgiNot FS Volume	Kerr	LOT. 1-1244	A-Silikon	Dynamix-Speed Mischgerät	2,75
AlginX Ultra Cartridge	Dentsply Caulk	LOT. 111012	A-Silikon	Mischpistole	2,5
Position Penta	3M ESPE	LOT. 457414	A-Silikon	Dynamix-Speed Mischgerät	3,0
Silginat	Kettenbach	LOT. 110311-102	A-Silikon	Dynamix-Speed Mischgerät	3,0



Status Blue	DMG	LOT. 669802	A-Silikon	Dynamix-Speed Mischgerät	3,0
Xantasil Cartridge fast set	Heraeus Kulzer	Testkartusche	A-Silikon	Mischpistole	2,5
Xantasil Dynamix fast set	Heraeus Kulzer	Testkartusche	A-Silikon	Dynamix-Speed Mischgerät	2,5

Zum Anmischen der Silikone wurden verschiedene Mischsysteme verwendet. Das Dynamix-Speed Mischgerät (s. Abbildung 3), mischt Basis- und Katalysatorpaste im Volumenverhältnis 5:1, im Fall von Status Blue im Verhältnis 4:1. Die Mischpistole mischt Materialien im Verhältnis 1:1 (s. Abbildung 4).



Abbildung 3: Dynamix-Speed Mischgerät (eigenes Bildmaterial)



Abbildung 4: Mischpistole (eigenes Bildmaterial)

Bei Verwendung der Dynamix-Speed-Mischmaschine wird zunächst die jeweils zum Material passende Mischdüse aufgesetzt, die Ausförderung gestartet, so viel gemischtes Material verworfen, bis das Gemisch homogen erscheint. Erst jetzt wird das Material in die Negativform der jeweiligen Probekörper gefüllt, ohne dass der Auswurf dazu unterbrochen wird.

Bei den Silikonen, die mit der Mischpistole verwendet werden, wird zuerst so viel ungemischtes Material verworfen, bis beide Massen homogen erscheinen und die Füllstände beider Kammern angeglichen sind. Dann wird die Mischdüse auf die Materialkartusche aufgesetzt und arretiert. Wieder wird so viel gemischtes Material verworfen, bis das gemischte Material homogen erscheint. Dann wird das Material zügig in die Probekörperform appliziert.

Tabelle 4: Alginatdosierungen mit dem Verhältnis Pulver [g] : destilliertes Wasser [ml]

Alginoplast	Blueprint XCreme	Jeltrate	Xantalgin
23 : 50	15,87 : 34	7 : 19	21 : 50

In Tabelle sind die vom Hersteller vorgeschriebenen Mischungsverhältnisse der getesteten Alginat-



Abbildung 5: Hausschild Mischgerät (eigenes Bildmaterial)

angegeben. Alginatpulver und Wasser werden nach diesen Vorgaben dosiert und in einer Hausschild-Mischmaschine (s. Abbildung 5) maschinell zehn Sekunden lang bei 3400 Umdrehungen pro Minute gemischt. Zum Anmischen wird, wie in der Norm DIN EN ISO 21563 beschrieben, entsalztes Wasser von  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  verwendet. Das Pulver wird vor dem Abwiegen aufgelockert, um optimale Mischergebnisse zu erhalten (vgl. DIN EN ISO 21563, S. 3). Zur Lagerung der Alginatprobekörper wurden sog. Exsikkatoren (s. Abbildung 6)

verwendet, in denen Lagerungsbedingungen simuliert werden können, unter denen Alginatabdrücke transportiert werden, in feuchte Tücher und in einer luftdichten Plastiktüte verpackt. Unter diesen Bedingungen (Temperatur:  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , relative Luftfeuchtigkeit: 100 – 10 %) wurden die Alginatprobekörper vom Zeitpunkt ihrer Entformung bis zum Zeitpunkt der Messung gelagert und anschließend wieder in die Exsikkatoren gebracht.



Abbildung 6: Alginatprobekörper in Exsikkatoren (eigenes Bildmaterial)

## 4.2 Untersuchungsmethoden

Zur Untersuchung der werkstoffkundlichen Eigenschaften der Abformmaterialien wurden folgende Werkstoffprüfungen durchgeführt:

- Verformung unter Druck
- Elastische Rückstellung nach Verformung
- Detailwiedergabegenauigkeit

- Dimensionsänderung nach 1, 2, 5, 7 und 14 Tagen
- Reißfestigkeit
- Reißdehnung
- Reißenergie bzw. Toughness
- E-Modul
- Homogenität

Bei allen Messungen wurden die vom Hersteller angegebenen Abbindezeiten genau eingehalten. Zur Simulation der intraoralen Verhältnisse zum Abbinden werden die Probekörper in ein Wasserbad mit einer Temperatur von  $35 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  eingebracht. Die verwendeten Abformwerkstoffe sowie alle verwendeten Geräte und Materialien wurden über den Zeitraum von einer Woche vor Beginn der Messung bis zum Abschluss aller Messungen kontinuierlich bei einer Zimmertemperatur von  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $50 \pm 10 \text{ } \%$  gelagert (vgl. DIN EN ISO 21563, S. 3; DIN EN ISO 4823, S. 9f). Dadurch wurden für alle Versuche durchgehend stabile Verhältnisse für eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse garantiert.

Um möglichst viele subjektive Fehler zu vermeiden, werden die Versuche außerdem unter immer gleichen Bedingungen, wie zeitlichen Abläufen und Geschwindigkeiten, und von derselben Person durchgeführt. Vor Beginn jeder Messung werden die Funktionen aller Teile der jeweiligen Messvorrichtungen kontrolliert und, falls notwendig, korrigiert (vgl. DIN EN ISO 4823, S. 10).

#### **4.2.1 Verformung unter Druck**

„[Die] Prüfung auf Verformung unter Druck [stellt eine] Methode zur Messung der Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit von elastomeren Abformmassen [dar] mit dem Ziel festzustellen, ob das abgebundene Material in Form einer Abformung 1) ohne Verletzung des abgeformten Mundgewebes aus dem Mund entfernt werden kann und 2) ausreichend widerstandsfähig ist, um in den flexibleren Teilen der Abformung beim Eingießen von Modellmaterialien nicht deformiert zu werden.“

(DIN EN ISO 4823, S. 7)

Durch die Bestimmung dieser Materialeigenschaft lässt sich eine Einteilung der Abformmaterialien bezüglich ihrer Nachgiebigkeit vornehmen. Nach den Vorgaben in den zutreffenden Normen soll die Verformbarkeit zwischen zwei und 20 Prozent für Silikone bzw. fünf und 20 Prozent für Alginat betragen (vgl. DIN EN ISO 4823, S. 9).

#### 4.2.1.1 Probekörperherstellung

Für die Messung der Verformung unter Druck wurden zylindrische Probekörper hergestellt. Die metallene Negativform war zur einfacheren Entnahme der Probekörper teilbar und ergab eine Hohlform mit 20 mm Länge und 12,5 mm Durchmesser. Die zusammengesetzte Form wurde auf eine mit Polyethylenfolie bedeckte Metallplatte gestellt, im Überschuss befüllt und dann nochmal mit einer Polyethylenfolie und einer Metallplatte abgedeckt. Mit einer Schraubpresse wurden die Überschüsse abgepresst, so dass



Abbildung 7: Negativform der zylindrischen Probekörper (eigenes Bildmaterial)

ein solider Zylinder aus Abformmasse entstand. Die geschlossene Schraubzwinge wurde bis zum Ende der jeweiligen Abbindezeit in dem warmen Wasserbad belassen. Vom Ende des Mischvorgangs bis zum Einbringen ins Wasserbad mussten exakt 60 Sekunden verstreichen. Nach der Abbindezeit wurde die Schraubzwinge aus dem Wasser entnommen und der Probekörper möglichst schnell entformt. Abbildung 7 zeigt die Bestandteile der Negativform und die Schraubzwinge.

#### 4.2.1.2 Versuchsaufbau und –durchführung

Die zur Messung der Verformung unter Druck angewandte Methode entspricht den Vorgaben der entsprechenden Normen (vgl. DIN EN ISO 21563; DIN EN ISO 4823).

Tabelle 5: Versuchsablauf Verformung unter Druck

Arbeitsschritte	Zeitlicher Ablauf Alginate	Zeitlicher Ablauf Silikone
<b>Entnahme aus dem Wasserbad</b>	Ende der Abbindezeit = t	
<b>Einstellen des Probekörpers in das Gerät und Absenken des Lastarmes</b>	t + 60 s	
<b>AbleSEN des Messwertes h1</b>	t + 90 s	
<b>Erhöhung der Last auf 12,25 ± 0,1 N über 10 s</b>	t + 120 s	t + 95 s
<b>AbleSEN des Messwertes h2</b>	t + 150 s	t + 135 s

In Tabelle 5 sind die einzelnen Schritte der Messung in der zeitlichen Reihenfolge dargestellt. Abbildung 8 zeigt die verwendete Prüfvorrichtung. Die eigentliche Messung begann mit dem Zeitpunkt der Entnahme des Probekörpers aus dem Wasserbad, also mit Ende der Abbindezeit. Der Probekörper wurde zentral mit dem Gewicht der Laststange des Messgerätes belastet ( $1,22 \pm 0,1$  N). Nachdem diese Kraft für exakt 30 Sekunden auf den Probekörper eingewirkt hatte, wurde der Wert auf der Messuhr am Ende der Laststange als Ausgangsdeformation  $h_1$  notiert.

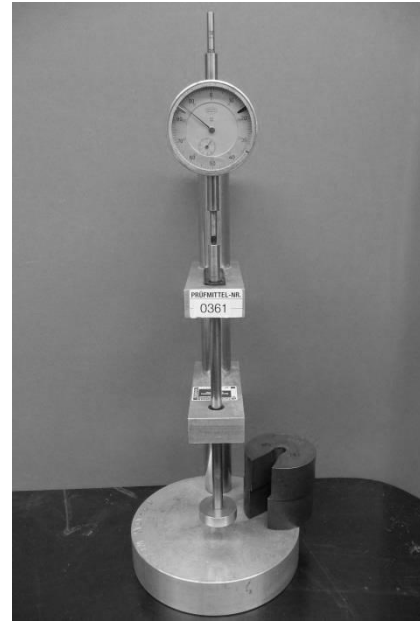


Abbildung 8: Prüfvorrichtung Verformung unter Druck (eigenes Bildmaterial)

Nach weiteren 30 Sekunden für die Alginat- bzw. fünf Sekunden für die Silikonprobekörper wurde die Kraft über zehn Sekunden auf  $12,25 \pm 0,1$  N erhöht und nach wiederum 30 Sekunden der Wert  $h_2$  als abschließender Wert für die Deformation notiert.

#### 4.2.1.3 Einschränkungen

Die Zeitspannen zwischen der initialen Belastung des Probekörpers mit der Messstange und der Erhöhung des Gewichts für Alginat und Silikon waren unterschiedlich lang. Bei den Alginaten wurde 30 Sekunden und bei den Silikon fünf Sekunden nach Ablese des ersten Messwertes gewartet, bevor das Gewicht erhöht wurde. Dieser Unterschied von 25 Sekunden bis zur maximalen Belastung ergab sich aus den unterschiedlichen Angaben für die Normmessverfahren. Der Vergleich der Ergebnisse ist trotz dieses Unterschieds möglich, da die Alginat, die nachgiebiger sind, dadurch mehr Zeit hatten, einen ähnlich großen inneren Widerstand wie die Silikon aufzubauen.

#### 4.2.1.4 Berechnung der Ergebnisse

Der Prozentsatz der Verformung unter Druck,  $E$ , wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel berechnet:

$$E = 100 \cdot ((h_1 - h_2) / h_0) \text{ in Prozent}$$

Dabei ist

h0 Höhe des geteilten inneren Ringes (20,00 mm);

h1 gemessene Höhe nach exakt 30 s andauernder Anfangsbelastung;

h2 gemessene Höhe nach exakt 30 s andauernder maximaler Belastung;

#### **4.2.2 Elastische Rückstellung nach Verformung**

„[Die] Prüfung der elastischen Rückstellung nach Verformung [stellt eine] Methode zur Bestimmung [dar], ob eine elastomere Abformmasse genügend elastisch ist, um sich im angemessenen Umfang zurückzustellen, wenn sie bei Entnahme der Abformung aus dem Mund deformiert wurde.“

(DIN EN ISO 4823, S. 6)

Nach den Anforderungen in den Normen müssen Alginateabformmassen mindestens eine 95 % - ige Rückstellung und Elastomere eine Rückstellung mindestens 96,5 % aufweisen (vgl. DIN EN ISO 21563, S. 3; DIN EN ISO 4823, S. 9; DIN 53504, S. 9). Idealerweise sollte die Rückstellung zu 100 % erfolgen, jedoch gibt es kein Abformmaterial, das ein vollständig elastisches Verhalten aufweist.

##### **4.2.2.1 Probekörperherstellung**

Die Probekörperherstellung erfolgte analog zu dem unter 4.2.1.1 beschriebenen Vorgehen.

##### **4.2.2.2 Versuchsaufbau und –durchführung**

Das Prüfgerät zur Messung der elastischen Rückstellung nach Verformung entspricht den Vorgaben aus den Normen (vgl. DIN EN ISO 21563; DIN EN ISO 4823). Tabelle 6 zeigt die genauen zeitlichen Abläufe der Untersuchung der elastischen Rückstellung nach Verformung für die Alginate und Silikone.

Tabelle 6: Versuchsablauf elastische Rückstellung

Arbeitsschritte	Zeitlicher Ablauf Alginate	Zeitlicher Ablauf Silikone
Entnahme aus dem Wasserbad	Ende der Abbindezeit = t	
Einstellen des Probekörpers in das Gerät und Absenken des Tasters der Messuhr	t + 45 s	
Ablezen des Messwertes h1	t + 55 s	
Stauchung des Probekörpers für 5 s und Abheben des Tasters	t + 60 s	
Erneutes Absenken des Tasters	t + 90 s	t + 170 s
Ablezen des Messwertes h2	t + 100 s	t + 180 s

Abbildung 9 zeigt die verwendete Prüfvorrichtung. Die eigentliche Messung begann mit

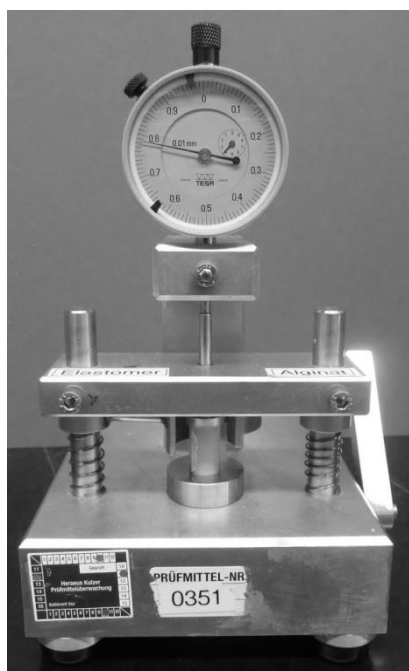


Abbildung 9: Prüfvorrichtung elastische Rückstellung (eigenes Bildmaterial)

dem Ende der jeweiligen Abbindezeit. Der Probekörper wurde mittig unter dem Taster der Messuhr positioniert, der Taster vorsichtig auf die Probe abgesenkt und der Wert h1 nach zehn Sekunden als Ausgangswert notiert. Nach fünf Sekunden unter der Anfangsbelastung durch den Taster wurde der Probekörper deformiert. Silikonprobekörper wurden innerhalb einer Sekunde um  $6 \pm 0,1$  mm komprimiert und diese Belastung wurde über fünf Sekunden wieder abgebaut. Alginatprobekörper wurden innerhalb einer Sekunde um  $16 \pm 0,1$  mm komprimiert, dieser Druck über  $5 \pm 0,5$  Sekunden konstant gehalten und der Taster danach sofort abgehoben.

Nach 25 Sekunden wurde bei Alginatprobekörpern und nach 105 Sekunden bei Silikonprobekörpern der Taster erneut auf den Probekörper abgesenkt und nach 10 Sekunden Belastung mit dem Gewicht des Tasters der Wert h2 als Höhe des Probekörpers nach erfolgter Rückstellung notiert.

#### 4.2.2.3 Einschränkungen

In den entsprechenden Prüfnormen sind dünne Glasplättchen beschrieben, die zwischen Messvorrichtung und Probekörper positioniert werden sollten. Diese konnten mit der verwendeten Prüfvorrichtung nicht benutzt werden, weil die Deformation sonst zu groß gewesen wäre. Da das verwendete Prüfgerät feste Abstandshalter enthielt, um die vorgeschriebenen Deformationen exakt zu erreichen, wäre durch den Einsatz der Glasplättchen die Verformung jeweils um den Betrag der Dicke der Glasplättchen verfälscht worden, was zu falschen Messergebnissen geführt hätte. Die Normverfahren unterscheiden sich in den Zeiten und Deformationsgraden doch erheblich, so dass die Messergebnisse aufgrund dieser Unterschiede nur bedingt verglichen werden konnten. Die Alginatprobekörper wurden um 16 mm, die Silikone nur um sechs Millimeter verformt. Auch die Relaxationszeiten für die beiden Materialarten sind unterschiedlich lang. Die Alginate wurden 30 Sekunden und die Silikone 110 Sekunden lang nach der Kompression nicht belastet, in denen dem Probekörper Zeit gegeben wurde sich zurückzustellen. Aufgrund dieser Unterschiede bei den Messverfahren, müssen die Ergebnisse und v. a. die Vergleiche zwischen den Alginaten und Silikonen als Tendenzen angesehen werden. Um definitive Aussagen zum Vergleich der elastischen Rückstellung von Alginaten und Silikonen treffen zu können, müssen nochmals Versuche mit einheitlichen Prüfverfahren durchgeführt werden.

#### 4.2.2.4 Berechnung der Ergebnisse

Der Prozentsatz der elastischen Rückstellung nach Verformung,  $K$ , wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel berechnet:

$$K = 100 - [100 ((h_1 - h_2) / h_0)] \text{ in } \%$$

Dabei ist

$h_0$  Höhe des geteilten inneren Ringes (= 20,00 mm);

$h_1$  gemessene Höhe bei exakt  $t + 55$  s, d. h. unmittelbar vor Deformation;

$h_2$  gemessene Höhe bei exakt  $t + 180$  s bzw.  $t + 115$  s, d. h. nach dem Aufheben der deformierenden Kraft.



### 4.2.3 Detailwiedergabegenauigkeit

„Die Detailwiedergabe ist die Genauigkeit der Wiedergabe feinsten Oberflächenstrukturen. Sie [...] hängt von der Struktur des Abformmaterials, dessen Quasiviskosität zum Zeitpunkt des Abformens und dem Abformdruck ab.“

(Breustedt & Lenz 1985, S. 39)

Mit dem Normprüfverfahren kann eine Wiedergabegenauigkeit von bis zu 20 µm festgestellt werden. Laut den Anforderungen müssen Alginate in der Lage sein die 50 µm-Linie und Silikone die 20 µm-Linie unterbrechungsfrei wiederzugeben (vgl. DIN EN ISO 21563, S. 2).

#### 4.2.3.1 Probekörperherstellung

Zur Messung der Detailwiedergabegenauigkeit wurden scheibenförmige Probekörper verwendet. Da aus Zeitgründen mehrere Negativformen zur Herstellung der Probekörper verwendet wurden, wiesen die Negativformen und somit auch die Probekörper zur besseren Unterscheidbarkeit Ziffern auf (s. Abbildung 10). Die Negativformen zeigten fünf eingravierte Rillen auf und waren zur leichteren Entformung der Probekörper teilbar. Insgesamt ergab sich eine Hohlform mit  $29,97 \pm 0,01$  mm Durchmesser und 3 mm Tiefe.

Die drei parallel und waagrecht verlaufenden Rillen hatten Breiten von  $50 \pm 8$  µm,  $20 \pm 4$  µm und  $75 \pm 8$  µm. Die beiden senkrecht verlaufenden Rillen schnitten die drei waagrecht in  $90^\circ$  Winkeln und waren  $75 \pm 8$  µm breit.

Die zusammengesetzte Form wurde überschüssig befüllt, eine Metallplatte und Polyethylenfolie so aufgesetzt, dass sich das Material ohne Blasen zu bilden in die Rillen drückte, als die Überschüsse mit einer Schraubzwinde abgepresst wurden. Nach dem Abbinden des Probekörpers wurde weitere drei Minuten gewartet, bevor die Metallform zum Entformen so geteilt wurde, dass der Probekörper im Ring verblieb und mit einem Stempel verformungsfrei ausgelöst werden konnte.

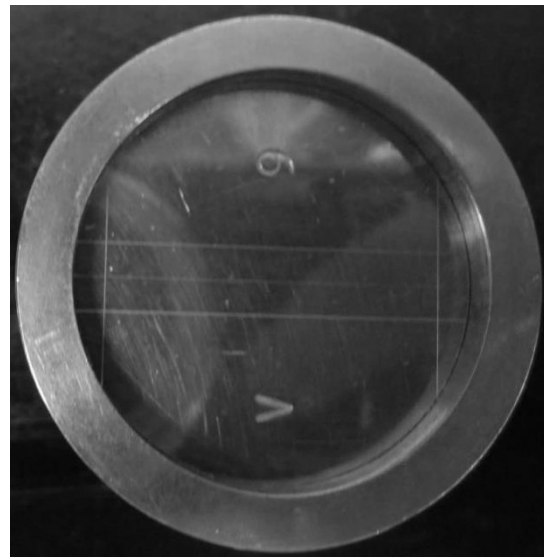


Abbildung 10: Probekörpernegativform Detailwiedergabegenauigkeit und Dimensionsstabilität (eigenes Bildmaterial)

#### **4.2.3.2 Versuchsaufbau und -durchführung**

Das Verfahren zur Messung der Detailwiedergabegenauigkeit wurde in Anlehnung an die Normverfahren durchgeführt (vgl. DIN EN ISO 21563; DIN EN ISO 4823). Nach dem Entformen wurde der Probekörper auf die Durchgängigkeit der abgebildeten Linien untersucht. Dazu wurde Schräglichtbeleuchtung verwendet. Die jeweils dünnste durchgängig abgebildete Linie wurde als Ergebnis für die Detailwiedergabe angegeben.

#### **4.2.3.3 Einschränkungen**

Auf ein Vortemperieren der Metallformen wurde verzichtet, da die Metallform nach dem Befüllen sowieso für die Dauer bis zum Ende der jeweiligen Mundverweildauer in ein temperiertes Wasserbad gesetzt wurde, was bereits zum vollständigen Abbinden der Materialien ausreichte, und in Vorversuchen kein Unterschied zwischen Probekörper aus vortemperierten und solchen aus nicht vortemperierten Metallformen festgestellt werden konnte. Die Beurteilung der Linien konnte aufgrund der zweifelsfreien Durchgängigkeit der Linie sogar ohne Vergrößerungshilfe durchgeführt werden. Abweichend zum Normverfahren wurden keine Gipsabdrücke der Alginatprobekörper angefertigt und vermessen, da dies die Messung der linearen Maßänderung an diesen Probekörpern unmöglich gemacht hätte (vgl. DIN EN ISO 21563).

#### **4.2.4 Dimensionsänderung**

„Das Dimensionsverhalten der Abformwerkstoffe bestimmt die Form- und Maßabweichungen von Abformnegativen nach ihrem Entfernen aus der Mundhöhle bis zum Modellherstellen. Es umfaßt die thermische Kontraktion beim Abkühlen von Mund- auf Raumtemperatur(,) die Kontraktion als Folge der fortschreitenden Vernetzung während der Lagerung(,) die Kontraktion durch Verdunsten von Bestandteilen von Grundmasse oder Vernetzer und gegebenenfalls die Quellung unter Einfluß von Feuchtigkeit.“

(Breustedt & Lenz 1985, S. 40)

Nach den Normanforderungen darf die Dimensionsänderung von Silikonabformmasse nach 24 Stunden maximal 1,5 % betragen (vgl. DIN EN ISO 4823, S. 9). Für Alginate gibt es kein Normverfahren zur Ermittlung der Dimensionsänderung, da allgemein bekannt ist, dass Alginatabformungen umgehend nach der Abformung ausgegossen werden sollen.

#### 4.2.4.1 Probekörperherstellung

Zur Messung der Dimensionsänderung wurden dieselben Probekörper vermessen, die schon zur Beurteilung der Detailgenauigkeit hergestellt worden waren (s. 4.2.3.1 Probekörperherstellung).

#### 4.2.4.2 Versuchsaufbau und -durchführung

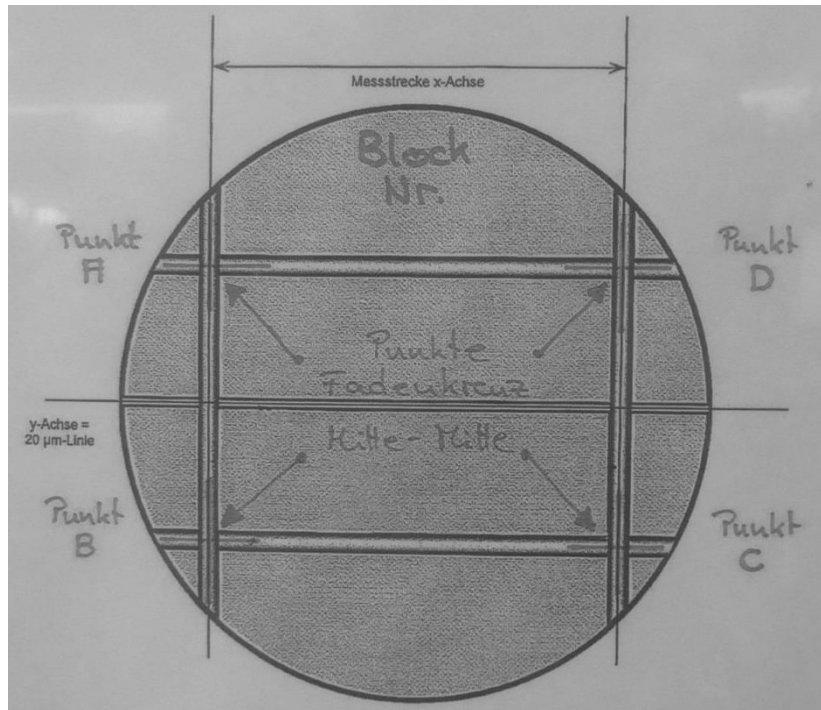


Abbildung 11: Messverfahren Dimensionsstabilität (eigenes Bildmaterial)

Die Dimensionsänderung wurde mit einem Verfahren bestimmt, das sich an der Messung der linearen Maßänderung nach dem Normverfahren orientiert (vgl. DIN EN ISO 4823). Die Dimensionsänderung wurde nach einem, zwei, fünf, sieben und 14 Tagen gemessen. Bei der angewandten Messmethode musste lediglich die Lage der vier Positionskoordinaten bestimmt werden, an denen sich die waage- und senkrechten Linien schneiden, um die Schrumpfung der Probekörper im Vergleich zur Metallform zu berechnen. Abbildung zeigt, dass die Schnittpunkte der beiden senkrechten mit den waagerechten 75 µm- und 50 µm-Linien unter mikroskopischer Vergrößerung ermittelt wurden. Zur Überprüfung, ob die Schrumpfung gleichmäßig stattfand, wurden jeweils zwei vertikale Linien berechnet, die durch die Messpunkte definiert waren und idealerweise parallel verlaufen sollten. Der Abstand dieser konstruierten Linien zueinander wurde mehrfach gemessen, der Mittelwert L2 errechnet und dieser mit dem mittleren

Abstand aus der Messung der Metallform L1 verglichen. Diese Vergleiche erfolgten automatisch, nachdem die Koordinaten der Schnittpunkte A bis D in eine Excel-Tabelle übertragen worden waren und die so ermittelten Maße des Prüfkörpers automatisch mit denen der zugehörigen Metallform verglichen wurden. So wurde die prozentuale Schrumpfung ermittelt. Ein Vorteil dieser Methode gegenüber der Normmethode besteht darin, dass eine geringe Gefahr zur versehentlichen Deformation der Probekörper bei der Positionierung unter dem Mikroskop besteht, da durch das Messprogramm keine exakt waagerechte Ausrichtung der horizontalen Linien für die Messung mehr nötig ist und kleinere Abweichungen automatisch ausgeglichen werden können. Ein anderer Vorteil ist, dass die angewandte Methode durch die automatische Winkelmessung deutlich besser ungleichmäßige Deformationen erkennen und somit ungültigen Messungen von der Statistik ausschließen kann.

