

Institut für Informatik
Lehrstuhl für Robotik
Prof. Dr. A. Nüchter
Prof. Dr. K. Schilling



Forschungsberichte
in der Robotik

Research Notes
in Robotics

Julius-Maximilians-

**UNIVERSITÄT
WÜRZBURG**

Band 27

Dissertation an der Graduate School
of Science and Technology

Jan Cetric Wagner

Maximalnetzplan zur
reaktiven Steuerung von
Produktionsabläufen

JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Maximalnetzplan zur reaktiven Steuerung von Produktionsabläufen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)



Submitted by / Vorgelegt von

Jan Cetric Wagner

August 2022 und im April 2023 publiziert

Erster Prüfer: Prof. Dr. Andreas Nüchter
Zweiter Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Sergio Montenegro
Dritter Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Larek, M.BC

Danksagung

Ich möchte die Gelegenheit nutzen und mich bei meinen Prüfern für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit bedanken. Mein oberster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing Roland Larek. Ohne Ihn wäre die ganze Arbeit nicht möglich gewesen. Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr. Andreas Nüchter für die Geduld und Unterstützung auf dem Weg zur Anfertigung der Arbeit. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Montenegro, welcher stets kritisch meine Ideen begutachtete.

Darüber hinaus danke ich meinen Freunden und Kollegen, die mir ein neues zu Hause gaben, mir zur Ablenkung in Zeiten der Notwendigkeit verhalfen und mit wachen Blick halfen diese Arbeit fertig zu stellen. Meiner Familie möchte ich ebenfalls danken. Sie glaubt seid je her an mich und unterstützt mich bei all meinen Vorhaben.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meiner Verlobten. Sie hat mich immer wieder in schwierigen Phasen aufgebaut und mir den Rücken für die Fertigstellung dieser Arbeit freigehalten.

Ich danke all meinen Unterstützern vom ganzen Herzen!

Abstract

In manufacturing companies, various procedures are used to plan, monitor and control production processes. One of these methods is called the activity-on-node network planning technique. The individual production steps are defined as nodes and connected to each other by arrows. The arrows represent the relationships of the respective operations to each other and thus the production flow. This technique allows users a comprehensive overview of the individual process relations. In addition, it can be used to determine operation times and product completion times, which enables detailed production planning. A disadvantage of this method is the exclusive representation of a single process sequence. In the event of a disruption resulting in a non-executable operation, the original process must be deviated from. Because of this, replanning becomes necessary. Alternatives for the interrupted process are needed in order to achieve a continuation of the process regardless of the disruption. This work therefore describes an extension of the activity-on-node network planning technique that allows alternative operations for individual activities to be presented in addition to the planned target process. This method is called a Maximal Network Plan. These alternatives are automatically evaluated in the event of a disruption and presented to the user in a prioritised order. By using this technique, time-consuming rescheduling can be avoided. An assembly process is used as an application example to demonstrate the applicability of the method. Furthermore, a time analysis of random Maximal Network Plans shows a justification for the execution of alternatives and thus the benefit of this technique.

Zusammenfassung

In produzierenden Unternehmen werden verschiedene Vorgehensweisen zur Planung, Überwachung und Steuerung von Produktionsabläufen eingesetzt. Einer dieser Methoden wird als Vorgangsknotennetzplantechnik bezeichnet. Die einzelnen Produktionsschritte werden als Knoten definiert und durch Pfeile miteinander verbunden. Die Pfeile stellen die Beziehungen der jeweiligen Vorgänge zueinander und damit den Produktionsablauf dar. Diese Technik erlaubt den Anwendern einen umfassenden Überblick über die einzelnen Prozessrelationen. Zusätzlich können mit ihr Vorgangszeiten und Produktfertigstellungszeiten ermittelt werden, wodurch eine ausführliche Planung der Produktion ermöglicht wird. Ein Nachteil dieser Technik begründet sich in der alleinigen Darstellung einer ausführbaren Prozessabfolge. Im Falle eines Störungseintritts mit der Folge eines nicht durchführbaren Vorgangs muss von dem originären Prozess abgewichen werden. Aufgrund dessen wird eine Neuplanung erforderlich. Es werden Alternativen für den gestörten Vorgang benötigt, um eine Fortführung des Prozesses ungeachtet der Störung zu erreichen. Innerhalb dieser Arbeit wird daher eine Erweiterung der Vorgangsknotennetzplantechnik beschrieben, die es erlaubt, ergänzend zu dem geplanten Soll-Prozess Alternativvorgänge für einzelne Vorgänge darzulegen. Diese Methode wird als Maximalnetzplan bezeichnet. Die Alternativen werden im Falle eines Störungseintritts automatisch evaluiert und dem Anwender in priorisierter Reihenfolge präsentiert. Durch die Verwendung des Maximalnetzplans kann eine aufwendige Neuplanung vermieden werden. Als Anwendungsbeispiel dient ein Montageprozess, mithilfe dessen die Verwendbarkeit der Methode dargelegt wird. Weiterführend zeigt eine zeitliche Analyse zufallsbedingter Maximalnetzpläne eine Begründung zur Durchführung von Alternativen und damit den Nutzen des Maximalnetzplans auf.

Zusätzlich sei angemerkt, dass innerhalb dieser Arbeit verwendete Begrifflichkeiten wie Anwender, Werker oder Mitarbeiter in maskuliner Schreibweise niedergeschrieben werden. Dieses ist ausschließlich der Einfachheit geschuldet und nicht dem Zweck der Diskriminierung anderer Geschlechter dienlich. Die verwendete Schreibweise soll alle Geschlechter ansprechen, ob männlich, weiblich oder divers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Wissenschaftlicher Beitrag	4
2	Zielsetzung und Vorgehensweise	6
3	Stand der Kenntnisse	9
3.1	Graphentheorie: Die Grundlage von Prozessplanungswerkzeugen	10
3.2	Netzplantechniken	15
3.2.1	Deterministische Netzplantechniken	17
3.2.2	Stochastische Netzplantechniken	27
3.3	Petrinetze	30
3.4	Produktionsplanung- und Produktionssteuerungswerkzeuge	33
3.4.1	Manufacturing Execution - und Enterprise Resource Planning - Systeme	35
3.4.2	CAPP - Computer Aided Process Planning	36
3.4.3	AAPP - Automated Assembly Process Planning	37
3.5	Künstliche Intelligenz	38
3.6	CPS - cyper-physische Systeme	40
3.7	Zusammenfassung	43
4	Maximalnetzplan	46
4.1	Grundkonzept des Maximalnetzplans	49
4.2	Maximalnetzplandarstellung und erweiterte Adjazenzmatrix	53
4.3	Entscheidungskriterien für die Evaluierung von Ausweichvorgängen	62
4.4	Vorgangszeitberechnung im Maximalnetzplan	67
4.4.1	Terminierung des Soll-Prozesses	68

4.4.2	Vorwärtsterminierung im Störfall	72
4.4.3	Rückwärtsterminierung im Störfall	76
4.5	Flexibilitätsbegriff innerhalb der Maximalnetzplanmethodik	79
4.5.1	Flexibilitätsgrad des Maximalnetzplans	80
4.5.2	Beispielberechnung zur Beschreibung des Flexibilitätsgrads	86
4.6	Zusammenfassung	89
5	Anwendungsbeispiel	92
5.1	Implementierung des Maximalnetzplans	93
5.1.1	Voraussetzung zur Implementierung des Maximalnetzplans	94
5.1.2	Bedienung des Maximalnetzplans mittels Benutzeroberfläche	96
5.2	Kommunikation und Interaktion mit mobilen Endgeräten	100
6	Evaluation und Ergebnisse	108
6.1	Zeitliche Analyse von Maximalnetzplänen unter Annahme einer Störung	109
6.1.1	Aufbau des Generators	109
6.1.2	Beschreibung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse	114
6.2	Konkretisierung der Charakteristiken der MNP-Methode und vergleichbaren grafischen Planungsverfahren	118
6.2.1	Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von Vorgangsknotennetzplänen	118
6.2.2	Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von Vorranggraphen	119
6.2.3	Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von UND/ODER - Graphen	120
6.2.4	Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von Petrietzen	121
6.2.5	Zusammenfassung der Vorteile des Maximalnetzplans	122
6.3	Zusammenfassung	127
7	Schlussfolgerung und Ausblick	129
A	Rückwärtsterminierung des Soll-Ablaufs zur Montage des „Spielzeugautos“	135
B	Terminierung der Alternativen bei der Montage des „Spielzeugautos“	137
C	Auswertung Prozesszeitberechnung unter Anpassung einzelner Parameter	140

Abbildungsverzeichnis

2.1	Struktureller Aufbau der Arbeit	8
3.1	Beispiel eines ungerichteten Graphen mit Mehrfachkante (Multigraph H)	11
3.2	Beispiel eines gerichteten Graphen (Graph G)	12
3.3	Darstellung der Adjazenzliste nach Steger [93] für den gerichteten Graphen G . .	13
3.4	Übersicht der vorgangsorientierten Netzplantechniken	17
3.5	Beispiel eines MPM-Netzplans nach DIN 69900 [20] mit Normalfolge und zeitlichen Mindestabständen; FAZ - frühester Anfangszeitpunkt, D - Vorgangsdauer, FEZ - frühester Endzeitpunkt, SEZ - spätester Endzeitpunkt, GP - gesamte Pufferzeit, SAZ - spätester Anfangszeitpunkt	18
3.6	Darstellung der vier Vorgangsfolgebeziehungen nach DIN 69900 [20]	20
3.7	Darstellung von Haupt- und Hilfsvorgängen in einem PPS-Netzplan [6]	22
3.8	Darstellung eines Subnetzplan-Knotens nach [37]	24
3.9	Darstellung eines Entscheidungsknotens nach [37]	25
3.10	Beispiel eines CPM-Netzplans in Anlehnung an [22]	26
3.11	Darstellung der Funktionsweise eines Keksautomaten mittels Petrinetz [70] . . .	32
3.12	Veranschaulichung üblicher Softwareanwendungen in produzierenden Unternehmen [50]	34
3.13	Von der Automatisierungspyramide zu einem dezentralen Netzwerk, Darstellung nach [40]	42
4.1	Darstellung des Prozessablaufs zum Anziehen von Socken und Schuhen mittels Netzplan [79]	47
4.2	Montage eines Spielzeugautos: 1-4 - Räder; 5 - unterer Korpus; 6 - obere Korpus; 7 - Aufsatz Laderaum; 8 - Frontscheibe; 9 - Scheinwerfer 1; 10 - Scheinwerfer 2 .	50
4.3	Darstellung des idealen Produktionsablaufs zur Herstellung des Spielzeugautos in Form eines Netzplans	51

4.4	Adjazenzmatrixdarstellung des idealen Prozessablaufs zur Herstellung des Spielzugautos	55
4.5	Erweiterte Adjazenzmatrix mit blauen Markierungen zur Darstellung alternativer Vorgänge	56
4.6	Darstellung des Maximalnetzplans - Erweiterung des idealen Ablaufs durch die Präsentation von Alternativvorgängen	57
4.7	Übersicht der möglichen Knotenstatus im Maximalnetzplan und in der erweiterten Adjazenzmatrix	58
4.8	Beispiel eines fehlerverknüpften Vorgangs und Veranschaulichung differenter Vorgangstatus	59
4.9	Darstellung der erweiterten Adjazenzmatrix einschließlich der bekannten Vorbedingungen	60
4.10	Darstellung des Vorbedingungsgraphen	61
4.11	Prioritätsregelverfahren zur Unterstützung der Entscheidungsfindung	67
4.12	Einteilung des Maximalnetzplans in Prozessabschnitte zur Quantifizierung des Flexibilitätsgrads auf Basis des Vorgangs mit der geringsten Anzahl an Ausweichvorgängen innerhalb eines Abschnittes	84
4.13	Minimalbeispiel zur Erläuterung der Berechnung des Flexibilitätsgrads eines Abschnitts des Maximalnetzplans	85
5.1	Implementierungskonzept des auf den Maximalnetzplan basierenden Planungs- und Steuerungssystems	93
5.2	Ausschnitt Stammdatentabelle; Speicherung notwendiger Prozessinformationen zur Erzeugung des Maximalnetzplans	95
5.3	Darstellung des Startbildschirms der Maximalnetzplan-Bedienungssoftware	97
5.4	Darstellung vom Simulationsbeginn des Beispielprodukts	98
5.5	Darstellung eines fehlerhaften Vorgangs unter Nutzung des Maximalnetzplans	99
5.6	Darstellung der Alternativen des Fehlerknotens unter Nutzung des Alternativnetzplans	100
5.7	Evaluierung der möglichen mobilen Endgeräte zur Nutzung im Frontend Bereich	101
5.8	Oberfläche zur Darstellung aktueller Aufträge für den jeweiligen Mitarbeiter	103
5.9	Übersicht der Auftragsinformationen zur Einsicht vor dem eigentlichen Auftragsstart	104
5.10	Seitenbasierte Darstellung der Auftragsinformationen	105
5.11	Oberfläche zur Erstellung von Störungsmeldungen	106

6.1	Zusammenfassender Generatorkaufbau zur Berechnung der Vorgangszeiten bei Störungseintritt	110
6.2	Darstellung einer zu vermeidenden Relation innerhalb eines zufällig generierten Netzplans	111
6.3	Untersuchungsergebnisse für die Berechnung eines Störungseintritts - 1) Der obere graue Bereich der Balken zeigt die Prozentanteile an Fällen in denen das Warten auf die Störungsbehebung ohne die Durchführung von Alternativvorgängen zu einer geringeren Prozesszeit führte. 2) Der mittlere Bereich verdeutlicht die Fälle in denen das Warten auf die Störungsbehebung und die Durchführung einer Alternative zu einer identischen Prozesszeit führten. 3) Der untere blaue Bereich der Balken zeigt die Fälle in denen die Durchführung einer Alternative während der Störungsbehebung zeitliche Vorteile ergab.	115
6.4	Untersuchungsergebnisse für die Berechnung eines Störungseintritts am Anfang (oberes Diagramm) und am Ende (unteres Diagramm) der generierten MNPs. . .	117
6.5	Beispiel eines einfachen Vorranggraphen für die Planung von Montageabläufen .	120
6.6	Darstellung alternativer Montagesequenzen unter Verwendung eines UND/ODER - Graphen in Anlehnung an [39]	121
6.7	Darstellung eines Time Petri Nets zur beispielhaften Veranschaulichung von Zeitattributen innerhalb von Petrinetzen	122
6.8	Tabellarischer Vergleich zwischen Attributen der genannten Planungswerkzeuge und der Maximalnetzplantechnik	123
6.9	Beispiel eines Maximalnetzplans unter Berücksichtigung von Vorgangstatus . . .	128
7.1	Vergleich der Arbeitsläufe zur Erstellung eines Fehlerberichtes auf konventioneller Weise und unter der Nutzung eines mobilen Endgeräts mit beschriebener Android Applikation	132
C.1	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE; Strafzeitfaktor = 2; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	141
C.2	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE; Strafzeitfaktor = 3; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	142

C.3	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE; Strafzeitfaktor = 4; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	143
C.4	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE; Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	144
C.5	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE; Strafzeitfaktor = 15; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	145
C.6	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE; Strafzeitfaktor = 30; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	146
C.7	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +5 ZE; Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	147
C.8	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +10 ZE; Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	148
C.9	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +20 ZE; Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	149
C.10	Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen. Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +40 ZE; Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE	150

Tabellenverzeichnis

4.1	Vorwärtsterminierung des Prozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter der Annahme fiktiver Vorgangszeiten	71
4.2	Terminierung des Beispielprozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Berücksichtigung des Störungseintritts des Vorgangs <i>V7</i> und der Alternative <i>V10</i>	78
A.1	Rückwärtsterminierung des Prozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Vorgabe eines Projektendzeitpunkts	136
B.1	Terminierung des Störungsprozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Verwendung der Alternative <i>V9</i>	138
B.2	Terminierung des Störungsprozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Verwendung der Alternative <i>V11</i>	139

Abkürzungsverzeichnis

AAPP	Automated Assembly Process Planning	3
ARF	Acceleration Rocket Frame	93
CAD	Computer Aided Design	44
CAPP	Computer Aided Process Planning	3
CoRiFe	Computer gestützte Realisierung einer intelligenten Fertigung	4
CPM	Critical Path Method	16
CPS	cyber-physische Systeme	1
CPPS	cyber-physische Produktionssysteme	43
DLZ	Durchlaufzeit	67
EKN	Ereignisknotennetzplan	16
ERP	Enterprise Resource Planning	33
FFS	flexible Fertigungssysteme	32
GERT	Graphical Evaluation and Review Technique	16
HCD	human-centered Design	42
HMD	Head-Mounted Displays	101
HMI	Human-Machine-Interface	40
I4.0	Industrie 4.0	1
KI	Künstliche Intelligenz	37
MES	Manufacturing Execution System	33
MNP	Maximalnetzplan	4
MPM	Metra Potential Methode	16
MTM	Methods-Time Measurement	19
NPT	Netzplantechnik	3
PERT	Program Evaluation and Review Technique	16
PPS	Produktionsplanung und -steuerung	3
RAMI4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0	40

RNG	Random Number Generator	110
VKN	Vorgangsknotennetzplan	3
VPN	Vorgangspfeilnetzplan	17
ZE	Zeiteinheiten	73

Symbolverzeichnis

a	$a \in AN(i)$
$A(G)$	Adjazenzmatrix eines Graphen G
$AN(i)$	Menge der alternativen Vorgänge eines Knotens i
BN	Menge der Bottleneck-Knoten innerhalb des Maximalnetzplans
d_{ij}	zeitliche Abstände der Vorgänge i und j
E	Menge der Kanten eines Graphen G
$EN(i)$	Menge der Ausweichvorgänge eines Knotens i
EN_s^i	Menge der mit Vorgang i verbundenen Ausweichvorgänge von s
F	Menge der Flussrelationen eines Petrinetzes
FAZ_i	frühester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i
FAZ_i^t	frühester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i in einem idealen Prozess
FAZ_i^σ	frühester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i in einem gestörten Prozess
FEZ_i	frühester Endzeitpunkt eines Vorgangs i
FEZ_i^t	frühester Endzeitpunkt eines Vorgangs i in einem idealen Prozess
FEZ_i^σ	frühester Endzeitpunkt eines Vorgangs i in einem gestörten Prozess
FG	Flexibilitätsgrad des Maximalnetzplans
FG^α	Flexibilitätsgrad des Maximalnetzplanabschnitts α
g_i	Knotengrad eines Knotens i
$G = (V, E)$	gerichteter Graph G
GP	gesamte Pufferzeit eines Vorgangs i
GP_i^t	gesamte Pufferzeit eines Vorgangs i in einem idealen Prozess
$I(G)$	Inzidenzmatrix eines Graphen G
n	Anzahl der Knoten eines Graphen G
$N = \{P, T, F, \mu\}$	markiertes Petrinetz
$N(i)$	Menge der Nachfolger eines Knotens i