Zwischen den einzelnen Messungen an den verschiedenen Tagen wurden die Probekörper auf Pergamentpapier gelagert, um eine Anheftung an die Unterlage zu verhindern und eine von äußeren Kräften unbeeinflusste Schrumpfung zu gewährleisten. Die Alginateprobekörper wurden nach ihrer Herstellung und zwischen den einzelnen Messungen zusätzlich stets in Exsikkatoren bei 100 % - iger Luftfeuchtigkeit (-10 %) und  $23 \pm 2$  °C Lufttemperatur gelagert.

#### **4.2.4.3 Einschränkungen**

Das zur adhäsionsminimierenden Lagerung verwendete Pergamentpapier hat die gleiche Funktion wie das in der Norm beschriebene Talkumpulver. Es ist streitbar, ob Alginateabformung tatsächlich über so lange Zeiträume gelagert werden, wie in dieser Studie simuliert wurde, jedoch mussten zum Vergleich der Dimensionsänderung von Alginaten und Silikonen gleiche Bedingungen angewandt werden.

#### **4.2.4.4 Berechnung der Ergebnisse**

Der Prozentsatz der Dimensionsänderung,  $\Delta L$ , wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel errechnet:

$$\Delta L = (L2 / L1 \times 100) - 100 \text{ in } \%$$

Dabei ist	L2	gemessene mittlere Länge zum jeweiligen Messzeitpunkt
	L1	gemessene mittlere Länge der Metallform

#### 4.2.5 Zugversuch

„Der Zugversuch [...] ist der Grundversuch der statischen Festigkeitsprüfungen. Eine stabförmige Probe wird in einer Zerreißmaschine zügig verlängert, wobei Belastung und Verlngung kontinuierlich gemessen werden.“

(Finger 1996, S. 386)

Wichtige Parameter sind in diesem Zusammenhang u. a. Reißfestigkeit, Reißdehnung, Reißenergie bzw. Toughness sowie das Elastizitätsmodul. Die genauere Beschreibung dieser Parameter erfolgt unter 4.2.5.4.

##### 4.2.5.1 Probekörperherstellung

Zur Messung der Reißfestigkeit wurden sogenannte Schulterstbe vom Typ S2 verwendet mit einer Steglänge von 25 mm und einer Stegbreite von  $4 \pm 0,05$  mm sowie einer Stegdicke von  $2 \pm 0,2$  mm (vgl. DIN 53504, S. 10f). Die metallene Negativform bestand aus einer Grundplatte, auf der sechs Trennplttchen passgenau und plan auflagen. Nach dem überschüssigen Befüllen der Form mit dem jeweiligen Material wurde dann eine plane Deckplatte aufgelegt und die Überschüsse mit einer hydraulischen Presse zehn Minuten lang mit drei Bar Druck abpresst, um möglichst uniforme und gleich dimensionierte Probekörper zu erhalten. Nach dem Entformen der Probekörper, wurden diese zum Ausgleich eventuell stattgefundener Deformationen für 50 Minuten auf Pergamentpapier gelagert. Die Alginatprobekörper wurden außerdem wieder in Exsikkatoren aufbewahrt.

##### 4.2.5.2 Versuchsaufbau und –durchführung

Der Zugversuch und die Ermittlung der Parameter erfolgte analog den Vorgaben aus der Norm (vgl. DIN 53504).

Genau eine Stunde nach Mischende wurde die eigentliche Messung begonnen. Der Prüfkörper wurde dazu zunächst mittig in die obere Spannbacke einer Zwick-1435-Maschine, die für den Zugversuch eingerichtet war, eingehängt, die Kraft genullt, der Probekörper dann an der unteren Spannbacke fixiert, ohne ihn dabei zu dehnen. Unter einer Vorspannung von  $< 0,1$  MPa und mit einer Vorschubgeschwindigkeit

< 50 mm / min wurde der Probekörper leicht vorgedehnt, bevor die Weglängenaufnehmer angelegt und der Zugversuch gestartet wurde. Der Probekörper wurde dazu mit einer konstanten Abzugsgeschwindigkeit von 500 mm / min, statt 200 mm / min, die für S2-Prüfkörper in DIN 53504 (S. 13) beschrieben sind, bis zum Zerreißen auseinandergezogen und die ermittelten Daten, sprich die Verlaufsänderung der Dicke des Probekörpersteges durch einen angeschlossenen Computer in die jeweiligen Werte der einzelnen Parameter umgerechnet.

Probekörper, die an der Rissstelle Luftblasen aufwiesen, wurden aus den Ergebnistabellen gelöscht. Ausreißer wurden mittels Ausreißertest nach Grubbs ( $\alpha = 5\%$ ,  $n \geq 5$ ) ermittelt und nicht in die Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichung übernommen.

#### **4.2.5.3 Einschränkungen**

Aufgrund der großen Streuung der Ergebnisse der ersten zehn Einzelmessungen mussten für das Material *Jeltrate* fünf weitere Einzelmessungen vorgenommen werden. Die große Streuung der Messwerte konnte jedoch auch für die neu hergestellten Probekörper beobachtet werden, so dass diese Streuung vermutlich nicht auf Fehlern bei Herstellung oder Messung beruht, sondern durch eine erhöhte Inhomogenität des angemischten Materials hervorgerufen wird.

#### **4.2.5.4 Bestimmung der einzelnen Parameter**

##### **4.2.5.4.1 Reißfestigkeit**

„Als Festigkeit eines Werkstücks bezeichnet man die Kraft, die man aufwenden muß, um es zu brechen oder irreversibel zu verformen. Auch die Festigkeit hängt wieder von der Art des betreffenden Materials und von der Dimensionierung des Werkstücks ab. Im Zugversuch wird die Festigkeit mit Hilfe der Streckspannung, der Zugfestigkeit und der Reißfestigkeit des untersuchten Probekörpers gemessen.“

(Retting 1991, S. 16)

Dabei beschreiben die Begriffe „Zugfestigkeit“ und „Reißfestigkeit“ zwei unterschiedliche Punkte auf der Linie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, obwohl sie häufig synonym verwendet werden. Die Zugfestigkeit gibt die maximale Spannung im Zugversuch an, wohingegen die Reißfestigkeit die Spannung zum Versagenszeitpunkt darstellt. Bei

Silikonabformmaterialien sind beide Festigkeitswerte oft nahezu identisch (vgl. Balkenhol et al. 2005, S. 95).

Die Reißfestigkeit ist, genauer gesagt, der Quotient aus der im Augenblick des Reißens gemessenen Kraft und dem Anfangsquerschnitt des Probekörpers.

Die Reißfestigkeit,  $\sigma_R$ , wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma_R = FR / A_0 \text{ in MPa oder N / mm}^2$$

Dabei ist

$\sigma_R$  die Reißfestigkeit in MPa oder N/mm<sup>2</sup>

FR die Kraft beim Reißen in N

A<sub>0</sub> der Anfangsquerschnitt in mm<sup>2</sup>

(vgl. DIN 53504, S. 14f)

#### 4.2.5.4.2 Reißdehnung

„Die Deformierbarkeit des Werkstücks ist je nach dessen Verwendungszweck die Deformation, bei der es bricht oder bei der es sich irreversibel verformt, d. h. allgemein die Deformation, bei der es „versagt“. Auch diese Eigenschaft hängt vom Material und von der Dimensionierung des betreffenden Fertigteils ab. Die zugehörigen Kennwerte des Zugversuchs sind die Streckdehnung und die Reißdehnung.“

(Retting 1991, S. 16)

Die Reißdehnung stellt den Quotienten aus der im Augenblick des Reißens gemessenen Längenänderung gegenüber der Ausgangslänge dar.

Die Reißdehnung,  $\epsilon_R$ , wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel berechnet:

$$\epsilon_R = [(LR - L_0) / L_0] \times 100 \text{ in \%}$$

Dabei ist

$\epsilon_R$  die Reißdehnung in %

LR die Messlänge beim Reißen in mm

L<sub>0</sub> die Anfangsmesslänge in mm

(vgl. DIN 53504, S. 15)

#### 4.2.5.4.3 Reißenergie und Toughness

„Als Arbeitsaufnahmevermögen eines Werkstücks wird die Energie bezeichnet, die man bis zu seinem Versagen aufbringen muß. Man erhält sie durch Integration der Kraft-Deformations-Kurve bis zum Versagenspunkt. Diese Energie, be-

zogen auf den Einheitsquerschnitt oder das Volumen des betreffenden Probekörpers, wird oft als „Zähigkeit“ bezeichnet. Zum Begriff der Zähigkeit muß allerdings bemerkt werden, daß diese, wie man leicht erkennt, keine eindeutige Größe ist. Sie unterscheidet nicht zwischen zwei Materialien, von denen das eine bei hoher Kraft und geringer Deformation und das andere umgekehrt bei geringer Kraft und hoher Deformation versagt. Um das Verhalten eines Materials hinreichend zu beschreiben, muß also außer seiner Zähigkeit mindestens eine weitere Kenngröße angegeben werden. Im Zugversuch wird das Arbeitsaufnahmevermögen des Probekörpers mit Hilfe der Reißenergie gemessen.“

(Retting 1991, S. 17; Weltschev 2010, S. 42)

Der Begriff Toughness oder Dehnfestigkeit bezeichnet die Reißenergie, die ein Werkstück in Abhängigkeit von seinem Volumen aufnehmen kann, bevor es zum Versagen kommt (vgl. Kalpakjian & Schmid 2010, S. 62).

Die Reißenergie,  $W - F_{\max}$  oder  $W_R$ , wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel berechnet:

$$W_R = \int \sigma \Delta \varepsilon$$

Dabei ist

$\sigma$  Spannung

$\varepsilon$  Dehnung

Die Reißenergie wird durch die Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Kurve dargestellt.

Die Angabe der Ergebnisse erfolgt in Nmm, ohne Nachkommastelle.

Die Toughness,  $W - F_{\max} / V$ , wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel berechnet:

$$W - F_{\max} / V = W_R / V$$

Dabei ist

$W_R$  Reißenergie

$V$  Volumen, d. h.  $L \times B \times H$ ,  $10 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$ , wobei die Länge durch den Anfangsabstand der Weglängenaufnehmer definiert ist.

Somit verhalten sich Toughness und Reißenergie direkt proportional zueinander, was dazu führt, dass beide Begriffe häufig synonym verwendet werden, was jedoch nicht ganz korrekt ist (vgl. Kalpakjian & Schmid 2010, S. 62).



#### 4.2.5.4.4 E-Modul

Das Elastizitätsmodul (E-Modul) beschreibt die Steifigkeit eines Materials bzw. den Widerstand des Materials gegenüber Verformung durch eine äußere Kraft. Je höher das E-Modul eines Materials also ist, umso steifer ist dieses (vgl. Retting 1991, S. 16).

Der Begriff E-Modul bzw. Steifigkeit gilt für elastische Abformmaterialien nur in einem bestimmten Bereich, in dem eine Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung bzw. Formänderung besteht. Dieses Verhältnis wird auch als Hook'sches Gesetz bezeichnet (vgl. Finger 1996, S. 386).

Das E-Modul, E, wurde für jeden Probekörper nach folgender Formel berechnet:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Dabei ist

$\sigma$  Spannung

$\varepsilon$  Dehnung

(vgl. Finger 1996, S. 386f)

#### 4.2.6 Homogenität

Bei der Recherche für diesen Teil der Arbeit fiel auf, dass es keine eindeutigen Definitionen bzw. Kriterien zur Bewertung der homogenen Durchmischung zahnärztlicher Abformmaterialien gibt. Die Hersteller von Abformmaterialien bewerben ihre Produkte dennoch immer wieder mit hohen Graden an Homogenität. Allgemein bedeutet Homogenität eine gleichmäßige Verteilung der einzelnen Bestandteile über das gesamte Volumen mit dem Resultat, dass das Verhältnis der einzelnen Komponenten an allen Stellen des gemischten Materials gleich ist. Durch die unterschiedlich farbigen Basis- und Katalysatorpasten bzw. die einheitlich farbigen Gemische soll die Homogenität der gemischten Massen optisch dargestellt werden. Zur Bewertung der Homogenität der gemischten Massen muss jedoch die Größe der Streuung der Messergebnisse, bspw. aus den anderen Versuchen in dieser Arbeit berücksichtigt werden, da ein homogeneres Gemisch unter gleichen Messbedingungen auch zu einer geringeren Streuung der Ergebnisse führen sollte.

#### **4.2.6.1 Probekörperherstellung**

Als Probekörper wurden Zylinder aus dem jeweiligen Material analog zu den unter 4.2.1.1 beschriebenen Angaben hergestellt und anschließend genau mittig der Länge nach geteilt. Von jeder Hälfte eines Probekörpers wurde jeweils ein Foto der Oberfläche und eines der Schnittfläche aufgenommen.

#### **4.2.6.2 Versuchsaufbau und –durchführung**

Zur Bestimmung des Homogenitätsgrades wurde vom Verfasser eine eigene Punkteskala entworfen. Mithilfe der in dieser Skala enthaltenen Kriterien und Punktwerte wurde anschließend eine Hierarchie der einzelnen Materialien im Hinblick auf die Homogenität erstellt (s. Tabellen 34-37).

Der Probekörper wurde nach der vorgegeben Abbindezeit entformt und genau mittig der Länge nach geteilt. Sowohl Schnitt- als auch Oberflächen beider Probekörperhälften wurden mit definierten Einstellungen (s. Tabelle 38) fotografiert und ihre Erscheinung bezüglich Farbe und Farbmischung, Blasen und eventuell sichtbaren Partikeln beschrieben.

Bei der Suche nach geeigneten Bewertungskriterien und Methoden zur Quantifizierung des Homogenitätsgrades bei der Mischung von zahnärztlichen Abformmaterialien tauchen wiederholt die Begriffe „einheitliche Färbung“ und „Blasenfreiheit“ auf. Solche optische Bewertungsmaßstäbe stellen nur bedingt aussagekräftige Kriterien dar, da ihre Bewertung subjektiv ist und somit vom jeweiligen Tester abhängt. Es existieren bisher keine objektiven Kriterien zur Quantifizierung und Einteilung des Durchmischungsgrades von Basis- und Katalysatormassen für zahnärztliche Abformsilikone. Die Entwicklung einer neuen Methodik zur Messung des Homogenitätsgrades von Abformmaterialien überstieg den Rahmen dieser Arbeit, weshalb sich der Autor ebenfalls auf rein optische Bewertungskriterien zur Einteilung des Durchmischungsgrades beschränkte.

- Einheitliche Farbe
- Vorhandensein von Blasen
- Vorhandensein von präformierten Füllkörperpartikeln

Die bewerteten Eigenschaften sind wie folgt durch Nummern kodiert:

Farbliche Durchmischung:

0 = einheitlich gefärbte Schnittfläche

1 = leichte Schlieren durch unvollständig vermischte, unterschiedlich farbige Phasen auf der Schnittfläche erkennbar

2 = deutlich voneinander abgrenzbare, unterschiedlich farbige Phasen auf der Schnittfläche erkennbar

Blasen (unabhängig von Größe und Verteilung):

0 = keine Blasen erkennbar

1 = Blasen erkennbar

Farblich erkennbare Füllkörper (unabhängig von Größe und Verteilung):

0 = keine farblich unterschiedlichen Füllkörper erkennbar

1 = farblich unterschiedliche Füllkörper erkennbar

Durch die Summation der Punktwerte der einzelnen Kriterien lassen sich den jeweiligen Materialien also Zahlen zuordnen. Vereinfacht gesagt, erscheint ein Material, in Bezug auf die in dieser Arbeit berücksichtigten Kriterien, umso homogener je geringer sein Gesamtpunktwert ist, also bei minimal 0 Punkten insgesamt. Analog erscheint ein Produkt weniger homogen gemischt, je größer sein summierter Punktwert ist, sprich bei maximal 4 Punkten.

#### **4.2.6.3 Einschränkungen**

Bei der Messung der Homogenität in dieser Arbeit konzentrierte sich der Verfasser allein auf optische, schwierig objektiv auswertbare Parameter. Eine weiterführende Arbeit, in welcher die Homogenität anhand von objektiv einwandfrei bewertbaren Kriterien messbar gemacht wird, ist daher erstrebenswert. In diesem Zusammenhang könnten bspw. die Prozentzahl der in der gemischten Masse verbliebenen Farbpartikel der ursprünglichen zwei Phasen, die Summe der Querschnittfläche aller angeschnittener Blasen im Vergleich zur gesamten Querschnittsfläche in Prozent oder der prozentual gemessene Anteil an Füllkörpern Grundlage eines Bewertungsmaßstab für die Homogenität von dentalen Abformmaterialien darstellen, um zu untersuchen, ob diese Parameter bzw. deren Veränderung und schlussendlich der objektivierte Grad an Homogenität,

zum Beispiel im Vergleich von manueller und maschineller Anmischung, eine signifikante Auswirkung auf relevante Eigenschaften von Abformmaterialien haben.

Sicherlich spielt auch die jeweils von den Herstellern verwendete Farbe bei der rein optischen Bewertung von Homogenität eine große Rolle, da pastellige Farbtöne durch ihre Farbqualität schwieriger bewertbar sind als kräftigere und somit kontrastreichere Farbtöne.

## 5. Ergebnisse und Diskussion

Nachdem die Beschreibung der verwendeten Materialien und Methoden abgeschlossen ist, werden nachfolgend die Ergebnisse der einzeln geprüften Eigenschaften vorgestellt und die Schlussfolgerungen diskutiert, die diese Ergebnisse zulassen.

Zur statistischen Auswertung wurde SPSS 22 verwendet. Die Rohdaten wurden jeweils mit dem Kruskal-Wallis-Test verglichen. War das Ergebnis signifikant, wurden als Post-Hoc-Test paarweise Vergleiche durchgeführt und auf die so ermittelten p-Werte eine Bonferroni-Korrektur angewandt.

Zur graphischen Darstellung der Ergebnisse der Daten nach der o. g. statistischen Auswertung wurden in dieser Arbeit sog. Boxplots verwendet. Diese Darstellungsform wurde gewählt, weil sie die Abbildung einer Vielzahl an verschiedenen Informationen ermöglicht. So können mittels Größe des Interquartilabstands zwischen 1. und 3. Quartil, also den Begrenzungen der Boxplots, bspw. erste Aussagen über die Homogenität bzw. Streuung der Messergebnisse gemacht werden, was Rückschlüsse auf den Grad der Durchmischung des jeweiligen Materials zulässt. Homogener angemischte Materialien können durch kleinere und weniger homogen angemischte Materialien durch größere Boxplots identifiziert werden. Im Vergleich zu Balkendiagrammen erscheint auch die Veranschaulichung von Ausreißern, Maxima und Minima übersichtlich und es können wiederum viel mehr Informationen entnommen werden als nur Mittelwert und Standardabweichung. Einen guten Überblick zur Interpretation von Boxplots liefern u. a. Kuckartz et al. (2013, S. 74ff).

Zusätzlich zur graphischen Darstellung der Ergebnisse sind jeweils sowohl die Signifikanzen der paarweisen Vergleiche als auch die jeweilige deskriptive Statistik mit Mittelwert, Standardabweichung, Median, Interquartilabstand, Minimum und Maximum zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit in Tabellenform angegeben.

In diesem Abschnitt der Arbeit sollen die verwendeten Methoden ebenso wie die durch sie erzielten Ergebnisse kritisch begutachtet, diskutiert und anschließend bezüglich ihrer Aussagen bewertet werden. Abschließend werden vom Verfasser Vorschläge zur Verbesserung für zukünftige Testverfahren und Anordnungen zur Erzielung weitergehender und aussagekräftigerer Testverfahren erörtert und ggf. Beispiele angeführt.

## 5.1 Verformung unter Druck

„Die Messung der elastischen Verformung der erhärteten Abformmasse unter Druck gibt [...] einen Anhalt für die Weichheit oder Härte des abgebundenen elastischen Abformmaterials. [...] [Z]u weiche Massen, die sich bei der Modellherstellung verformen könnten, und zu feste harte Abformmaterialien, die sich zu schwer vom Kiefer oder Modell ablösen lassen [sollen durch diesen Test erkannt und ausgeschossen werden.]“

(Rehberg 1978, S. 34)

### 5.1.1 Ergebnisse

Pro Material wurden sieben Einzelmessungen für die Verformung unter Druck durchgeführt. Der Kruskal-Wallis-Test zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik enthalten Tabellen 7 und 8.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik Verformung unter Druck in Prozent

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	6,39	5,99	4,16	4,40	4,83	6,61	7,31	5,00
<b>Standardabweichung</b>	0,21	0,26	0,06	0,29	0,15	0,17	0,18	0,10
<b>Median</b>	6,30	5,95	4,15	4,30	4,83	6,58	7,33	5,03
<b>Interquartilabstand</b>	0,30	0,40	0,10	0,05	0,23	0,35	0,35	0,18
<b>Minimum</b>	6,20	5,65	4,10	4,25	4,60	6,43	7,05	4,85
<b>Maximum</b>	6,80	6,45	4,25	5,05	5,05	6,83	7,55	5,15
	AP	BX	J	XA				
<b>Mittelwert</b>	13,85	12,46	13,45	14,89				
<b>Standardabweichung</b>	0,22	0,31	0,42	0,19				
<b>Median</b>	13,90	12,65	13,33	14,90				
<b>Interquartilabstand</b>	0,35	0,55	0,70	0,35				
<b>Minimum</b>	13,60	12,10	12,85	14,60				
<b>Maximum</b>	14,15	12,80	14,00	15,15				

Tabelle 8: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Verformung unter Druck, Signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
AN C		1,000	0,434	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,762	1,000	1,000	0,096
AN V			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,161	1,000	0,413	0,015
AX				1,000	1,000	0,125	0,012	1,000	0,000	0,001	0,000	0,000
PP					1,000	0,931	0,127	1,000	0,000	0,018	0,001	0,000
SI						1,000	0,503	1,000	0,002	0,089	0,007	0,000
SB							1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,343
X C								1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
X D									0,010	0,310	0,033	0,001
AP										1,000	1,000	1,000
BX											1,000	1,000
J												1,000
XA												

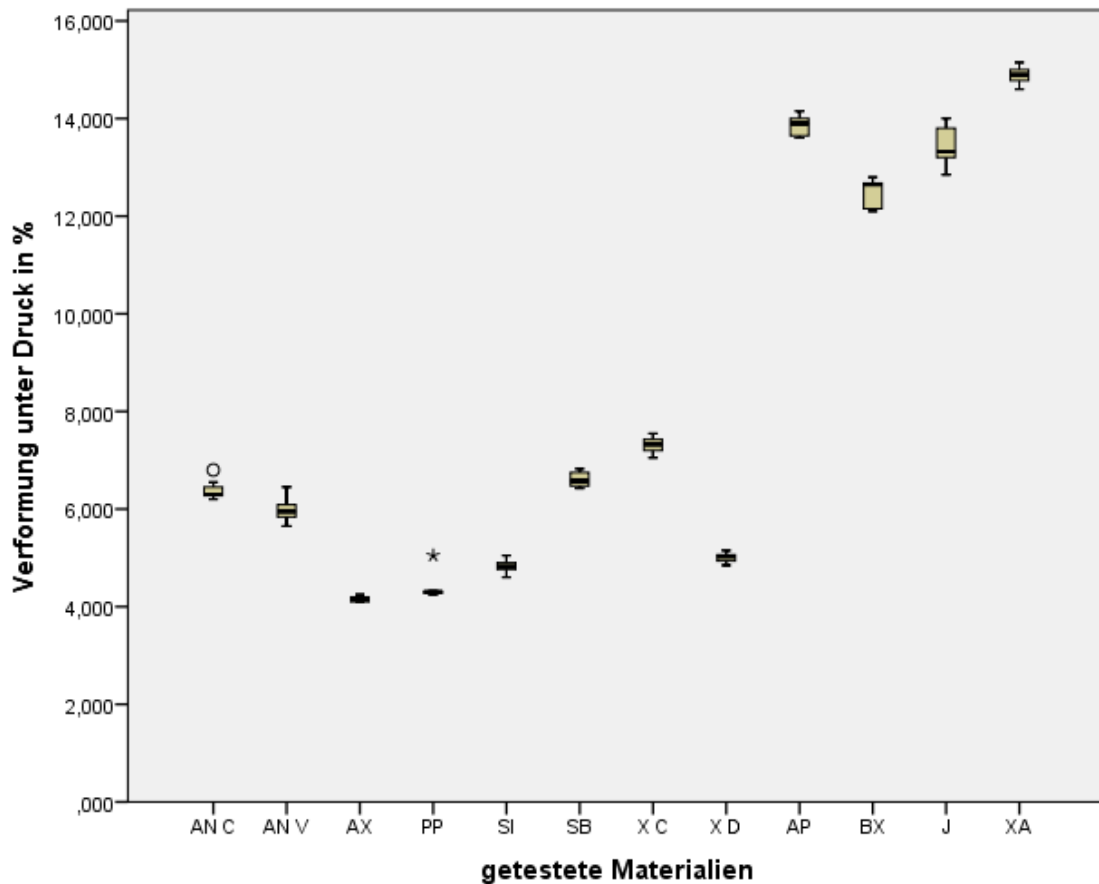


Abbildung 12: Ergebnisse für Verformung unter Druck

Abbildung 12 zeigt die prozentuale Verformung der einzelnen Materialien unter Druck. Es besteht ein deutlicher Unterschied in der Verformbarkeit zwischen den Alginaten (Mittelwerten von mehr als 12 %) und den Silikonen. Die Silikone zeigen auch unter-

schiedliche Werte, wobei *Xantasil Cartridge* die größte mittlere Verformung (7,31 %) aufweist und *AlginX Ultra* die geringste. Die Silikone sind somit in sehr steife, wie *AlginX Ultra* und weniger steife, wie *Xantasil Cartridge*, einteilbar, das fast doppelt so nachgiebig ist wie *AlginX Ultra*. Die Verformbarkeit von den Alginaten ist jedoch zu der der Silikone deutlich größer, nämlich um das zwei- bis vierfache.

Bei den Materialien *AlgiNot Cartridge* und *Position Penta* gibt es Ausreißerwerte. Die sog. Interquartilabstände, d. h. die Bereiche, in denen die mittleren 50 % der Messwerte verstreut sind und mit deren Hilfe somit eine Aussage über die Streuung der Messwerte getroffen werden kann, von *Blueprint XCreme* (0,55 %) und *Jeltrate* (0,70 %) sind verglichen mit denen der restlichen Materialien größer (vgl. Kuckartz et al. 2013, S. 70f). Dies drückt somit eine größere Streuung der Messwerte bei diesen Materialien aus.

Wenn man die p-Werte betrachtet, vgl. Tabelle 8, so sind die Unterschiede zwischen den Alginaten und den steiferen Silikonen, nämlich *AlgiNot Volume*, *AlginX Ultra*, *Position Penta*, *Silginat* und *Xantasil Dynamix* signifikant.

### 5.1.2 Diskussion

Die Alginate stellen sich durch die Ergebnisse als die eindeutig nachgiebigeren und weicheren Materialien dar.

Wie eingangs beschrieben, stellt der Test der Verformung eine Methode zur Messung der Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit eines abgebundenen Materials dar. Betrachtet man einen Abformlöffel, der nach der Abbindezeit wieder aus dem Mund entnommen wird, wie in Abbildung 13, so treten bei der Entnahme Druck-, Zug- und Scherbelastung im gesamten Kontaktbereich des Abformmaterials und der abgeformten Strukturen auf. Die Druckbelastungen treten hierbei in Winkeln von 90 ° bis 180 °, also senkrecht bis entgegengesetzt zu der abziehenden Kraft in den unter sich gehenden Bereichen der Abformung auf.



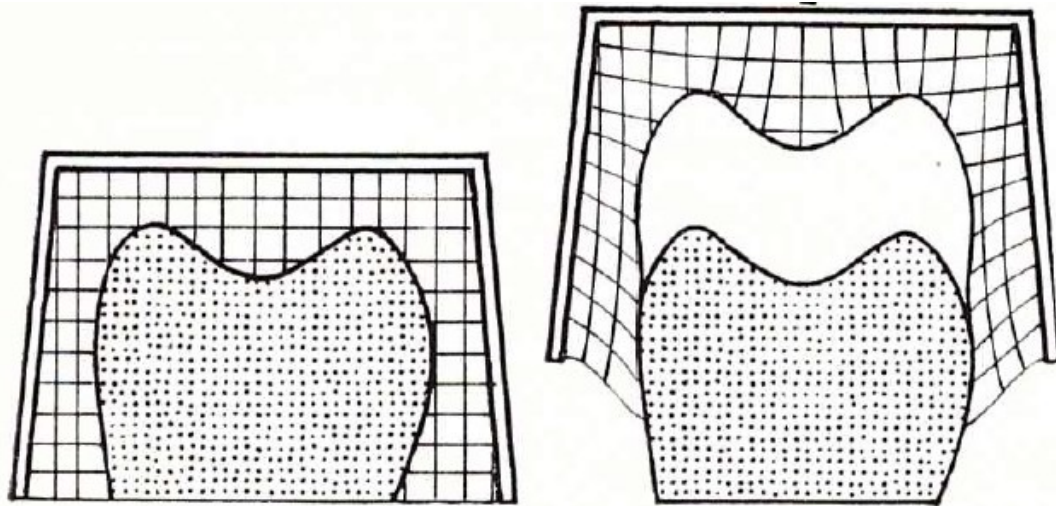


Abbildung 13: Beanspruchung eines Abformwerkstoffs beim Entfernen aus einer Infrawölbung (Breustedt & Lenz 1985, S. 22)

In diesen Arealen muss das Material gestaucht, d. h. komprimiert, und am größten Durchmesser der abgeformten Struktur vorbeigezogen werden, bevor die Abformung komplett entnommen werden kann. Je nachgiebiger sich ein Material gegenüber Druckbelastung verhält, umso leichter, d. h. mit weniger Kraft, kann die Abformung entnommen werden. Deswegen eignen sich weniger rigide Abformmassen auch besonders im parodontal vorgeschädigten Gebiss. Die Ergebnisse zeigen, dass die getesteten Alginatabformungen deutlich nachgiebiger sind als die Silikone. Alle getesteten Materialien entsprechen den Anforderung nach Verformbarkeit zwischen zwei und 20 bzw. fünf und 20 Prozent für Alginat (vgl. DIN EN ISO 4823, S. 9). Alginat müssen also nachgiebiger sein. Die stärkere Nachgiebigkeit bedingt, dass Alginatabformung deutlich leichter aus dem Mund oder vom Modell entfernt werden können als Silikonabformungen. Allerdings bedeutet eine größere Nachgiebigkeit auch, dass solche Materialien ein hohes Rückstellungsvermögen aufweisen müssen, damit Verzerrungen, die bei der Entnahme in der Abformung stattfinden nicht zu fehlerhaften Modellen führen.

## 5.2 Elastische Rückstellung nach Verformung

„Die Elastizität der Massen soll es ermöglichen, daß der Abdruck nach dem Abnehmen, d. h. also nach einer vorübergehenden Verzerrung, seine ursprüngliche am Kiefer zunächst fixierte Form möglichst vollständig wieder einnimmt. Diese Rückstellung erfolgt bei den elastischen Abformmassen zunächst weitgehend spontan, aber nicht ganz vollständig[, so dass] ein Rest an Verformung, die bleibende Deformation (auch Formänderungsrest genannt) bleibt[.]“

(Rehberg 1978, S. 36)

### 5.2.1 Ergebnisse

Pro Material wurden sieben Einzelmessungen zum Test der elastischen Rückstellung nach Verformung durchgeführt. Der Kruskal-Wallis-Test zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik sind Tabellen 9 und 10 zu entnehmen.

Tabelle 9: Deskriptive Statistik Elastische Rückstellung nach Verformung in Prozent

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	97,43	97,14	99,72	99,38	99,34	99,65	99,45	99,45
<b>Standardabweichung</b>	0,49	0,63	0,11	0,07	0,12	0,12	0,18	0,16
<b>Median</b>	97,65	97,15	99,70	99,40	99,28	99,65	99,35	99,48
<b>Interquartilabstand</b>	0,83	0,70	0,20	0,08	0,13	0,23	0,33	0,23
<b>Minimum</b>	96,70	96,55	99,60	99,25	99,25	99,53	99,30	99,23
<b>Maximum</b>	98,00	98,38	99,90	99,48	99,58	99,85	99,75	99,73
	AP	BX	J	XA				
<b>Mittelwert</b>	97,53	97,14	96,21	96,91				
<b>Standardabweichung</b>	0,22	0,47	0,59	0,13				
<b>Median</b>	97,58	97,00	96,30	96,93				
<b>Interquartilabstand</b>	0,20	0,80	1,00	0,18				
<b>Minimum</b>	97,21	96,55	95,30	96,70				
<b>Maximum</b>	97,93	97,80	96,95	97,10				

Tabelle 10: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Elastische Rückstellung nach Verformung, Signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
AN C		1,000	0,018	1,000	1,000	0,043	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AN V			0,001	0,426	1,000	0,003	0,155	0,153	1,000	1,000	1,000	1,000
AX				1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,041	0,002	0,000	0,000
PP					1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,554	0,009	0,180
SI						1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,030	0,470
SB							1,000	1,000	0,094	0,004	0,000	0,001
X C								1,000	1,000	0,207	0,002	0,060
X D									1,000	0,204	0,002	0,059
AP										1,000	1,000	1,000
BX											1,000	1,000
J												1,000
XA												

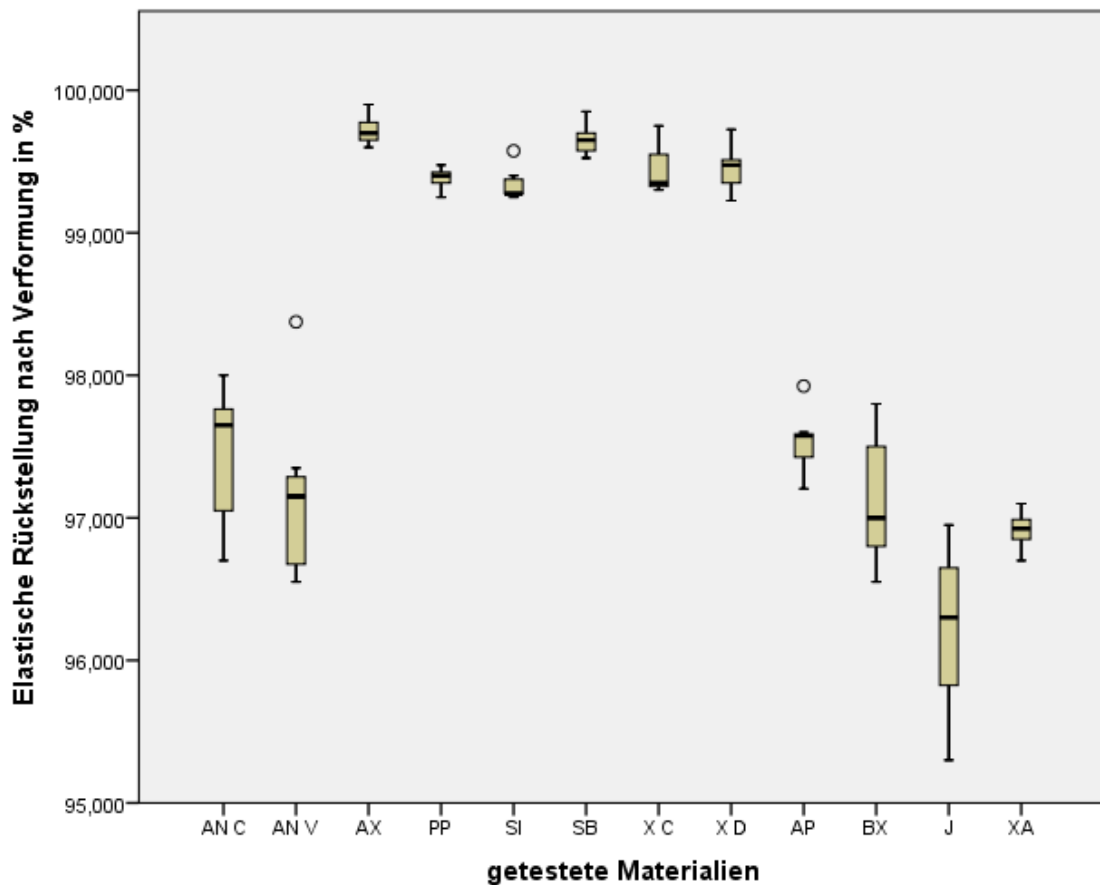


Abbildung 14: Ergebnisse für elastische Rückstellung

Abbildung 14 zeigt die elastische Rückstellung der einzelnen Materialien in Prozent. Die Silikone weisen eine mittlere Rückstellung von mehr als 99 % auf, mit Ausnahme von *AlgiNot Volume* und *AlgiNot Cartridge*. Die *AlgiNot*-Varianten und die Alginat

besitzen deutlich geringere Rückstellungsvermögen. Von diesen Materialien besitzt *Alginoplast* besitzt mit 97,53 % das größte Rückstellvermögen und *Jeltrate* das geringste (96,21 %). *AlginX Ultra* (99,72 %) und *Status Blue* (99,65 %) haben die höchsten Rückstellungswerte. Die Unterschiede dieser Werte zu denen der *AlgiNot*-Varianten und der Alginaten sind signifikant. Doch auch die Unterschiede der Werte zwischen den anderen Silikonen, die sich zu mehr als 99,00 % zurückstellen und den Alginaten und *AlgiNot* ist deutlich erkennbar. Der Wert von *Jeltrate* zeigt signifikante Unterschiede zu allen Silikonen, außer *AlgiNot*. Die Interquartilabstände der *AlgiNot*-Varianten, von *Blueprint XCreme* und *Jeltrate* weisen auf eine große Streuung der Messergebnisse möglicherweise durch eine geringere Konstanz bzw. Homogenität der angemischten Materialien hin.

### 5.2.2 Diskussion

Wie unter 5.1 beschrieben, ist es bei der Entnahme von Abformmassen von Vorteil, wenn die Abformmasse nachgiebig ist. Durch den Test der elastischen Verformung unter Druck wird ermittelt, wie groß jeweils der elastische und plastische Anteil an der Gesamtverformung ist.

Die Gesamtverformung ist die Summe der plastischen und der elastischen Verformung. Die plastische, d. h. bleibende, Deformation beschreibt Formänderungen aufgrund mechanischer Beanspruchung (vgl. Rehberg 1978, S. 41). Die elastische Verformung beschreibt den Anteil an der stattgefundenen Gesamtverformung, um den sich eine elastische Abformmasse nach der Belastung, bspw. nach der Entnahme, wieder zurückstellt. Dabei können die ursprünglichen Maße nie vollständig, d. h. zu 100 % erreicht werden. Die elastische Verformung sollte einen möglichst hohen Anteil an der Gesamtverformung ausmachen, um detail- und dimensionsgenaue Modelle zu erhalten. Das bedeutet gleichzeitig, dass der Formänderungsrest, also die plastische Verformung, einen möglichst geringen Anteil an der Gesamtverformung hat. Je geringer der Anteil der plastischen Verformung ist, desto größer ist automatisch der Anteil der elastischen Verformung (s. Abbildung 15).

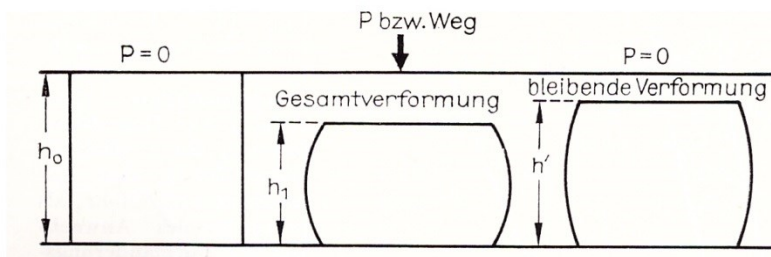


Abbildung 15: Systematische Darstellung des Druckversuchs zur Ermittlung des Anteils von Verformungsrest und elastischer Verformung an der Gesamtverformung aus Breustedt & Lenz (1985, S. 23)

Die Messungen bestätigen die Beobachtung und Ergebnisse vieler Wissenschaftler, darunter auch die von Breustedt & Lenz (1985, S. 23), dass Alginate eine deutlich geringere elastische Rückstellung nach Druckbeanspruchung aufweisen als Silikone. Die Ergebnisse der vorliegenden Messungen sind jedoch nur bedingt vergleichbar, da die Messungen mit unterschiedlich starken Deformationen von Silikonen und Alginaten durchgeführt wurden. Da die Messungen streng nach den Vorgaben der jeweiligen Normen vorgenommen wurden, wurden die Alginate stärker deformiert (10 mm mehr als die Silikone) und der zweite Wert wird nach einer kürzeren Relaxationszeit, nämlich nach 30 statt 110 Sekunden gemessen. Eindeutig ist, dass beide *AlgiNot*-Materialien eine etwa genauso geringe Elastizität aufzeigen wie die getesteten Alginate.

Um die Dimensionen besser verständlich zu machen, werden die Prozentzahlen beispielhaft in absolute Zahlen umgerechnet:

Wenn angenommen wird, dass ein intraoraler Unterschnitt von 10 mm Tiefe abgeformt wird, so würde dieser im Modell bei 95 % - iger Rückstellung des Abformmaterials noch mit 9,5 mm Tiefe darstellen. Die Abweichung befände sich also im Bereich eines halben Millimeters im Vergleich zum Original.

Für die meisten Anwendungsbereiche von Alginatabdrücke reicht eine 95 % - ige elastische Rückstellung zur Herstellung von Modellen aus, bspw. für die Anfertigung von Schienen oder KFO-Geräten bzw. für Planungsmodelle. Der Mehrwert, der durch akkuratere Modelle, die durch Alginatsubstitute mit Werten über 99 % Rückstellung erzielt werden können, ist daher in vielen Fällen eher gering. Sinnvoll ist ihre Verwendung jedoch, wenn Abformungen bei sehr starken Unterschnitten genommen werden müssen oder wenn es um Abformungen zur Herstellung von Gegenkiefermodellen für Zahnersatz geht. In diesen Fällen ist eine größere Genauigkeit der Modelle erforderlich, die in großem Maße auch von der Elastizität des Abformmaterials abhängt. Eine große Elastizität verhindert plastische, d. h. bleibende Verzerrungen in einer Abformung und in der

Konsequenz auch im Modell. Boksman & Tousignant (2010) untersuchten den Einfluss der Abformmaterialien für Gegenkiefermodelle und beschreiben, dass Alginatabformungen zu deutlich ungenaueren Modellen und dadurch zu schlechter passendem Zahnersatz führen.

Das Rückstellungsvermögen ist neben der Verformbarkeit von Abformmassen auch von der Schichtstärke des Materials abhängig. In Abbildung 16 ist dargestellt, welchen Einfluss die Materialstärke im Abdrucklöffel auf die Gesamtverformung hat. Weil Verformungen nie komplett elastisch stattfinden, kann auch durch die Wahl des passenden Abformlöffels die Genauigkeit der Abformung mit beeinflusst werden.

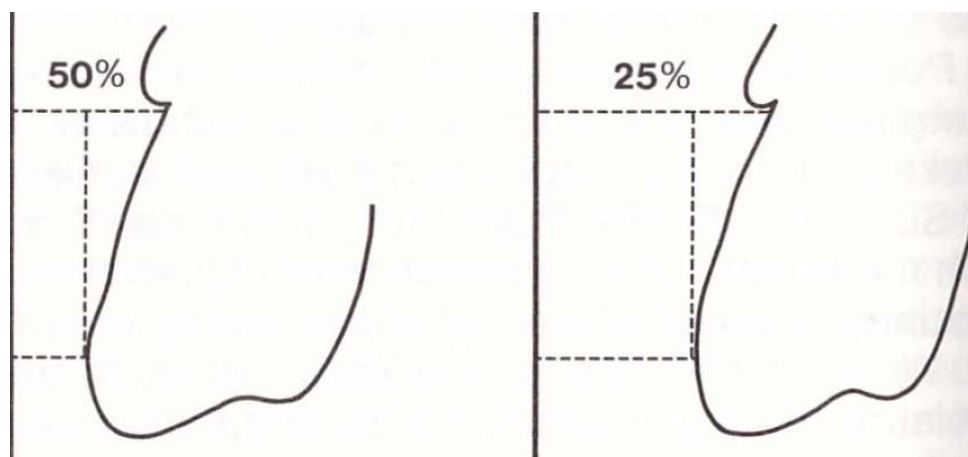


Abbildung 16: Abhängigkeit der Elastischen Rückstellung von der Stärke der Verformung bei verschiedenen Materialstärken (Rehberg 1978, S. 68)

Aufgrund der stärkeren Deformation der Alginatprobekörper im Vergleich zu den Silikonprobekörpern, sind die Ergebnisse und Vergleiche zwischen Alginaten und Silikon nur bedingt bewertbar und eher als Tendenzen anzusehen. Alle Materialien erfüllen die jeweiligen Normanforderungen. Alginatabformmassen müssen mindestens eine 95 % - ige Rückstellung, Elastomere mindestens 96,5 % Rückstellung aufweisen (vgl. DIN EN ISO 21563, S. 3; DIN EN ISO 4823, S. 9; DIN 53504, S. 9). Für Silikone besitzen die *AlgiNot*-Materialien, jedoch eine eher zu geringe Rückstellung.

### 5.3 Detailwiedergabegenauigkeit

„Die Wiedergabe feiner Details ist klinisch von verschiedenen Faktoren abhängig, wie z. B. der Fließfähigkeit der Massen, dem Zeitpunkt des Abformvorgangs, dem ausgeübten bzw. dem hydrostatischen Druck in der Masse und auch der Lage der Abformfläche (z. B. okklusal oder gingival) sowie deren Zustand (trocken oder feucht).“

(Rehberg 1978, S. 41f)

#### 5.3.1 Ergebnisse

Pro Material wurden sechs Einzelmessungen für die Prüfung der Detailwiedergabegenauigkeit durchgeführt. Der Kruskal-Wallis-Test zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p = 1,000$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik sind Tabellen 11 und 12 zu entnehmen.

Tabelle 11: Deskriptive Statistik Detailwiedergabegenauigkeit

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
<b>Standardabweichung</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Median</b>	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
<b>Interquartilabstand</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Minimum</b>	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
<b>Maximum</b>	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	AP	BX	J	XA				
<b>Mittelwert</b>	20,00	20,00	20,00	20,00				
<b>Standardabweichung</b>	0,00	0,00	0,00	0,00				
<b>Median</b>	20,00	20,00	20,00	20,00				
<b>Interquartilabstand</b>	0,00	0,00	0,00	0,00				
<b>Minimum</b>	20,00	20,00	20,00	20,00				
<b>Maximum</b>	20,00	20,00	20,00	20,00				

Tabelle 12: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Detailwiedergabegenauigkeit, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
AN C		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AN V			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AX				1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
PP					1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
SI						1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
SB							1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
X C								1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
X D									1,000	1,000	1,000	1,000
AP										1,000	1,000	1,000
BX											1,000	1,000
J												1,000
XA												

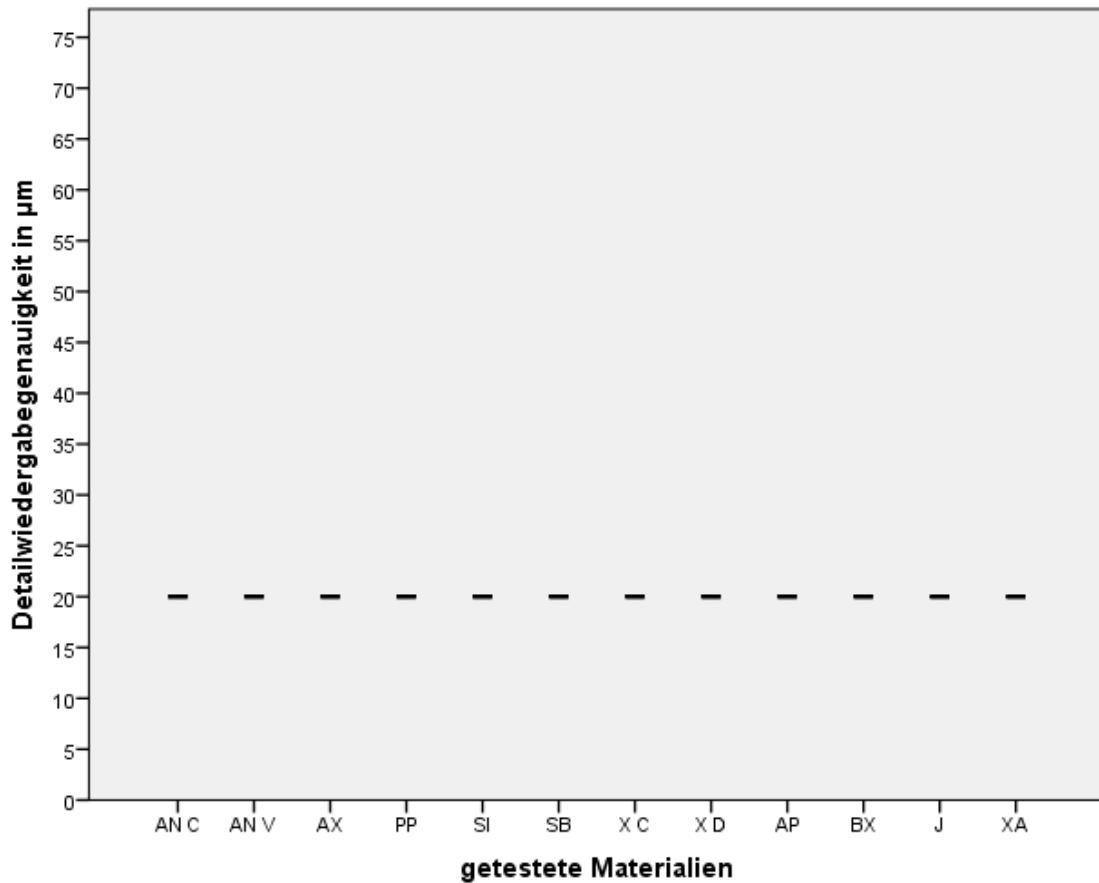


Abbildung 17: Ergebnisse für Detailwiedergabegenauigkeit

Wie aus Abbildung 17 entnommen werden kann, waren alle getesteten Abformmaterialien in der Lage die 20  $\mu\text{m}$ -Linie durchgehend abzuformen. Die Materialien unterschei-



den sich in der Detailwiedergabegenauigkeit, so wie sie in dieser Arbeit untersucht wurde, nicht.

### **5.3.2 Diskussion**

Laut Rehberg (1978, S. 42) sollen Alginatmassen in der Lage sein eine 75  $\mu\text{m}$  breite Linien und Silikone eine 20  $\mu\text{m}$  breite Linie kontinuierlich abzuformen. Nach den Normanforderungen müssen Alginatprobekörper die 50  $\mu\text{m}$ - und Silikonprobekörper die 20  $\mu\text{m}$ -Linie unterbrechungsfrei wiedergeben (vgl. DIN EN ISO 21563, S. 2; DIN EN ISO 4823, S. 9).

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die untersuchten Materialien hinsichtlich ihrer Detailwiedergabegenauigkeit nach Normverfahren nicht voneinander unterscheiden. Sowohl die getesteten Alginate, als auch die Silikone konnten Strukturen von 20  $\mu\text{m}$  Breite abbilden. Allerdings fiel bei der Betrachtung der Alginatprobekörper unter dem Mikroskop im Zuge der Dimensionsstabilität deren deutlich rauere und porösere Oberfläche auf. Da die Probekörper nicht mit Gips ausgegossen wurden, konnte nur die Abbildung, nicht aber die Reproduzierbarkeit der 20- $\mu\text{m}$ -Linie getestet werden. Aufgrund der besseren Oberflächenbeschaffenheit ist zu erwarten, dass die Silikone besser geeignet sind, feine Details wiederzugeben, obwohl auch die getesteten Alginate die 20- $\mu\text{m}$ -Linie abbildeten. Die Verträglichkeit mit Gips wurde allerdings, wie oben bereits erwähnt, nicht untersucht, so dass lediglich festgehalten werden kann, dass beide Materialien, Alginate und Silikone, in der Lage sind 20  $\mu\text{m}$  breite Details abzuformen.

## 5.4 Dimensionsänderung

Rehberg (1978, S. 40) schreibt, „[dass b]ei Alginat-[...]Abformmassen [...] keine Normprüfungen auf Formkonstanz vorgesehen [sind], da bekannt ist, daß derartige Abdrücke so wenig formstabil sind, daß sie möglichst umgehend nach ihrer Herausnahme aus dem Mund ausgegossen werden müssen.“

### 5.4.1 Ergebnisse

Zu fünf verschiedenen Messzeitpunkten wurden pro Material jeweils sechs Einzelmessungen zur Bestimmung der Dimensionsstabilität durchgeführt. Da einige Alginatprobekörper während des Lagerungszeitraums unbrauchbar geworden sind, ist die Anzahl der Einzelmessungen zum Teil reduziert, was in den Tabellen mit den jeweiligen deskriptiven Statistikdaten angegeben ist. Aufgrund der verringerten Anzahl an Einzelmessungen konnte die Bestimmung einiger Parameter nicht mehr vorgenommen werden. Diese fehlenden Angaben sind dann in den Tabellenfeldern mit „n. a.“, nicht auswertbar, gekennzeichnet.

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte für jeden einzelnen gemessenen Tag einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik enthalten die Tabellen 13 bis 23.

Die Abbildung 18 bis 23 zeigen die Schrumpfung der Abformmaterialien zu den verschiedenen Messzeitpunkten und die mittlere Dimensionsänderung im Verlauf.