$NB(i)$	Menge der Nachbarn eines Knotens i
m	Anzahl der Kanten eines Graphen G
pi^H	wahrscheinlichste Vorgangsdauer
pi^P	pessimistische Vorgangsdauer
pi^O	optimistische Vorgangsdauer
p_i	erwartete Vorgangsdauer
P	Menge der Plätze eines Petrinetzes
$P(i)$	Menge an Vorbedingungen eines Knotens i
$PN(i)$	Menge der parallelen Vorgänge eines Knotens i
t_i	Dauer des Vorgangs i
t_i^t	Dauer des Vorgangs i im idealen Prozess
t_a^σ	Strafzeit der Alternative im gestörten Prozess
t_b^σ	Dauer der Störungsbehebung
t_w	Wiedereingliederungszeit eines Vorgangs s nach der Störungsbehebung
T	Menge der Transitionen eines Petrinetzes
TL	zeitliche Verschiebung des Prozesses durch den Eintritt einer Störung
s	$s \in S$
S	Menge der störungsbehafteten Knoten
SF	Strafzeitfaktor einer Alternative
SAZ_i	spätester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i
SAZ_i^t	spätester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i in einem idealen Prozess
SAZ_i^σ	spätester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i in einem gestörten Prozess
SEZ_i	spätester Endzeitpunkt eines Vorgangs i
SEZ_i^t	spätester Endzeitpunkt eines Vorgangs i in einem idealen Prozess
SEZ_i^σ	spätester Endzeitpunkt eines Vorgangs i in einem gestörten Prozess
v_s	Anzahl der Vorgänger des Störknotens s
V	Menge der Knoten eines Graphen G
$V(i)$	Menge der Vorgänger eines Knotens i
w_{ij}	Kantengewicht zwischen zwei Knoten i und j
zZE	zusätzliche Zeiteinheiten bei der Strafzeitberechnung
α	Anzahl der Maximalnetzplanabschnitte
$O(n * m)$	Speicherplatzbedarf einer Inzidenzmatrix
$O(n + m)$	Speicherplatzbedarf einer Adjazenzliste
$O(n^2)$	Speicherplatzbedarf einer Adjazenzmatrix
μ	Menge der Markierungen eines Petrinetzes

Kapitel 1

Einleitung

Die Bundesregierung hat auf der Hannover Messe 2013 das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 (I4.0) als die neue Hightech-Strategie auserkoren. Diese Strategie beinhaltet, dass in Deutschland ansässige Unternehmen sich durch den Einsatz moderner Technologien für den zukünftigen weltweiten Wettbewerb rüsten können sollen. Der Fokus dieser Strategie liegt auf der Digitalisierung von Unternehmensprozessen [12]. Der Begriff I4.0 steht für die vierte industrielle Revolution und soll den umfangreichen Einfluss der neuen Hightech-Strategie auf die Unternehmen widerspiegeln. Das Ziel ist es, Unternehmen mit moderner Informations- und Kommunikationstechnik, insbesondere mittels Vernetzung durch intelligente Sensoren und Robotersysteme, auszustatten. Diese Vernetzung wird durch sogenannte cyber-physische Systeme (CPS) erreicht. Unter CPS werden eingebettete Systeme verstanden, die mittels Sensoren Daten erfassen, diese auswerten und über Aktoren mit der physikalischen und digitalen Welt interagieren können [30]. Ihnen ist es möglich, über das Internet zu kommunizieren und so weltweit verfügbare Daten und Dienste zu nutzen [30]. Die CPS liefern die Grundlage für eine erfolgreiche Maschinen-Maschinen- oder Mensch-Maschinen-Kooperation sowie Kollaboration innerhalb und außerhalb von Unternehmen in Zeiten von I4.0. Der Ursprung dieser Strategie ist im Wesentlichen für bereits zu Beginn der vierten industriellen Revolution hochautomatisierten Produktionsstätten gedacht. Die Bundesregierung stellt vornehmlich Szenarien vor, in denen auf Produktionsebene ein geringes Maß menschlichen Eingreifens erforderlich ist. Beispielsweise sollen Produkte unter Nutzung von CPS Maschinen und Roboter Auskunft über benötigte Bearbeitungswerkzeuge oder Lieferdaten zur Verfügung stellen [12]. Eine weiterführende Betrachtung dieser Systeme ist in dem entsprechenden Abschnitt 3.6 zu finden. Doch werden in Zukunft nicht nur bereits hochautomatisierte Betriebe einem wachsenden Konkurrenzdruck ausgesetzt sein, sondern auch diejenigen, dessen Montage auch zukünftig weitestgehend auf Handarbeit ausgerichtet sein wird. Hierbei handelt es sich um

Branchen für die Herstellung hochpreisiger Produkte, wie die Luft- und Raumfahrtindustrie, Nutz- und Schienenfahrzeuge, sowie im Maschinen- und Anlagenbau. Besonders bei der Luft- und Raumfahrtindustrie, galt es lange Zeit als undenkbar, dass diese Produkte für den Massenmarkt und folglich in der Privatwirtschaft ankommen. Aus diesem Grund standen Produktionskosten seltener im Fokus von Optimierungsprojekten. Der Druck auf solche Industriezweige steigt durch Firmen wie SpaceX, die das Ziel verfolgen, Trägerraketen für den Weltraumtourismus zu produzieren und den Mars zu bevölkern [89]. Aufträge wie der Personaltransport zur internationalen Raumstation sind mittlerweile nicht mehr ausschließlich staatlichen Unternehmen vorbehalten [90].

1.1 Problemstellung

Beach et al. definieren den Begriff der Flexibilität als die Fähigkeit eines Fertigungssystems auf wechselnde Umstände oder Instabilität, verursacht durch die Umgebung, geeignet zu reagieren [5]. Eine Möglichkeit die Flexibilität der Produktion zu erhöhen, ist die unmittelbare und prädestinierte Reaktion auf eintretende Unterbrechungen. Diese Unterbrechungen können durch Störungen hervorgerufen werden. Clausen et al. definieren in [15] eine Störung als einen Zustand während einer Prozessoperation, dessen Einfluss auf den Prozess hinreichend groß ist, um eine Abweichung vom ursprünglichen Plan zur Notwendigkeit werden zu lassen. Es wird innerhalb dieser Arbeit somit davon ausgegangen, dass eine Störung eines Vorgangs immer zu einer Unterbrechung des spezifischen Vorgangs führt. Die Verwendung von praktikablen Alternativvorgängen hilft daher, den Einfluss von Störungen auf Prozesse und Mitarbeiter gering zu halten. Um dieses umsetzen zu können, müssen bei Störungseintritt derartige Alternativen unmittelbar ermittelt werden. Eine Störung wirkt sich zwangsläufig negativ auf die Produktionskosten aus, sei es indirekt, durch die Verlängerung von Prozesszeiten oder direkt, weil ein Bauteil beschädigt ist und deshalb neu beschafft werden muss. Dieses bedeutet, entscheidungsberechtigte Personen, in nachfolgenden Abschnitten dieser Arbeit auch als Entscheider bezeichnet, müssen schnellstmöglich geeignete Vorgänge eruieren, die alternativ bearbeitet werden können. Der Prozess zum Auffinden umsetzbarer Alternativen und der damit einhergehenden Anpassung des Prozessplans kann je nach Kenntnisstand des Entscheiders und den zu Verfügung stehenden Informationen mehrere Tage andauern [15]. Häufig wird die Wahl der zu bearbeitenden Alternative auf Basis des Erfahrungsschatzes des jeweiligen Entscheiders gefällt. Eine Ursache hierfür ist unter anderem ein ungenügender Überblick über den Prozess aufgrund der Vielzahl an Vorgängen, die es zu bearbeiten gilt. Prozesse in den innerhalb des Abschnitts 1 aufgeführten Branchen können mehrere hundert Vorgänge umfassen. Den Überblick über solche Prozesse zu bewahren unterliegt folglich einer gewissen Komplexität. Zusätzlich sind die Entscheider gezwungen, die Dauer

des Entscheidungsprozesses aufgrund der Kostenexpansion gering zu halten. Die Informationsgrundlagen für derartige Entscheidungsprozesse werden bereits in der Planung der Produktionsprozesse geschaffen, also vor dem Start des eigentlichen Herstellungsprozesses. Die Prozessplaner haben die Aufgabe unter der Einhaltung von Restriktionen, wie Zeit- und Kostenfaktoren, eine Ablaufsequenz zu entwerfen. Speziell in Montageprozessen existieren Füge­restriktionen, die ebenfalls Einfluss auf die möglichen Sequenzen haben. Derartige Restriktionen bezeichnen beispielsweise bauteilspezifische Montageeinschränkungen, die unter anderem vorgeben, in welcher Reihenfolge die Bauteile montiert werden müssen. Solch ein Plan wird im Allgemeinen als ideal bezeichnet, sofern die zugrundeliegenden Restriktionen eingehalten werden können und jeder Vorgang wie geplant durchgeführt werden kann. Um eine ideale Ablaufsequenz zu erarbeiten, existieren computerbasierte Ansätze, welche als Computer Aided Process Planning (CAPP) und Automated Assembly Process Planning (AAPP) bezeichnet werden. Diese Ansätze werden in den dazugehörigen Abschnitten 3.4.2 und 3.4.3 detaillierter erläutert. Innerhalb dieser Arbeit soll es jedoch nicht um die Erarbeitung der jeweiligen Alternativen gehen, sondern um die Präsentation und automatisiert numerische Evaluierung dieser Alternativen in Entscheidungssituationen. Die genannten Abschnitte dienen daher zur Verdeutlichung der Abgrenzung der in dieser Arbeit dargelegten Zielsetzung.

Im operativen Geschäft der Montageplanung sind CAPP- und AAPP-Verfahren von geringfügiger Bedeutung, hier sind vornehmlich händische Ansätze existent bei denen die Planer den idealen Ablauf auf Basis ihres Erfahrungsschatzes und dem Vergleich verschiedener Prozessvarianten erarbeiten. Die Planer analysieren differente Sequenzen hinsichtlich der Einhaltung der Restriktionen. Es existieren Sequenzen mit denen die Einschränkungen explizit umsetzbar sind und welche, die beispielsweise einen erhöhten Zeit- oder Kostenaufwand verursachen. Ein Mittel zur Darstellung dieser Sequenzen ist die Netzplantechnik (NPT). Netzpläne erlauben die Abbildung komplexer Prozesse. Unter anderem finden sie Anwendung zur Beschreibung von Produktionsprozessen in Produktionsplanung und -steuerung (PPS)-Systemen [83]. Dem zu Grunde liegt die Annahme, dass die Herstellung eines Produkts durch eine bestimmte Abfolge zuvor definierter einzelner Prozessschritte erfolgt. Der Netzplan beschreibt die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen dieser Prozessschritte. Die Vorgänger und Nachfolger, als Knoten bezeichnet, werden durch Kanten verknüpft. Diese Kanten repräsentieren die Beziehungen der Knoten untereinander und folglich die der Vorgänge. Vorausgesetzt ist hierbei die Verwendung von einem Vorgangsknotennetzplan (VKN). Auf diesem Modell basiert die operative Steuerung betrieblicher Abläufe zur Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen, wie Personal, Material und Betriebsmittel. Die Komplexität des Netzplans steigt mit der Komplexität des Produkts. Die Herstellung eines Produkts kann auf vielen hunderten Vorgängen basieren, daher sind mehrstufig hierarchische Netzpläne mit vielen hundert Knoten in der industriellen Anwendung nicht

unüblich. Die Planer können unter Verwendung der NPT jedoch nur die ideale Variante beschreiben. Weitere technisch mögliche Prozessabläufe werden hingegen verworfen. Bei Eintreten von Störungsereignissen steht deshalb das innerhalb der Planungsphase generierte Wissen nicht mehr zur Verfügung. Durch die mangelnde Möglichkeit alternative Vorgänge innerhalb der NPT zu beschreiben sind Entscheider gezwungen durchführbare Alternativen auf Basis ihres Erfahrungsschatzes in Stresssituationen zu eruieren. Dadurch werden wiederholt Alternativvorgänge gewählt, die einen weitaus umfangreicheren negativen Effekt auf die Produktion haben als es erforderlich wäre.

1.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Die Notwendigkeit der Flexibilität ist im Zeitalter der Digitalisierung eine der maßgebenden Fähigkeiten einer zukunftsfähigen Produktion. Auf der einen Seite ist ein hoher Grad an Flexibilität bei der Durchführung von Arbeitsaufträgen gefordert, auf der anderen Seite kann sie zur Unterstützung bei produktionsplanerischen Entscheidungsprozessen dienen. Beide Aspekte galt es zu kombinieren. Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit lässt sich thematisch durch im Vorfeld der Dissertation getätigten Veröffentlichungen wie folgt einordnen:

Untersuchung konzeptioneller Grundlagen dynamischer Planungssysteme. 2017 wurden die Grundlagen zur Verwendung mobiler Endgeräte auf der Produktionsebene sowie erste Ansätze zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen auf Basis der NPT in [32, 51] vorgestellt. Im Vordergrund stand hierbei die Evaluierung möglicher Endgeräte und die Beschreibung notwendiger Rahmenbedingungen für die Verwendung dynamischer Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im operativen Einsatz. In diesem Zusammenhang wurden die ersten Ansätze zur Erweiterung der NPT beschrieben.

Konzept des Maximalnetzplans. Der Maximalnetzplan (MNP) wurde erstmalig im Jahr 2018 vorgestellt [100]. Eine aktualisierte englische Ausgabe erschien im Juni 2022 im Production Engineering Journal [53]. Es wurden die Darstellung des Netzplans sowie dessen Methodik ausführlich präsentiert. Ein Vorschlag zur Berechnung der Vorgangszeiten innerhalb des MNP und zur Berechnung des Flexibilitätsgrads wurde in den genannten Veröffentlichungen nicht präsentiert.

Zusammenführung des Front- und Backends. Ebenfalls im Jahr 2018 wurde auf einer CIRP-Konferenz die bis zu diesem Zeitpunkt erarbeiteten Ergebnisse des vom Bundesministerium für Bildung- und Forschung geförderten Projekts „Computer gestützte Realisierung einer intel-

lignent Fertigung (CoRiFe)“ präsentiert. Im Fokus stand hier das Zusammenspiel zwischen mobilen Endgeräten (Frontend) und dem MNP (Backend). Das zugehörige Paper wurde im Januar 2019 im Elsevier Verlag veröffentlicht [52].

Steuerung von Mensch-Roboter-Kollaborationsarbeitsplätzen. 2019 wurde der Einsatz des MNPs als mögliches Mittel zur Steuerung von Arbeitsaufträgen in einem Mensch-Roboter-Kollaborationsarbeitsplatz untersucht [27, 28]. Es wurde damit, neben der Nutzung des MNPs zur Unterstützung für Entscheider auf der Shopfloor-Ebene, ein weiteres potentielles Anwendungsszenario vorgestellt.

Einsatz des Maximalnetzplans zur automatisiert numerischen Priorisierung von Störungsmeldungen. Aufgrund der Beschreibung der benötigten Prozessvorgänge und dessen Beziehungen zueinander, ermöglicht der MNP die Identifizierung prozesskritischer Vorgänge in ideal verlaufenden und gestörten Prozessen. Dieses Potential wurde 2021 zur Priorisierung von Störungsmeldungen verwendet. Innerhalb eines Konferenzbeitrags [101] wurden auf Basis des MNPs Priorisierungsparameter definiert, die gemeldete Störungen unter Beachtung der dazugehörigen Prozessvorgänge automatisiert numerisch gewichten. Das vorgestellte Verfahren unterstützt Mitarbeiter der Qualitätssicherung in der Identifizierung der Reihenfolge der zu bearbeiteten Störungsmeldungen.

Kapitel 2

Zielsetzung und Vorgehensweise

Wie bereits in der Problemstellung erwähnt existiert ein Mangel an Prozessplanungswerkzeugen, die mit geringer Komplexität bekannte alternative Prozessschritte repräsentieren. Eine vereinfachte Darstellung würde zur Steigerung der Flexibilität auf der Produktionsebene führen und folglich zur Effizienzsteigerung der Unternehmen beitragen. Mit diesem Vorhaben beschäftigt sich die vorliegende Arbeit. Diese wird zur Umsetzung der gewünschten Ergebnisse in drei einzelne Teilziele gegliedert: dem analytischen, dem deskriptiven sowie dem pragmatischen Ziel.

Als **analytisches Ziel** wird die Analyse der Ist-Situation sowie die Analyse von Anforderungen und Rahmenbedingungen des Einsatzes eines dynamischen PPS-Systems innerhalb des operativen Geschäfts definiert. Hierzu werden existente Forschungsarbeiten untersucht. Im Fokus der Analyse stehen Arbeiten, die sich mit identischen oder ähnlichen Fragestellungen befassen. Die erarbeiteten Ansätze werden für die Lösung der hier vorliegenden Problemstellung untersucht, eingeordnet und bewertet.

Daneben existiert das **deskriptive Ziel**, die Etablierung einer neuen Methode, die es erlaubt innerhalb eines Netzplanmodells neben dem Soll-Prozess – in der Problemstellung als ideale Ablaufsequenz bezeichnet – auch alle zulässigen bekannten alternativen Prozessvorgänge abzubilden. Dabei entsteht ein Maximalnetzplan, der bei gegebener Anzahl an Knoten zusätzliche Kanten enthält. Die Methode beinhaltet demnach eine grundlegend weiterentwickelte Netzplanstruktur und ein Regelwerk zu deren Handhabung. Diese werden numerisch in Form eines Datenmodells sowie der korrespondierenden Entscheidungsalgorithmen abgebildet und exemplarisch an einem Fallbeispiel erprobt. Zusammenfassend kann das deskriptive Ziel dieser Arbeit als die Entwicklung einer neuen Netzplanmethodik zur Darstellung von Alternativprozessen mit dem Vorsatz der Vermeidung eines Prozessstillstands beschrieben werden.

Eine detaillierte Beschreibung der Methodik ist im Kapitel 4 dieser Arbeit zu finden. Zur Vervollständigung der Zieldefinition wird das **pragmatische Ziel** als das beispielhafte Umsetzen der erarbeiteten Methodik in einer Anwendung definiert. Hierzu wird eine Benutzeroberfläche geschaffen, die es ermöglicht, den Netzplan zu visualisieren und den Planern erlaubt, mit dem MNP zu interagieren. Die Anwendung wird im Falle von Störungsereignissen numerisch geeignete Alternativprozesse evaluieren, sie dem Nutzer empfehlen und dazu verhelfen, die jeweilige Alternative einem Mitarbeiter zuzuweisen. Im Falle eines Störungseintritts sind diese Alternativen zu evaluieren und in geeigneter Weise dem Anwender als bewertete Auswahl zu präsentieren. Zur Erreichung der beschriebenen Ziele wird eine induktive Herangehensweise verwendet. Das Ziel der Forschung ist es für die Produktion allgemeingültige Regeln zur Suche alternativer Produktionsabläufe auf der Grundlage einer Montageprozessanalyse zu definieren. Der Aspekt der Allgemeingültigkeit steht hierbei im Vordergrund und impliziert die mögliche Anwendung der erarbeiteten Regeln auf beliebige als Projekt darstellbare Prozesse. Das verfolgte Anwendungsgebiet der zu erarbeitenden Methode übersteigt somit den innerhalb der Einleitung beschriebenen Branchen.