Tabelle 13: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 1 in Prozent

	<b>AN C 1</b>	<b>AN V 1</b>	<b>AX 1</b>	<b>PP 1</b>	<b>SI 1</b>	<b>SB 1</b>	<b>X C 1</b>	<b>X D 1</b>
<b>Mittelwert</b>	-0,16	-0,17	-0,16	-0,17	-0,05	-0,07	-0,11	-0,08
<b>Standardabweichung</b>	0,09	0,03	0,07	0,08	0,03	0,07	0,04	0,03
<b>Median</b>	-0,15	-0,16	-0,17	-0,16	-0,06	-0,06	-0,12	-0,08
<b>Interquartilabstand</b>	0,13	0,06	0,14	0,09	0,03	0,12	0,07	0,04
<b>Minimum</b>	-0,32	-0,20	-0,23	-0,31	-0,07	-0,17	-0,18	-0,13
<b>Maximum</b>	-0,07	-0,12	-0,08	-0,09	0,00	0,00	-0,07	-0,05
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	6	6	6	6	6	6	6	6
	<b>AP 1</b>	<b>BX 1</b>	<b>J 1</b>	<b>XA 1</b>				
<b>Mittelwert</b>	-1,60	-1,89	-1,39	-2,98				
<b>Standardabweichung</b>	0,17	0,23	0,39	0,27				
<b>Median</b>	-1,60	-1,93	-1,43	-3,05				
<b>Interquartilabstand</b>	0,32	0,49	0,79	0,52				
<b>Minimum</b>	-1,82	-2,13	-1,88	-3,28				
<b>Maximum</b>	-1,36	-1,59	-0,87	-2,67				
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	6	6	6	5				

Tabelle 14: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 1, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	<b>AN C</b>	<b>AN V</b>	<b>AX</b>	<b>PP</b>	<b>SI</b>	<b>SB</b>	<b>X C</b>	<b>X D</b>	<b>AP</b>	<b>BX</b>	<b>J</b>	<b>XA</b>
<b>AN C</b>		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,606	1,000	0,154
<b>AN V</b>			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,509
<b>AX</b>				1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,313
<b>PP</b>					1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,306
<b>SI</b>						1,000	1,000	1,000	0,003	0,000	0,007	0,000
<b>SB</b>							1,000	1,000	0,030	0,004	0,055	0,001
<b>X C</b>								1,000	0,359	0,073	0,594	0,016
<b>X D</b>									0,049	0,008	0,088	0,001
<b>AP</b>										1,000	1,000	1,000
<b>BX</b>											1,000	1,000
<b>J</b>												1,000
<b>XA</b>												

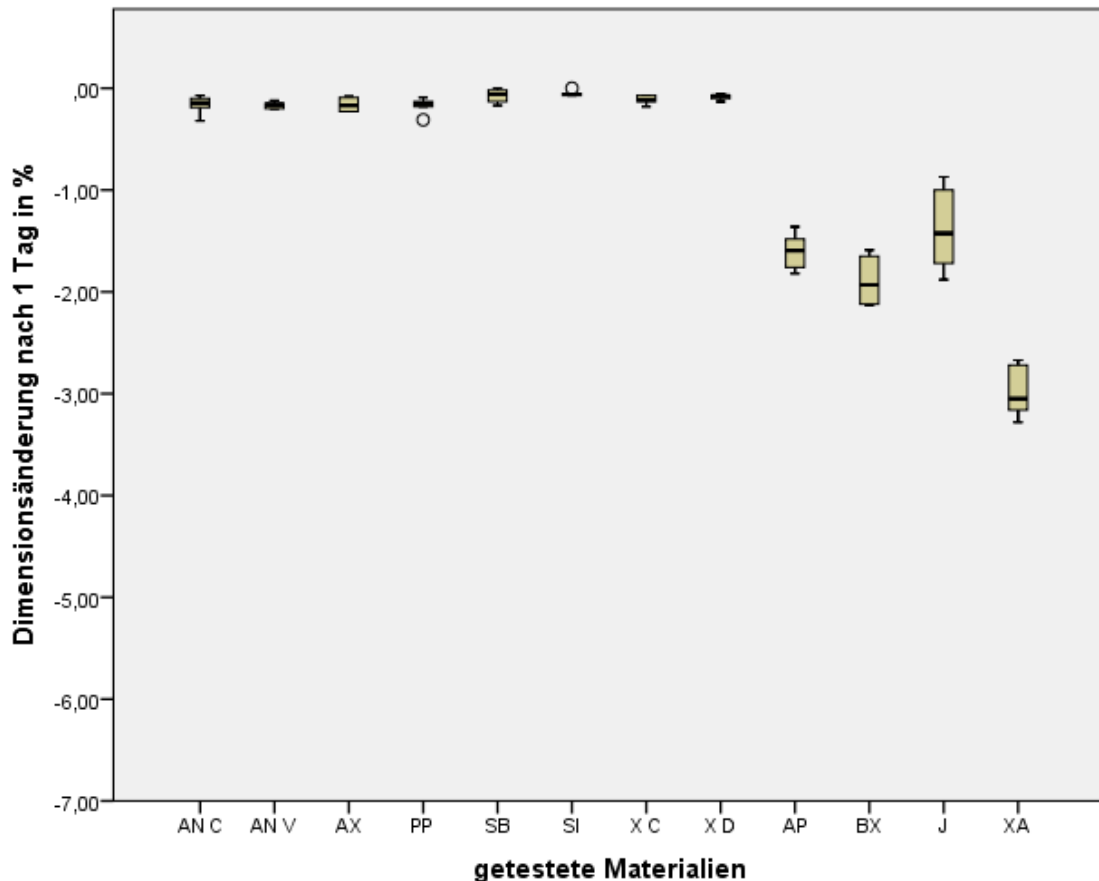


Abbildung 18: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 1

Abbildung 18 zeigt die Dimensionsänderung der Probekörper nach einem Tag Lagerung. Bei den Probekörpern handelt es sich um dieselben, die bereits zur Messung der Detailgenauigkeitswiedergabe verwendet wurden. Die negativen Werte zeigen die prozentuale Schrumpfung im Vergleich zu den Abmessungen der metallenen Negativformen an.

Die Silikone zeigen nach einem Tag Lagerung eine deutlich geringere Schrumpfung als die Alginate. *Silginat* weist die insgesamt geringste Schrumpfung auf (-0,05 %). Die Silikone mit den größten Schrumpfungen sind *AlgiNot Volume* und *Position Penta* mit Mittelwerten von jeweils -0,17 %. Die Alginate weisen Mittelwerte zwischen -1,39 %, (*Jeltrate*) und -2,98 % (*Xantalgin*) auf und sind somit um das acht- bis 60-fache mehr geschrumpft als die Silikone. Die großen IQR-Werte bei den Ergebnissen der Alginate veranschaulichen eine breite Streuung der Messergebnisse. Ursächlich sind möglicherweise inhomogene Mischungen oder Fehler bzw. unwillkürliche Verformungen der weicheren Alginatprobekörper bei der Positionierung unter dem Messmikroskop.

Signifikante p-Werte wurden für die Unterschiede zwischen den Alginaten und den Silikonen *Silginat*, *Status Blue* und den beiden Applikationsvarianten von *Xantasil* festgestellt werden. Doch auch die Unterschiede zwischen den übrigen Alginate-Substituten und den getesteten Alginaten sind deutlich erkennbar. Die Unterschiede in der Schrumpfung zwischen den einzelnen Silikonen hingegen erscheinen nicht bedeutsam.

Tabelle 15: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 2 in Prozent

	AN C 2	AN V 2	AX 2	PP 2	SI 2	SB 2	X C 2	X D 2
<b>Mittelwert</b>	-0,24	-0,19	-0,23	-0,15	-0,18	-0,09	-0,16	-0,09
<b>Standardabweichung</b>	0,09	0,04	0,08	0,09	0,06	0,01	0,05	0,04
<b>Median</b>	-0,24	-0,20	-0,22	-0,12	-0,16	-0,09	-0,18	-0,09
<b>Interquartilabstand</b>	0,14	0,09	0,13	0,11	0,11	0,02	0,09	0,07
<b>Minimum</b>	-0,40	-0,24	-0,36	-0,34	-0,27	-0,11	-0,20	-0,14
<b>Maximum</b>	-0,13	-0,13	-0,15	-0,09	-0,13	-0,08	-0,08	-0,05
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	6	6	6	6	6	6	6	6
	AP 2	BX 2	J 2	XA 2				
<b>Mittelwert</b>	-2,24	-2,63	-1,94	-4,02				
<b>Standardabweichung</b>	0,20	0,18	0,25	0,14				
<b>Median</b>	-2,29	-2,59	-1,96	-3,98				
<b>Interquartilabstand</b>	0,31	0,35	0,50	0,18				
<b>Minimum</b>	-2,40	-2,84	-2,20	-4,28				
<b>Maximum</b>	-1,90	-2,39	-1,67	-3,90				
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	6	5	5	6				

Tabelle 16: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 2, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
<b>AN C</b>		1,000	1,000	1,000	1,000	0,874	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,632
<b>AN V</b>			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,888	1,000	0,130
<b>AX</b>				1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,452
<b>PP</b>					1,000	1,000	1,000	1,000	0,181	0,059	0,689	0,004
<b>SI</b>						1,000	1,000	1,000	1,000	0,525	1,000	0,067
<b>SB</b>							1,000	1,000	0,003	0,001	0,022	0,000
<b>X C</b>								1,000	0,513	0,175	1,000	0,017
<b>X D</b>									0,006	0,002	0,038	0,000
<b>AP</b>										1,000	1,000	1,000
<b>BX</b>											1,000	1,000
<b>J</b>												1,000
<b>XA</b>												

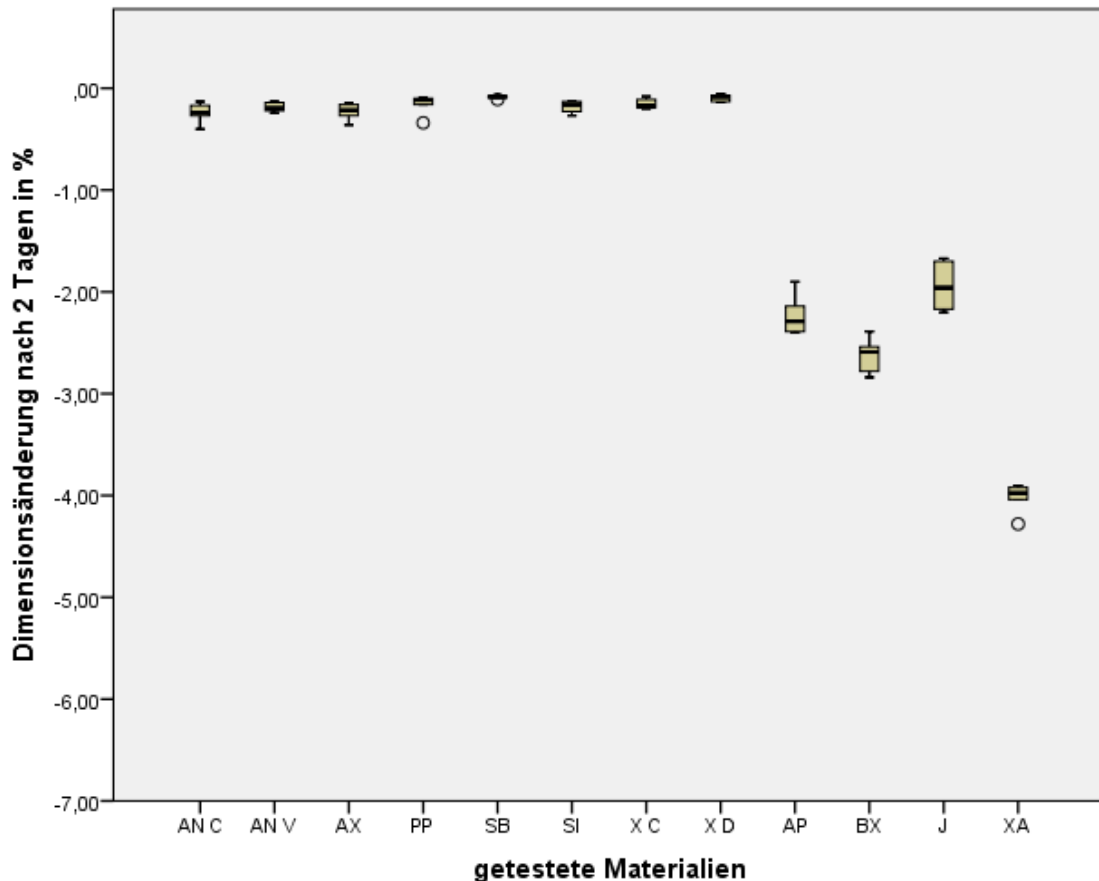


Abbildung 19: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 2

In Abbildung 19 sind die Dimensionsänderungen nach zwei Tagen Lagerung dargestellt. Die größte Schrumpfung bei den Silikonen betrifft *Silginat* mit einer Schrumpfung um weitere -0,13 % auf insgesamt -0,18 % nach zwei Tagen Lagerung. *AlgiNot Cartridge* (-0,24 %) zeigt am zweiten Messtag mit die größte und *Xantasil Dynamix* (-0,09 %) die kleinste mittlere Schrumpfung. Bei den Alginaten liegt die Schrumpfungszunahme zwischen -0,6 % und -1,2 %. Bei den Alginaten zeigt *Jeltrate* die geringste (-1,94 %) und *Xantalgin* die stärkste (-4,02 %) Dimensionsänderung.

Signifikante p-Werte liegen beim Vergleich der Ergebnisse zwischen den Alginaten und *Position Penta*, *Status Blue* sowie *Xantasil Cartridge* und *Volume* vor. Doch auch beim Vergleich der Messwerte der übrigen Silikone mit denen der Alginate zum Zeitpunkt zwei Tage nach Herstellung sind die Unterschiede deutlich erkennbar. Während die Werte der Silikone vergleichbar mit denen des ersten Messtages sind und es nur zu kaum merklicher weiterer Schrumpfung kommt, sind die Alginate deutlich weiter geschrumpft.

Tabelle 17: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 5 in Prozent

	<b>AN C 5</b>	<b>AN V 5</b>	<b>AX 5</b>	<b>PP 5</b>	<b>SI 5</b>	<b>SB 5</b>	<b>X C 5</b>	<b>X D 5</b>
<b>Mittelwert</b>	-0,20	-0,16	-0,28	-0,09	-0,32	-0,08	-0,21	-0,05
<b>Standardabweichung</b>	0,09	0,03	0,04	0,08	0,09	0,02	0,12	0,06
<b>Median</b>	-0,17	-0,16	-0,28	-0,07	-0,32	-0,09	-0,20	-0,04
<b>Interquartilabstand</b>	0,15	0,05	0,08	0,09	0,18	0,03	0,15	0,08
<b>Minimum</b>	-0,35	-0,20	-0,32	-0,26	-0,42	-0,10	-0,42	-0,15
<b>Maximum</b>	-0,11	-0,11	-0,23	-0,03	-0,23	-0,04	-0,04	0,01
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	6	6	6	6	6	6	6	6
	<b>AP 5</b>	<b>BX 5</b>	<b>J 5</b>	<b>XA 5</b>				
<b>Mittelwert</b>	-2,76	-4,02	-2,27	-5,11				
<b>Standardabweichung</b>	0,21	0,93	0,42	0,39				
<b>Median</b>	-2,70	-4,32	-2,44	-5,16				
<b>Interquartilabstand</b>	0,34	n. a.	0,69	n. a.				
<b>Minimum</b>	-3,10	-4,77	-2,56	-5,47				
<b>Maximum</b>	-2,59	-2,98	-1,65	-4,70				
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	5	3	4	3				

Tabelle 18: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 5, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	<b>AN C</b>	<b>AN V</b>	<b>AX</b>	<b>PP</b>	<b>SI</b>	<b>SB</b>	<b>X C</b>	<b>X D</b>	<b>AP</b>	<b>BX</b>	<b>J</b>	<b>XA</b>
<b>AN C</b>		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,716
<b>AN V</b>			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,356	0,492	1,000	0,261
<b>AX</b>				1,000	1,000	0,902	1,000	0,207	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>PP</b>					0,738	1,000	1,000	1,000	0,014	0,035	0,137	0,016
<b>SI</b>						0,536	1,000	0,113	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>SB</b>							1,000	1,000	0,009	0,025	0,098	0,011
<b>X C</b>								1,000	1,000	1,000	1,000	0,665
<b>X D</b>									0,001	0,005	0,020	0,002
<b>AP</b>										1,000	1,000	1,000
<b>BX</b>											1,000	1,000
<b>J</b>												1,000
<b>XA</b>												

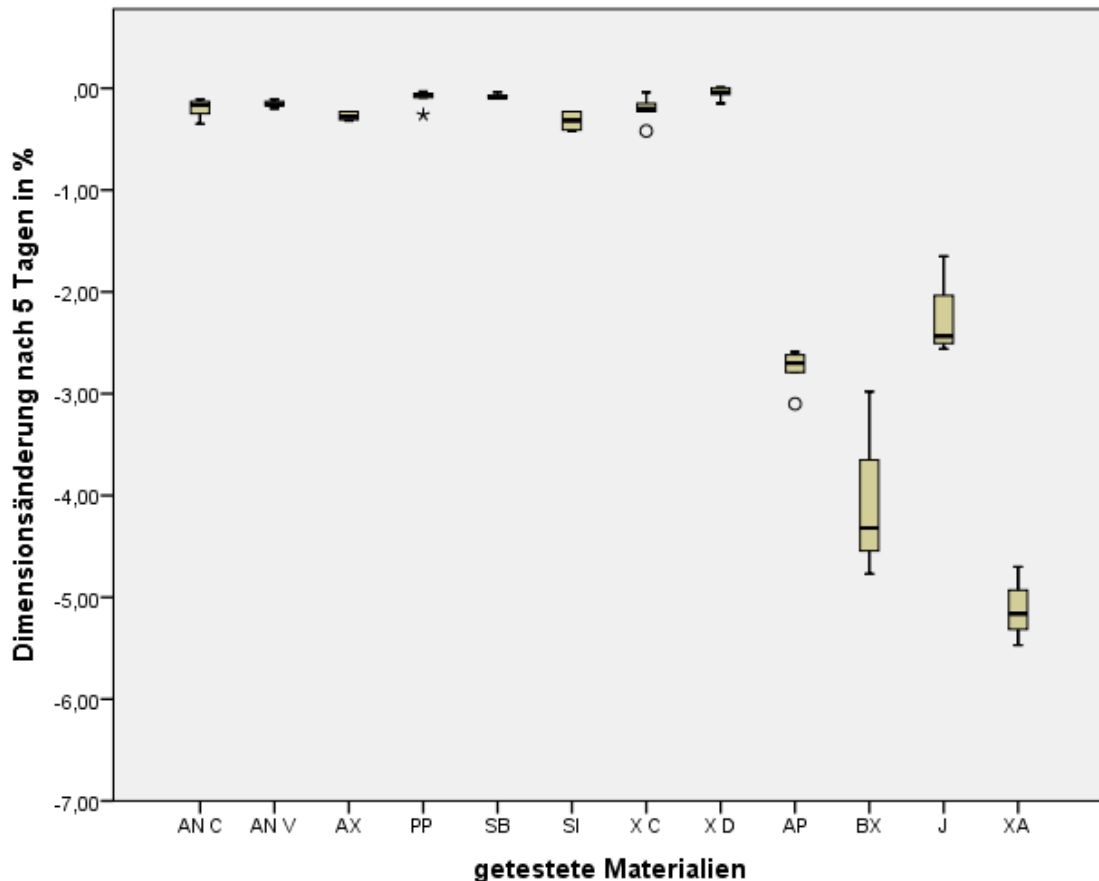


Abbildung 20: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 5

Abbildung 20 zeigt die Dimensionsschrumpfung der Materialien nach fünftägiger Lagerung seit der Herstellung der Probekörper. Unter den Silikonen zeigt *Silginat* (-0,32 %) die größte Schrumpfung und auch die größte Schrumpfungszunahme (-0,14 %) im Vergleich zu den übrigen Silikonen bei denen keine eindeutige Änderung der Dimensionierung festgestellt werden kann. *Xantasil Dynamix* weist die geringste Schrumpfung nach fünf Tagen Lagerung auf (-0,05 %). Die Alginat zeigen Dimensionsänderungen zwischen -2,27 % (*Jeltrate*) und -5,11 % (*Xantalgin*) und sind deutlich weiter geschrumpft um Werte zwischen -0,33 % (*Jeltrate*) bis -1,39 % (*Blueprint XCreme*).

Die p-Werte für die Vergleiche der Werte der Alginat und der Silikone *Position Penta*, *Status Blue* und *Xantasil Dynamix* sind signifikant, doch die unterschiedlich starken Schrumpfungen zwischen den Polyvinylsiloxanen und den Alginaten sind nach fünf Tagen Lagerung noch deutlicher erkennbar als an den vorhergegangenen Messzeitpunkten.



Tabelle 19: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 7 in Prozent

	<b>AN C 7</b>	<b>AN V 7</b>	<b>AX 7</b>	<b>PP 7</b>	<b>SI 7</b>	<b>SB 7</b>	<b>X C 7</b>	<b>X D 7</b>
<b>Mittelwert</b>	-0,16	-0,22	-0,26	-0,15	-0,45	-0,10	-0,20	-0,10
<b>Standardabweichung</b>	0,14	0,03	0,03	0,06	0,10	0,02	0,08	0,08
<b>Median</b>	-0,12	-0,22	-0,26	-0,13	-0,43	-0,10	-0,19	-0,07
<b>Interquartilabstand</b>	0,18	0,05	0,07	0,09	0,18	0,03	0,12	0,11
<b>Minimum</b>	-0,43	-0,27	-0,29	-0,25	-0,58	-0,13	-0,32	-0,25
<b>Maximum</b>	-0,06	-0,19	-0,21	-0,07	-0,35	-0,08	-0,11	-0,03
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	6	6	6	6	6	6	6	6
	<b>AP 7</b>	<b>BX 7</b>	<b>J 7</b>	<b>XA 7</b>				
<b>Mittelwert</b>	-3,08	-4,24	-3,13	-6,61				
<b>Standardabweichung</b>	0,06	1,40	0,19	n. a.				
<b>Median</b>	-3,08	-4,24	-3,16	-6,61				
<b>Interquartilabstand</b>	0,11	n. a.	0,36	n. a.				
<b>Minimum</b>	-3,15	-5,23	-3,33	-6,61				
<b>Maximum</b>	-3,00	-3,25	-2,88	-6,61				
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	4	2	4	1				

Tabelle 20: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 7, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	<b>AN C</b>	<b>AN V</b>	<b>AX</b>	<b>PP</b>	<b>SI</b>	<b>SB</b>	<b>X C</b>	<b>X D</b>	<b>AP</b>	<b>BX</b>	<b>J</b>	<b>XA</b>
<b>AN C</b>		1,000	1,000	1,000	0,447	1,000	1,000	1,000	0,161	0,369	0,094	1,000
<b>AN V</b>			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>AX</b>				1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>PP</b>					0,618	1,000	1,000	1,000	0,221	0,467	0,132	1,000
<b>SI</b>						0,051	1,000	0,041	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>SB</b>							1,000	1,000	0,020	0,080	0,011	0,705
<b>X C</b>								1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>X D</b>									0,016	0,069	0,009	0,644
<b>AP</b>										1,000	1,000	1,000
<b>BX</b>											1,000	1,000
<b>J</b>												1,000
<b>XA</b>												

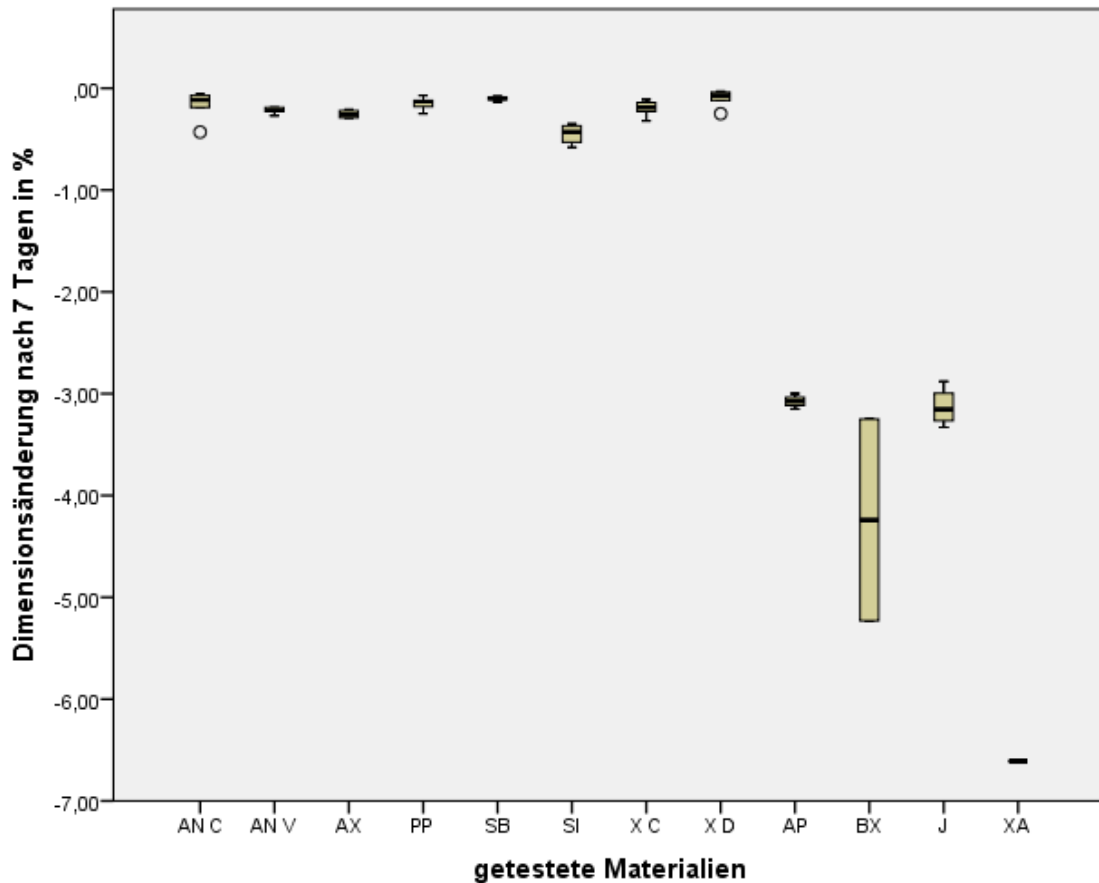


Abbildung 21: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 7

Abbildung 21 zeigt die Schrumpfungswerte der Materialien nach sieben Tagen Lagerung. *Status Blue* und *Xantasil Dynamix* zeigen die geringste Werte (jeweils -0,10 %). *Silginat* (-0,45 %) hat die größte mittlere Schrumpfung und Schrumpfungstendenz (-0,13 %) von den getesteten Silikonen. Die Alginat zeigen Werte zwischen -3,08 % (*Alginoplast*) und -6,61 % (*Xantasil*) auf. Ihre Schrumpfung nimmt um Werte zwischen -0,22 % (*Blueprint XCreme*) und -1,5 % (*Xantalgin*) im Vergleich zu der Messung nach fünf Tagen zu. Die Anzahl der auswertbaren Einzelergebnisse ist bei den Alginaten durch die lange Lagerungsdauer teilweise stark reduziert (*Xantasil*: N=1), da die Oberfläche einiger Probekörper sich während der Lagerung so verändert hatte, dass keine Linien mehr zu erkennen waren. Die Anzahl n der auswertbaren Probekörper zu den verschiedenen Messzeitpunkten sind, wie bereits beschrieben, den Tabellen der deskriptiven Statistiken zu entnehmen. Tabelle 19 beinhaltet die deskriptive Statistik für die Messung nach sieben Tagen Lagerung.

Die Vergleiche der Schrumpfungswerte nach sieben Tagen Lagerung von *Silginat* zu *Xantasil Dynamix*, sowie von *Alginoplast* und *Jeltrate* jeweils zu *Status Blue* und *Xan-*

*tasil Dynamix* ergeben signifikante p-Werte. Die unterschiedlich starken Dimensionsänderungen von Alginaten und Silikonen sind noch deutlicher sichtbar als nach der Messung nach fünf Tagen Lagerzeit. Die Silikone weisen weitestgehend stagnierende Werte bezüglich weiterer Dimensionsänderung auf. Bei *Silginat* ist eine kontinuierliche Schrumpfungszunahme erkennbar, wenn auch nur von geringem Ausmaß. Die weitere Zunahme der Schrumpfung der Alginatprobekörper hingegen ist deutlich erkennbar.

Tabelle 21: Deskriptive Statistik Dimensionsänderung Tag 14 in Prozent, ohne Alginat

	<b>AN C 14</b>	<b>AN V 14</b>	<b>AX 14</b>	<b>PP 14</b>	<b>SI 14</b>	<b>SB 14</b>	<b>X C 14</b>	<b>X D 14</b>
<b>Mittelwert</b>	-0,28	-0,19	-0,29	-0,19	-0,71	-0,12	-0,26	-0,18
<b>Standardabweichung</b>	0,11	0,04	0,04	0,06	0,07	0,02	0,06	0,06
<b>Median</b>	-0,26	-0,19	-0,29	-0,17	-0,71	-0,12	-0,24	-0,18
<b>Interquartilabstand</b>	0,15	0,06	0,07	0,08	0,12	0,03	0,12	0,11
<b>Minimum</b>	-0,49	-0,24	-0,34	-0,31	-0,80	-0,15	-0,33	-0,25
<b>Maximum</b>	-0,18	-0,13	-0,22	-0,14	-0,60	-0,10	-0,20	-0,09
<b>Anzahl Einzelmessung</b>	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabelle 22: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Dimensionsänderung Tag 14, ohne Alginat, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	<b>AN C</b>	<b>AN V</b>	<b>AX</b>	<b>PP</b>	<b>SI</b>	<b>SB</b>	<b>X C</b>	<b>X D</b>
<b>AN C</b>		1,000	1,000	1,000	1,000	0,092	1,000	1,000
<b>AN V</b>			1,000	1,000	0,021	1,000	1,000	1,000
<b>AX</b>				0,846	1,000	0,009	1,000	0,742
<b>PP</b>					0,012	1,000	1,000	1,000
<b>SI</b>						0,000	1,000	0,010
<b>SB</b>							0,098	1,000
<b>X C</b>								1,000
<b>X D</b>								

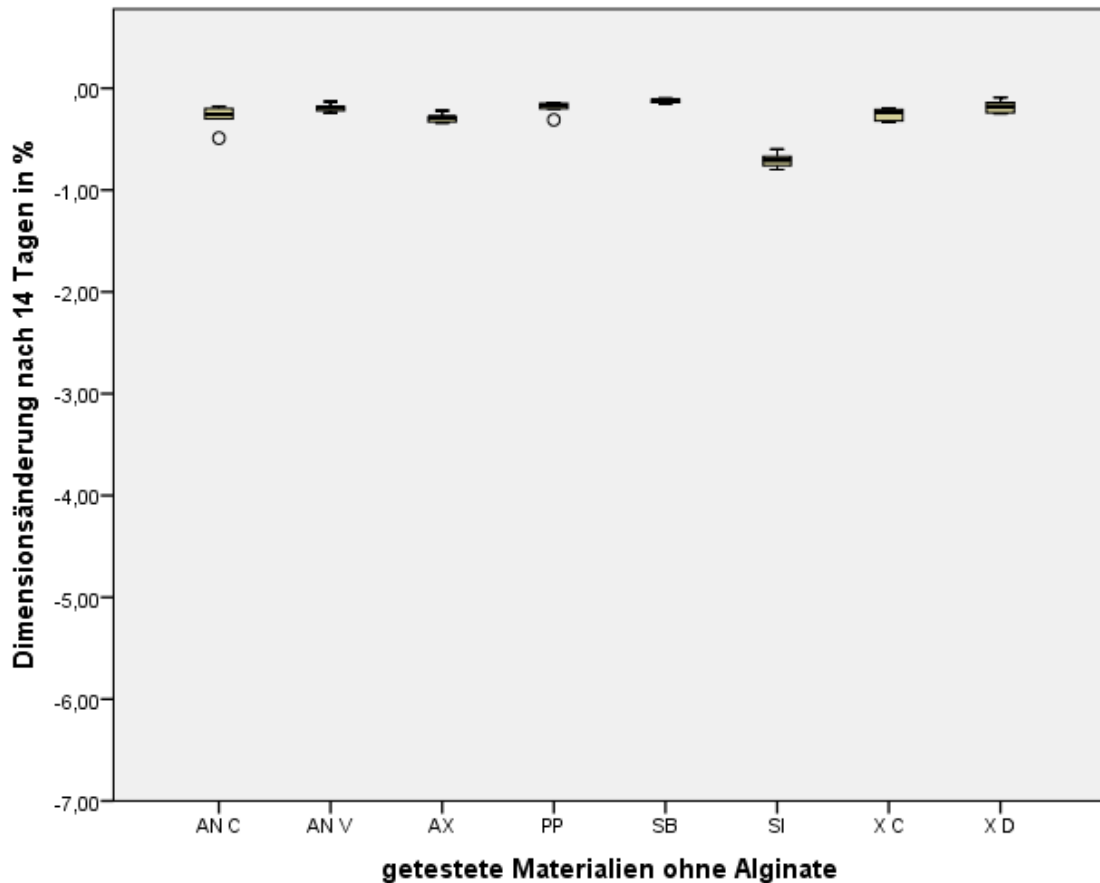


Abbildung 22: Ergebnisse für Dimensionsänderung Tag 14, ohne Alginat

In Abbildung 22 sind nur die Dimensionsänderungen der Silikonprobekörper dargestellt, da alle Alginatprobekörper nach 14 Tagen Lagerung mit der verwendeten Methode nicht mehr ausgewertet werden konnten. *Status Blue* zeigt die geringste mittlere Schrumpfung mit -0,12 %, *Silginat* hingegen die größte mit -0,71 %.

Aufgrund der geringeren Anzahl an Materialien wurden die p-Werte durch das Statistikprogramm neu berechnet, sodass sich für die Vergleiche der Werte der einzelnen Materialien neu signifikante p-Werte ergeben. Die p-Werte sind signifikant beim Vergleich von der Schrumpfung von *Silginat* zu der von *AlgiNot Volume*, *Position Penta*, *Status Blue* und *Xantasil Dynamix*. Auch beim Vergleich der Werte von *Status Blue* und *AlginX Ultra* ist der p-Wert signifikant.

Tabelle 23: Deskriptive Statistik Dimensionsstabilität im Verlauf

	<b>AN C 1</b>	<b>AN C 2</b>	<b>AN C 5</b>	<b>AN C 7</b>	<b>AN C 14</b>	<b>AN V 1</b>	<b>AN V 2</b>	<b>AN V 5</b>	<b>AN V 7</b>	<b>AN V 14</b>
<b>MW</b>	-0,16	-0,24	-0,20	-0,16	-0,28	-0,17	-0,19	-0,16	-0,22	-0,19
<b>STABW</b>	0,09	0,09	0,09	0,14	0,11	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04
<b>N</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	<b>AX 1</b>	<b>AX 2</b>	<b>AX 5</b>	<b>AX 7</b>	<b>AX 14</b>	<b>PP 1</b>	<b>PP 2</b>	<b>PP 5</b>	<b>PP 7</b>	<b>PP 14</b>
<b>MW</b>	-0,16	-0,23	-0,28	-0,26	-0,29	-0,17	-0,15	-0,09	-0,15	-0,19
<b>STABW</b>	0,07	0,08	0,04	0,03	0,04	0,08	0,09	0,08	0,06	0,06
<b>N</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	<b>SI 1</b>	<b>SI 2</b>	<b>SI 5</b>	<b>SI 7</b>	<b>SI 14</b>	<b>SB 1</b>	<b>SB 2</b>	<b>SB 5</b>	<b>SB 7</b>	<b>SB 14</b>
<b>MW</b>	-0,05	-0,18	-0,32	-0,45	-0,71	-0,07	-0,09	-0,08	-0,10	-0,12
<b>STABW</b>	0,03	0,06	0,09	0,10	0,07	0,07	0,01	0,02	0,02	0,02
<b>N</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	<b>XC 1</b>	<b>XC 2</b>	<b>XC 5</b>	<b>XC 7</b>	<b>XC 14</b>	<b>XD 1</b>	<b>XD 2</b>	<b>XD 5</b>	<b>XD 7</b>	<b>XD 14</b>
<b>MW</b>	-0,11	-0,16	-0,21	-0,20	-0,26	-0,08	-0,09	-0,05	-0,10	-0,18
<b>STABW</b>	0,04	0,05	0,12	0,08	0,06	0,03	0,04	0,06	0,08	0,06
<b>N</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	<b>AP 1</b>	<b>AP 2</b>	<b>AP 5</b>	<b>AP 7</b>	<b>AP 14</b>	<b>BX 1</b>	<b>BX 2</b>	<b>BX 5</b>	<b>BX 7</b>	<b>BX 14</b>
<b>MW</b>	-1,60	-2,24	-2,76	-3,08	n. a.	-1,89	-2,63	-4,02	-4,24	n. a.
<b>STABW</b>	0,17	0,20	0,21	0,06	n. a.	0,23	0,18	0,93	1,40	n. a.
<b>N</b>	6	6	5	4	n. a.	6	5	3	2	n. a.
	<b>J 1</b>	<b>J 2</b>	<b>J 5</b>	<b>J 7</b>	<b>J 14</b>	<b>XA 1</b>	<b>XA 2</b>	<b>XA 5</b>	<b>XA 7</b>	<b>XA 14</b>
<b>MW</b>	-1,39	-1,94	-2,27	-3,13	n. a.	-2,98	-4,02	-5,11	-6,61	n. a.
<b>STABW</b>	0,39	0,25	0,42	0,19	n. a.	0,27	0,14	0,39	n. a.	n. a.
<b>N</b>	6	5	4	4	n. a.	5	6	3	1	n. a.

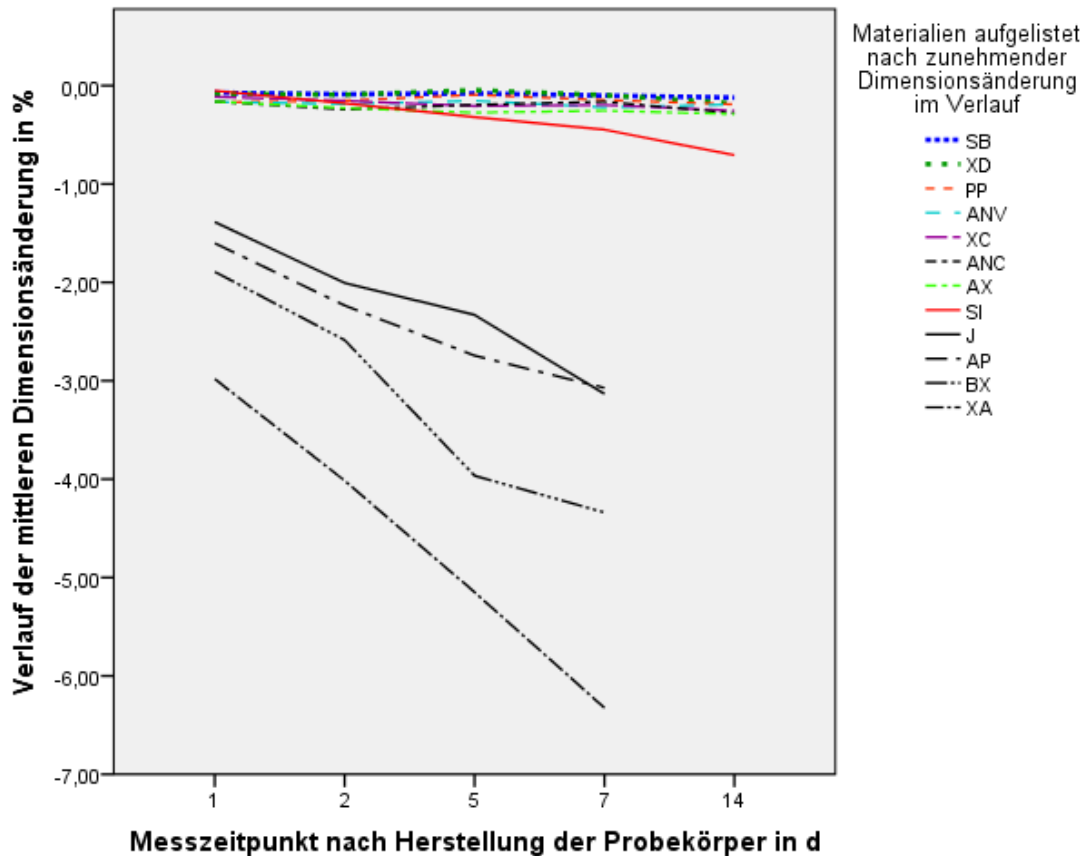


Abbildung 23: zeitlicher Verlauf der Dimensionsänderungen

Abbildung 23 stellt zur besseren Übersicht den Verlauf der mittleren Dimensionsänderungen der einzelnen Materialien dar. Tabelle 23 beinhaltet die dargestellten Mittelwerte sowie Standardabweichungen und die Anzahl der jeweils ausgewerteten Einzelmessungen. In diesem Diagramm kann wiederum der Vergleich der unterschiedlichen Dimensionsänderungen von Alginaten und Silikonen gut abgelesen werden. Die Silikone zeigen gleichbleibende Werte ohne merkliche Unterschiede zwischen den einzelnen Messtagen, mit Ausnahme von *Silginat*. Ihre Werte liegen im Bereich von -0,05 % und -0,72 % Schrumpfung. Die Dimensionsänderungen der Alginate bewegen sich hingegen in einem deutlich größeren Bereich zwischen -1,39 % und -6,61 %. Die teilweise gegenläufigen Schrumpfungswerte, die eine Volumenzunahme bei einigen Silikonen vortäuschen, begründen sich auf Messfehlern bzw. Ungenauigkeiten aufgrund der sehr geringen Unterschiede zwischen den Werten, bspw. für die Werte von *Position Penta* in Tabelle 23. Wie bereits angesprochen sind diese Werte Ausdruck für die Stagnation in der weiteren Dimensionsänderung der Silikone. Die Alginate und auch *Silginat* zeigen über den kompletten Messzeitraum eine Zunahme der Schrumpfung, die für *Xantalgin*

mit der Zunahme der Schrumpfung um -3,63 % zwischen dem ersten und letzten Mess- tag am stärksten ausfällt.

Es gibt somit Unterschiede im Dimensionsverhalten zwischen den Materialien, genauer zwischen Alginaten und Silikonen, aber auch zwischen *Silginat* und den übrigen Siliko- nen. Außerdem gibt es auch Unterschiede zwischen den Messergebnissen der einzelnen Tage, d. h. es finden deutliche Dimensionsänderungen statt. Zudem kann man festhal- ten, dass der Verlauf der Dimensionsänderung vom jeweiligen Material abhängt und diese unterschiedlich sind.

#### **5.4.2 Diskussion**

Die Dimensionsstabilität oder Formkonstanz wird durch mechanische Beanspruchun- gen, thermische Einflüsse, Verdunstung oder Quellung, sowie chemische Reaktion bei der Aushärtung der Abformmaterialien beeinträchtigt. Als erstes muss die Kontraktion, die beim Abkühlen von Mund- auf Zimmertemperatur erfolgt, einbezogen werden (vgl. Rehberg 1978, S. 38ff).

Keines der getesteten Materialien besitzt eine vollständige Formkonstanz. Aufgrund der Abbindereaktion entstehen bei den Alginatersatzmaterialien nach einer initialen thermi- schen Kontraktion im Verlauf der Lagerung keine weiteren Dimensionsveränderungen mehr, da es keine flüchtigen Nebenprodukte gibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Alginatate auch unter optimalen Lagerungsbedingungen bereits nach einem Tag so sehr geschrumpft sind, dass es nicht mehr möglich ist, di- mensionsgetreue Modelle aus ihnen herzustellen. Die Alginatabformung setzt vom An- wender eine schnellstmögliche Modellherstellung voraus, während die Silikonabfor- mung es dem Anwender ermöglicht, den Zeitpunkt zur Modellherstellung frei zu wäh- len. Entsprechend der Anforderung an elastomere Abformmaterialien darf die Dimensi- onsänderung von Silikonabformmasse nach 24 Stunden maximal 1,5 % betragen (vgl. DIN EN ISO 4823, S. 9). Für Alginatate gibt es kein Normverfahren zur Ermittlung der Dimensionsänderung, da es als allgemein anerkannt gilt, dass Alginatabformungen um- gehend nach der Abformung ausgegossen werden sollen.

Alle getesteten Polyvinylsiloxane erfüllen die Normanforderung und bleiben deutlich unter dem maximal erlaubten Grenzwert. Mit Ausnahme von *Silginat* behielten alle Al- ginatsubstitute über die gemessene Zeit auch ihr Volumen, ohne weiter zu schrumpfen.

Wenn man die Prozentwerte in Millimeter umrechnet, ergibt sich auch für eine *Silginat*-Abformung einer 10,00 mm langen Rille nach zwei Wochen Lagerung nur eine Schrumpfung um 0,71 mm auf somit 9,29 mm. Für die Zwecke von Studienmodellen oder Modellen zur Anfertigung von Schienen erscheinen derartig kleine Abweichungen unproblematisch. Die Schrumpfungswerte der getesteten Alginatabformmassen erscheinen im Vergleich als deutlich zu groß, um bei der Herstellung von Modellen vernachlässigt werden zu können, vor allem, wenn man bedenkt, dass diese Werte an Probekörpern gemessen wurden, die unter optimalen Bedingungen gelagert wurden. Wenn man für die Bewertung der Schrumpfung der Alginatate den Grenzwerte zur maximal tolerierbaren Dimensionsänderung der Silikone zugrunde legt (1,5 %), so kann lediglich eine Abformung mit *Jeltrate*, die unter optimalen Bedingungen gelagert wird nach 24 Stunden noch ausgegossen werden. Nach zwei Tagen ist die Schrumpfung aller Alginatate jedoch schon zu stark fortgeschritten, um noch zur Herstellung von Modellen verwendet werden zu können.

Die Schrumpfung der Alginatate wird vor allem durch die Verdunstung des eingelagerten Wassers bedingt und nimmt deshalb bis zur vollständigen Austrocknung der Abformung immer weiter zu. Die Schrumpfung von A-Silikonem wird nur durch die fortschreitende Vernetzung und eine thermische Kontraktion durch die Temperaturdifferenz zwischen Mund- und Raumtemperatur bedingt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Alginatabformungen der getesteten Alginatate auch unter optimalen Lagerungsbedingungen nicht einmal 24 Stunden aufbewahrt werden können und daher besser umgehend ausgegossen werden müssen, während die getesteten A-Silikonem nahezu unbegrenzt haltbar sind, da ihre Schrumpfung nicht durch flüchtige Bestandteile bedingt ist und somit über die Zeit nicht mehr zunimmt. Aufgrund der Ergebnisse wird empfohlen, dass Abformungen mit *Silginat* am besten bereits nach einer Woche Lagerung zur Modellherstellung ausgegossen werden sollen, da die Ergebnisse darauf hindeuten, dass *Silginat* im Unterschied zu den anderen getesteten Alginatersatzmaterialien einer Zunahme der Schrumpfung während der Lagerung unterliegt und somit nicht wie die übrigen Polyvinylsiloxane unbegrenzt lange vor dem Ausgießen gelagert werden soll.

Die Unregelmäßigkeit der Ergebnisse für *Xantalgin*, da an Tag 1 nur fünf und an Tag 2 jedoch sechs gemessene Einzelwerte vorhanden sind, wurde durch einen Eingabefehler bei den Rohdaten hervorgerufen, der sich jedoch nicht nachteilig auf die statistische



Auswertung auswirkt. Wegen zu starker Austrocknung und teilweise auftretender Schimmelbildung aufgrund der feuchten Lagerung konnten die Alginatprobekörper bzw. die messrelevanten Strukturen auf ihren Oberflächen nach 14 Tagen nicht mehr beurteilt werden. Die Oberflächen der Silikonprobekörper hingegen erschienen unter dem Mikroskop immer noch glatt und unverändert.

## 5.5 Zugversuch

Für die Ergebnisse der Materialeigenschaften, die durch den Zugversuch ermittelt wurden, wurden pro Material zehn Einzelmessungen durchgeführt. Die Messvorrichtung erkannte Ausreißerwerte automatisch, so dass solche Extremwerte bereits direkt nach der Messung verworfen und nicht in die statistische Auswertung mit einbezogen wurden. Dadurch ist die Anzahl an Einzelmessungen ( $n$ ) zum Teil reduziert und ist in den Tabellen 24, 26, 28, 30 und 32 grau markiert. Der Bereich, in dem sich die Messwerte der E-Module der Alginat befinden, lag unter der Messgrenze der verwendeten Software. Deshalb konnten für die Alginat keine Werte für die E-Module ausgewertet werden. Dies wurde in dem jeweiligen Tabellenfeld mit nicht auswertbar (n. a.) angegeben.

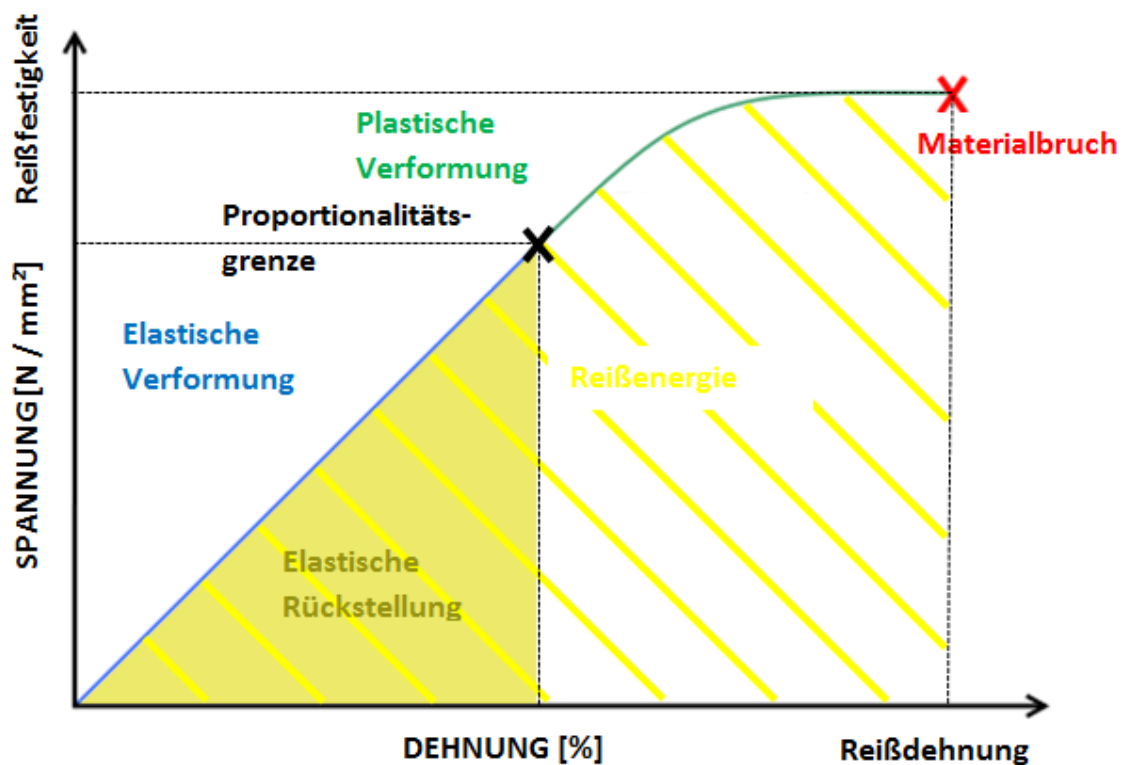


Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, modifiziert nach O'Brien (2008, S. 84)

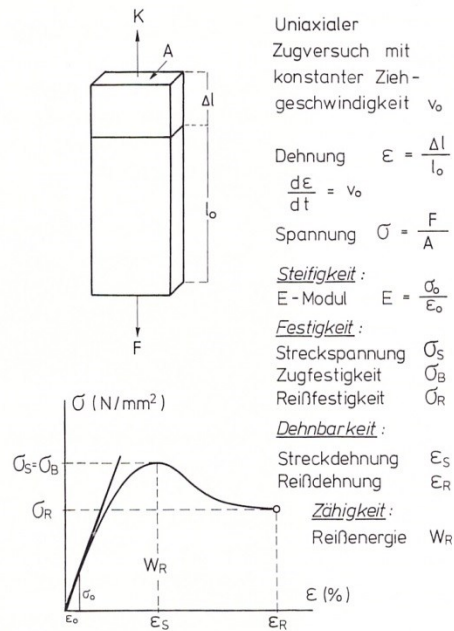


Abbildung 25: Schematische Darstellung der im Zugversuch gemessenen Materialeigenschaften (Retting 1991, S. 17)

Elastizität beschreibt die Eigenschaft eines konstanten Verhältnisses zwischen Spannung und Dehnung. Diese Konstante wird als E-Modul (Elastizitätsmodul) bezeichnet und sagt aus, dass die Verformung bzw. Dehnung eines Materials mit demselben Faktor zunimmt, wie die verformende Kraft bzw. Spannung. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, wie in Abbildung 24 dargestellt, entspricht der Wert des E-Moduls der Steigung der Kurve des Materials im Bereich bis zur Proportionalitätsgrenze. Das E-Modul ist eine inhärente Materialeigenschaft, also eine der wenigen Materialeigenschaften, die nicht durch Veränderungen der Mikrostruktur, wie bspw. durch Erwärmung, beeinflussbar ist. Die Proportionalitätsgrenze gibt die Kraft und Dehnung an, ab der die Verformung nicht mehr vollkommen elastisch abläuft und sich theoretisch komplett zurückstellt. Die Proportionalitätsgrenze ist eine materialspezifische Eigenschaft und wird auch als Elastizitätsgrenze bezeichnet. Sie ist schwer zu bestimmen, weshalb stattdessen meist die 0,2 %-Dehngrenze angegeben wird, die immer knapp über der jeweiligen Elastizitätsgrenze liegt. Oberhalb der Elastizitätsgrenze verhalten sich Materialien plastisch, d.h. die Verformung ist zumindest teilweise bleibend und selbst nach Abnahme der Spannung stellt sich ein so stark gedehntes Material nicht wieder gänzlich zurück. Wenn ein Material nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze kontinuierlich weiter gedehnt wird kommt es nach der Zunahme der bleibenden, d. h. plastischen Verformung, schließlich zum Versagen des Materials. Im Fall der Abformmaterialien handelt sich um

ein Zerreißen der Abformmasse. Die Kraft bzw. Spannung, die im Punkt des Versagens bzw. kurz vorher gemessen wird, wird als Reißfestigkeit bezeichnet (vgl. O'Brien 2008, S. 80ff). Die Gesamtdehnung ergibt sich aus elastischer und plastischer Dehnung. Als Reißdehnung wird die Dehnung bezeichnet, die im bzw. kurz vor dem Versagenspunkt gemessen wird. Die Fläche unter der Spannungsdehnungskurve beschreibt die Reißenergie, die Energie also, die aufgebracht werden muss, um das Material zum Zerreißen zu bringen. Als Toughness oder Dehnfestigkeit wird das Verhältnis zwischen Reißenergie und der Querschnittsfläche bezeichnet (vgl. O'Brien 2008, S. 85f).

## 5.5.1 Reißfestigkeit

### 5.5.1.1 Ergebnisse

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik enthalten die Tabellen 24 und 25.