Zu Beginn der Arbeit werden die fachspezifischen Grundlagen der MNP-Methodik, sowie bereits zu dieser Ausarbeitung ähnlichen Zielsetzungen existente Arbeiten innerhalb des Kapitels „Stand der Kenntnisse“ aufgeführt. Durch Beschreibung der einzelnen Ansätze wird die Notwendigkeit, der in dieser Ausarbeitung vorgestellten Lösung herausgestellt. Teilaspekte der Arbeit bestehen aus einem mathematischen, informatischen Fundament in Kombination mit Kenntnissen aus dem Projektmanagement sowie der PPS. Aus diesem Grund werden theoretische Grundlagen zu den einzelnen Themen in den jeweiligen Abschnitten kurz erläutert.

Die beschriebenen Verfahren dienen als Fundament der Anforderungsanalyse über die Umsetzung des MNPs. Innerhalb des gleichnamigen Kapitels „Maximalnetzplan“ werden die Ergebnisse der Anforderungsanalyse in die Methodik eines derartigen Netzplans eingebunden. Zusätzlich wird die grundlegende Struktur als auch die mathematische Beschreibung eines dieser graphischen Darstellung erläutert sowie Entscheidungskriterien erörtert mit denen der Algorithmus zur Verfügung stehende Alternativen analysiert und priorisiert.

Anschließend folgt die Beschreibung des Anwendungsbeispiels. Das Gesamtkonzept des Planungssystems wird charakterisiert, in dem der MNP das Backend bildet. Hierbei wird auf eventuelle Herausforderungen bei der Implementierung des Planungstools eingegangen.

Daraufhin folgt die Evaluierung der Ergebnisse. Im gleichnamigen Kapitel werden die Vorteile des MNPs gegenüber anderen Techniken aufgeführt und im Detail erörtert. Das Kapitel Schlussfolgerung und Ausblick dient als Abschluss dieser Arbeit. Die Eigenschaften der ausgefertigten Methodik werden zusammenfassend dargelegt sowie etwaige weiterführende Arbeiten beschrieben. In nachfolgender Abbildung 2.1 ist der strukturelle Aufbau der Arbeit veranschaulicht.

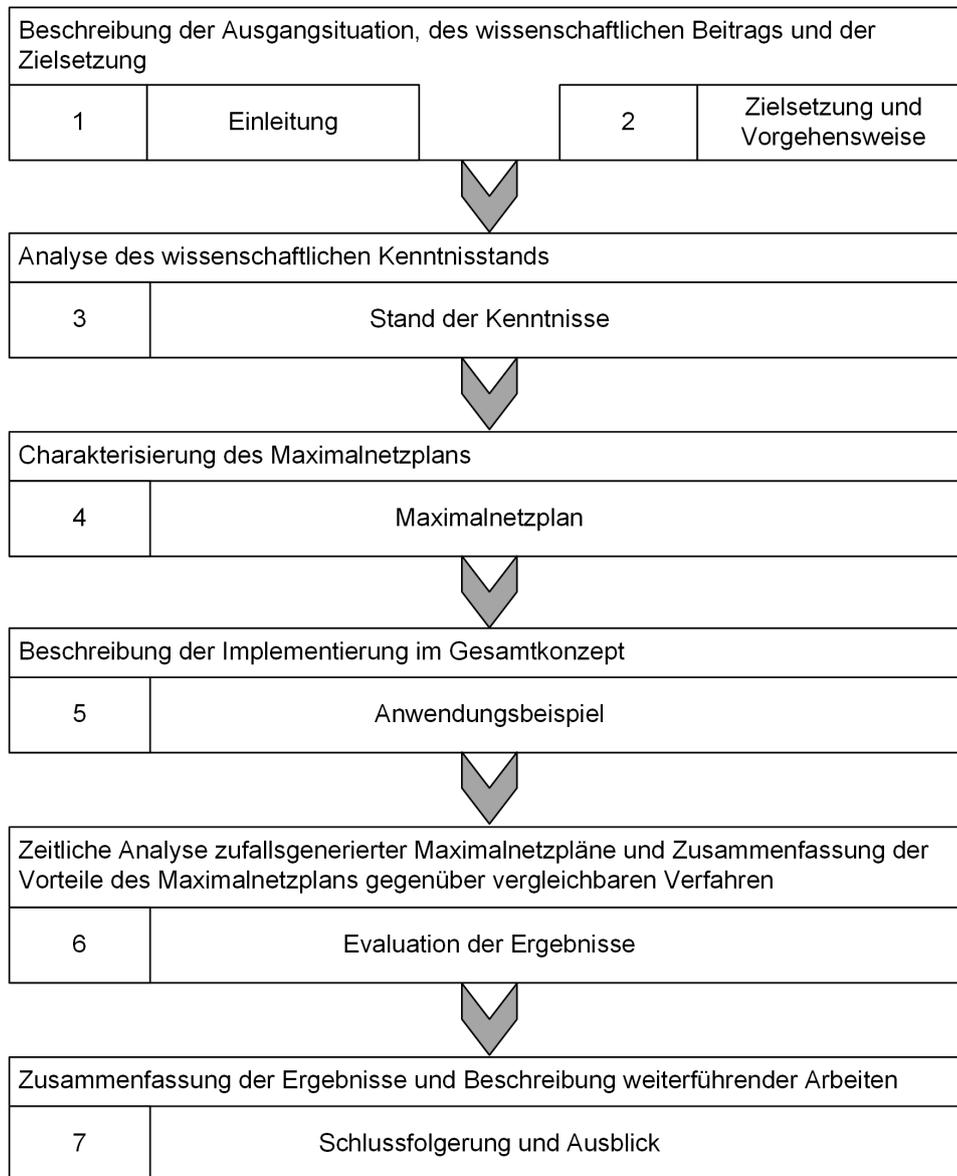


Abbildung 2.1: Struktureller Aufbau der Arbeit

Kapitel 3

Stand der Kenntnisse

Zu Beginn dieses Abschnitts werden grundlegende Eigenschaften der allgemeinen Graphentheorie vorgestellt. Dieses theoretische Konzept dient vielerlei Problemstellungen und Methodiken als logische Basis. Die sogenannten Netzplantechniken basieren auf dieser Theorie. Diese werden im Allgemeinen als Projektplanungswerkzeuge eingesetzt. Sie visualisieren durch eine verständliche Darstellungsweise Arbeitsvorgänge und deren Beziehungen zu einander, wodurch Projekte unkompliziert überwacht und gesteuert werden können. Daher werden Aspekte beschrieben, die im Zusammenhang dieser Arbeit als wichtig erachtet werden und Werke diskutiert, die zur Lösung ähnlicher Problemstellungen herangezogen wurden. Hierbei ist zu erwähnen, dass innerhalb dieser Arbeit ausschließlich die Merkmale der Graphentheorie aufgeführt werden, die zum Verständnis der nachfolgenden vorgestellten Verfahren beitragen.

Neben den Netzplantechniken werden Petrinetze in der Planung und Steuerung von Abläufen eingesetzt. Ein Beispiel sind Simulationen von Arbeitsabläufen im produktionstechnischen Kontext. Aufgrund des ähnlichen Einsatzgebiets werden die Petrinetze ebenfalls diskutiert und auf Erfüllung der Zielsetzung hin untersucht. Bereits zu Beginn dieser Arbeit wurden computerbasierte Verfahren zur Erstellung von Prozessplänen (CAPP, AAPP) erwähnt. Diese Verfahren dienen zur computergestützten Erstellung von Prozessplänen. In einigen Fällen finden hierbei alternative Abläufe Berücksichtigung. Zur Abgrenzung zu Prozessdarstellungswerkzeugen, wie der NPT, finden diese Verfahren ebenfalls Erläuterung. Hinzukommend werden derartige Verfahren im Gegensatz zur NPT nicht im operativen Geschäftsbetrieb verwendet. Die Schaffung einer Methode Mitarbeiter in Zeiten der Digitalisierung in ihren Tätigkeiten wie Entscheidungsprozesse zu unterstützen stellt das übergeordnete Ziel dieser Arbeit.

Hier bedarf es Techniken der künstlichen Intelligenz wie heuristische Verfahren, weshalb einige innerhalb dieses Kapitels zur Erreichung der Zielsetzung analysiert werden.

Der Abschluss des Kapitels stellt die erarbeitete Methode und deren Umsetzung in den Kontext der I4.0 durch die Darstellung von cyber-physischen Systemen dar. Eine über in der Problemstellung hinaus aufgeführte Beschreibung dieser Systeme wird innerhalb des entsprechenden Abschnitts 3.6 vorgenommen.

3.1 Graphentheorie: Die Grundlage von Prozessplanungswerkzeugen

Graphen $G = (V, E)$ sind eine kombinatorische Struktur, die aus einer Menge von Objekten, den Knoten V , und einer Menge von Relationen, den Kanten E , besteht [93]. Die Kanten stellen dabei die Verbindung der einzelnen Knoten dar. Die Definition eines Graphen lautet nach Steger in [93] wie folgt:

„Ein Graph G ist ein Tupel (V, E) , wobei V eine (endliche) nichtleere Menge von Knoten (engl. vertices) ist. Die Menge E ist eine Teilmenge der zweielementigen Teilmengen von V , also $E \subseteq \binom{V}{2} := \{\{x, y\} \mid x, y \in V, x \neq y\}$. Die Elemente der Menge E bezeichnet man als Kanten (engl. edges).“

In der Abbildung 3.1 ist ein ungerichteter Multigraph dargestellt. Als ungerichtet werden Graphen bezeichnet, in denen keine Richtung vorgegeben ist, um von einem Knoten zu einem anderen zu gelangen. Es ist folglich möglich, sowohl den Knoten 1, den Knoten 2 als auch ausgehend vom Knoten 2 den Knoten 1 auf einer Kante $[1, 2]$ zu erreichen. Graphen werden als Multigraph charakterisiert, sofern zwischen den einzelnen Knoten mehr als eine Eingangs- und Ausgangsbeziehung besteht und die jeweiligen Knoten somit über Mehrfachkanten verfügen [92]. Weist hingegen ein Graph eine definierte Richtung auf, wird dieser als gerichtet bezeichnet. Dargestellt ist dieses in der Abbildung 3.2. Die Beziehungen der Knoten zueinander werden in solch einem Graphen durch Pfeile beschrieben [47]. In derartigen Graphen gelten zwei Kanten zwischen zwei Knoten i und j nicht als Mehrfachkanten, sofern diese Kanten entgegengesetzte Richtung aufweisen [93]. Eine „Fortbewegung“ im Graphen ist ausschließlich nach der definierten Pfeilrichtung durchzuführen. Die jeweiligen Knoten am Ende einer Kante sind folglich nicht wie im zuvor genannten Beispiel beliebig zu erreichen, sondern ausschließlich in Pfeilrichtung.

Zusätzlich können die Kanten eines Graphen, ob gerichtet oder ungerichtet, mit Gewichten versehen werden. Dieses wird mittels Zahlen an den dazugehörigen Kanten dargestellt.

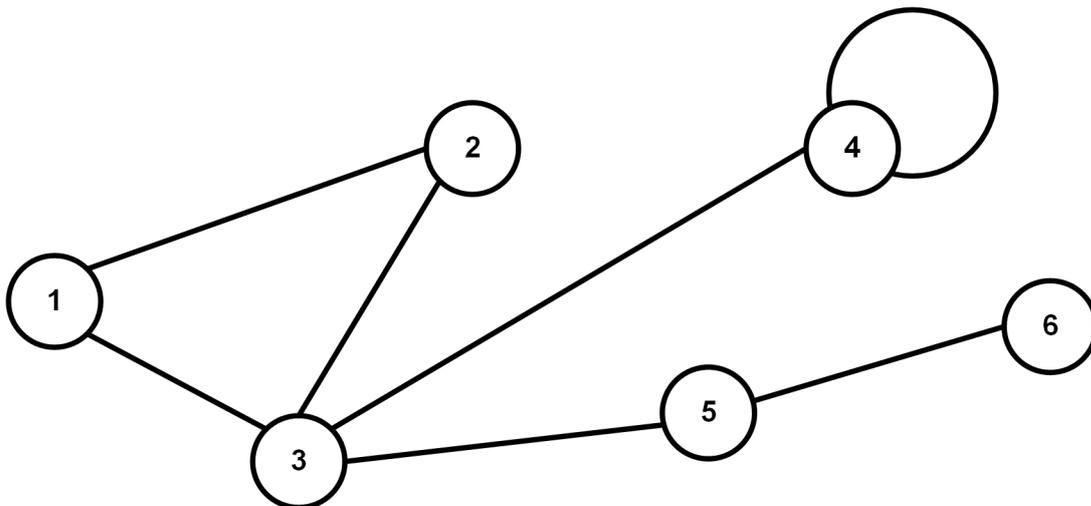


Abbildung 3.1: Beispiel eines ungerichteten Graphen mit Mehrfachkante (Multigraph H)

Diese Gewichte können als Kosten interpretiert werden, um von einem Knoten zu einem anderen zu gelangen.

Neben der Darstellung der Graphen sind auch einige Begrifflichkeiten der Graphentheorie in die Netzplantechniken überführt wurden. In einer Definition von Domschke [22] werden die Begriffe Vorgänger, Nachfolger, Nachbarschaft sowie der Knotengrad folgendermaßen definiert:

„In einem gerichteten Graphen G heißt ein Knoten j (unmittelbarer) Nachfolger eines Knotens i , wenn in G ein Pfeil (i, j) existiert; i bezeichnet man entsprechend als (unmittelbaren) Vorgänger von j . Man sagt ferner, i und j seien mit dem Pfeil inzident. Die Menge aller Nachfolger eines Knotens i bezeichnen wir mit $N(i)$, die Menge seiner Vorgänger mit $V(i)$. Vorgänger und Nachfolger eines Knotens i bezeichnet man auch als dessen Nachbarn, ausgedrückt durch $NB(i)$. Ein Knoten i mit $V(i) = \emptyset$ heißt Quelle, ein Knoten i mit $N(i) = \emptyset$ Senke des Graphen. Analog dazu nennen wir in einem ungerichteten Graphen G Knoten i und j Nachbarn, wenn $[i, j]$ eine Kante von G ist. Die Menge der Nachbarn eines Knotens i bezeichnen wir mit $N(i)$. Die Anzahl der mit einem Knoten i inzidenten Kanten bezeichnet man als Grad des Knotens oder Knotengrad. In einem schlichten Graphen gilt $g_i = |NB(i)|$ für alle Knoten i .“

Der Knoten 4 in der Abbildung 3.2 weist nach oben beschriebener Definition einen Knotengrad $g_4 = 3$ auf. Knoten 4 ist mit drei Pfeilen inzident. Unter Verwendung des Knotengrads lässt sich die Wichtigkeit von Prozessschritten innerhalb eines Produktionsprozesses erkennen, sofern dieser Prozess als Graph beispielsweise in Form eines Netzplans visualisiert wird. Je höher

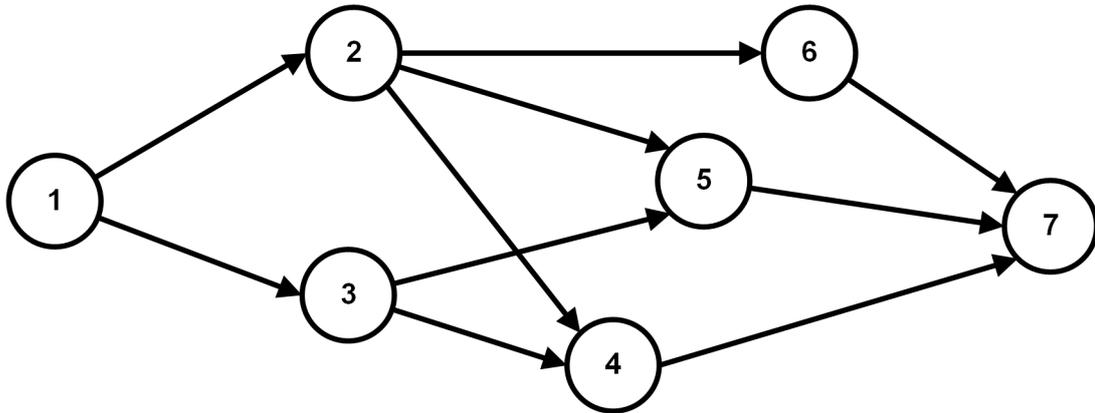


Abbildung 3.2: Beispiel eines gerichteten Graphen (Graph G)

die Anzahl der ein- und ausgehenden Kanten eines Knotens sind, desto wichtiger erscheint dieser im produktionstechnischen Kontext.

Um einen Graphen in der Informatik verarbeiten zu können, bedarf es numerischer Verfahren zur Darstellung der Relationen. Hier existieren differente Varianten. Beispiele sind die Inzidenzmatrix, Adjazenzliste und die Adjazenzmatrix. Diese werden kurz erläutert. Die Variationen eignen sich, je nach Anwendungsfall, mehr oder minder zur Speicherung von Knotenrelationen. Zur Erläuterung der Varianten wird, wie in [60] davon ausgegangen, dass $n = |V|$, also n der Anzahl an Knoten entspricht und $m = |E|$ die Anzahl der Kanten beschreibt.

Für die Einträge der Inzidenzmatrix bestehen abweichende Fälle. Nebel [60] differenziert diese wie folgt:

$$i_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls Knoten } i \text{ Anfangsknoten von Kante } j \text{ ist} \\ 2 & \text{falls Knoten } i \text{ Endknoten von Kante } j \text{ ist} \\ 3 & \text{falls Knoten } i \text{ Anfangs- und Endknoten von Kante } j \text{ ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Hierbei wird unterschieden, ob es sich bei dem betrachteten Knoten um einen Anfangs- oder einen Endknoten (Fall 1, Fall 2) oder um einen Anfangs- und einen Endknoten einer Kante handelt (Fall 3). Nach den beschriebenen Bedingungen ist die Inzidenzmatrix des gerichteten Graphen aus der Abbildung 3.2 auf nachfolgende Art darzustellen.

$$I(G) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Der 3. Fall findet in dieser Inzidenzmatrix keine Beachtung, da in dem beschriebenen gerichteten Graphen G kein Knoten existiert, der als Anfangs- und Endknoten einer Kante agiert. Der Speicherplatzbedarf einer solchen Inzidenzmatrix beträgt $O(n * m)$ [49]. Eine solche Matrix basiert folglich nicht nur auf der Menge der Knoten eines Graphen, sondern auch auf der Anzahl dessen Kanten.