Tabelle 24: Deskriptive Statistik Reißfestigkeit in N / mm<sup>2</sup>

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	1,18	1,00	3,29	1,09	1,74	1,01	2,05	2,22
<b>Standardabweichung</b>	0,02	0,01	0,28	0,03	0,04	0,01	0,09	0,06
<b>Median</b>	1,18	1,00	3,33	1,09	1,75	1,01	2,05	2,24
<b>Interquartilabstand</b>	0,03	0,02	0,53	0,05	0,07	0,02	0,13	0,11
<b>Minimum</b>	1,15	0,99	2,85	1,06	1,66	0,98	1,92	2,14
<b>Maximum</b>	1,22	1,01	3,65	1,14	1,79	1,03	2,20	2,31
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	9	8	10	10	9	10	9
	AP	BX	J	XA				
<b>Mittelwert</b>	0,54	0,56	0,25	0,38				
<b>Standardabweichung</b>	0,04	0,03	0,12	0,02				
<b>Median</b>	0,53	0,56	0,20	0,38				
<b>Interquartilabstand</b>	0,06	0,04	0,21	0,02				
<b>Minimum</b>	0,48	0,52	0,08	0,36				
<b>Maximum</b>	0,61	0,60	0,43	0,41				
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	15	9				

Tabelle 25: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Reißfestigkeit, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
AN C		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,261	0,466	0,000	0,009
AN V			0,009	1,000	1,000	1,000	0,203	0,050	1,000	1,000	0,278	1,000
AX				0,221	1,000	0,023	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PP					1,000	1,000	1,000	0,979	1,000	1,000	0,003	0,096
SI						1,000	1,000	1,000	0,027	0,055	0,000	0,001
SB							0,466	0,125	1,000	1,000	0,107	1,000
X C								1,000	0,002	0,003	0,000	0,000
X D									0,000	0,001	0,000	0,000
AP										1,000	1,000	1,000
BX											1,000	1,000
J												1,000
XA												

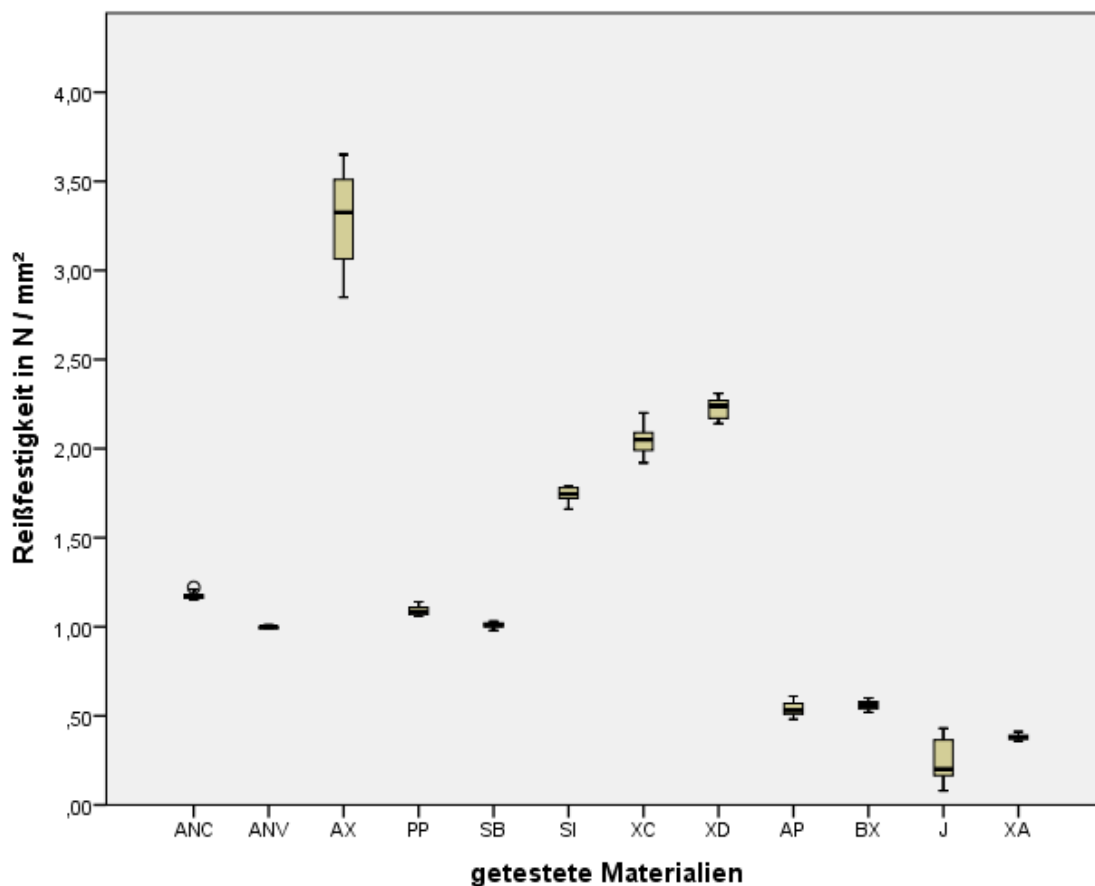


Abbildung 26: Ergebnisse für Reißfestigkeit

In Abbildung 26 sind die Reißfestigkeitswerte der einzelnen Materialien in  $N / mm^2$  dargestellt. Die Silikone zeigen deutlich größere Reißfestigkeitswerte, nämlich um das Zwei- bis 13-fache der Reißfestigkeiten, die für die Alginate gemessen wurden. Die

Silikone unterscheiden sich jedoch auch untereinander in den Werten deutlich. *AlginX Ultra* verfügt mit über die höchste mittlere Reißfestigkeit mit  $3,29 \text{ N/mm}^2$ , hat allerdings einen großen Interquartilabstand, d. h. weist eine große Streuung der einzelnen Messwerte auf, was auf inhomogene Mischungen hindeutet. *Xantasil Dynamix*, *Xantasil Cartridge* und *Silginat* haben relativ große Reißfestigkeiten mit Werten zwischen  $2,22 \text{ N/mm}^2$  und  $1,74 \text{ N/mm}^2$  während die restlichen Silikone, das sind *AlgiNot Cartridge* und *Volume*, *Position Penta* und *Status Blue* geringere Reißfestigkeiten von  $1,18 \text{ N/mm}^2$  bis  $1,00 \text{ N/mm}^2$  aufweisen. Für die Alginat wurden deutlich niedrigere Werte zwischen  $0,56 \text{ N/mm}^2$  (*Blueprint XCreme*) und  $0,25 \text{ N/mm}^2$  (*Jeltrate*) gemessen.

Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zeigen, dass die Unterschiede zwischen den Alginaten und allen Silikonen signifikant sind, mit Ausnahme der Unterschiede zwischen den Alginaten und *AlgiNot Volume*, sowie *Status Blue*. Die p-Werte der Vergleiche von *AlgiNot Volume* und *Status Blue* mit der Reißfestigkeit von *AlginX Ultra* sind signifikant.

*AlginX Ultra* besitzt eine deutlich höhere Reißfestigkeit als alle anderen getesteten Materialien. Auch der Unterschied von den beiden *Xantasil*-Produkten und *Silginat* zu den *AlgiNot*-Produkten, *Position Penta* und *Status Blue* ist erkennbar, wenn auch in geringem Ausmaß.

### **5.5.1.2 Diskussion**

Die Reißfestigkeit ist von der klinischen Bedeutung her eine Materialeigenschaft, deren Bewertung nur in Kombination mit dem elastischen Verhalten und der Reißdehnung eines Materials stattfinden kann. Aus rein mechanischer Sicht ist ein Abformmaterial dann besonders gut geeignet dünne Bereiche, wie Sulki, abzuformen, wenn diese bei der Entnahme nicht ausreißen, das Material also eine hohe Reißfestigkeit und Elastizität aufweist. Eine solche Abformung muss ohne Materialausreißungen entnommen werden können, so dass keine irritierenden Abformungsreste im Mund verbleiben. Da Abformungen jedoch von Geweben genommen werden, die nicht verletzt oder gereizt werden sollen, sind den Abformmaterialien bezüglich der Reißfestigkeit biologische Grenzen vorgegeben, die sich in den Richtwerten der Normen widerspiegeln sollen. Alginat besitzen relative niedrige Reißfestigkeiten, wodurch es bei Abformungen unter sich

gehender, schmaler Bereiche, wie bspw. von Zahnzwischenräumen, typischerweise zum Ausreißen von Abformmasse aus der abgebundenen Abformung kommt. Höhere Reißfestigkeiten würden bei Alginaten dazu führen, dass das Material vor dem Ausreißen stärker gedehnt und plastisch verformt würde. D. h. stärkere Verzerrungen würden innerhalb der Abformung auftreten und diese somit unbrauchbar machen. Alginatabformungen werden in der Regel nicht für die Darstellung von Präparationsgrenzen verwendet werden, die durch dünnauslaufende Sulkusbereiche dargestellt werden müssen. Daher erscheint es fraglich, ob hohe Reißfestigkeitswerte einen Vorteil bei der Materialauswahl für den Indikationsbereich von Alginatabformungen darstellen. Vielmehr besitzen Materialien mit geringer Reißfestigkeit bei Situationsabformungen den Vorteil, dass auf umständliches Ausblocken, bspw. von Brückengliedern, verzichtet werden kann, da das Abformmaterial in der Regel eher ausreißt, anstatt dass der Widerstand des Zements gegen abziehende Kräfte überschritten wird und eine Restauration bei der Entnahme der Abformung dezementiert wird. Hohe Reißfestigkeit ist für die Anwendungsbereiche von Alginatabformungen somit eher unwichtig. Obwohl es möglich ist, Silikone mit geringeren Reißfestigkeitswerten herzustellen, ist es durchaus sinnvoll, ihre Reißfestigkeit nicht so gering zu gestalten wie die von Alginaten. Höhere Reißfestigkeit stellt durchaus einen großen Vorteil dar, wenn man bedenkt, dass eine Abformung nicht nur die Entnahme aus dem Mund, sondern auch die Abnahme von dem Gipsmodell möglichst unbeschadet überstehen soll, wenn eine Abformung zur Herstellung mehrerer Modelle benutzt werden soll. Eine hohe Reißfestigkeit soll sicherstellen, dass Abformungen mehrfach ausgegossen werden können, ohne dass die Qualität der Modelle durch Ausreißen wichtiger Abformungsbereiche abnimmt. Aufgrund der Diskrepanz, dass es möglich sein soll, Abformungen mit Alginatsubstituten einerseits genauso einfach zu entnehmen wie Alginatabformungen, und sie dennoch genügend Stabilität gegenüber abziehenden Kräften aufweisen sollen, muss die Reißfestigkeit von Alginatsubstituten deutlich höher sein als bei Alginaten. Die Reißfestigkeit darf allerdings auch nicht so groß sein, dass ein Ausblocken unter sich gehender intraoraler Bereiche nötig wird. Ob die Reißfestigkeit von *AlginX Ultra*, die deutlich größer ist als die aller anderen Materialien, zu groß ist, muss durch weitere Untersuchungen ermittelt werden.

## 5.5.2 Reißdehnung

### 5.5.2.1 Ergebnisse

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik finden sich in den Tabellen 26 und 27.

Tabelle 26: Deskriptive Statistik Reißdehnung in Prozent

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	83,90	98,70	137,25	79,10	126,60	99,00	93,10	85,78
<b>Standardabweichung</b>	5,32	8,23	10,91	2,28	6,20	4,59	3,81	1,56
<b>Median</b>	85,00	98,50	135,50	78,50	126,50	99,00	92,00	86,00
<b>Interquartilabstand</b>	9,25	13,25	17,25	4,00	8,25	7,75	6,25	2,00
<b>Minimum</b>	75,00	87,00	121,00	77,00	114,00	92,00	86,00	84,00
<b>Maximum</b>	91,00	111,00	155,00	84,00	137,00	105,00	98,00	89,00
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	8	10	10	10	10	9
	AP	BX	J	XA				
<b>Mittelwert</b>	32,60	36,00	15,40	27,67				
<b>Standardabweichung</b>	2,32	2,40	9,25	1,87				
<b>Median</b>	32,00	36,50	10,00	28,00				
<b>Interquartilabstand</b>	3,50	4,25	16,00	3,50				
<b>Minimum</b>	30,00	32,00	4,00	25,00				
<b>Maximum</b>	37,00	39,00	31,00	30,00				
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	15	9				

Tabelle 27: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Reißdehnung, Signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
<b>AN C</b>		1,000	0,098	1,000	0,167	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,012	0,393
<b>AN V</b>			1,000	0,955	1,000	1,000	1,000	1,000	0,010	0,061	0,000	0,001
<b>AX</b>				0,008	1,000	1,000	1,000	0,207	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>PP</b>					0,013	0,690	1,000	1,000	1,000	1,000	0,196	1,000
<b>SI</b>						1,000	1,000	0,356	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>SB</b>							1,000	1,000	0,006	0,040	0,000	0,000
<b>X C</b>								1,000	0,076	0,366	0,000	0,006
<b>X D</b>									1,000	1,000	0,010	0,304
<b>AP</b>										1,000	1,000	1,000
<b>BX</b>											1,000	1,000
<b>J</b>												1,000
<b>XA</b>												



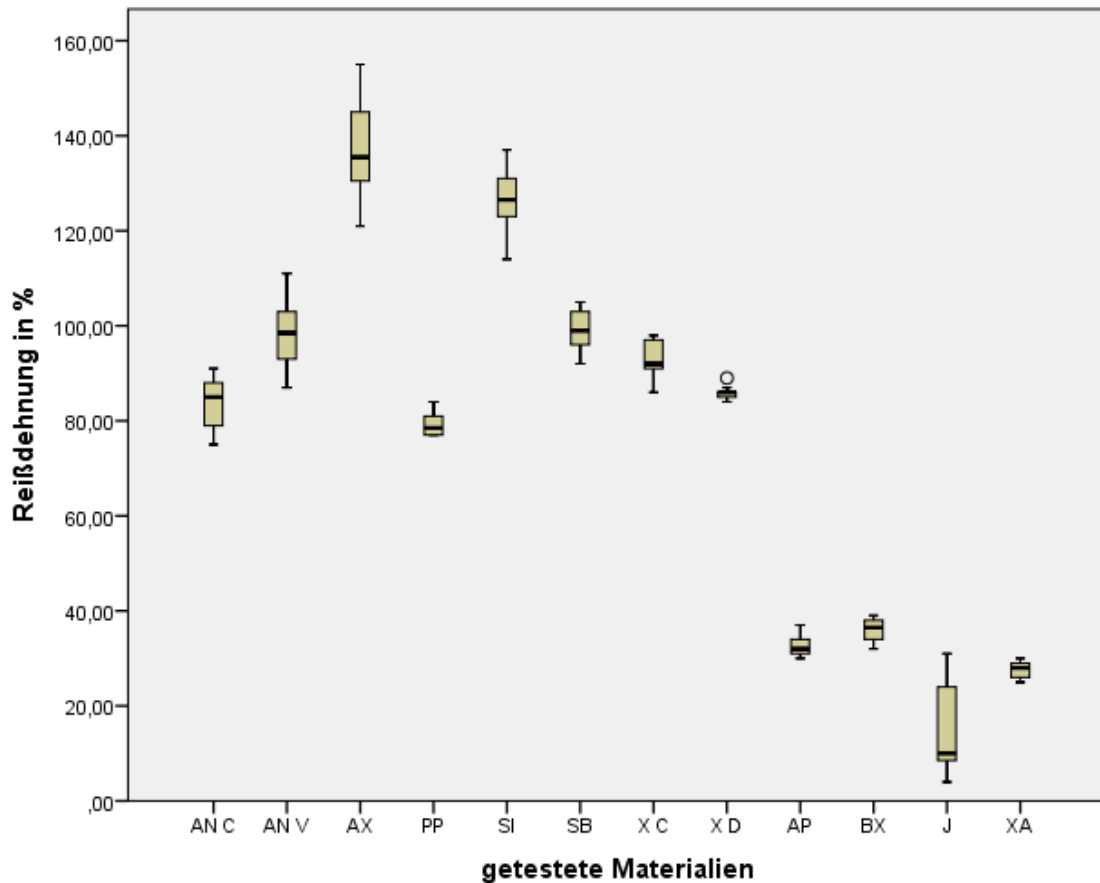


Abbildung 27: Ergebnisse für Reißdehnung

Das Boxplots-Diagramm (s. Abbildung 27) zeigt die Reißdehnungen der getesteten Abformmaterialien. Die Werte sind in der Einheit Prozent angegeben, bezogen auf die Ausgangslänge der Probekörper. Für *AlginX Ultra* (137,25 %) und *Silginat* (126,60 %) wurden die größten Reißdehnungswerte gemessen. Die anderen Silikone sind weniger stark dehnbar und weisen Werte auf, die sich im Bereich zwischen 99,00 % (*Status Blue*) und 79,10 % (*Position Penta*) befinden. Für die Alginate wurden Werte zwischen 36,00 % (*Blueprint XCreme*) und 15,40 % (*Jeltrate*) gemessen. Mit Ausnahme von *Position Penta* sind alle Silikone bezüglich der Reißdehnung signifikant unterschiedlich zu den Alginaten. Die p-Werte für die Vergleiche der Reißdehnungen von *AlginX Ultra* und *Silginat* mit der Reißdehnung von *Position Penta* sind ebenfalls signifikant. Der Unterschied von *Position Penta* zu den Alginaten ist dennoch deutlich erkennbar. *Position Penta* weist eine zwei- bis viereinhalbfach größere Reißdehnung auf als die Alginate. Unter den Alginaten besitzt *Jeltrate* mit Abstand die geringste Reißdehnung (15,40 %). Die übrigen Alginate können ca. um das Doppelte dieses Wertes gestreckt werden, bevor es zum Zerreißen kommt.

### 5.5.2.2 Diskussion

Der Begriff Reißdehnung besagt nichts darüber, wie schwer oder leicht ein Material gedehnt werden kann, sondern nur, wie weit es sich dehnt, bevor es reißt. Die Reißdehnung eines Abformmaterials kann theoretisch nicht groß genug sein, vorausgesetzt, dass sich die Dehnung möglichst vollständig wieder zurückstellt. Alginate müssen wegen ihrer geringeren Elastizität und ihres eingeschränkten Rückstellvermögens eine geringe Reißdehnung besitzen. Das bestätigen die Messergebnisse. Da es vor dem Bruch zu einer Einschnürung im Zuge Dehnung kommt, können bei ausreichend großer Reißdehnung auch deutlich feiner auslaufende Strukturen, wie Gingivalsulki, besser abgebildet werden. Es besteht jedoch wiederum die Frage, ob solche Strukturen für Situationsabformungen wichtig sind. Es ist leichter, Reißfestigkeit und Reißdehnung nicht separat, sondern im Zusammenhang zu beurteilen. Silikone ermöglichen durch ihre höhere Dehnbarkeit und Reißfestigkeit detailreiche Abformungen, die außerdem mehrfach ausgegossen werden können, da sie widerstandsfähiger sind und dünne Abdruckbereiche beim Entformen nicht so leicht ausreißen. Es ist wiederum festzuhalten, dass Reißdehnung, Reißfestigkeit und Elastizität, sowie Rückstellvermögen der Materialien sich stark gegenseitig beeinflussen, so dass diese Materialeigenschaften gut aufeinander abgestimmt werden müssen, um gute Abformungen zu ermöglichen.

### 5.5.3 Reißenergie und Toughness

#### 5.5.3.1 Ergebnisse

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Tabellen 28 bis 31 zeigen die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik.

Tabelle 28: Deskriptive Statistik Reißenergie in Nmm

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	54,00	61,60	172,88	46,22	109,70	53,70	75,20	77,00
<b>Standardabweichung</b>	4,92	6,02	29,85	1,56	7,73	3,16	6,44	2,35
<b>Median</b>	55,50	62,50	171,00	46,00	111,50	53,50	73,50	76,00
<b>Interquartilabstand</b>	9,00	9,00	54,00	2,00	10,00	5,00	12,00	3,00
<b>Minimum</b>	46,00	52,00	130,00	43,00	93,00	49,00	65,00	73,00
<b>Maximum</b>	60,00	70,00	218,00	48,00	120,00	59,00	84,00	81,00
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	8	9	10	10	10	9
	AP	BX	J	XA				
<b>Mittelwert</b>	8,20	9,20	2,40	4,89				
<b>Standardabweichung</b>	1,03	0,92	1,99	0,60				
<b>Median</b>	8,00	9,50	1,00	5,00				
<b>Interquartilabstand</b>	2,00	2,00	3,00	1,00				
<b>Minimum</b>	7,00	8,00	0,00	4,00				
<b>Maximum</b>	10,00	10,00	6,00	6,00				
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	15	9				

Tabelle 29: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Reißenergie, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
AN C		1,000	0,113	1,000	0,398	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,006	0,207
AN V			0,951	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,292	0,793	0,000	0,016
AX				0,005	1,000	0,103	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PP					0,019	1,000	0,555	0,441	1,000	1,000	0,404	1,000
SI						0,364	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB							1,000	1,000	1,000	1,000	0,007	0,227
X C								1,000	0,008	0,029	0,000	0,000
X D									0,007	0,024	0,000	0,000
AP										1,000	1,000	1,000
BX											1,000	1,000
J												1,000
XA												

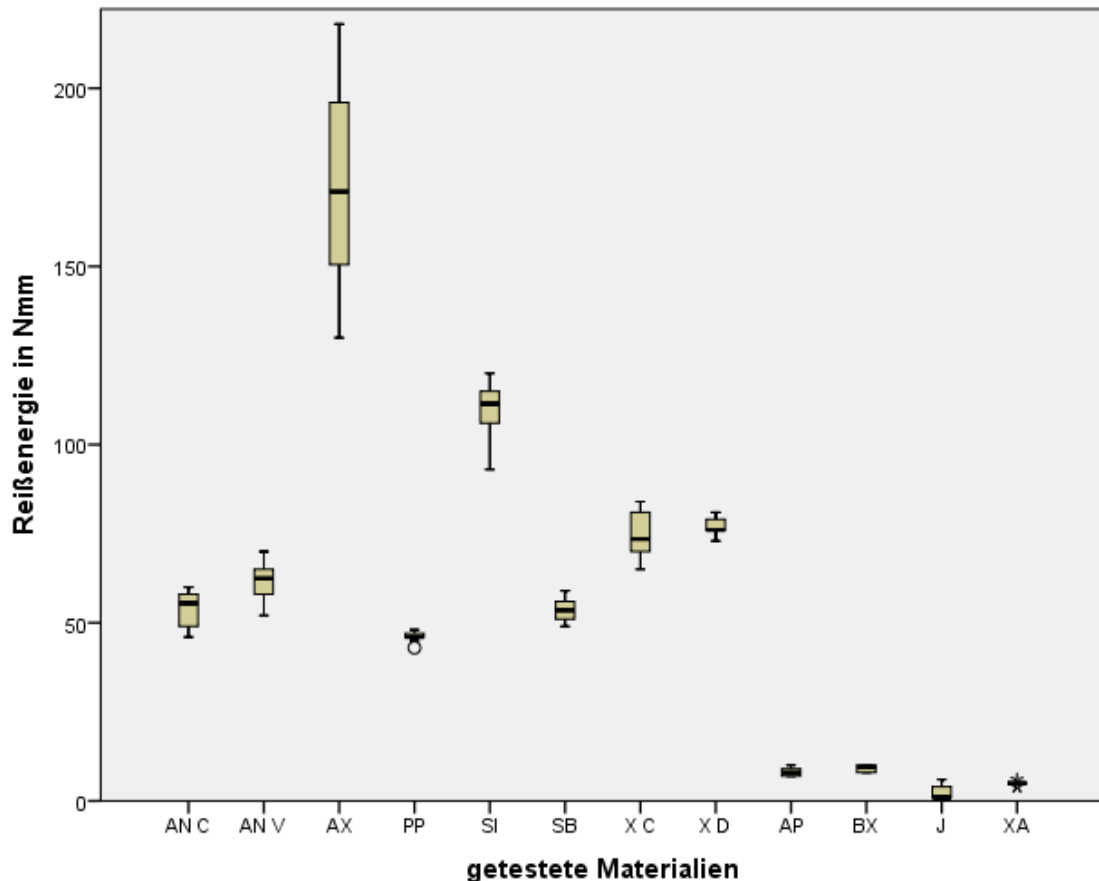


Abbildung 28: Ergebnisse für Reißenergie

Abbildung 28 zeigt die Reißenergiewerte, die für die getesteten Materialien gemessen wurden in der Einheit Nmm. *AlginX Ultra* (172,88 Nmm) und *Silginat* (109,70 Nmm) besitzen die größten Werte, wobei *AlginX Ultra* eine große Streuung der Einzelwerte aufweist. Die übrigen Silikone weisen Werte zwischen 77,00 Nmm (*Xantasil Dynamix*) und 46,20 Nmm (*Position Penta*). Die Alginatate besitzen Reißenergiewerte im Bereich zwischen 9,20 Nmm (*Blueprint XCreme*) und 2,40 Nmm (*Jeltrate*). Die p-Werte der Vergleiche von *AlginX Ultra* und *Silginat* mit *Position Penta* zeigen, dass die Unterschiede der Reißenergien dieser Materialien signifikant sind. Auch die p-Werte für die Vergleiche der Silikone, mit Ausnahme von *Position Penta*, mit den Alginaten zeigen, dass die Unterschiede zwischen den beiden Materialarten signifikant sind. Obwohl die p-Werte für die Vergleiche zwischen *Position Penta* und den Alginaten nicht signifikant sind, ist der Unterschied dennoch deutlich. *Position Penta* hat eine fünffach größere Reißenergie als *Blueprint XCreme*, das Alginat mit der größten Reißenergie.

Der Kruskal-Wallis-Test für die Untersuchung der Toughness zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik enthalten Tabellen 30 und 31.

Tabelle 30: Deskriptive Statistik Toughness in N / mm<sup>2</sup>

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	0,67	0,77	2,16	0,58	1,37	0,67	0,94	0,96
<b>Standardabweichung</b>	0,06	0,08	0,38	0,02	0,10	0,04	0,08	0,03
<b>Median</b>	0,69	0,78	2,14	0,58	1,39	0,67	0,92	0,95
<b>Interquartilabstand</b>	0,12	0,12	0,67	0,03	0,12	0,07	0,14	0,05
<b>Minimum</b>	0,57	0,65	1,62	0,54	1,16	0,62	0,81	0,91
<b>Maximum</b>	0,75	0,88	2,73	0,60	1,50	0,73	1,05	1,01
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	8	9	10	10	10	9
	AP	BX	J	XA				
<b>Mittelwert</b>	0,10	0,11	0,03	0,06				
<b>Standardabweichung</b>	0,01	0,01	0,03	0,01				
<b>Median</b>	0,11	0,12	0,01	0,06				
<b>Interquartilabstand</b>	0,02	0,01	0,04	0,02				
<b>Minimum</b>	0,09	0,10	0,00	0,05				
<b>Maximum</b>	0,13	0,13	0,08	0,07				
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	15	9				

Tabelle 31: p-Werte aus dem Post-hoc-Test Toughness, signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D	AP	BX	J	XA
<b>AN C</b>		1,000	0,109	1,000	0,383	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,006	0,228
<b>AN V</b>			0,960	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,298	0,765	0,000	0,017
<b>AX</b>				0,005	1,000	0,107	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>PP</b>					0,020	1,000	0,584	0,460	1,000	1,000	0,378	1,000
<b>SI</b>						0,375	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>SB</b>							1,000	1,000	1,000	1,000	0,007	0,233
<b>X C</b>								1,000	0,008	0,029	0,000	0,000
<b>X D</b>									0,007	0,023	0,000	0,000
<b>AP</b>										1,000	1,000	1,000
<b>BX</b>											1,000	1,000
<b>J</b>												1,000
<b>XA</b>												

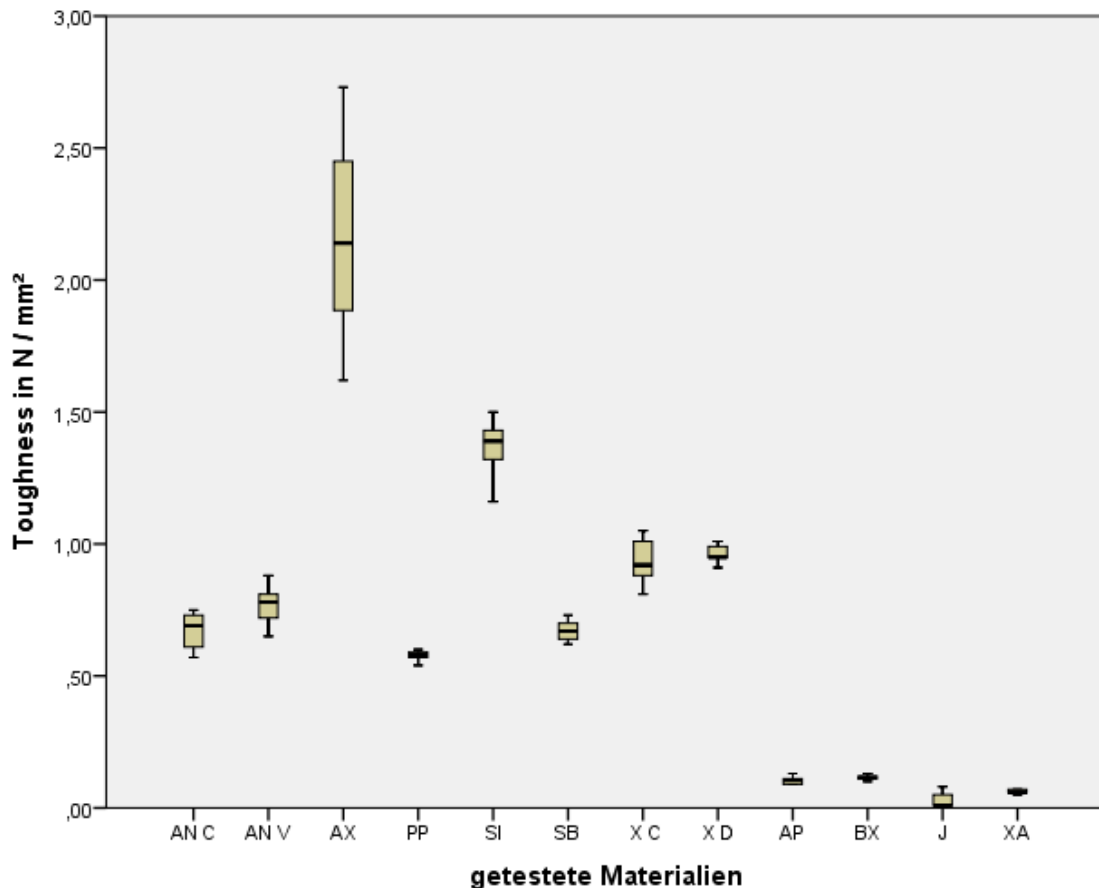


Abbildung 29: Ergebnisse für Toughness

In Abbildung 29 sind die Ergebnisse für die Toughness der getesteten Materialien in der Einheit  $\text{N} / \text{mm}^2$  dargestellt. Da die Toughness die Reißenergie in Abhängigkeit von dem Volumen des Probekörpers darstellt, entsprechen die Ergebnisse denjenigen der Reißenergie. Die p-Werte verhalten sich ebenfalls ähnlich wie die p-Werte für Reißenergie.