Die zweite Verfahrensweise, welche zur Speicherung der Grapheninformationen betrachtet wird, ist die Adjazenzliste. Zur Darstellung des Graphen wird für jede Ecke eine Liste mit den dazugehörigen Nachbarn abgespeichert [97]. Der Speicherplatz einer Adjazenzliste beträgt $O(n + m)$ [93]. Somit steht der Speicherbedarf, wie bei der Inzidenzmatrix, in einem direkten Zusammenhang mit der Anzahl an Kanten des Graphen. Nachfolgend ist ein Beispiel für eine Adjazenzliste des Graphen G dargestellt. Die Darstellung ist an Steger angelehnt [93]. Innerhalb einer solchen Adjazenzliste werden die für jeden Knoten zugehörigen Nachbarn abgespeichert.

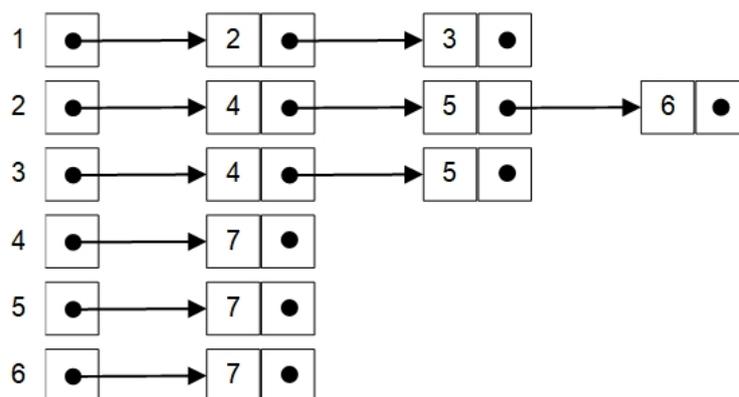


Abbildung 3.3: Darstellung der Adjazenzliste nach Steger [93] für den gerichteten Graphen G

Die letzte Art, die zur Darstellung und Speicherung von Graphen beschrieben wird, ist die Adjazenzmatrix. Sowohl Krumke [49], als auch Gurski [34] erklären diese Matrix als die einfachste Möglichkeit einen Graphen darzustellen. Diese enthält im Gegensatz zu der Inzidenzmatrix ausschließlich die Knoten eines Graphen und beschreibt dessen Beziehungen zueinander auf Grundlage zweier Fälle [34]:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls } (i,j) \in E \\ 0 & \text{falls } (i,j) \notin E \end{cases}$$

Innerhalb einer Adjazenzmatrix sind auf Basis der Fallunterscheidung daher die Einträge Eins und Null gegeben. Es wird eine Eins in die Zelle $a_{i,j}$ eingetragen, sofern zwischen den Knoten i und j eine Kante existiert, die Knoten i und j , also adjazent, zueinander sind. Stehen die Knoten i und j in keinerlei Beziehungen zueinander, existiert folglich keine Kante (i, j) zwischen diesen, so ist der Eintrag $a_{i,j} = 0$. Für den gerichteten Graphen G ergibt sich die Adjazenzmatrix daraus wie folgt:

$$A(G) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Ausschließlich der Matrixbereich oberhalb der Hauptdiagonalen, auch obere Dreiecksmatrix genannt, ist mit Einsen belegt. Dieses basiert auf der topologischen Sortierung des gerichteten Graphen. Die Nummerierung der Knoten wurde so vorgenommen, dass diese in Leserichtung, also von links nach rechts, steigend verläuft. Alle Kanten zeigen von einem Knoten mit einer niedrigen Kennzeichnung zu einem Knoten mit einer höheren [93]. Gewichtete Graphen sind ebenfalls durch eine Adjazenzmatrix darstellbar. Bei dieser Art von Graph werden die einzelnen Kanten zwischen den jeweiligen Knoten mit Kantengewichtungen versehen. In solch einem Fall werden diese Gewichtungen in die Adjazenzmatrix in die entsprechende Zelle eingetragen [49]. Diese Neubelegung hat keinerlei Auswirkungen auf den Speicherbedarf der Adjazenzmatrix, dieser beträgt $O(n^2)$ [91]. Somit ist es bezogen auf den Speicherbedarf nicht von Bedeutung, ob

die Adjazenzmatrix zur Beschreibung eines gewichteten oder ungewichteten Graphen eingesetzt wird [91]. Hingegen ist die Kantenanzahl von größerer Bedeutung. Die Adjazenzmatrix ist für Graphen mit einer geringeren Anzahl an Kanten weniger geeignet [96]. In Solch einem Fall kann die Verwendung einer Inzidenzmatrix oder Adjazenzliste bezogen auf den Speicherplatz von Vorteil sein [93]. Ein Graph mit einer hohen Kantenanzahl wird als *dicht besetzt* bezeichnet.

Die Graphentheorie stellt in vielen Bereichen das Grundgerüst für die jeweilige Methode. Nachfolgend werden Techniken beschrieben, die auf dieser Theorie basieren und innerhalb der Prozessorganisation Verwendung finden. Hierzu zählen unter anderem die NPT und Petrietze. Zusätzlich sei angemerkt, dass die untersuchten Techniken eine definierte Kantenrichtung vorweisen. Folglich werden die innerhalb der Graphentheorie verwendeten Begrifflichkeiten „Pfeil“ und „Kante“ nachfolgend als Synonyme verwendet. Mit der Verwendung des Kanten-Begriffs wird gleichbedeutend immer von einer Verbindung zwischen zwei Knoten mit einer definierten Richtung gesprochen. Dieses gilt analog für den Begriff des „Kantengewichts“, welcher somit die Gewichtung eines Pfeils im Sinne der Graphentheorie beschreibt.

3.2 Netzplantechniken

Innerhalb dieser Arbeit wird sich zur Untersuchung der Netzplantechnik ausschließlich mit dem Kontext der produzierenden Industrie auseinandergesetzt. Hier werden mit Hilfe der Graphentheorie beispielsweise Transportnetzbeziehungen zu Logistikprozessen in der Warenversorgung visualisiert [11]. Die Bedarfsstationen, wie Maschinen- oder Montagearbeitsplätze, werden durch die Knoten des Graphen und die Wege zu den einzelnen Stationen durch dessen Kanten repräsentiert. Es gilt möglichst kurze Wege von dem Lagerort zu allen Verbrauchern zu definieren, um eine effiziente Materialversorgung gewährleisten zu können.

Darüber hinaus wird die Graphentheorie als Basis der NPT zur Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten unter anderem im unternehmerischen Kontext eingesetzt [85]. Grundlegend existieren differente Varianten der NPT. Ausgerichtet sind sie je nach im Mittelpunkt der Betrachtung stehenden Vorgänge oder Ereignisse. In der Literatur, beispielgebend in [78], wird bei erstgenanntem Zentrum des Interesses von Vorgangsknoten- oder Vorgangspfeilnetzplänen gesprochen. Schwarze definiert einen Vorgang wie folgt [85]:

„Ein Vorgang ist ein zeiterforderndes Geschehen innerhalb eines Projektes mit definierbarem Anfang und Ende, bei dem im allgemeinen Arbeitskräfte, Nutzungsgüter und/oder Verbrauchsgüter beansprucht werden.“

Ein Netzplan, der zur Fokussierung von Ereignissen Verwendung findet, wird als Ereignisknoten-netzplan (EKN) bezeichnet. In diesen sind einzig Ereignisse und deren Beziehungen zueinander dargestellt. Vorgänge werden in derartigen Netzplänen nicht direkt einbezogen. Ein Ereignis definiert einen bestimmten Projekt- oder Vorgangszustand. Beispielsweise werden dem Beginn und Ende eines Projekts die Ereignisse „Projektstart“ und „Projektende“ zugeordnet [110]. Ereignisknoten-netzpläne werden aufgrund der geringen Relevanz für Projekte im unternehmerischen Kontext nicht ausführlicher diskutiert. Sie dienen vornehmlich der Beschreibung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten, in denen eine detaillierte Definition der einzelnen Vorgänge nicht möglich ist [85].

Nachfolgend werden differente vorgangsorientierte Netzplantechniken beschrieben. Hierzu wird eine Unterteilung in deterministische und stochastische Techniken vorgenommen. Dieses beruht auf der Einteilung nach [22]. Demnach lassen sich NPT in deterministische und stochastische Verfahren gliedern. Eine Übersicht zu den wichtigsten Techniken ist der Abbildung 3.4 zu entnehmen.

Bei deterministischen Verfahren ist jeder Knoten eines Netzplans durchzuführen, die Vorgangsdauer wird jeweils als bekannt vorausgesetzt. Hierzu zählen Vorgangsknoten- und Vorgangspfeil-netzpläne. Im englischen Sprachgebrauch werden diese Arten als „activity-on-node network“ und „activity-on-arc network“ bezeichnet [61]. Die Metra Potential Methode (MPM) ist der bekannteste Ansatz der erstgenannten Methode, die Methode des kritischen Pfads (engl. Critical Path Method (CPM)) der verbreitetste der zweitgenannten Methode. In der CPM werden die Vorgänge durch Pfeile repräsentiert. Die Knoten hingegen stellen Ereignisse dar. Der CPM-Begriff lässt vermuten, dass eine Bestimmung kritischer Wege ausschließlich in dieser Methode möglich sei. Dieses ist jedoch nicht zutreffend. Auch die MPM erlaubt die Deklaration solcher Kantenzüge. Eine exakte Definition kritischer Wege ist in den Abschnitten über die Berechnung von Zeitfaktoren der MPM-Netzpläne zu finden.

Die in der Abbildung 3.4 genannten stochastischen Verfahren Program Evaluation and Review Technique (PERT) und die Graphical Evaluation and Review Technique (GERT) können ebenfalls als Vorgangspfeilnetzpläne betrachtet werden [110]. Diese lassen sich in zwei Gruppen basierend auf der jeweiligen Vorgangsdauer und der Wahrscheinlichkeit der Vorgangsdurchführung gliedern:

- Die Dauer der einzelnen Vorgänge des Netzplans unterliegt einer stochastischen Verteilung. Die Durchführung aller Vorgänge ist zwingend erforderlich und somit deterministisch. Diese Gruppe wird durch PERT-Netzpläne veranschaulicht.

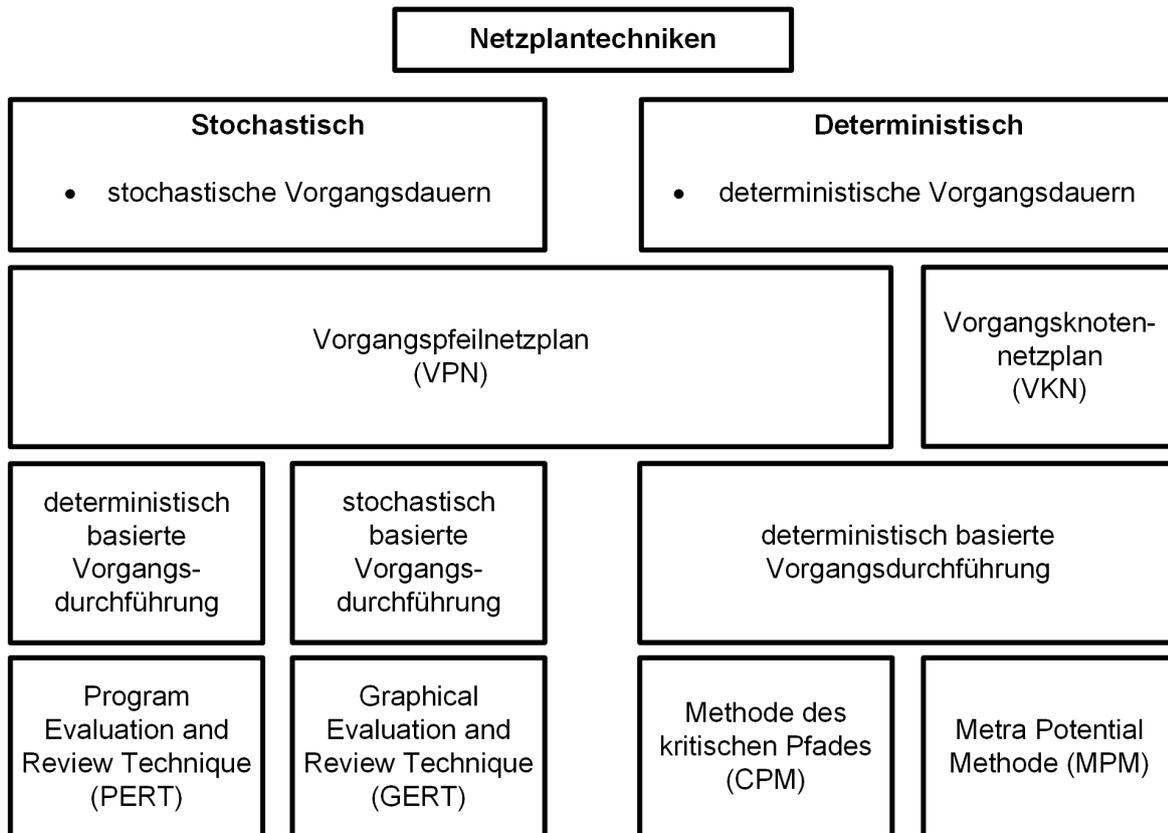


Abbildung 3.4: Übersicht der vorgangsorientierten Netzplantechniken

- Dem gegenüber steht die zweite Gruppe. GERT-Netzpläne basieren auf der Nutzung einer stochastischen Vorgangsdauer sowie der stochastischen Durchführung der einzelnen Vorgänge.

Bei den beschriebenen Netzplantechniken werden die Vorgänge in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt. PERT-Netzpläne können jedoch auch, wenn der Fokus auf die Ereignisse gerichtet wird, zu der Gruppe der Ereignisknotennetzpläne gezählt werden [78]. Dieses ist jedoch im produktionstechnischen Kontext nicht zielführend. Aus diesem Grund werden PERT- und GERT-Netzpläne in dieser Ausarbeitung als Vorgangspfeilnetzplan (VPN) präsentiert. Die detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Arten wird nachfolgend in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 unternommen.

3.2.1 Deterministische Netzplantechniken

Deterministische Netzpläne sind in VKN und VPN untergliedert. Es wird auf strukturelle Eigenschaften, sowie die Zeitplanung der einzelnen Netzplanvarianten eingegangen.

Begonnen wird mit der Beschreibung der VKN. Hierbei werden unterscheidbare Darstellungsarten dieser Netzplanart aufgeführt und auf jeweilige Eigenarten eingegangen.

Vorgangsknotennetzpläne

Der Fokus dieser Netzplantechniken liegt auf den durchzuführenden Vorgängen, weshalb diese folglich auch als vorgangsorientiert bezeichnet werden [78]. Die Vorgänge, auch als Knoten bezeichnet, werden durch Rechtecke dargestellt [44]. Die Beziehung der einzelnen Knotenpunkte zueinander ist, wie in der zugrunde gelegten Graphentheorie durch Pfeile definiert. In der Abbildung 3.5 ist ein Beispiel eines VKNs in Form eines MPM-Netzplans veranschaulicht. Die einzelnen Prozessschritte sind mit Attributen, wie Vorgangszeiten, verknüpft, wodurch eine Berechnung einzelner Vorgangszeiten (Formel: 3.3 - Formel: 3.7) möglich wird. Die Netzpläne lassen sich unter Verwendung verschiedener Abfolgebeziehungen abbilden. Innerhalb der klassischen MPM wird von einer Anfang-Anfang-Beziehung, auch als Anfangsfolge bezeichnet [20], zwischen den einzelnen Vorgängen ausgegangen [78]. Nachfolger eines Vorgangs können nach dessen Start mit einer zeitlichen Verzögerung begonnen werden. Kerbosch et al. [44] erweiterten diese Beziehungsstrukturen unter anderem durch die Ende-Anfang-Beziehung (Normalfolge). Nachfolger eines Vorgangs dürfen erst nach dessen Fertigstellung und Ablauf eines zeitlichen Mindestabstands begonnen werden. Diese Verzögerung ist auf den Pfeilen hinterlegt, erkennbar in der Abbildung 3.5 und kann als Maximal- oder Minimalabstand definiert werden [61]. Diese zeitliche Abstände können positiv, negativ oder gleich Null sein. Eine weitere Abfolgebeziehung ist die Prozent-Beziehung [44]. Hier kann der Nachfolgeknoten begonnen werden, sobald die Prozesszeit des Vorgängers zu einem gewissen Prozentsatz beendet ist. Der Mindestabstand wird in solch einem Fall als Prozentangabe in Abhängigkeit der Dauer des Vorgangs i hinterlegt. Die

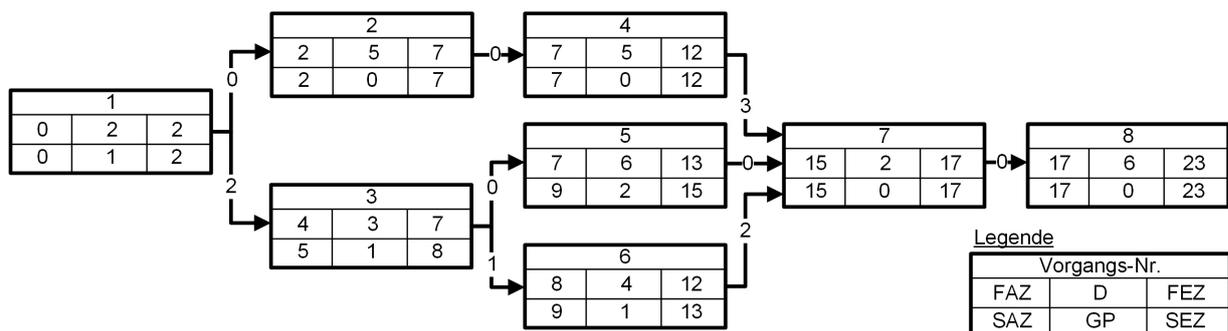


Abbildung 3.5: Beispiel eines MPM-Netzplans nach DIN 69900 [20] mit Normalfolge und zeitlichen Mindestabständen; FAZ - frühester Anfangszeitpunkt, D - Vorgangsdauer, FEZ - frühester Endzeitpunkt, SEZ - spätester Endzeitpunkt, GP - gesamte Pufferzeit, SAZ - spätester Anfangszeitpunkt

Pfeilverbindung von einem Knoten zu einem anderen ist nicht wie üblich am Anfang oder Ende eines Vorgangs verknüpft, sondern seitlich an einem solchen angebracht. Neben den genannten Abfolgebeziehungen sind die Anfang-Ende- sowie die Ende-Ende-Beziehung in der Literatur definiert, unter anderem in [44]. Alle genannten Abfolgen wurden aus Gründen der Vollständigkeit benannt. Die vier gängigsten sind in der Abbildung 3.6 dargestellt. Sie lassen sich in die Normalfolge überführen und werden deshalb in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Eine detaillierte Betrachtung dieser Überführung ist [22] zu entnehmen.

Ein wesentlicher Vorteil von Netzplantechniken ist die Berechnung diverser Zeitfaktoren zur Ablaufplanung des Produktionsprozesses. Die Grundlage hierfür ist die Beurteilungen der Vorgangsdauer t_i (in der Abbildung 3.5 als D bezeichnet) und die Einschätzung von zeitlichen Abständen d_{ij} zwischen den Vorgängen i und j . Eine Möglichkeit hierzu bieten unter anderem das REFA-Verfahren [69] oder die Methods-Time Measurement (MTM) [103]. Unter Verwendung der Vorgangsdauer t_i ist es möglich, früheste und spät möglichste Anfangs- und Endzeitpunkte der Prozessschritte festzulegen und einhergehend die Gesamtdauer eines Projekts zu bestimmen. Darüber hinaus erlaubt die Technik die Berechnung von Zeitreserven (Pufferzeiten), die sich zwischen einzelnen Vorgängen ergeben können. Die nachfolgenden Definitionen und Bezeichnungen entstammen der Arbeit von Domschke und seinen Kollegen [22], können aber auch in zahlreichen anderen Arbeiten wie in der DIN 69900 [20] oder in [110] eingesehen werden.

Ausgangspunkt der Berechnung ist der geplante Projektstart. Unter Nutzung der Vorwärtsrechnung werden beginnend beim zweiten Knoten des Netzplans der früheste Anfangszeitpunkt (FAZ) sowie der früheste Endzeitpunkt (FEZ) der einzelnen Vorgänge kalkuliert.

Die Berechnung fundiert auf der Annahme, der FAZ des ersten Vorgangs entspricht dem Zeitpunkt Null, wodurch der FEZ des ersten Vorgangs identisch mit dessen Dauer ist. Der Projektbeginn kann jedoch beliebig angenommen werden.

Frühester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i :

$$FAZ_i := \max \{ FEZ_h + d_{hi} \mid h \in V(i) \} \quad \text{für } i = 2, \dots, n \quad (3.3)$$

Frühester Endzeitpunkt eines Vorgangs i :

$$FEZ_i := FAZ_i + t_i \quad \text{für } i = 2, \dots, n \quad (3.4)$$

Sind die frühesten Anfangs- und Endzeiten der einzelnen Vorgänge berechnet worden, werden unter zu Hilfenahme der Rückwärtsrechnung der späteste Anfangszeitpunkt (SAZ) und der

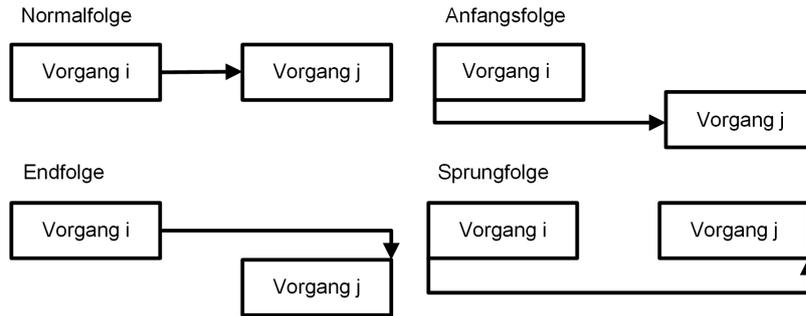


Abbildung 3.6: Darstellung der vier Vorgangsfolgebeziehungen nach DIN 69900 [20]

späteste Endzeitpunkt (SEZ) für jeden Vorgang i bestimmt:

Spätester Endzeitpunkt eines Vorgangs i :

$$SEZ_i := \min \{SAZ_j - d_{ij} \mid j \in N(i)\} \quad \text{für } i = n - 1, \dots, 1 \quad (3.5)$$

Diese Zeiten werden unter der Annahme berechnet, dass der späteste Endzeitpunkt des Knotens n dessen frühesten Endzeitpunkt entspricht. Aus diesem Grund beginnt die Formel Gültigkeit erst mit dem Knoten $n - 1$.

Spätester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i :

$$SAZ_i := SEZ_i - t_i \quad \text{für } i = n, \dots, 1 \quad (3.6)$$

Nach Berechnung dieser Zeitfaktoren ist es möglich, die gesamte Pufferzeit (GP) eines jeden Vorgangs i zu bestimmen und abschließend den kritischen Weg im Netzplan zu ermitteln.

Gesamte Pufferzeit eines Vorgangs i :

$$GP := SAZ_i - FAZ_i \quad \text{für } i = 1, \dots, n \quad (3.7)$$

Die GP ist die maximale Zeitspanne, um die ein Projekt verschoben werden kann, ohne Folgeauswirkungen auf das geplante Projektende zu nehmen. Als kritische Wege werden die Pfade des Netzplans bezeichnet, auf denen sich die Vorgänge mit einer $GP = 0$ befinden. Eine zeitliche Verschiebung dieser Vorgänge führt zu einer zeitlichen Verschiebung aller nachfolgenden Vorgänge auf dem kritischen Weg und somit zu einer Verschiebung des geplanten Projektendes. Die angegebenen Formeln setzen eine Verwendung zyklensortierter, topologisch sortierter Netzpläne, wie sie Abschnitt 3.1 erläutert werden, voraus.

Durch die Berechnung der GP eines jeden Vorgangs, ist es dem Anwender dieser Planungstechnik möglich, den kritischen Pfad bzw. Weg zu bestimmen. Als prekär sind diejenigen Schritte zu betrachten, bei denen $FAZ_i = SAZ_i$ gilt und folglich $GP = 0$ ist. Der Begriff „kritisch“ ist demnach in den zeitlichen Kontext gesetzt. Es werden Vorgänge hervorgehoben, bei denen sich eine zeitweilige Verzögerung direkt auf den Projektdenotermin auswirkt.

Neben den beschriebenen MPM-Netzplänen existieren weitere horizontale Planungsansätze, wie PPS-Netzpläne. PPS-Netzpläne beschreibt Behnke in [6] als VKN, welche zusätzlich zu der MPM einige Ergänzungen beinhalten. So können im Netzplan weitere Knoten direkt unterhalb des eigentlichen Hauptknotens über einen senkrechten Pfeil verbunden sein. Solch ein untergeordneter Knoten wird als Hilfsvorgang bezeichnet, dessen übergeordneter Knoten als Hauptvorgang. Die Hilfsvorgänge werden aus der Zeitplanung des Netzwerks ausgenommen. Sie werden als Bestandteile der jeweiligen Hauptvorgänge angesehen. Nachfolgende Darstellung (Abbildung 3.7) verdeutlicht diese Vorgangsbeziehung.

Es wird jedoch nicht beschrieben, wie sich die gewählte Darstellung verhält, sobald mehrere Hilfsvorgänge einem Hauptvorgang zugeordnet werden. Dieses könnte eine drastische Beeinflussung hinsichtlich der Übersichtlichkeit bedeuten. Zusätzlich sind die Vorgänge innerhalb eines PPS-Netzplans mit weiteren Attributen, wie Statusinformationen (begonnen, beendet), Materialkosten und Anzahl an Arbeitskräfte ausgestattet. Eine ausführliche Auflistung der Vorgangsattribute sowie eine dazugehörige Darstellung ist in dem Buch von Behnke vorzufinden. Des Weiteren ist es mit genannten Netzplänen möglich, eine Anfang-Anfang-Beziehung zwischen den Vorgängen so abzubilden, dass diese zeitgleich begonnen werden können. Der Pfeil wird dann mit einer Pfeilspitze in beide Richtungen versehen. Weiterführend hebt Behnke hervor, dass bei einem solchen Informationsgehalt datenverarbeitende Geräte im Laufe der Projektdurchführung zur Handhabung des PPS-Netzplans von Nöten seien. Die Eigenschaften dieser Methodik werden heute im Allgemeinen dem Begriff der NPT zugeordnet. Jeder Knoten beinhaltet wie eingangs beschrieben neben zeitlichen auch diverse andere Attribute. Weist ein Knoten mehrere Hilfsvorgänge auf und können diese ebenfalls in einer Netzplanabfolge dargestellt werden, so wird dieses als hierarchischer Netzplan bezeichnet.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass horizontale deterministische Netzplantechniken, zum Beispiel MPM-Netzpläne, keine Möglichkeiten zur Darstellung alternativer Prozessvarianten beinhalten. Folglich verliert solch ein Netzplan seine Gültigkeit, wenn Vorgänge beispielsweise aufgrund fehlenden Materials nicht wie geplant bearbeitet werden können. Daher wird zur Notwendigkeit auf Basis des Erfahrungsschatzes des Entscheiders unmittelbar einen Alternativvorgang für den fehlerbehafteten Prozessschritt zu finden. Darüber hinaus kann die Entwicklung eines neuen Netzplans eine weitere Konsequenz sein. Um das zu umgehen, stellten 1967 Crowston und Thompson den „Decision CPM“ Netzplan vor [17]. Er wird hier im Kapitel der VKN mit aufge-

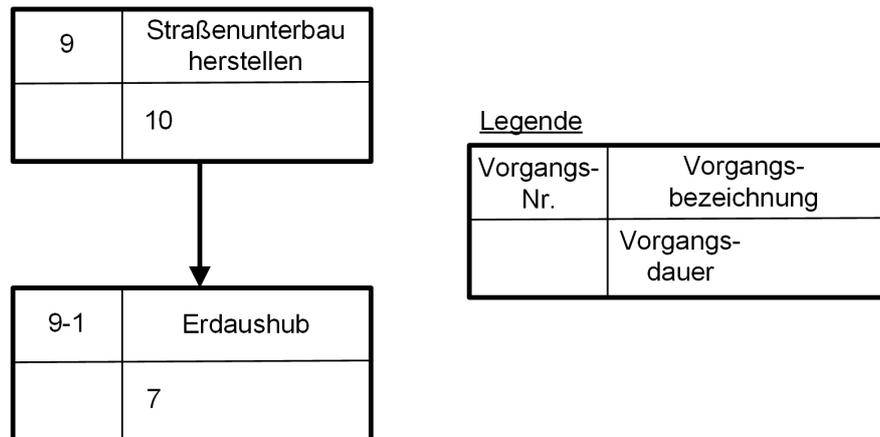


Abbildung 3.7: Darstellung von Haupt- und Hilfsvorgängen in einem PPS-Netzplan [6]

führt, da die verwendete Begriffsdefinition nicht eindeutig ist. Der Netzplan ähnelt strukturell eher einem VKN als einem CPM-Netzplan und somit VPN, da die Vorgänge des Projekts durch Knoten repräsentiert werden. Dieses erkannte Henricke bereits in seiner Arbeit [37]. Crowston und Thompsen stellen mit ihrer Netzplanvariante eine Handhabe vor, um alternative Projektabläufe zu visualisieren. Hierzu werden Entscheidungsknoten eingeführt, die es ermöglichen, zwischen nachfolgenden Knoten differente Prozessvarianten zu wählen, wodurch der Projektfortschritt sichergestellt werden soll. Solche Knoten werden als Dreiecke visualisiert. Der Anwender kann auf die Entscheidungsknoten folgenden Vorgänge in Anbetracht der jeweiligen Situation wählen. Folglich ist in dem vorgestellten Ansatz nicht jeder dargestellte Knoten notwendig, um das Projekt durchzuführen. Nicht verwendete Knoten werden nach der Wahl einer Alternative aus der Darstellung entfernt. Die Darstellungsart des Netzplans wird somit laufend verändert. Hinzukommend wird im Vorfeld Planungsaufwand für alternative Vorgänge investiert, die in der eigentlichen Durchführung des Projekts nicht von Nöten und folglich redundant sind. Darüber hinaus wird in [37] die Verständlichkeit des Netzplans kritisiert, welche durch die zusätzliche Darstellung von Entscheidungsknoten erschwert wird. Neben dem beschriebenen Ansatz der horizontalen Darstellung von Vorgangsknotenetzplänen existieren vertikale Darstellungsarten zur Beschreibung alternativer Prozessabläufe. Henricke fügt in seiner Dissertation „wissensbasierte Erweiterung der Netzplantechnik“ [37] der ursprünglichen horizontalen Darstellung von Vorgangsknotenetzplänen eine vertikale Darstellungsart hinzu. Aufgrund der mangelnden Darstellungsmöglichkeit von Durchführungsalternativen in Produktionsprozessen stellt er einen hierarchischen Netzplan mit vier Knotentypen vor. In einigen Aspekten basiert die Idee seiner Netzplanstruktur auf UND/ODER - Graphen. UND/ODER - Graphen sind progressive Graphen, die erlauben durch zwei differente Kantenverknüpfungsarten Entscheidungsmöglichkeiten

abzubilden. In klassischen UND/ODER - Graphen werden jedoch keine Anordnungsbeziehungen der Knoten wiedergegeben [37]. Hennicke erlaubt sich die Verwendung dieser Graphen, da er hierarchische Netzpläne als UND/ODER - Graphen interpretiert in denen ausschließlich UND-Beziehungen existieren [37]. Innerhalb seines Netzplans werden zur vertikalen Gliederung der Teilprojekte ebenfalls UND-Beziehungen eingesetzt. Diese werden durch Subnetzplan-Knoten visualisiert. Diese Knotenart ist in der Abbildung 3.8 veranschaulicht. Im Gegensatz zur Darstellungsart innerhalb eines UND/ODER - Graphen werden diese untergeordneten Knotenbeziehungen durch ein erweitertes Knotensymbol des übergeordneten Knotens veranschaulicht. Der übergeordnete Subnetzplan-Knoten repräsentiert ein Teilprojekt, welches aus den untergeordneten Knoten besteht. Alle enthaltenen Prozessschritte sind durchzuführen, damit das Teilprojekt abgeschlossen werden kann. Neben der Verwendung der Subnetzplan-Knoten wählt Hennicke die Aspekte der ODER-Beziehungen zur Einführung eines Entscheidungsknotens, welche durch eine Raute im vertikalen Netzplan dargestellt werden. Erkennbar ist dieses in der Abbildung 3.9. Er erweitert folglich die ausschließlichen UND-Verknüpfungen innerhalb des Netzplans mit zusätzlichen Entscheidungsmöglichkeiten mit Hilfe der ODER-Knoten. Bei der Wahl der Darstellungsart orientierte sich Hennicke an der von Eisner [24] und Elmaghraby [25] eingeführten Raute. Der Entscheidungsknoten findet für die Darstellung und Auswahl von Durchführungsalternativen Verwendung. Selbst weist dieser keinen eigenen Zeit-, Kosten- oder Kapazitätsbedarf auf. Zu den bereits genannten Änderungen führt Hennicke eine erweiterte Definition von Vorgangsknoten ein. Der Begriff Arbeitseinheiten wird verwendet, um eine sichere Vorgangsdauer angeben zu können. Bei der klassischen Beschreibung der Dauer durch Werk- oder Kalendertage wird kritisiert, dass diese durch unterschiedliche Anzahl von Arbeitskräften verlängert oder verkürzt werden kann. Folglich verliert die Vorgangsdauer so ihre Eindeutigkeit [37]. Dieses soll mit der Verwendung der Arbeitseinheiten nicht möglich sein. Die Darstellung des Vorgangsknotens wird nicht verändert. Prozessschritte werden weiterhin als Rechteck visualisiert und beinhalten zusätzlich die genannten Informationen. Der letzte Knoten nach Hennicke bezieht sich auf Abbildungsproblematiken von Durchführungsalternativen in einem vertikalen Netzplan. Problematisch hierbei sei es eine astübergreifende Abhängigkeit zwischen den Vorgängen darzustellen. Bei diesen könne keine durch Kanten dargestellte visuelle Verknüpfung existieren. Hennicke löst diese Problematik mit Positionsknoten. Diese Knoten geben die alternative Position eines Knotens im Graphen wieder. Hennicke ermöglicht mit der Darbietung seines Netzplans die Abbildung von Durchführungsalternativen, welche jedoch ausschließlich in der Komplexität des vertikalen hierarchischen Netzplans zu finden sind.

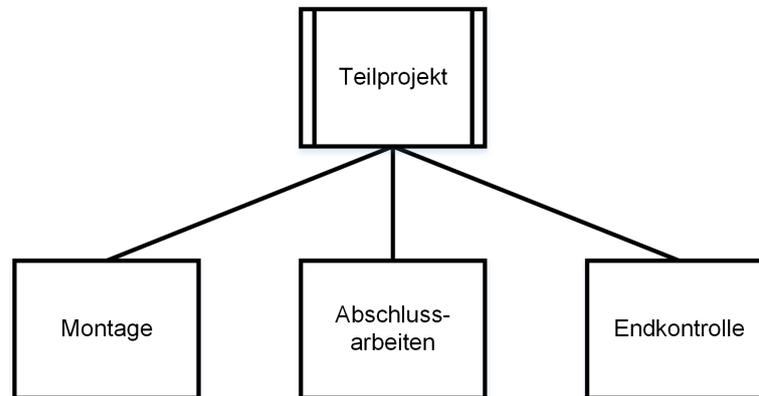


Abbildung 3.8: Darstellung eines Subnetzplan-Knotens nach [37]

Eine vereinfachte horizontale Darstellung mit der Präsentation realisierbarer Alternativen ist hingegen nicht möglich [37]:

„Zu jeder Zeit kann ein vertikaler Netzplan in einen traditionellen Vorgangsknoten-Netzplan transformiert werden, wobei aber die Informationen über die Durchführungsalternativen verloren gehen.“

Neben dem hohen Planungsaufwand zur Erstellung eines solchen Netzplans wird durch die Verwendung der diversen Knotenarten die Lesbarkeit des Netzplans deutlich erschwert. Rittgen beschreibt, wie Henricke, ebenfalls die Vereinheitlichung von UND/ODER - Graphen und MPM-Netzplänen [71]. Jedoch werden ebenfalls keinerlei Überlegungen zur Nutzung dieser Netzpläne in Problemsituationen präsentiert.

Neben den Vorgangsknotenetzplänen sind Vorgangspfeilnetzpläne für die Planung von Projektabläufen im unternehmerischen Kontext mehr oder minder geeignet. Nachfolgend wird diese Darstellungsart, im Besonderen die wichtigsten Varianten CPM, PERT sowie GERT erläutert. Hinzukommend werden deren Potenziale als Produktionsplanungswerkzeuge diskutiert. Dieses bezieht eine mögliche Präsentation von Alternativvorgängen mit ein. Ein zusammenfassender Vergleich zwischen diesen Methoden und des innerhalb dieser Arbeit dargelegten Ansatzes ist innerhalb des Kapitels 6 aufgeführt.