*AlginX Ultra* ( $2,16 \text{ N} / \text{mm}^2$ ) und *Silginat* ( $1,37 \text{ N} / \text{mm}^2$ ) besitzen die größten Werte für Toughness unter den gemessenen Materialien. *AlginX Ultra* zeigt jedoch eine große Streuung der einzelnen Messwerte. Die übrigen Silikone weisen Werte zwischen  $0,96 \text{ N} / \text{mm}^2$  (*Xantasil Dynamix*) und  $0,58 \text{ N} / \text{mm}^2$  (*Position Penta*). Die Messwerte der Alginate liegen im Bereich zwischen  $0,11 \text{ N} / \text{mm}^2$  (*Blueprint XCreme*) und  $0,03 \text{ N} / \text{mm}^2$  (*Jeltrate*). Die p-Werte der Vergleiche von *AlginX Ultra* und *Silginat* mit *Position Penta* zeigen, dass die Unterschiede zwischen diesen Materialien signifikant sind. Die p-Werte für die Vergleiche der Silikone, mit Ausnahme von *Position Penta*, mit den Alginaten zeigen, dass die Unterschiede zwischen den beiden Materialarten ebenfalls signifikant sind. Obwohl die p-Werte für die Vergleiche zwischen *Position*

*Penta* und den Alginaten nicht signifikant sind, ist der Unterschied dennoch deutlich. *Position Penta* hat eine fünffach größere Toughness als *Blueprint XCreme*, das Alginat mit der größten Toughness.

### 5.5.3.2 Diskussion

Die Reißenergie, die ja die Fläche unter der Kennlinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm darstellt, ist abhängig von der Reißfestigkeit und Reißdehnung eines Materials. So ist es möglich, gleiche Reißenergiewerte sowohl durch Kombination von geringer Reißfestigkeit und hoher Reißdehnung, als auch durch die Kombination einer hohen Reißfestigkeit mit einer geringen Reißdehnung zu erreichen. Die größten Reißenergiewerte haben Materialien, die sowohl hohe Reißfestigkeit, als auch Reißdehnung besitzen. Die Reißenergie bezeichnet die Arbeit bzw. Energie, die an der Abformmasse verrichtet bzw. von ihr absorbiert werden kann, bis es zum Versagen kommt. Als alleiniger Wert hat die Reißenergie nur eine geringe Aussagekraft. Betrachtet man jedoch das Verhältnis von Reißfestigkeit und -dehnung, aus dem sich die jeweilige Reißenergie ergibt, so können mithilfe dieser drei Werte die Abformmaterialien bezüglich ihrer Eigenschaften gegenüber Zugbelastungen deutlich besser eingeteilt und unterschieden werden. Der bedeutendste dieser drei Parameter ist die Reißdehnung, wie oben bereits erläutert, vor allem für Materialien, die sich nahezu vollständig zurückstellen.

Die Toughness setzt die Reißenergie in Verbindung zum jeweiligen Volumen der Abformmasse und erlaubt somit eine Vorhersage, welche Teile der Abformung zuerst Ausreißen werden. Bei den verwendeten Prüfkörpern ergibt sich durch den Abstand der beiden Messfühler von 10 mm zu Beginn der Messung ein Volumen von ungefähr 80 mm<sup>3</sup>, das als fester Faktor für die Ermittlung der Toughness aus der Reißenergie verwendet wurde. Deshalb ähneln sich die Ergebnisse von Toughness und Reißfestigkeit auch so stark. Bei homogenen gemischten Materialien handelt es sich hierbei normalerweise um die Bereiche der Abformung, in denen das Material am dünnsten ist, da hier die Reißenergie am schnellsten überschritten wird.

## 5.5.4 E-Modul

### 5.5.4.1 Ergebnisse

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Materialien ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sowie die deskriptive Statistik enthalten Tabellen 32 und 33.

Tabelle 32: Deskriptive Statistik E-Modul in N / mm<sup>2</sup>, ohne Alginate

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>Mittelwert</b>	1,71	1,49	1,96	1,61	1,87	1,40	2,25	2,73
<b>Standardabweichung</b>	0,03	0,04	0,06	0,05	0,10	0,04	0,03	0,09
<b>Median</b>	1,71	1,49	1,98	1,61	1,91	1,40	2,25	2,74
<b>Interquartilabstand</b>	0,06	0,05	0,09	0,07	0,15	0,06	0,05	0,16
<b>Minimum</b>	1,67	1,42	1,86	1,50	1,65	1,35	2,20	2,62
<b>Maximum</b>	1,76	1,56	2,03	1,69	1,98	1,49	2,31	2,85
<b>Anzahl Einzelmessungen</b>	10	10	8	10	10	10	10	10

Tabelle 33: p-Werte aus dem Post-hoc-Test E-Modul, ohne Alginate, Signifikante Ergebnisse ( $p < 0,05$ ) sind grau hinterlegt

	AN C	AN V	AX	PP	SI	SB	X C	X D
<b>AN C</b>		1,000	1,000	1,000	1,000	0,090	0,195	0,006
<b>AN V</b>			0,014	1,000	0,068	1,000	0,000	0,000
<b>AX</b>				0,339	1,000	0,000	1,000	1,000
<b>PP</b>					1,000	1,000	0,005	0,000
<b>SI</b>						0,003	1,000	0,178
<b>SB</b>							0,000	0,000
<b>X C</b>								1,000
<b>X D</b>								

Aufgrund der Einstellung der Messvorrichtung konnten für die Alginate keine E-Modul-Werte ermittelt werden, da diese Probekörper zu früh versagten. Daher sind keine E-Modulwerte für die getesteten Alginate vorhanden. Wegen der geringeren Anzahl an Materialien wurden die p-Werte durch das Statistikprogramm neu berechnet, sodass sich andere signifikante Unterschiede ergaben als bei Betrachtung von zwölf getesteten Materialien.



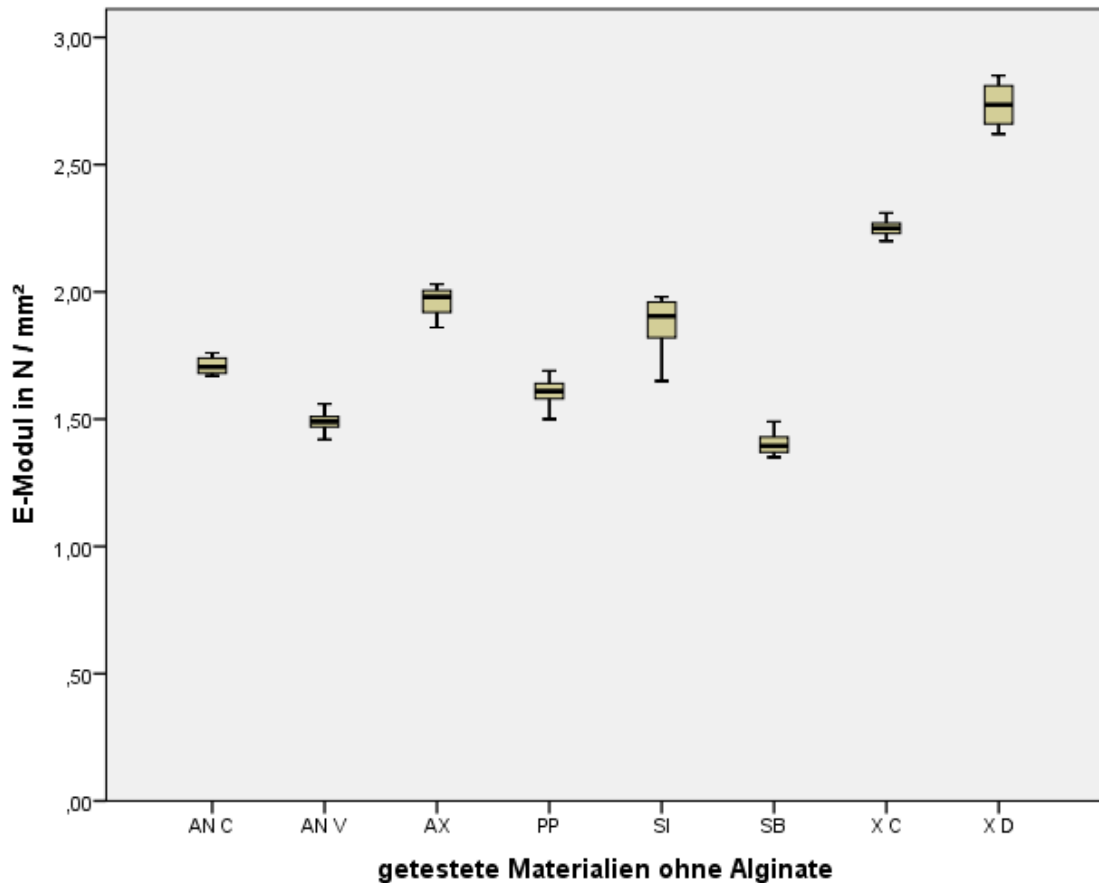


Abbildung 30: Ergebnisse für E-Modul, ohne Alginate

Dargestellt in Abbildung 30 finden sich die E-Module der Silikon-Abformmaterialien in  $\text{N} / \text{mm}^2$ . *Xantasil Dynamix* ( $2,73 \text{ N} / \text{mm}^2$ ) und *Xantasil Cartridge* ( $2,25 \text{ N} / \text{mm}^2$ ) besitzen die höchsten E-Module unter den getesteten Materialien und die p-Werte für alle Vergleiche mit den übrigen Silikonem, außer mit *AlginX Ultra* und *Silginat*, sind signifikant. *Status Blue* hat das geringste E-Modul ( $1,40 \text{ N} / \text{mm}^2$ ) und die p-Werte der Vergleiche mit den E-Modul-Werten von den *Xantasil*-Produkten, *AlginX Ultra* und *Silginat* sind signifikant. *AlginX Ultra* hat nach *Xantasil*-Varianten das nächstgrößte E-Modul ( $1,96 \text{ N} / \text{mm}^2$ ) und auch der p-Wert für den Vergleich mit *AlgiNot Volume* ist signifikant.

#### 5.5.4.2 Diskussion

Ähnlich wie der Test der Verformung unter Druck dient auch das E-Modul zur Beschreibung der Elastizität bzw. Steifigkeit eines Materials.

Bei den Abformmaterialien wird mithilfe des E-Moduls das Verhalten zwischen Spannung und Dehnung im Bereich der elastischen Verformung beschrieben. In diesem Be-

reich besteht eine direkte materialspezifische Proportionalität zwischen applizierter Kraft und Dehnung, die die Starrheit bzw. Flexibilität eines Materials beschreibt. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird dies durch die Steigung der Kurve im linearen Verlauf dargestellt. Das Ende des linearen Verlaufs wird als Proportionalitätsgrenze bezeichnet, die Kraft und Spannung also, ab der die Verformung auch plastisch stattfindet. Je größer das E-Modul ist, desto steifer und unnachgiebiger ist ein Material. Je näher Proportionalitätsgrenze und Reißfestigkeit zusammenliegen, desto elastischer verhält sich ein Material, da der Bereich der plastischen Verformung dadurch sehr klein wird.

Wie auch bei dem Versuch zur Bestimmung der Verformung unter Druck, handelt es sich bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls wieder um ein Maß für die Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit der abgebundenen Abformmassen. Aufgrund der geringen Dehnbarkeit der Alginat- und der Limitationen der verwendeten Messvorrichtung war kein Vergleich zwischen Silikonen und Alginaten möglich. Im Bereich der elastischen Verformung, der bei der Entnahme der Abformung aus dem Mund möglichst nicht überschritten werden sollte, zeigen alle Silikone ähnliche Werte für das E-Modul. Es sind zwar signifikante Unterschiede feststellbar, jedoch resultieren diese vor allem aus der geringeren Anzahl an Vergleichen und Materialien, sodass keine abschließende Aussage über die Steifigkeit der einzelnen Materialien getroffen werden kann.

## 5.6 Homogenität

### 5.6.1 Ergebnisse

Zur Messung der Homogenität wurden pro Material acht Probekörper hergestellt. In den Tabellen 34 bis 37 sind die verschiedenen Ausprägungsgrade der einzelnen Eigenschaften sowie eine exemplarische Aufnahme der Querschnittsfläche eines Probekörpers aufgeführt.

Tabelle 34: Kriterien, Bewertungspunkte und exemplarische Querschnitte zur Beurteilung der Homogenität 1/4


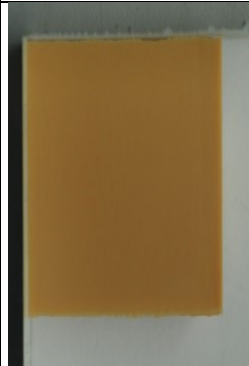

	AN C	AN V	AX
<b>Farbliche Durchmischung</b>	2	1	2
<b>Blasen</b>	0	0	0
<b>farblich erkennbare Füllkörper</b>	1	0	1
<b>Querschnitt</b>			
<b>Gesamtpunktwert</b>	3	1	3

Tabelle 35: Kriterien, Bewertungspunkte und exemplarische Querschnitte zur Beurteilung der Homogenität 2/4


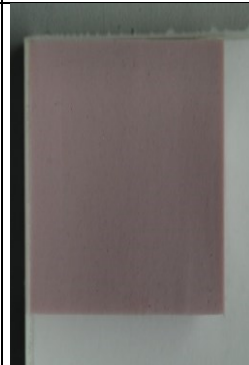

	PP	SI	SB
<b>Farbliche Durchmischung</b>	0	0	0
<b>Blasen</b>	0	1	0
<b>farblich erkennbare Füllkörper</b>	0	1	0
<b>Querschnitt</b>			
<b>Gesamtpunktwert</b>	0	2	0

Tabelle 36: Kriterien, Bewertungspunkte und exemplarische Querschnitte zur Beurteilung der Homogenität 3/4




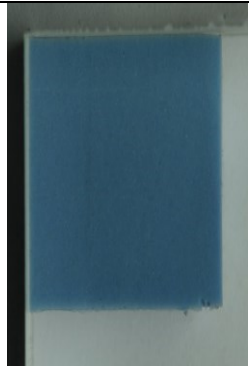


	<b>X C</b>	<b>X D</b>	<b>AP</b>
<b>Farbliche Durchmischung</b>	1	0	0
<b>Blasen</b>	1	1	0
<b>farblich erkennbare Füllkörper</b>	0	0	0
<b>Querschnitt</b>			
<b>Gesamtpunktwert</b>	2	1	0

Tabelle 37: Kriterien, Bewertungspunkte und exemplarische Querschnitte zur Beurteilung der Homogenität 4/4

	<b>BX</b>	<b>J</b>	<b>XA</b>
<b>Farbliche Durchmischung</b>	0	0	0
<b>Blasen</b>	1	1	0
<b>farblich erkennbare Füllkörper</b>	0	0	0
<b>Querschnitt</b>			
<b>Gesamtpunktwert</b>	1	1	0

*AlgiNot Cartridge*, *AlginX Ultra* und *Xantasil Cartridge* zeigen deutlich eine unvollständige Durchmischung von Basis- und Katalysatormasse. Blasen kommen in den einzelnen Probekörpern unterschiedlich oft und auch in variierender Größe vor, ohne dass sich eine Gesetzmäßigkeit erkennen lässt. Bei *AlgiNot Cartridge*, *AlginX Ultra* und *Silginat* sind farbige Füllkörper erkennbar.

### **5.6.2 Diskussion**

Diejenigen Materialien, die mit Mischpistolen appliziert werden, also *AlgiNot Cartridge*, *AlginX Ultra* und *Xantasil Cartridge*, weisen eine deutlich schlechtere farbliche Durchmischung auf als die übrigen Materialien. Wenn man Interquartilabstände als Maß für die Streuung der Ergebnisse ansieht und diese Streuung mit einem geringen Grad an Durchmischung der Materialien in Verbindung setzt, so fallen die großen Streuungen der Messwerte im Zugversuch von *AlginX Ultra* und für *AlgiNot Cartridge* bei dem Test der elastischen Rückstellung nach Verformung auf. Allerdings können die Streuungen der Messwerte nicht direkt mit der unvollständigen Vermischung der Materialkomponenten in Verbindung gesetzt werden, da auch die Farbwahl von Basis- und Katalysatormasse einen deutlichen Einfluss auf die Erscheinung der gemischten Abformmasse haben. So kann durch die Verwendung von Pastellfarben eine deutlich bessere Durchmischung suggeriert werden als mit kontrastreicheren Farben. Insgesamt reichen die gesammelten Daten bei Weitem nicht aus, um einen Einfluss des Homogenitätsgrades der gemischten Abformmassen auf die Materialeigenschaften feststellen zu können. Außerdem kann es auch nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei den Applikationsvarianten der Materialien *AlgiNot* und *Xantasil* um unterschiedliche Materialien handeln könnte, in den Verpackungen also trotz des gleichen Namens und gleicher Färbung, Materialien abgepackt sind, die Unterschiede in der Zusammensetzung aufweisen könnten.

Auch die Bewertung von Vorhandensein, Quantität und Größe sowohl von Blasen als auch von farbigen Füllkörpern reicht nicht aus, um allgemeine Aussagen formulieren zu können, da pro Material ja nur ein Querschnittsbild analysiert wurde.

Durch die Untersuchung der Schnittflächen der Probekörper sollten zunächst die Aussagekraft und Relevanz der verwendeten Kriterien zur Bewertung der Homogenität zahnärztlicher Abformmaterialien überprüft werden. Um valide Aussagen zu Homoge-

nität und ihrer Bedeutung treffen zu können, bzw. darüber, ob und in wie weit ein höherer Grad an Homogenität mit besseren physikalischen Eigenschaften korreliert, sind allerdings noch weitere Untersuchungen notwendig. Festgehalten werden kann, dass die maschinelle Mischung von Silikonen zu einer besseren Durchmischung von Basis- und Katalysatorpaste führt, als durch die Mischung mit einer Mischpistole erreicht werden kann.

## 6. Zusammenfassung

Diese Dissertation untersucht mechanische Werkstoffeigenschaften von Alginaten und Alginatsubstituten. Nachdem im Literaturüberblick die Unterschiede, Eigenschaften und Indikationsbereich von Abformung mithilfe von Alginaten und Silikonen vorgestellt wurden, schloss sich im Hauptteil der Arbeit die Präsentation der Messmethodik, der Ergebnisse und die Diskussion der Ergebnisse an. Bei den Prüfungen lassen sich Unterschiede zwischen den Materialien feststellen. Da es sich bei dieser Arbeit um eine in vitro Studie handelt, bestehen gewisse Einschränkungen bezüglich der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf die klinische Situation.

Nachdem die Werkstoffeigenschaften und ihre Bedeutung im Hauptteil beschreiben wurden, sollen nun die Forschungsfragen wieder aufgegriffen und soweit möglich beantwortet werden.

- a) Wie unterscheiden sich die Alginat und Alginatsubstitute bezüglich ihrer Materialeigenschaften?

Die getesteten Silikone und Alginat unterschieden sich in den Materialprüfungen zum Teil sehr deutlich.

Die Silikone weisen eine deutlich größere Elastizität als die Alginat auf. Die Alginat lassen sich einfacher aus Unterschnitten entfernen und sind nachgiebiger als die Alginateersatzmaterialien. Aufgrund ihrer geringeren Elastizität kann es jedoch auch leichter zu Verzerrungen und Materialausreißungen kommen. Silikone sind in ihrer Eigenschaft als Alginatsubstitute in der Lage detailreichere und akkuratere Abformungen zu garantieren, da ihr hohes Rückstellungsvermögen in nahezu vollständig elastischer Verformung resultiert. Demgegenüber besitzen Alginat einen geringeren Widerstand gegenüber Druck, so dass Alginateabdrücke leichter aus dem Mund oder vom Gipsmodell entfernt werden können, wodurch kein zeitraubendes Ausblocken, selbst stark unter sich gehender Bereiche, vor der Abdrucknahme erforderlich ist. V. a. im parodontal vorgeschädigten Gebiss haben die Alginat, da ihre Reißfestigkeit so gering ist, den Vorteil, dass bei ihrer Verwendung das Risiko einer unbeabsichtigten Extraktion minimal ist. Bei den Alginaten kommt es bei der Entnahme aus dem Mund häufig zu Materialausreißungen in schmalen, unter sich gehenden Bereichen, wie Interdentalräumen, aufgrund ihrer geringeren Reißfestigkeit. Diese Ausreißungen stellen jedoch keinen großen Nachteil dar, solange die Abformungen nur zur Herstellung von Studien- und Gegenkiefermodelle

verwendet werden. Auch die Reißdehnung der Alginat-Drucke ist deutlich geringer als bei den Silikon-Drucke, allerdings trägt sie in Kombination mit dem geringeren Rückstellungsvermögen dazu bei, dass Alginat-Drucke bei der Entnahme nicht zu stark verformt, d. h. plastisch verzerrt und dadurch unbrauchbar werden. Sowohl Alginat-Drucke als auch Silikon-Drucke sind in der Lage eine 20 µm-Linie durchgängig abzuformen. Dennoch liefern Silikon-Drucke detailgenauere Modelle aufgrund ihrer glatteren Oberflächenstruktur, größeren Elastizität und da sie sich nahezu vollständig zurückstellen. Faria et al. veröffentlichten 2008 eine Studie, in der die Detailwiedergabegenauigkeit von verschiedenen Abformmaterialien, so auch von Alginaten, darunter Jeltrate, und A-Silikon-Drucke miteinander verglichen wurde. Gipsmodelle wurden aus den Abformungen des Meistermodells hergestellt und fotografiert. Dann wurden die Fotos der Modelle mit einem Foto des Meistermodells verglichen und die Diskrepanz gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Alginat-Drucke Modelle mit ähnlich guten Oberflächenwiedergabegenauigkeiten erzielt werden können, wie mit Silikon-Drucke, vorausgesetzt, dass die Herstellerangaben zur Verarbeitung, Anwendung und zum Ausgießen mit Gips genau eingehalten werden. Allerdings limitieren die Nachteile von Alginat, nämlich eine mangelhafte Dimensionsstabilität und rauere Oberfläche, die durch die schnelle Austrocknung bedingt sind, seine Anwendungsbereiche vornehmlich zur Herstellung von Modellen für diagnostische Zwecke (vgl. Faria et al. 2008, S. 296). Sun et al. (2010) führten ebenfalls Versuche zur Ermittlung der Abformgenauigkeit von Alginat-, Silikon- und Polyätherabformmaterialien durch, indem die Abformungen eines Meistermodells mit den verschiedenen Abformmaterialien mit Gips ausgegossen, diese Gipsmodelle per Scanner vermessen und die Ergebnisse mit den Maßen des Meistermodells verglichen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass nur die Diskrepanz von Modellen von Alginat-Drucke im Vergleich zu dem Meistermodell signifikant ist. Laut Sun et al. sind Alginat-Drucke somit nicht zur Herstellung akkurater Gipsmodelle geeignet, v. a. weil die Modelle aus Alginat-Drucke die größten Abweichungen in den Bereichen zwischen Zahnhals und Gingiva aufweisen. Insgesamt bestehen gegensätzliche Meinungen dazu, inwiefern mit Alginat-Drucke akkurate Modelle hergestellt werden können, die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen jedoch, dass Alginat-Drucke ebenso wie Silikon-Drucke in der Lage sind 20 µm große Strukturen abzubilden. Zur Güte der Modelle lässt sich aufgrund der Messmethodik jedoch keine Aussage treffen. Im Gegensatz



kann festgehalten werden, dass die getesteten Silikonabformmassen aufgrund der Messergebnisse mindestens 14 Tage gelagert werden können. Außerdem können Silikonabformungen mehrfach ausgegossen werden, sodass identische Duplikatgipsmodelle hergestellt werden können (vgl. Kumar & Patil 2013, S. 272–278). Alginatabformung hingegen sind selbst unter optimalen Bedingungen nicht einmal 24 Stunden lagerungsfähig und ein erneutes Ausgießen von Abdrücken führt zu deutlich ungenaueren Modellen (vgl. Chen et al. 2004). Kumar & Patil haben die Detailwiedergabegenauigkeit und Dimensionsänderung von Polyäthern, kondensationsvernetzenden und additionsvernetzenden Silikonen im Hinblick auf die Möglichkeit der mehrfachen Modellherstellung aus einem Abdruck untersucht. Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, dass es zwischen den Gipsmodellen aller getesteter Abformmaterialien zwar Unterschiede sowohl zwischen den Abformmaterialien, als auch zwischen den verschiedenen Ausgußzeitpunkten gab, diese Unterschiede jedoch bis zur Herstellung des vierten Modells von einer Abformung insignifikant waren. Kumar & Patil schlossen daraus, dass aus einem Abdruck unabhängig ob Polyäther, K- oder A-Silikon als Abformmaterial verwendet werden bis zu vier Gipsmodelle hergestellt werden können, ohne dass die Genauigkeit der Modelle signifikant schlechter ist. Außerdem konnten sie nachweisen, dass sowohl K- als auch A-Silikone ein deutlich besseres Rückstellungsvermögen nach Deformation aufweisen als Polyäther. Torassian et al. gossen Alginat- und Alginatsubstitutabformungen, nämlich *AlgiNot* und *Position Penta*, zu drei verschiedenen Zeitpunkten nach Entnahme der Abformungen mit Gips aus und stellten in ihren Untersuchungen fest, dass zum Zeitpunkt ihrer ersten Messung, d. h. nach 72 Stunden, die Alginatprobekörper deutliche Schrumpfungen aufwiesen, wohingegen die getesteten Alginatsubstitute auch bei der letzten Messung, d. h. nach einwöchiger Lagerung der Abformung, immer noch zur Herstellung dimensionsgenauer Gipsmodelle verwendet werden konnten. Pereira et al. (2010) konnten durch vergleichende Untersuchungen zur Dimensionsstabilität von Polyäthern, kondensationsvernetzenden und additionsvernetzenden Silikonen, sowie von Polysulfiden nachweisen, dass unter den Elastomeren die A-Silikone die beste Dimensionsstabilität aufweisen. In den Messungen der vorliegenden Arbeit können Unterschiede in der Homogenität der Mischung zwischen Silikonen, die mit Mischpistolen angewendet werden und solchen, die mit automatischen Mischmaschinen verwendet werden, festgestellt werden. Hierbei fällt die teilweise inkomplette und optische inho-

mogene Vermischung von Basis- und Katalysatormasse bei der Verwendung von Mischpistolen auf. Allerdings wurden in dieser Arbeit keine eindeutig relativierbaren und objektiv bewertbaren Kriterien zur Bewertung der Homogenität angewendet, so dass weitere, umfangreichere Untersuchungen zur Bewertung der Homogenität von Silikonabformmassen aus automatischen Mischsystemen und Mischpistolen und der Relevanz von optisch inhomogenen Abformmassen wünschenswert sind. Lampe & Hege- dus untersuchten in ihrer Studie aus dem Jahr 2002 die Abhängigkeit der Polymerisati- onsschrumpfung von K- und A-Silikonem von der Mischtechnik, d. h. für jeweils manu- elle und maschinelle Mischung. Die Ergebnisse konnten jedoch bis zu 72 Stunden nach Anmischung keinen signifikanten Unterschied zwischen den Schrumpfungswerten von A-Silikonem, die manuell, und solchen, die maschinell gemischt wurden, feststellen. Lepe et al. (1998) untersuchten die Auswirkungen von verschiedenen Mischverfahren bei Silikon- und Polyätherabformmaterialien auf Oberflächenbenetzungseigenschaften und die Materialquellung durch Desinfektionsmittel. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede der Quellung der Abformmassen, sowohl von Siloxanen, als auch von Polyäthern, nach dem Desinfektionsbad bei handgemischten Abformmaterialien deut- lich größer ist, als bei maschineller Anmischung der Abformmassen und auch signifi- kant. Aus dieser Beobachtung leiteten Lepe et al. ab, dass die maschinelle Mischung von Polyäthern und Silikonem zu weniger Blasen, geringerer Schrumpfung und somit zu dimensionsstabileren Abformungen und besseren Gipsmodellen führt. Wilson et al. un- tersuchten 2001 die Menge an verworfenem Silikonabformmaterial in Abhängigkeit von der Mischmethode und konnten mit ihrer umfangreichen Untersuchung zeigen, dass der Unterschied zwischen Handanmischung und maschineller Mischung signifikant ist. Bei der maschinellen Mischung entsteht deutlich weniger verworfenes Abformmaterial als bei der manuellen Anmischung von Silikonabformmaterial.