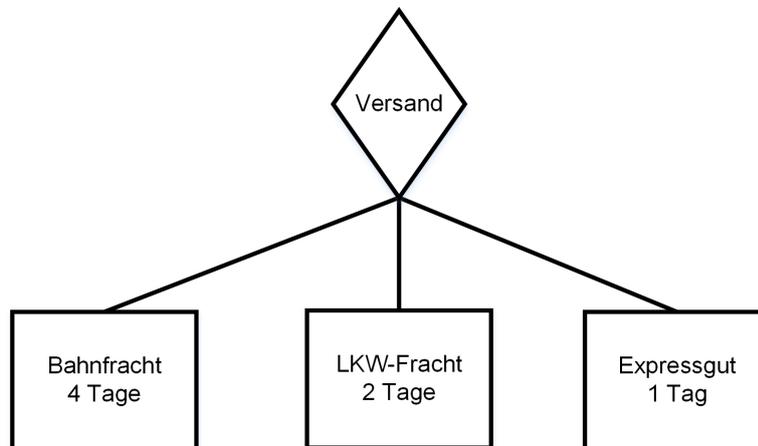


Abbildung 3.9: Darstellung eines Entscheidungsknotens nach [37]

Vorgangspfeilnetzpläne

Die renommierteste deterministische Methode der Vorgangspfeilnetzpläne ist die CPM. Daneben existieren, wie aus der Abbildung 3.4 zu entnehmen, zusätzlich stochastische VPN-Methoden. Die bekanntesten sind die PERT und die GERT. Diese werden im Anschluss an die Darstellung des CPM-Verfahrens analysiert und unter den Gesichtspunkten der alternativen Vorgangsdurchführung untersucht.

Innerhalb von CPM-Netzplänen stellen, im Gegensatz zu den MPM-Netzplänen, die Pfeile nicht die Beziehungen der einzelnen Vorgänge zueinander dar, sondern repräsentieren die Vorgänge selbst. Die Knoten hingegen demonstrieren die Anfangs- und Endereignisse der jeweiligen Vorgänge [78]. In der Abbildung 3.10 ist ein Beispiel eines CPM-Netzplans veranschaulicht. Die Knoten sind topologisch sortiert. Die Vorgangsnummerierung bezieht sich auf die Nummerierung der jeweiligen Anfangs- und Endereignisse [78]. Die Längen der Vorgangspfeile geben keinen Hinweis auf die eigentliche Vorgangsdauer; ihnen wird keinerlei Bedeutung zugesprochen [6]. Neben den beschriebenen strukturellen Elementen eines VPNs existieren sogenannte Scheinvorgänge als weitere Bausteine. Sie werden in den Netzplänen als gestrichelte Pfeile visualisiert. In der Abbildung 3.10 sind solche Scheinvorgänge zwischen den Vorgängen $(V3, V5)$, $(V2, V5)$ und $(V5, V4)$ zu finden. Scheinvorgänge erscheinen unter folgenden Gesichtspunkten notwendig:

- Zwischen den Vorgängen i und j soll ein Minimalabstand gewährleistet werden,
- die Vorgänger (h, i) haben neben dem Vorgang j weitere nicht identische Nachfolger und
- im Netzplan weisen zwei Vorgänge die identischen Anfangs- und Endereignisse auf, d.h. es existieren parallel verlaufende Vorgänge.

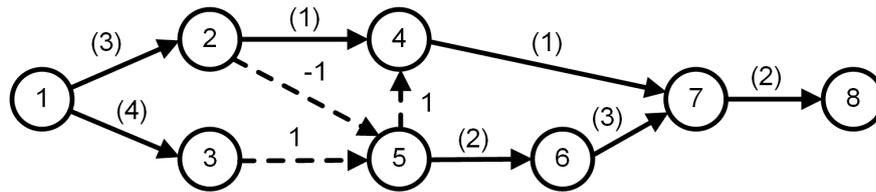


Abbildung 3.10: Beispiel eines CPM-Netzplans in Anlehnung an [22]

Die Scheinvorgänge bekommen eine Dauer Null zugewiesen [110], können jedoch auch jeden Wert der reellen Zahlen annehmen [22]. Wird ein Scheinvorgang dazu verwendet, einen Minimalabstand abzubilden, so bedeutet dies, der Prozessschritt j kann erst nach Vorgang i beginnen, sobald ein minimaler zeitlicher Abstand eingehalten wurde. Die auf die Vorgänge folgenden Ereignisse können erst eintreten sofern alle in das jeweilige Ereignis führenden Vorgänge abgeschlossen sind [78]. Die nachfolgenden Vorgänge hingegen können umgehend nach dem Eintritt des jeweiligen Ereignisses begonnen werden [110]. Durch die notwendige Verwendung von Scheinvorgängen ist die Planung mit Mehraufwand verbunden. Eine schnelle Neuplanung bei Verlust der Gültigkeit eines CPM-Netzplans ist daher aufwendiger als bei MPM-Netzplänen [78].

Innerhalb der CPM ist es möglich, eine Zeitplanung zur Ermittlung der frühesten und spätesten Anfangs- und Endzeitpunkte durchzuführen, ähnlich wie bei MPM-Netzplänen. Die Berechnung unterscheidet sich hierbei auf Grundlage der Existenz von Ereignissen und Vorgängen. Im Umfang dieser Arbeit sind die zeitlichen Berechnung zu den Vorgangspfeilnetzplan von geringerem Interesse. Daher wird für eine detaillierte Beschreibung der Zeitberechnung auf die Literatur wie zum Beispiel [22] verwiesen und hier nicht detaillierter ausgeführt.

Die beschriebenen Verfahren zur Darstellung von Projektablaufen als Vorgangsknoten- und Vorgangspfeilnetzpläne sind vollständig deterministisch bestimmt. Sie werden zu Beginn der Produktion geplant und ausgearbeitet. Dieses beinhaltet die vollständige Bestimmung der zeitlichen Faktoren. Solche Netzpläne stellen keine Möglichkeit dar, alternative Projektablaufe abzubilden [37]. Schlussfolgernd ist zu sagen, dass solche Netzpläne, im Falle von ungeplanten Störungen, voll umfänglich neu ausgearbeitet werden müssen. Der zu Beginn des Projekts erarbeitete Netzplan muss verworfen werden.

Es existieren Netzplanarten, welche die Möglichkeit zur Abbildung von alternativen Prozessschritten unter Einbeziehungen von Wahrscheinlichkeiten beachten. Solche werden als stochastische Netzpläne bezeichnet. Die häufigsten genannten Methoden sind PERT und GERT. Deren struktureller Aufbau werden ähnlich wie bereits bei den deterministischen Netzplänen beschrieben. Darüber hinaus wird diskutiert, inwieweit solche Netzpläne geeignet sind, in Störungssituationen alternative Vorgänge zu präsentieren.

3.2.2 Stochastische Netzplantechniken

Nachfolgend werden stochastische Netzplantechniken beschrieben. Aus der Abbildung 3.4 ist die Gemeinsamkeit, die stochastisch basierte Vorgangsdauer, zu entnehmen. Im Gegensatz zu der GERT [66] sind bei der PERT [56] die Vorgangsdurchführungen deterministisch bestimmt.

PERT

In dieser Abhandlung werden PERT-Netzpläne ebenso wie in [65] als VPN betrachtet. Sie werden jedoch auch in anderen Arbeiten, wie in [3], als EKN beschrieben.

Wird ein PERT-Netzplan als VPN betrachtet, ist der wesentliche Unterschied zu CPM-Netzplänen die wahrscheinlichkeitsbasierte Dauer der einzelnen Vorgänge. Ist die Vorgangsdauer deterministisch, so kann ein PERT-Netzplan auch als CPM-Netzplan interpretiert werden [31]. Aus diesem Grund wird auf die strukturelle Darstellung eines PERT-Netzplans verzichtet und nachfolgend der Fokus auf die wahrscheinlichkeitsbasierte Ermittlung der Vorgangsdauer gelegt. Theoretisch kann jedes stochastische Verfahren zur Kalkulation der Vorgangsdauer verwendet werden. In der originären Entwicklung der PERT-Netzpläne hingegen wird zur Berechnung eine Beta-Verteilung zugrunde gelegt. Dazu werden drei differente Zeitschätzungen, die wahrscheinlichste Vorgangsdauer pi^H , die pessimistische Vorgangsdauer pi^P , und die optimistische Vorgangsdauer pi^O definiert [86].

Unter der erstgenannten wird die benötigte Zeit verstanden, die in einem Produktionsprozess unter regulären Umständen am häufigsten eintritt. Die pessimistische Vorgangsdauer ist die Zeit, die unter besonders misslichen Bedingungen benötigt wird. Die zuletzt aufgelistete Variante beschreibt die geringstmögliche Ausführungszeit. Eine solche Vorgangsdauer ist ausschließlich unter einwandfreien Umständen und somit in einer störungsfreien Produktion zu erreichen.

Unter Verwendung der aufgelisteten geschätzten Vorgangsdauer, auch als Dreizeitenschätzung [110] oder Drei-Werte-Verfahren [78] bezeichnet, wird anschließend die erwartete Vorgangsdauer p_i mit der nachfolgenden Formel berechnet.

$$\bar{p}_i = \frac{pi^O + 4 * pi^H + pi^P}{6} \quad (3.8)$$

Obwohl Zimmermann et al. die PERT-Netzpläne als Vorgangspfeilnetzpläne beschreiben, ist die Formel zur Berechnung der Vorgangsdauer mit der Definition nach Runzheimer oder Schwarz identisch. Ausschließlich die Parameterbezeichnungen sind abweichend. Diese Analogie basiert auf der Grundlage, dass die Dauer der Vorgänge unabhängig der strukturellen Einordnung der PERT-Netzpläne berechnet werden kann.

Der sich aus der Formel 3.8 ergebende Wert wird als Dauer des Vorgangs angenommen. Diese Vorgehensweise ist analog zu der Einzeitschätzung bei deterministischen Netzplantechniken. Die Berechnung auf Basis der Betaverteilung wird in zahlreichen wissenschaftlichen Ausarbeitungen kritisiert, unter anderem in [6] und [65]. Daher werden beispielsweise in [65] andere Verfahren untersucht, stochastische Vorgangsdauern zu bestimmen. Prontrandolfo bestimmt alternative Projektabläufe unter Verwendung von PERT-Zustands- und PERT-Pfadtechniken und verweist in diesem Zusammenhang bei komplexen Netzplanstrukturen auf eine Bestimmung der Vorgangsdauer mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation.

Zur Vermeidung einer komplexen stochastischen Berechnung der jeweiligen Vorgangsdauer kann diese auch vereinfacht als deterministisch angenommen werden. Innerhalb von Produktionsprozessen wird die Vorgangsdauer mittels Zeitanalyseverfahren wie der REFA-Methode [69] oder dem MTM-Verfahren [94] bestimmt. Diese Verfahren erlauben es Vorgänge auf ihre grundlegenden Abläufe hin zu analysieren. Beispielsweise werden innerhalb des MTM-Verfahrens die Bewegungsabläufe in Hinlangen, Bewegen, Drehen, Greifen und Loslassen unterteilt [8]. Jeder Ablauf ist mit einem Zeitfaktor verknüpft, wodurch es möglich ist, die Dauer von Ablaufsequenzen genau zu definieren und folglich auch eine einzelne Vorgangsdauer genau zu bestimmen.

Genannte Verfahren ermöglichen somit, eine Vorgangsdauer als deterministisch zu betrachten. Schlussfolgernd besteht nicht die Notwendigkeit des Einsatzes der PERT-NPT als Dokumentationsstool in Produktionsprozessen und zur Analyse von alternativen Vorgängen. Es kann auf eine stochastische Interpretation der Vorgangsdauer verzichtet werden, wodurch, wie zu Anfang des Abschnitts dargelegt, ein PERT-Netzplan als CPM-Netzplan gelesen werden kann. Daher wird auf eine weitere Analyse verzichtet.

GERT

Neben dem beschriebenen PERT-Verfahren gehört die sogenannte Graphical Evaluation and Review Technique ebenfalls zu den VPN-Verfahren. Es lässt zusätzlich zu dem PERT- oder CPM-Verfahren ein stochastisch basiertes Eintreten eines Vorgangs zu [105]. Folglich ist nicht jeder im Netzplan dargestellte Knoten durchzuführen, diese können nach Pritsker in unterschiedlichen Varianten eine Konjunktion oder Disjunktion darstellen [66]. Die Konjunktion wird durch einen UND-Knoten vertreten, hier sind alle nachfolgenden Knoten im Projektverlauf zu bearbeiten. Eine Disjunktion kann mit Hilfe eines Inklusiv-ODER- oder Exklusiv-ODER-Knotens repräsentiert werden. Die verschiedenen Knotentypen ergeben sich auf der Grundlage von Eingangs- und Ausgangslogiken für die jeweiligen Knoten [66]. Insgesamt entstehen dadurch sechs mögliche Knotenarten, die es erlauben, einen Projektablauf unter Betrachtung verschiedenster Prozessabläufe zu beschreiben [66]. Jeder Knoten weist besondere Eigenschaften auf. Diese sind in

der Arbeit von Pritsker [66] im Detail erläutert. Mit einer solchen Anzahl an Knotenvarianten lässt sich eine Vielzahl möglicher Prozesszustände und -varianten abbilden. Jedoch beinhaltet eine vollständige Abbildung eines Herstellungsverfahrens eine hohe Anzahl von Arbeitsschritten (Kanten) und Ereignissen (Knoten). Durch die möglichen Knotenvariationen werden zusätzliche, die in der eigentlichen Projektdurchführung nicht zum Tragen kommende Prozessvarianten abgebildet. Dieses ist darin begründet, dass nicht nur, wie bei dem zuvor beschriebenen PERT-Verfahren, die Vorgangsdauer stochastisch basiert sein können, sondern auch der Eintritt eines Vorgangs einer Wahrscheinlichkeit unterliegen kann. In der Planungsphase eines Projekts kann das Aufzeigen der diversen Möglichkeiten der Projektdurchführung in Verbindung mit der eintretenden Wahrscheinlichkeit ein nützliches Werkzeug sein, einen idealen Projektdurchlauf und dessen alternative Optionen herauszuarbeiten. Des Weiteren ist solch ein Verfahren von Vorteil, wenn ungenaue Informationen über den genauen Prozessablauf vorliegen. Einer derartige Situation findet sich häufig in Forschungsprojekten. Hier wird der Projektverlauf häufig durch die vorigen erarbeiteten Ergebnisse beeinflusst und verändert. In der aktiven Produktionsplanung und -steuerung ist es hingegen hinderlich, einen Plan zu verwenden, welcher nicht notwendige Vorgänge und Ereignisse aufzeigt, also solche, die im Herstellungsverlauf nicht durchgeführt oder eintreten werden. Es ist dienlicher die Vorgänge darzulegen, die zu einem erfolgreichen Herstellungsprozess führen und im Falle von Störungsereignissen aus den bereits bekannten und notwendigen Vorgängen alternative Prozessschritte zu analysieren. Es sind bei der Herstellung eines Produkts alle durchzuführenden Arbeitsvorgänge bekannt und mit der NPT bereits umfänglich dokumentiert. Der GERT-Netzplan beinhaltet jedoch auch Vorgänge, welche sich erst im Laufe der Projektdurchführung ergeben können. Solch eine Planungsunsicherheit führt innerhalb eines Produktionsprozesses zu merklichen Schwankungen der Prozessdauer und -kosten. Dieses sind mitunter die wichtigsten Parameter in Herstellungsprozessen und in der Regel streng reglementiert, weshalb Unsicherheiten nicht für eine erfolgreiche Produktherstellung unter Einhaltung der Restriktionen sprechen. Aus genannten Gründen sind GERT-Netzpläne nicht geeignet, um innerhalb eines Produktionsprozesses die notwendigen Vorgänge zu dokumentieren, den Ablauf zu beschreiben sowie im Falle von Störungsereignissen bekannte und erforderliche Vorgänge als geeignete Alternativen zu evaluieren.

Da die Verwendung des GERT-Verfahrens bereits in dessen Grundkonstellation im produktionstechnischen Kontext nicht verwendbar ist, wurde auf die Analyse und Diskussionen von auf diesem Prinzip basierenden Arbeiten verzichtet.

Die Methoden PERT und GERT ermöglichen folglich die Darstellung alternativer Prozessabläufe. Jedoch beruhen diese Alternativen auf innerhalb des Herstellungsprozesses nicht zwingend notwendigen Vorgängen, welche sich erst im Laufe der Bearbeitung ergeben können. Hinzu kommt ist die Dauer der jeweiligen Vorgänge innerhalb einer Produktion nicht zwangsläufig

stochastisch. Das MTM Verfahren, um eine Methode zu nennen, erlaubt eine genaue Bestimmung von Vorgangszeiten [94], weshalb diese als deterministisch angesehen werden können. Die Verwendung eines PERT- oder GERT-Netzplans ist aufgrund dessen nicht notwendig. Daher werden diese Verfahren der in dieser Arbeit zugrunde gelegten Zielsetzung nicht herangezogen. Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die Beschreibung von Petrinetzen sowie einigen Anwendungsbeispielen eingegangen. Petrinetze stellen ein weiteres Werkzeug zur Darstellung von Prozessabläufen dar. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit Petrinetze auf das Erreichen der definierten Ziele hin zu untersuchen. In verkürzter Form wird der Formalismus von Petrinetzen erläutert. Die Anwendungsbeispiele werden diskutiert und auf die Eignung der zur Lösung der definierten Zielsetzung geprüft. Ein detaillierter Vergleich zu der erarbeiteten MNP-Methodik wird innerhalb des entsprechenden Kapitels 6 durchgeführt. Bevor mit dem nachfolgenden Abschnitt begonnen wird, soll zunächst auf die inkonsistente Schreibweise des „Petrinetz“-Begriffs hingewiesen werden. Innerhalb dieser Untersuchung wird der Begriff in bereits verwendeter Schreibweise angewandt.

3.3 Petrinetze

Die Theorie der Petrinetze ist bereits im Jahr 1962 im Rahmen der Dissertation von Carl Adam Petri entstanden [64]. Die ursprüngliche Idee der Petrinetze fungiert als Darstellungswerkzeug der Informationsübertragung innerhalb eines endlichen Automaten [64]. Als endliche Automaten werden beispielsweise einfache abstrakte Rechnermodelle bezeichnet [99]. Bei der Beschreibung von Petrinetzen ist es möglich, zwischen markierten und unmarkierten Petrinetzen zu unterscheiden. Markierte Petrinetze bestehen aus einem Tupel $N = \{P, T, F, \mu\}$, Plätzen P, den Transitionen T, den Flussrelationen F und den Markierungen μ . Bei unmarkierten Petrinetzen entfallen letztgenannte Attribute entsprechend. Die Plätze in solchen Netzen dienen als Speicherkomponenten. Sie enthalten Gegenstände oder Datenelemente und stellen beispielsweise Arbeitsplätze oder Maschinen dar. Die Wiedergabe von Aktivitäten innerhalb der Petrinetze wird durch die Transitionen möglich. Sie dienen zur Veränderung von Speicherinhalten und aktivieren durch das Feuern von Marken die Plätze. Transitionen und Plätze werden durch die Flussrelationen, dargestellt als Pfeile, miteinander vernetzt. Es ist nicht möglich, zwei Plätze oder zwei Transitionen direkt zu verbinden. Die Marken (engl. Tokens) ermöglichen es Ressourcen innerhalb des Netzes wiederzugeben. Bei einfachen markierten Petrinetzen ist es nicht möglich die Marken zu unterscheiden. Darüber hinaus beinhalten Petrinetze differenzierte Zustände, welche wechselnde Verteilungen der Marken beschreiben. Die Status des Netzes verändern sich durch die Weitergabe der Tokens an andere Plätze. Eine mögliche Erweiterung der Netze sind Kantengewichte. Diese symbolisieren die Kosten eines Schaltvorgangs. Bei einer durch eine Transition

erzeugte Schaltung des Netzes werden Marken geschaffen und verbraucht. Das jeweilige Kantengewicht bestimmt die Anzahl der zu erschaffenden oder zu verbrauchenden Marken.

In nachfolgender Abbildung 3.11 wird zur Beschreibung eines Petrinetzes das Beispiel von Reisig [70] als Grundlage herangezogen. Dieser verwendet einen vereinfachten Keksautomaten zur Erläuterung des Petrinetz-Formalismus. Dieser Keksautomat, enthält fünf Schachteln im Speicher und einen Zähler, welcher reduziert wird, sobald ein Kunde eine Schachtel bezahlt und entnommen hat. Sind keine Schachteln mehr vorhanden, so ist der Zähler auf Null und der Kunde erhält sein Geld zurück. Zur Charakterisierung der einzelnen Komponenten wird die gewählte Darstellung von Reisig mit einer Legende versehen. Die Beschreibung der Elemente wird somit verdeutlicht. Das Beispiel sei hier ausschließlich grundlegend erklärt, um die allgemeine Funktionsweise der Petrinetze zu erläutern. Für das über die gewählte Erläuterung hinausgehende Interesse wird auf das Buch von Reisig [70] verwiesen.

Hinzukommend wird zwischen kalten und heißen Transitionen unterschieden. Bei letztgenannten gilt es als sicher, dass diese während einer Sequenz aktiviert werden. Es wird auch vom Feuern einer Transition gesprochen. Bei kalten Transitionen, welche in der Darstellung mit einem Epsilon gekennzeichnet sind, ist dieses hingegen nicht gewährleistet. Es ist somit nicht zwingend, dass ein Kunde eine Münze in den Automaten gibt und es ist nicht sichergestellt, dass dieser auch seine Kekse aus dem Ausgabefach entnimmt.

Der grundlegende Petrinetzformalismus betrachtet keinerlei Zeitkomponenten. Schulz-Reiter et al. bezeichnen dieses als „die Zeitlosigkeit von Petrinetzen“ [81]. Aus diesem Grund sind differente Petrinetzarten existent, die um Zeitattribute ergänzt wurden. Hierbei handelt es sich beispielweise um „timed Petri Nets“ [68] oder „time Petri Nets“ [57]. Erstgenannte erlauben es den Transitionen eine unterschiedliche Schaltdauer zuzuordnen. Nach dem Aktivieren einer Transition, also dessen Verbrauch von Marken, verstreicht eine zu definierende Zeitspanne bis eine entsprechende Transition Marken produziert. Bei der zuletzt genannten Erweiterung nach Merlin [57] werden den Transitionen eine früheste und späteste Feuerungszeit (engl. *earliest and latest firing time*) zugeordnet. Innerhalb diesen Intervalls ist die Transition in der Lage zu feuern.

Petrinetze bieten aufgrund ihrer diversen Attribute umfassende Einsatzmöglichkeiten und wurden daher bereits in zahlreichen Arbeiten mit dem Ziel der Flexibilisierung von Produktionsprozessen und Fertigungssystemen eingesetzt. Dieses zeigen unter anderem Lee und DiCesare in ihrer Veröffentlichung durch eine umfangreiche Literaturliste [54]. Solch eine umfassende Analyse ist innerhalb dieser Ausarbeitung nicht von Nöten. Es werden lediglich einige Arbeiten aufgeführt, die alternative Prozessabläufe mittels Petrinetzen zu veranschaulichen versuchen und sich somit mit der Zielsetzung dieser Arbeit zu einem gewissen Anteil, zum Beispiel in der Darstellung von Alternativen decken. Im Detail unterscheiden sich jedoch die Anwendungsgebiete

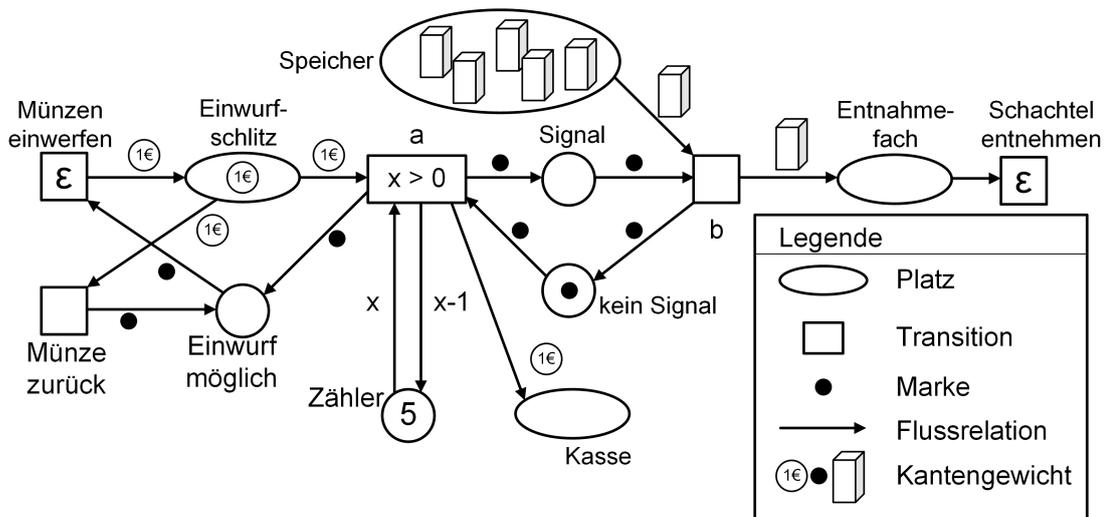


Abbildung 3.11: Darstellung der Funktionsweise eines Keksautomaten mittels Petrinetz [70]

der einzelnen Arbeiten zu dem in dieser Ausarbeitung gewählten Ansatz. Lee und DiCesare verwenden Petrinetze in Kombination mit Heuristiken (Abschnitt 3.5) zur Erarbeitung einer neuen Planungsmethode für flexible Fertigungssysteme (FFS) (engl. flexible manufacturing system) [54]. Unter anderem verfolgen sie das Ziel, einen Stillstand aufgrund ungenügender Kapazitäten von Ressourcen zu vermeiden. Hier ist jedoch zuzusagen, dass der Produktionsablauf in FFS sich gegenüber der manuellen Montage dahingehend unterscheidet, dass der Fertigungsablauf voll umfänglich automatisiert durchgeführt wird. Mitarbeiter übernehmen in solchen Systemen ausschließlich überwachende Tätigkeiten. Einen direkten Einfluss auf den Produktionsablauf, wie es in der manuellen Montage vorzufinden ist, haben die Mitarbeiter hingegen nicht. Die Steuerung des Ablaufs wird von einem Zentralrechner übernommen.

Kiritsis und Porchet verwenden Petrinetze zur Simulation von Prozessabläufen [45]. Ihr Modell bietet die Option alle möglichen Prozesspläne für die Fertigung eines Produkts zu visualisieren und im Falle der Notwendigkeit alternative Prozesssequenzen der Bearbeitungsfolge aufzuzeigen [45]. Im Mittelpunkt steht hierbei die spanende Bearbeitung eines Bauteils. Folglich handelt es sich hierbei nicht um die Steuerung menschlicher Arbeitsabläufe, sondern der Steuerung von Maschinen.

Darüber hinaus existieren zahlreiche Arbeiten, die sich mit dem Einsatz von Petrinetzen innerhalb der Planung von Roboter durchgeführten Montageprozessen beschäftigen. Eine umfangreiche Auflistung von Referenzen ist in [74] zu finden. All diese Arbeiten weisen die Gemeinsamkeit der autonomen Fertigung ohne den Eingriff des Menschen auf.

Petrinetze ermöglichen es durch den Einsatz von Marken den Gebrauch unterschiedlicher Materialien oder die Herstellung differenter Produkte innerhalb eines Produktionsprozesses zu veranschaulichen. Eine Erweiterung durch farbige Marken hebt zusätzlich die Diversität von Ressourcen hervor. Petrinetze bieten auf Basis ihrer diversen Bestandteile eine gute Möglichkeit Prozessabläufe darzustellen und zu simulieren. Durch die Erweiterung von Zeitkomponenten zu zeitbehafteten Petrinetzen können den Transitionen, aber auch Plätzen und Kanten zeitliche Attribute hinzugefügt werden [43]. Werden Transitionen mit Zeiten ausgestattet, kann die Dauer einzelner Prozessaktivitäten oder deren möglicher Beginn repräsentiert werden [87]. Jedoch ist eine detaillierte zeitliche Vorgangsanalyse inklusive Rückschlüsse auf kritische Vorgänge, wie es Netzplantechniken erlauben, hingegen nicht möglich. Eine detaillierter Vergleich des entwickelten Ansatzes mit den Petrinetzen finden im dazugehörigen Kapitel „Evaluation und Ergebnisse“ statt. In diesem Zusammenhang werden die Unterschiede aufgestellt und die Begründung für die Nutzung des erarbeiteten Verfahrens dargelegt.

Ein Bestandteil der innerhalb dieser Arbeit erdachten Lösung beruht auf der Verwaltung von Prozessdaten. Um eine Einordnung der Ergebnisse in den unternehmerischen Kontext durchführen zu können, werden Enterprise Resource Planning (ERP)-Systeme und Manufacturing Execution System (MES) aufgeführt und zu einigen Teilen erläutert. Darüber hinaus werden Lösungen zur automatischen Generierung von Prozessplänen beschrieben, welche auch als CAPP- und AAPP-Verfahren bezeichnet werden. Dieses dient den Zweck die Unterschiede zwischen diesen Werkzeugen und der MNP-Technik hervorzuheben sowie die Methode des MNPs besser einordnen zu können.

3.4 Produktionsplanung- und Produktionssteuerungswerkzeuge

Die Netzplantechniken und Petrinetze finden ihren Einsatz in verschiedenen Bereichen der Produktion. Petrinetze kommen vor allem in zeitlich unabhängig vornehmlich ereignisgesteuerten Systemen, wie dem Prozessablauf von Bauteilen innerhalb von CNC-Bearbeitungszentren, zum Einsatz. Sie dienen unter anderem dem Zweck die Abläufe eines Prozesses visuell darzustellen oder alternative Prozesssequenzen zu erarbeiten. Die Vorgangsknotennetzpläne hingegen sind Teil zeitgesteuerter Systeme. Sie können zur Beschreibung von Projekt- und Montageabläufen Verwendung finden und mit Hilfe differenzierter Zeitanalysen den Einfluss eines ausfallenden Vorgangs, beispielsweise unter Darstellung des kritischen Pfads, auf dem Gesamtprozess quantifizieren. Übergeordnet könnten sowohl die Petrinetze als auch die VKN als Teil von Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungswerkzeugen bezeichnet werden.

Nach Kurbel [50] wurde bis zur Jahrtausendwende der PPS-Begriff als Synonym für das zentrale Anwendungssystem von produzierenden Unternehmen verwendet. Kurbel ordnet ein solches

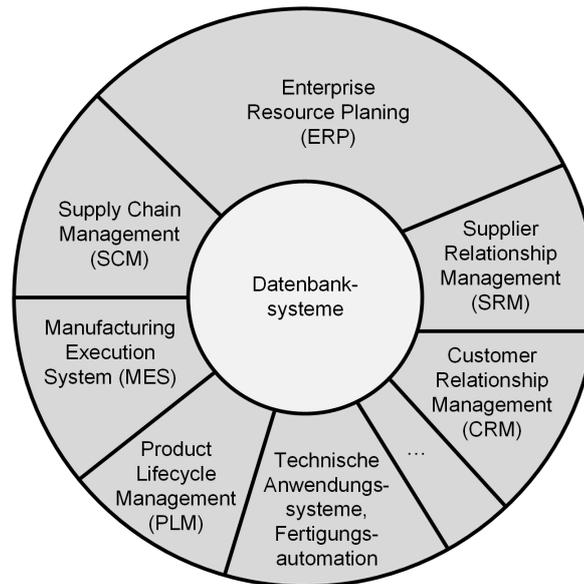


Abbildung 3.12: Veranschaulichung üblicher Softwareanwendungen in produzierenden Unternehmen [50]

System mittlerweile als Vorstufe von Enterprise Resource Planning-Systemen ein. Andere, wie Schuh und Stich [83] oder Kletti [46], stellen PPS-Systeme auf eine gleiche Stufe, wodurch ihnen die gleichen Aufgaben wie ERP-Systemen zu geordnet werden. Im speziellen bezeichnen Schuh und Stich in [83] dieses als „Aachener PPS-Modell“. Da die Einordnung nicht konsistent ist, wird sich innerhalb dieser Arbeit an der produktionstechnischen Einordnung dieser Systeme nach Kurbel orientiert. Dieser stellt eine Grafik (Abbildung 3.12) zur Verfügung in denen eine Vielzahl der unternehmerischen Softwarelösungen zur Datenverwaltung aufgeführt wird.

Netzplantechniken und Petrinetze dienen innerhalb dieses Systems nicht dem Zweck, benötigte Prozessschritte zur Bearbeitung oder Montage eines Produkts zu definieren, sondern dessen Sequenzen und Abhängigkeiten zu beschreiben, sowie deren Abläufe zu überwachen. Innerhalb der folgenden Abschnitte wird eine Einordnung der Vorgangsknotennetzpläne durch eine prägnante Darstellung von MES und ERP-Systemen in den produktionstechnischen Kontext vorgenommen. Darauf folgend wird eine zusammenfassende Erläuterung von CAPP - und AAPP - Verfahren aufgeführt. Diese Verfahren dienen zur Bestimmung von notwendigen Vorgängen innerhalb eines Prozesses, womit sie sich von den Netzplantechniken, und somit auch von den Maximalnetzplan unterscheiden. Sie werden in diesem Zusammenhang aufgeführt, um die Unterschiede zwischen der Beschreibung und der Definition von Prozessvorgängen darzulegen.

3.4.1 Manufacturing Execution - und Enterprise Resource Planning - Systeme

Die Steuerung heutiger Unternehmensprozesse basiert auf der Nutzung eines umfangreichen Softwarerepertoires. Für die Unterscheidung der einzelnen Systeme werden die Unternehmen im Allgemeinen in drei unterschiedliche Ebenen unterteilt. Hierbei handelt es sich um die Unternehmensleit-, die Fertigungsleit- und die Fertigungsebene. Wesentliche Bestandteil der Unternehmens- und Fertigungsleitebene sind die ERP-Systeme und MES. Die Managementsysteme dienen zur Planung und Steuerung von Ressourcen zur Erfüllung von Kundenaufträgen [4]. Nach Kurbel [50] bezeichnen ERP-Systeme ein umfangreiches Anwendungssystem, das die wesentlichen Funktionen und Geschäftsprozesse eines Unternehmens auf den diversen Planungs- und Steuerungsebenen unterstützt, weshalb sie nach der VDI Richtlinie 5600 Blatt 1 [98] der Unternehmensleitebene zugeordnet werden. Sie bestimmen Art und Umfang von Aufträgen, deren Bearbeitungszeitraum, sowie deren nachfolgende Abrechnungen. Sie verwalten Ressourcen und führen eine grobe Kapazitätsbetrachtung durch. Darüber hinaus verwalten ERP-Systeme den Materialbedarf inklusive der Bestellvorgänge und überwachen die Lagerbestände.

Eine Unterebene darunter in der Fertigungsleitebene werden die MES eingeordnet [98]. MES befinden sich somit direkt über der eigentlichen Fertigungsebene, welche zur Umsetzung der Arbeitsgänge unter Einhaltung der definierten Vorgaben zuständig ist [98]. MES dienen dazu, Produktionssysteme mit Arbeitsanleitungen und alle notwendigen Informationen papierbasiert oder digital zur Verfügung zu stellen. Sie können als Bindeglied zwischen den ERP-Systemen (Unternehmensleitebene) und der Produktion (Fertigungsebene) betrachtet werden [84]. Hinsichtlich der Aufträge bestimmen MES dessen Bearbeitungszeitpunkte, die Ressourcenzuordnung, sowie die Reihenfolge der jeweiligen Aufträge innerhalb des Produktionsprozesses [98]. Netzpläne können innerhalb dieser Systeme zur Darstellung der Reihenfolgebeziehungen der jeweiligen Aufträge Verwendung finden. Weiterführend übernehmen MES die Ressourcenverwaltung und ordnen diese in Abhängigkeit der Verfügbarkeit den entsprechenden Aufträgen zu. Der letzte Aufgabenbereich der innerhalb der VDI Richtlinie 5600 Blatt 1 [98] definiert ist, beschreibt die Verwaltung der Umlaufbestände sowie die Materialbereitstellung durch das MES. MES stellen im Wesentlichen alle Informationen bereit, die zur Durchführung der jeweiligen Aufgaben essentiell sind [103]. Die beschriebene Verfahren dienen zusammengefasst zur Verwaltung der benötigten Daten zur Herstellung der Produkte. Sie stellen die erforderlichen Daten für die umfangreichen Herstellungsprozesse bereit mit dem Ziel, möglichst störungsfreie Prozesse bereitstellen zu können. Innerhalb dieser Systeme dienen Netzplantechniken zur Darstellung der Reihenfolgebeziehungen der jeweiligen Vorgänge. Neben den beschriebenen Verwaltungswerkzeugen existieren Verfahren zur automatischen Generierung der zu verwaltenden Informationen. Hierzu zählen

rechnergestützte Planungswerkzeuge, wie CAPP- und AAPP-Verfahren. Mit CAPP werden automatisch Fertigungssequenzen für die Herstellung von Bauteilen auf Maschinen erstellt. Mittels AAPP lassen sich Prozesssequenzen für die Montage eines Produkts automatisch generieren. Weiterführend ermöglichen diese Werkzeuge eine Erstellung und Bewertung von Planungsalternativen [63].