- b) Können durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften Empfehlung für die Anwendungen der beiden Abformmaterialien abgeleitet werden?

Aufgrund der Materialeigenschaften empfehlen sich die Silikone vor allem für Situatio- nen, in denen genaue Modelle sehr wichtig sind. Bei der Anfertigung von Zahnersatz werden Silikone schon lange mit guten Ergebnissen angewandt (vgl. Viohl, J. 1996, S. 281; Schmalz, G. & Geurtsen, W. 2008, S. 25). Doch auch für die Gegenkiefermodelle sollten bei der Anfertigung von Zahnersatz lieber Alginatsubstitute als Alginate zur

Anwendung kommen, da sie akkuratere Modelle liefern. Die Okklusionsverhältnisse können durch Silikonabformungen deutlich besser wiedergegeben werden (vgl. Boksmann 2005). Für die Anfertigung mehrerer Modelle aus einer Abformung, beispielsweise Planungs- und Arbeitsmodellen in der Kieferorthopädie, sollten ausschließlich Alginateersatzmaterialien verwendet werden, da Alginaten bei der Aushärtung des Gipses durch die Erwärmung Wasser entzogen wird, sie austrocknen und schrumpfen (vgl. u. a. Viohl 1996, S. 281). Da Alginatabdrücke möglichst umgehend nach der Entnahme aus dem Mund ausgegossen werden sollen, sollten Anwender, die nicht über die Möglichkeit verfügen selber Modelle herzustellen und die ihre Abdrücke somit vor dem Ausgießen über längere Zeit aufbewahren müssen, die Verwendung von Alginatsubstituten anstelle von Alginaten in Betracht ziehen. Gleiches gilt für die Herstellung von Provisoriumsabdrücken, bei denen Silikone den Vorteil bieten, mehrfach, d. h. auch beim Verlust des Provisoriums problemlos erneut verwendet werden können. Trotz dieser Vorteile stellt auch Alginat ein gutes Abformmaterial dar, das v. a. durch seinen niedrigen Preis und eine ausreichende Genauigkeit für die Herstellung von Modellen für einfachen Zahnersatz, für Gegenkiefer- und Planungsmodelle, sowie Provisoriumsabdrücke häufig verwendet wird (vgl. Viohl 1996, S. 281). Ihre Tendenz zu Verzerrungen, schlechte Lagerbarkeit und die Tatsache, dass Alginatabformungen wegen Austrocknung, mangelnder Dimensionsstabilität und der geringen Reißfestigkeit nur einmal ausgegossen werden können, stellen die Nachteile der Alginate dar, die durch die Testungen in dieser Arbeit gegenüber ihren Alginatsubstituten aufgezeigt werden konnten. Die elastischen Eigenschaften, also nahezu vollständige Rückstellung bei einer gleichzeitig hohen Dehnbarkeit, tragen dazu bei, dass mit den Alginatsubstituten wesentlich feinerer Strukturen abgebildet werden können (vgl. u. a. Viohl 1996, S. 281). V. a. die nahezu unbegrenzte Lagerungsfähigkeit stellt einen deutlichen Vorteil der Silikonabformmaterialien dar (vgl. u. a. Viohl 1996, S. 281). Obwohl die Testergebnisse aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit auch den Alginaten eine Abformgenauigkeit bis zu 20 µm bescheinigen, ist die Zeichenschärfe und Oberflächenbeschaffenheit von Silikonabformungen besser. Die Homogenität erscheint durch die maschinelle Anmischung sowohl für Alginat als auch Silikone prinzipiell besser als bei der Handanmischung. Auffällig ist jedoch die stärkere Durchmischung der Silikone mit der Mischmaschine im Vergleich zur Mischung mit der Mischpistole. Obwohl beim Test der Rückstellung nach Verformung teilweise Un-

terschiede für die Streuung der Einzelmesswerte zwischen Mischpistolen- und Mischmaschinenvarianten festgestellt werden konnte, kann nicht behauptet werden, dass die unterschiedliche Breite der Streuung der Messergebnisse mit dem Grad der Vermischung korreliert. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Unterschiede nicht auf die Mischmethode zurückzuführen sind, sondern darauf, dass die Materialien eventuell durch Unterschiede in ihrer Zusammensetzung vom Hersteller bewusst herbeigeführte Unterschiede aufweisen.

Die Alginat stellen zwar aus werkstoffkundlicher Sicht das schlechtere Material dar, dennoch liegt ihre weite Verbreitung neben finanziellen Aspekten auch darin begründet, dass die Materialeigenschaften nicht für jede Abformsituation den ausschlaggebenden Faktor darstellen. Die Indikationen der Materialarten und die Anforderungen an die jeweiligen Abformungen bzw. Modelle bestimmen maßgeblich die Wahl des verwendeten Materials. Die Untersuchung von Materialeigenschaften, wie sie in dieser und vergleichbaren Arbeiten durchgeführt wird, kann der jeweiligen Anwenderin bzw. dem Anwender also nur eine Kriterienliste als Auswahlhilfe bereitstellen, so dass es den Anwendern selbst überlassen wird, welches Material sie für welchen Zweck verwenden. Die Erkenntnisse, die durch vergleichende Untersuchungen erarbeitet werden, sind für das Verständnis der Eigenschaften, ihrer Bedeutung bei der Anwendung und somit auch für die Indikation der Materialien unverzichtbar. Die kontinuierliche Weiter-, Neuentwicklung und Verbesserung von zahnärztlichen Werkstoffen machen unabhängige werkstoffkundliche Untersuchungen wie die vorliegende Arbeit unverzichtbar.

Da die vorliegende Arbeit in der kieferorthopädischen Abteilung der Zahnklinik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg angefertigt wurde, möchte ich gerne abschließend noch kurz auf die besonderen Ansprüche der Kieferorthopädie an die verwendeten Abformmaterialien eingehen. Prinzipiell werden Situationsabformung in vielen kieferorthopädischen Praxen v. a. aus Kostengründen mit Alginat genommen (vgl. Christensen 1997; Nandini et al. 2008). Alginatsubstitute, sprich A-Silikone mit etwas schlechteren Materialeigenschaften als die Silikone, die für Präzisionsabformungen angeboten werden, werden mittlerweile von den meisten Abformmaterialherstellern angeboten. Die Werbung verspricht das „bessere Alginat“, also das Abformmaterial, das alle Vorteile von Alginat und Silikon miteinander vereint. In der Tat ist es unstrittig, dass Silikone Eigenschaften besitzen, v. a. die lange Dimensionsstabilität, die Alginat nicht

haben und haben können. Wie schon angesprochen stellt z. B. die lange Lagerbarkeit von Silikonabformungen einen echten Vorteil dar, weil Abformungen nicht sofort ausgegossen werden müssen und sogar mehrfach zur Modellherstellung verwendet werden können. Außerdem sind Silikonabformungen deutlich weniger anfällig gegenüber Desinfektionsmaßnahmen als Alginate (vgl. u. a. Viohl 1996, S. 295). Allerdings besitzen auch die Alginate Vorteile, die jedoch vielleicht nicht sofort auffallen. Ein gutes Argument für Alginatabformungen ist die sehr geringe Reißfestigkeit, die dazu beiträgt, dass kieferorthopädisch bewegte und dadurch vorübergehend gelockerte Zähne bei der Abdrucknahme und -entnahme so wenig wie möglich belastet werden, da das Alginate sehr nachgiebig ist. Wie Christensen 2008 schreibt, ist der größte Vorteil der Alginate nach wie vor ihr unschlagbar günstiger Preis. Und obwohl heutzutage die weitverbreitete Mentalität „Geiz ist geil“ häufig negative Assoziationen hervorruft, so haben die billigen Alginate einen zusätzlichen Vorteil, der sie ebenfalls für umweltbewusste Anwender attraktiv machen kann. Die Alginate sind nämlich im Gegensatz zu den Silikonen vollständig biologisch abbaubar, da es sich bei den Alginaten, anders als bei den synthetischen und auf Erdöl basierenden Silikonen, um Produkte aus natürlichen und nachwachsenden Rohstoffquellen handelt, die zur Qualitätsoptimierung jedoch ebenso gut synthetisch hergestellt werden können. Wie oben bereits gesagt, haben jedoch beide Materialien ihren Indikationsbereich und je nach Anforderung an das Abformmaterial sollte vom jeweiligen Anwender auch das für die Situation am besten geeignete Material verwendet werden.

Desiderata für zukünftige Forschung in diesem Bereich sind eine Marktanalyse, die den wirtschaftlichen Aspekt der Umstellung von Alginate auf Silikonabdrücke beleuchtet, sowie eine Studie, die die Abformereigenschaften der in dieser Arbeit untersuchten Materialien am Patienten untersucht und vergleicht. Weiterhin wäre auch ein Vergleich dieser „schlechten“ Silikone mit den „high-end“ Silikonen sehr interessant, sowie eine Prognose, was ein Mehrverbrauch an Silikonen für die Umwelt bedeutet, da Alginate ja im Gegensatz zu Silikonen komplett abgebaut werden können.

## 7. Ausblick

Die Einführung der Abformung und die ständige Weiterentwicklung von Materialien und Methoden stellten wichtige Schritte auf dem Weg zur modernen Zahnmedizin dar. Mittlerweile befinden sich die Abformmaterialien auf einem derartig hohen Entwicklungsstand, dass sich durch die alleinige Weiterentwicklung der Materialien nur noch geringe Verbesserungen in Bezug auf die Modellgenauigkeit erzielen lassen. Da die Reproduzierbarkeit von guten Abformungen neben den Materialeigenschaften in erster Linie vom Behandlungsteam und dessen Fähigkeiten abhängt, wurden in den letzten Jahren andere, verlässlichere Wege zur Abformung intraoraler Strukturen gesucht. Bei der konventionellen Abformung und den Folgeschritten, die bis zur Herstellung von Zahnersatz, Schiene o. ä. nötig sind, bestehen viele potenzielle Fehlerquellen und je früher ein Fehler auftritt, umso größer ist seine Auswirkung auf das Endergebnis. Die Forschung nach anderen Abformverfahren resultierte in der Entwicklung von optischen, digitalen Abformmethoden wie bspw. *Cerec* oder *iTero*. Obwohl auch diese optischen Abformmethoden nicht universell einsetzbar sind und gewisse Nachteile besitzen, darunter die begrenzte Abformbarkeit tief liegender Präparationsgrenzen, ermöglichen sie dem Anwender eine standardisierte und aufgrund der direkten Übertragung weniger fehleranfällige Methode zur Herstellung von Zahnersatz (vgl. Seelbach et al. 2011).

Gerade im Bereich der Kieferorthopädie, aber auch für die Analyse der Gebissituation im Allgemeinen, besitzen Studienmodelle im Vergleich zu digitalen Abformungen den Vorteil, dass mit realen Modellen die Situation des Patienten in der Hand noch immer besser „begriffen“ werden kann. Ob digitale Abformverfahren die konventionelle Abformung jemals komplett ersetzen werden können, ist strittig. Abformmaterialien und Gipsmodelle können zumindest in der näheren Zukunft sicherlich nicht komplett verdrängt werden. Es wird weiterhin die Aufgabe des Behandlers sein, nach Abwägen aller Vor- und Nachteile und unter Berücksichtigung der individuellen Situation das bestmögliche Material bzw. Verfahren auszuwählen. Die Universallösung muss erst noch gefunden werden.

## Anhang: Einstellungen der Nikon D 90 für die Homogenitätsaufnahmen

	Schnittflächenaufnahme	Oberflächenaufnahme
Belichtungszeit	1/13 Sekunde	1/13 Sekunde
Blende	1:20	1:51
Bildkorrektur	+1 1/3 LW	+1 1/3 LW
Belichtungsmessung	Matrixmessung	Matrixmessung
ISO-Empfindlichkeit	ISO 200	ISO 200
Weißabgleich	Leuchtstofflampe	Leuchtstofflampe
Leuchtstofflampe	Tageslicht (weiß)	Tageslicht (weiß)
Bildgröße	L (4288 x 2848)	L (4288 x 2848)
Objektiv	VR 105mm 1:2.8G	VR 105mm 1:2.8G
Picture Control (Bildopt.)	Standard*	Standard*
Farbraum	sRGB	sRGB
Active D-Lighting	Aus	Aus
Rausreduzierung bei ISO+	Normal	Normal
Abstand Stativ-Auflagefläche Probekörper	34,6 cm	34,6 cm

## Literaturverzeichnis

Arnetzl, G. V. 2010, „Optische versus konventionelle Abformung – wie präzise sind die Methoden?“, *ZMK Zahnheilkunde Management Kultur*, Jg. 26 Nr. 5, S. 19–24.

Balkenhol, M., Rehmann, P., Siemer, A., Noack, T., Ferger, P. & Wöstmann, B. 2005, „Die Präzisionsabformung: materialimmanente und verfahrenstechnische Einflussfaktoren - Teil 2: Reißfestigkeit“, *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, Jg. 114 Nr. 3, S. 93–97.

Boksman, L. 2005, „Eliminating variables in impression-taking“, *Ontario Dentist*, Jg. 34 Dezember, S. 22–25.

Boksman, L. & Tousignant, G. 2010, „Alginate Substitutes: Rationale for Their Use“, *Chairside*, Jg. 5 Nr. 3, S. 57–60.

Borchers, L. 1996, „Modellwerkstoffe“ in H. F. Kappert & K. Eichner (Hrsg.), *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*, Hüthig, Heidelberg.

Breustedt, A. & Lenz, E. 1985, *Stomatologische Werkstoffkunde. 207 Bilder und 55 Tabellen*, 2., überarb. und erw. Aufl, Johann Ambrosius Barth, Leipzig.

Brown, R. L. Jr. 2009, „An Elastomeric Impression Material Breakthrough“, *Dentistry Today*, Jg. 28 Nr. 10, S. 118–120.

Bryant, H. A. & Blank, J. T. 2009, „Capitalizing on the Advantages of Alginate Alternatives“, *Inside Dental Assisting*, Jg. 5 Nr. 2, S. 24–27.

Buchan, S. & Peggie, R. W. 1966, „Role of Ingredients in Alginate Impression Compounds“, *Journal of Dental Research*, Jg. 45 Nr. 4, S. 1120–1129.

Chen, S. Y., Liang, W. M. & Chen, F. N. 2004, „Factors Affecting the Accuracy of Elastometric Impression Materials“, *Journal of Dentistry*, Jg. 32 Nr. 8, S. 603–609.

Christensen, G. J. 1997, „What category of impression material is best for your practice?“, *The Journal of the American Dental Association*, Jg. 128 Nr. 7, S. 1026–1028.

Christensen, G. J. 2008, „Ask Dr. Christensen“, *Dental Economics*, Jg. 98 Nr. 1, abgerufen am 9. August 2014, <http://www.dentaleconomics.com/articles/print/volume-98/issue-1/departments/ask-dr-christensen/ask-dr-christensen.html>.



Craig, R. 1988, „Review of Dental Impression Materials“, *Advances in Dental Research*, Jg. 2 Nr. 1, S. 51–64.

Deutsches Institut für Normung DIN 53504 2013, *Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Jg. 83.060.

Deutsches Institut für Normung DIN EN 21563 1992, *Zahnärztliche Alginat-Abformmasse*, Beuth Verlag, Berlin.

Deutsches Institut für Normung DIN EN ISO 4823 2007, *Zahnheilkunde - Elastomere Abformmassen*, Beuth Verlag, Berlin, Jg. 11.060.10.

Faria, A. C. L., Rodrigues, R. C. S., Macedo, A. P., Mattos, M. & Ribeiro, R. F. 2008, „Accuracy of stone casts obtained by different impression materials“, *Brazilian Oral Research*, Jg. 22 Nr. 4, S. 293–298.

Finger, W. 1996, „Begriffsbestimmungen der Werkstoffprüfung“ in H. F. Kappert & K. Eichner (Hrsg.), *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*, Hüthig, Heidelberg.

Gambardella, E. G. & Johnson, R. J. 2010, „Alginate Impression and Diagnostic Study Model Techniques“, DentalCare.com, Material zum Online-Kurs, abgerufen am 9. August 2014, <http://www.dentalcare.com/media/en-US/education/ce378/ce378.pdf>.

Glenner, R. A. 1997, „Dental impressions“, *Journal of the History of Dentistry*, Jg. 45 Nr. 3, S. 127–130.

Hamalian, T. A., Nasr, E. & Chidiac, J. J. 2011, „Impression Materials in Fixed Prosthodontics: Influence of Choice on Clinical Procedure“, *Journal of Prosthodontics*, Jg. 20 Nr. 2, S. 153–160.

Handschuck, N. 2007, *Werkstoffkundlich vergleichende Untersuchung an Abformmassen auf der Basis von Polyethern, additionsvernetzenden und kondensationsvernetzenden Silikonen*. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor medicinae dentariae an der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Heller, G. & Kern, M. 1996, „Der Einsatz eines automatischen Misch- und Dosiersystems für Abformmaterialien - Ein klinischer Erfahrungsbericht“, *Quintessenz*, Jg. 47 Nr. 10, S. 1331–1343.

- Hoffmann-Axthelm, W. 1985, *Die Geschichte der Zahnheilkunde*, 2. Aufl., Quintessenz, Berlin [u.a.].
- Hosoda, H. & Fusayama, T. 1959, „Surface Reproduction of Elastic Impressions“, *Journal of Dental Research*, Jg. 38 Nr. 5, S. 932–939.
- Jaeggi, S. 1960, *Die Entwicklung der zahnärztlichen Abdruckverfahren von den Anfängen bis zur Gegenwart*, Keller, Winterthur.
- Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. 2010, *Manufacturing engineering and technology*, 6. Aufl., Prentice Hall, New York.
- Karthikeyan, K. & Annapurni, H. 2007, „Comparative evaluation of dimensional stability of three types of interocclusal recording materials: An in vitro study“, *Journal of Indian Prosthodontic Society*, Jg. 7 Nr. 1, S. 24.
- Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T. & Schehl, J. 2013, *Statistik. Eine verständliche Einführung*, 2., überarb. Aufl. 2013, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Kumar, D. & Patil, S. 2013, „Elastomeric Impression Materials: A Comparison of Accuracy of Multiple Pours“, *The Journal of Contemporary Dental Practice*, S. 272–278.
- Lampe, I. & Hegedus, C. 2002, „Comparative evaluation of the shrinkage of addition-type silicone impression material using hand-mix and cartridge-mix technique“, *Fogorvosi szemle*, Jg. 95 Nr. 6, S. 249–252.
- Lehner, C. R. & Schärer, P. 1991, „Abformmaterialien in der Kronen-Brücken-Prothetik. Standortbestimmung und praktische Tips.“, *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin SMfZ*, Jg. 101, S. 629–635.
- Lepe, X., Johnson, G. H., Berg, J. C. & Aw, T. C. 1998, „Effect of mixing technique on surface characteristics of impression materials“, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Jg. 79 Nr. 5, S. 495–502.
- Marxkors, R. & Meiners, H. 2005, *Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde*, 5., überarb. und erg. Aufl., Dt. Zahnärzte-Verl., DÄV, Köln.
- Nandini, V. V., Venkatesh, K. V. & Nair, K. C. 2008, „Alginate impressions: A practical perspective“, *Journal of Conservative Dentistry*, Jg. 11 Nr. 1, S. 37.

- Nguyen, E., Huynh, L., Xie, D. X. & Tobia, D. 2005, „Physical Properties of Alginate and Alginate Alternative Impression Materials“, Abstract vorgestellt auf der IADR-Tagung in Baltimore, abgerufen am 9. August 2014, [https://iadr.confex.com/iadr/2005Balt/techprogram/abstract\\_64291.htm](https://iadr.confex.com/iadr/2005Balt/techprogram/abstract_64291.htm).
- O'Brien, W. J. 2008, *Dental materials and their selection*, 4. Aufl., Quintessence Pub. Co., Hanover Park, IL.
- Pereira, J. R., Murata, K. Y., Valle, A. L., Ghizoni, J. S. & Shiratori, F. K. 2010, „Linear dimensional changes in plaster die models using different elastomeric materials“, *Brazilian Oral Research*, Jg. 24 Nr. 3, S. 336–341.
- Perry, R. 2004, „Using Polyvinyl Impressions for Study Models: A Case Report“, *Dentistry Today*, Jg. 23 Nr. 10, S. 106–107.
- Rehberg, H.-J. 1978, *Die Quintessenz der zahnärztlichen Abformhilfsmittel. Ihre Eigenschaften und Anwendung*, 2., überarb. Aufl, Quintessenz, Berlin.
- Retting, W. 1991, *Mechanik der Kunststoffe. Die mechanischen Eigenschaften von Polymer-Werkstoffen*, Hanser, München, Wien.
- Schmalz, G. & Geurtsen, W. 2008, „Unerwünschte biologische Nebenwirkungen“ in H. F. Kappert & K. Eichner (Hrsg.), *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2: Werkstoffe unter klinischen Aspekten*, Thieme, Stuttgart.
- Schulein, T. M. 2005, „Significant Events in the History of Operative Dentistry“, *Journal of the History of Dentistry*, Jg. 53 Nr. 1, S. 62–73.
- Schulz, H.-H. & Schwickerath, H. 1989, *Die Abformung in der Zahnheilkunde*, Deutscher Ärzte-Verlag, Köln.
- Seelbach, P., Rehmann, P., Winkler, G. & Wöstmann, B. 2010, „Digitale Abformverfahren in der zahnärztlichen Praxis“, *ZMK Zahnheilkunde Management Kultur*, Jg. 26 Nr. 10, S. 580–584.
- Stoll, S. 2001, *Dimensionsänderung von Abformmassen auf Polyetherbasis nach Desinfektion*. Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde dem Fachbereich Humanmedizin der Philipps-Universität Marburg.

- Strübig, W. 1989, *Geschichte der Zahnheilkunde. Eine Einführung für Studenten und Zahnärzte*, Deutscher Ärzte-Verlag, Köln.
- Sun, L., Li, H. & Chu, B. 2010, „Three-dimensional accuracy of plaster casts obtained using three impression materials“, *Journal of Southern Medical University*, Jg. 30 Nr. 2, S. 257–259.
- Torassian, G., Kau, C. H., English, J. D., Powers, J., Bussa, H. I., Marie Salas-Lopez, A. & Corbett, J. A. 2010, „Digital models vs plaster models using alginate and alginate substitute materials“, *The Angle Orthodontist*, Jg. 80 Nr. 4, S. 474–481.
- Verweyen, W. 1978, *Geschichte und Entwicklung der plastischen Abformmassen*, Dissertation FU Berlin.
- Viohl, J. 1996, „Abformwerkstoffe“ in H. F. Kappert & K. Eichner (Hrsg.), *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*, Hüthig, Heidelberg.
- Welker, D. & Mehner, M. 1979, „Additionsvernetzte Silikone-Abformwerkstoffe“, *Stomatol DDR*, Jg. 29, S. 391–400.
- Weltschev, M. 2010, *Vergleich der Materialkennwerte von Formstoffen aus Polyethylen hoher Dichte mit dem Baumsterverhalten von Gefahrgutverpackungen*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin.
- Wilson, N. H., Cowan, A. J., Crisp, R. J. & Wilson, M. A. 2001, „Wastage of a silicone impression material in a general practice setting: a comparison between hand and auto-mixing methods“, *Journal of the South African Dental Association*, Jg. 56 Nr. 5, S. 233–236.
- Wirz, J. 1981, „Der Alginatabdruck in der täglichen Praxis“, *Die Quintessenz der Zahn-technik*, Jg. 7 Nr. 2,3, S. 199-205, 299-302.
- Wöstmann, B. 1998, *Zum derzeitigen Stand der Abformung in der Zahnheilkunde*. Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Quintessenz, Berlin.
- Yeh, C. L., Powers, J. M. & Craig, R. G. 1980, „Properties of addition-type silicone impression materials“, *The Journal of the American Dental Association*, Jg. 101 Nr. 3, S. 482–484.

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Frau Professor Dr. Angelika Stellzig-Eisenhauer für die Überlassung des Promotionsthemas, die Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung der Promotion.

Ich danke Herrn PD Dr. Stefan Fickl für die freundliche Übernahme des Korreferates.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei Herrn Dr. Marcus Holzmeier für die wissenschaftliche Betreuung, seine fachliche Unterstützung und große Hilfsbereitschaft.

Herrn Dr. Andreas Grundler, Herrn Marc Feldhaus und Frau Ina Volpp der Abteilung Forschung und Entwicklung der Heraeus Kulzer GmbH in Dormagen danke ich für die Unterstützung und Beratung zur Durchführung der praktischen Versuche.

Frau Dr. Janine Schweppe aus der Abteilung Scientific Affairs Restoratives & Impressions der Heraeus Kulzer GmbH in Hanau danke ich für die Bereitstellung der Abformmaterialien und des Messinstrumentariums.

Frau Sabine Karl von der studentischen statistischen Beratung des Lehrstuhls für Mathematik VIII (Statistik) der Julius-Maximilians-Universität Würzburg danke ich für die Beratung bei der Auswertung der statistischen Daten.

Ganz besonders danke ich meiner Frau Sabine für ihre Geduld und ständige Unterstützung.