3.4.2 CAPP - Computer Aided Process Planning

CAPP steht für die Möglichkeit die Prozessplanung zur Herstellung eines Produkts nicht händisch, sondern mit Hilfe eines Computers zu erstellen. Die Software muss in der Lage sein verschiedene Aufgabengebiete zu übernehmen. Die Prozessplanung besteht nach Alting und Zhang [2] aus zehn Teilaufgaben:

- Interpretation der Produktkonstruktionsdaten
- Auswahl der Bearbeitungsprozesse
- Auswahl der Bearbeitungsmaschinen
- Bestimmung von Vorrichtungen und Bezugsflächen
- Festlegung der Operationsreihenfolge
- Auswahl der Prüfgeräte
- Bestimmung der Fertigungstoleranzen
- Bestimmung der Schnittbedingungen
- Berechnung der Gesamtzeit
- Erstellung von Prozessdatenblättern einschließlich der NC-Daten

CAPP-Algorithmen müssen folglich eine Vielzahl von Aufgaben übernehmen, um geeignete Prozesspläne erstellen zu können. Eine Zusammenfassung einzelner CAPP-Verfahren zeigen Xu et al. [107] sowie Yusof und Kalif in ihrer Arbeit [108]. Grundsätzlich werden diese Algorithmen in zwei Kategorien unterteilt. Es existiert der Ansatz der Variantenplanung sowie die generative Herangehensweise [108]. Bei der Variantenplanung werden die Prozesspläne unter der Verwendung bereits bestehender Pläne erarbeitet und im Detail je nach Bauteileigenschaften angepasst. Dieses bedarf zusätzliche Informationen durch die Bereitstellung von Experten. Der generative Ansatz hingegen benötigt weniger menschliches Eingreifen. Bei dieser Methode werden vollständig neue Prozesspläne auf Basis von spezifischen Produktmerkmalen erstellt [107].

Zum Einsatz kommen hierbei unterschiedliche Techniken, wie neuronale Netze, Fuzzy Methodiken, die zu Künstliche Intelligenz (KI) Verfahren gezählt werden oder die bereits im Abschnitt 3.3 erläuterten Petrinetze. Unter Verwendung von Petrinetzen innerhalb von CAPP-Umgebungen sind weitere Varianten des Petrinetzformalismus entstanden [107]. Diese werden hier nicht weiter beschrieben, stattdessen wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Nach Rudolf [75] liegt der Schwerpunkt der CAPP-Verfahren in der Zerspanung. Mit Hilfe der CAPP-Techniken werden folglich die einzelnen Bearbeitungssequenzen auf den Maschinen generiert. Als Grundlage hierzu dienen CAD-Daten, die die jeweiligen Maße der Bauteile sowie dessen Bezugsflächen beinhalten.

Das beschriebene CAPP-Anwendungsgebiet unterscheidet sich von dem des MNPs. Die MNP-Technik dient vornehmlich zur Beschreibung von projektähnlichen Abläufen der Produktion. Ein Anwendungsbeispiel sind Montageabläufe von Großbaustrukturen, z.B. wie innerhalb des Schienen- und Sonderfahrzeugbaus. Auf eine umfassendere Analyse dieser Systeme wird daher verzichtet. Die Beschreibung der CAPP-Vorgehensweise verdeutlicht diese Unterschiede und wird daher als Notwendigkeit betrachtet.

Neben der computerbasierten Erstellung von Zerspanungssequenzen ist es möglich unter der Verwendung von AAPP-Verfahren automatisiert Montagesequenzen unter der Beachtung von Montage restriktionen zu erstellen [38].

3.4.3 AAPP - Automated Assembly Process Planning

Ebenfalls wie bei der Prozessplanung innerhalb von Bearbeitungszentren für die Zerspanung kommen für AAPP computerbasierte Methoden zum Einsatz. Wang et al. stellen eine Zusammenfassung von bis dahin bekannten Verfahren für die computerbasierte Montageplanung vor [102]. Sie gruppieren die Verfahren in exakte und heuristische Methoden ein und zeigen auf, dass es in allen Fällen notwendig ist allgemeine Montagerestriktionen zu beachten.

Bei der Nutzung von AAPP-Verfahren ist es das Ziel einen optimalen (exakte Methoden) oder hinreichend guten (heuristische Verfahren) Montageprozess zu erarbeiten. In einigen Arbeiten wird die Suche um alternative Abläufe erweitert.

Diese Verfahren werden hier ausschließlich kurz dargestellt, um die Abgrenzung zum Vorhaben innerhalb dieser Arbeit zu verdeutlichen. Die Methode der vorliegenden Arbeit befasst sich nicht mit der Definition der einzelnen Alternativen innerhalb eines Montage- oder Fertigungsprozesses. Hingegen ist es der Zweck einen gewählten Montageprozess darzustellen und diesen mit bekannten Alternativen zu erweitern. Die Vorgangsbeziehungen und alternativen Vorgänge werden vor dem eigentlich Produktionsprozess erarbeitet. Es ist bei der Verwendung des MNPs jedoch nicht von Belangen, unter Nutzung welcher Methode, ob computerbasiert oder händisch,

der Prozess und mögliche Alternativen erarbeitet wurden.

Neben der Darstellung von Alternativvorgängen ermöglicht die Verwendung des MNPs eine situationsbedingte Analyse der definierten Alternativen. Für solch ein Vorhaben dienen Heuristiken, ein Werkzeug der KI, als ein mögliches Mittel. Der nachfolgende Abschnitt fasst daher einen Ausschnitt dieser Verfahren zusammen.

3.5 Künstliche Intelligenz

Bereits in den Achtzigerjahren existierte die Ansicht, Methoden der KI würden in der Industrie zu besseren Ergebnissen innerhalb der Produktionsplanung führen [58]. Mittlerweile gehört die KI zum Standardrepertoires der Branche. Sie dient beispielsweise innerhalb der ERP - Umgebungen als Werkzeug der Datenanalyse, dem sogenannten Data Mining. Eingesetzt wird es unter anderem beim Predictive Maintenance. Unter diesem Begriff wird die Früherkennung möglicher Störungen von Maschinen oder Arbeitsplätzen verstanden. „Data Mining“ bezeichnet Analysemethoden für numerische und nichtnumerische Daten. Dieses beinhaltet auch die Datenverarbeitung, Filterung und die Visualisierung [76]. Darüber hinaus kommen im industriellen Umfeld andere Techniken wie Heuristiken zum Einsatz, um Planungs- und Steuerungsaufgaben zu unterstützen. Heuristische Verfahren dienen zur näherungsweise Lösung von komplexen Entscheidungs- und Optimierungsproblemen vor allem dann, wenn Optimierungsverfahren aufgrund des hohen Rechenaufwands scheitern [23]. Domschke und Scholl unterteilen Heuristiken in vier differente Methoden, verweisen im Zuge dessen jedoch auf eine allgemeinere Arbeit von Silver [88]. In dieser werden heuristische Verfahren weitaus differenzierter betrachtet. Für das Verständnis dieser Ausarbeitung und den beinhaltenden Heuristiken ist die Arbeit von Domschke und Scholl jedoch zweckdienlich. Es werden folgende Gruppen benannt:

- Eröffnungsverfahren zur Bestimmung einer (ersten) zulässigen Lösung,
- Lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren zur Verbesserung einer gegebenen zulässigen Lösung,
- Relaxationsbasierte Verfahren,
- Unvollständig ausgeführte Optimierungsverfahren, z.B. vorzeitig beendete B&B-Verfahren.

B&B ist die Abkürzung für Branch and Bound. Bei dieser Herangehensweise werden Problematiken in Teilprobleme unterteilt und diese für sich genommen untersucht.

Zu den Eröffnungsverfahren werden uninformierte Strategien, myopische (kurzsichtige) oder greedy (gierige) Heuristiken und vorausschauende Verfahren zugeordnet [23]. Erstgenannte Methoden sind für Produktionssituationen in denen ungeplante Störungen eintreten und Lösungen

für diese gefunden werden sollen ungeeignet. Sie weisen einen starren Ablauf auf und verwenden keinerlei Problemdaten, weshalb sie auf individuelle Ereignisse nicht annehmbar reagieren können. Myopische und greedy Heuristiken sind statische Prioritätsregelverfahren. Diese verwenden eine bereits zu Beginn der Analyse festgelegte Prioritätsliste und versuchen in jedem Verfahrensschritt die bestmögliche Teillösung zu erreichen. Die letztgenannten vorausschauenden Verfahren passen die Prioritäten hingegen in jedem Iterationsschritt an. Sie werden daher auch als dynamische Prioritätsregelverfahren bezeichnet [23].

Auf die Erklärung der zusätzlich genannten Gruppen wird verzichtet. Stattdessen wird auf die bereits zitierte Arbeit von Domschke und Scholl [23] verwiesen. Eine Begründung liefern Evans und Zanakis. Sie beschreiben 1981 die dominierende Akzeptanz von einfachen Heuristiken gegenüber solchen, die für Anwender im geringeren Maße nachvollziehbar erscheinen [109]. Diesem widerspricht Haessler. Nach seinem Empfinden sollten ausschließlich die Erträge einer Heuristik von Bedeutung sein [36]. In unternehmerischen Entscheidungsprozessen ist es jedoch elementar, dass ein Entscheider nachvollziehen kann, wie die Ergebnisse entstehen. Dieser trägt die Verantwortung über seine Handlung und die seiner Mitarbeiter. Wird nicht verstanden, wie die Ergebnisse durch eine Heuristik generiert wurden, so wird die Zustimmung der Belegschaft geringer ausfallen. Entscheidungen werden daraufhin möglicherweise auf Basis eigener Erfahrungen getroffen. Dieses gilt es, wie in der Einführung im Kapitel 1 und 2 dieser Arbeit bereits erläutert ist zu vermeiden. Eine Analyse über die Akzeptanz der KI liefert Scheuer in [80]. Er untersucht differente KI-Akzeptanzmodelle und beschreibt in seinen Ergebnissen, dass eine erhöhte Transparenz des Systems zur Steigerung der Akzeptanz durch die Probanden beitrug [80], was folglich für die Verwendung transparenter und nachvollziehbarer Heuristiken spricht. Weiterführend werden Heuristiken häufig eingesetzt, sobald das zu lösende Problem NP-schwer ist. Diese Sachverhalte werden als solche bezeichnet, wenn eine optimale Lösung nicht in polynomieller Zeit errechenbar ist. Kombinatorische Problematiken, wie sie innerhalb der Produktionsorganisation auftreten, sind im Allgemeinen NP-schwer [23]. Dieses begründet neben der Nachvollziehbarkeit von Heuristiken deren Einsatz zur Entscheidungsunterstützung in Produktionsprozessen. Darüber hinaus sind in der Produktion und Logistik im Allgemeinen mehrere Ziele zeitgleich zu beachten. Diese Problematik wird auch als „Dilemma der Ablaufplanung“ [35] bzw. „Polylemma der Produktionstechnik“ [29] bezeichnet. Für die Bestimmung derartiger Kompromisslösungen eignen sich ausschließlich heuristische Optimierungsverfahren [48]. Einfache und überaus verständliche Heuristiken, im speziellen Prioritätsregelverfahren, werden daher zur Lösung der im Kapitel 2 dargelegten Zielsetzung verwendet.

Ein wesentlicher Bestandteil der I4.0 sind neben der KI sogenannte CPS. Diese stellen einen großen Anteil an der Digitalisierung und werden nachfolgend näher betrachtet.

3.6 CPS - cyper-physische Systeme

Im Rahmen von I4.0 beschäftigen sich Unternehmen unter anderem mit der Entwicklung von Normen und Standards von Kommunikationsprotokollen sowie Richtlinien für die Einführung von innovativen Technologien. In diesem Zuge wurde das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) eingeführt. Dieses verfolgt den Zweck ein einheitliches Verständnis, Standards und Normen von I4.0 innerhalb eines Modells darzustellen, um anhand dessen Zusammenhänge und Details diskutieren zu können [13]. Dieses Modell besteht aus verschiedenen Schichten (engl. layer). Zwei in dem Kontext dieser Arbeit bedeutenden Ebenen sind die Gegenstandsschicht (engl. asset layer) und die Integrationsschicht (engl. integration layer). Durch die RAMI4.0-Norm [21] sind die spezifizierten Schichten definiert. Die Gegenstandsschicht repräsentiert die realen Assets in der physischen Welt. Dieser Layer umfasst die real existierenden Assets im Sinn von I4.0 und der Menschen. Hierbei handelt es sich beispielsweise um physikalische Elemente wie Linearachsen und Blechteile, Dokumente, Schaltpläne oder auch Ideen. Weiterführend beinhaltet dieser Layer die Schnittstellen des Menschen zur Informationswelt und die Anbindung der Assets an die Integrationsschicht. Durch die Integrationsschicht werden die Menschen mit der virtuelle Welt verknüpft [13]. Diese Schicht ist die zweitunterste Schicht des RAMI4.0 und dient als Übergangsschicht zwischen der physischen und der digitalen Welt. Die Inhalte dieser Schicht umfassen die Repräsentation der realen Ressource eines Assets, die rechnergestützte Steuerung technischer Prozesse, die Erzeugung von Ereignissen aus den realen Assets sowie die Mensch-Maschinen-Schnittstellen (engl. Human-Machine-Interface (HMI)). Darüber hinaus enthält diese Schicht mit der IT verbundenen Elemente, wie z.B. RFID-Reader oder Sensoren.

Die treibende Technologie zur Zielerreichung der I4.0 Bundesstrategie stellen CPS dar [12]. Die Verwendung von CPS ist essentiell für eine erfolgreiche Digitalisierung von Unternehmensprozessen, wodurch CPS fester Bestandteil des RAMI4.0 sind. Laut Monostori et al. wurde der CPS-Begriff erstmalig 2006 bei einem Workshop mit dem Titel „Cyber-Physical System“ von der amerikanischen National Science Foundation verwendet [59]. Seitdem existieren zahlreiche Arbeiten, die Definitionen und Beschreibungen dieser Systeme hervorbringen. Eine der ersten Definitionen der cyber-physischen Systeme veröffentlicht Lee 2008 in [55] :

„Cyber-Physical Systems (CPS) are integrations of computation with physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa.“

Ein cyber-physisches System stellt somit eine Erweiterung aus den eingebetteten Systemen (engl. embedded systems) dar. Diese Erweiterung fundiert im Wesentlichen auf der Kommunikati-

onsfähigkeit der CPS. Diese Fähigkeit hebt Lee im weiteren Verlauf seiner Arbeit hervor und bezeichnet diese als ein Schlüsselement der cyber-physischen Systeme. Mittels der CPS ist eine Interaktion zwischen der digitalen und der physischen Welt realisierbar. Die Definition der Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Acatech) aus dem Jahr 2012 [30] ist durch die detaillierter Beschreibung einiger Eigenschaften noch spezifischer.

„Cyber-Physical Systems umfassen eingebettete Systeme, also Geräte, Gebäude, Verkehrsmittel und medizinische Geräte, aber auch Logistik-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internet-Dienste, die

- mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken,*
- Daten auswerten und speichern sowie auf dieser Grundlage aktiv oder reaktiv mit der physikalischen und der digitalen Welt interagieren,*
- mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, und zwar sowohl drahtlos als auch drahtgebunden, sowohl lokal als auch global,*
- weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen,*
- über eine Reihe multimodaler Mensch-Maschinen-Schnittstellen verfügen, also sowohl für Kommunikation und Steuerung differenzierte und dedizierte Möglichkeiten bereitstellen, zum Beispiel Sprache und Gesten.“*

Eine exakte Definition des CPS-Begriffs existiert hingegen nicht und wird es nach Bettenhausen und Kowalewski nicht geben. Vielmehr wird es nach Ihrer Auffassung zu einem allgemeinen übereinstimmenden Verständnis bei der Verwendung des Begriffs kommen [7].

Rajkumar et al. sind bereits 2010 der Meinung, dass CPS unsere Interaktion mit der physischen Welt so beeinflussen werden, wie das Internet die Interaktion zwischen den Menschen beeinflusst [67]. Die Erwartung an diese Systeme sind folglich sehr hoch. Die Form der Automatisierung wechselt von einem starren Pyramidensystem hin zu einem dezentralen Netzwerk [67]. Die Automatisierung geht über die eigentlichen Unternehmensgrenzen hinaus. Diese verdeutlicht die Abbildung 3.13.

Eine direkte CPS Integration führt beispielsweise zu einer verkürzten Lieferkette. Vorratssysteme, wie Kanban, können direkt in den Beschaffungsprozess eines Unternehmens integriert werden und eigenständig Bestellungen nach Bedarf auslösen. Ein Beispiel hierfür liefert die Würth Industrie Service GmbH & Co. KG [106].

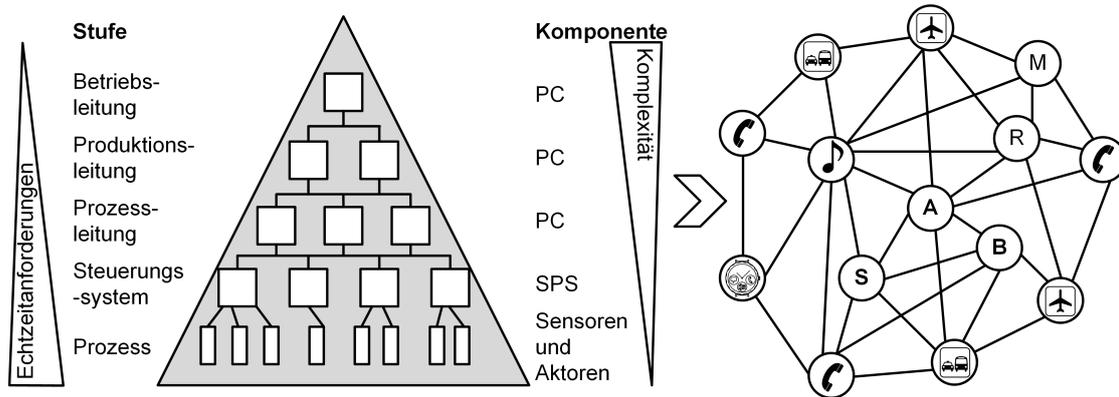


Abbildung 3.13: Von der Automatisierungspyramide zu einem dezentralen Netzwerk, Darstellung nach [40]

Eine zentrale Rolle bei der Nutzung von CPS spielt in Deutschland vor allem die Automobilindustrie als Vertreter eines bereits hochautomatisierten Industriezweigs [30]. In solchen Produktionsstätten werden umfangreiche Tätigkeiten bereits durch Roboter durchgeführt, wobei der Mensch vornehmlich als Kontrollinstanz des Systems auftritt. Es wird ausschließlich in Problemsituationen vom Menschen in das System eingegriffen. Darüber hinaus sind jedoch auch Produktionsstätten von Bedeutung bei denen die Automatisierung nicht zu solch einem Umfang durchgeführt werden kann. Solche Industriezweige sind beispielsweise die Luft- und Raumfahrtbranche oder der Schienen- und Sonderfahrzeugbau. Hier stehen händische Montagetätigkeiten im Fokus der Wertschöpfungskette. Für solche Produktionsstätten bedarf es ebenfalls Lösungen, um Unternehmensprozesse zu digitalisieren. Auch hier können die CPS den richtigen Ansatz liefern. Denn obwohl CPS einen hohen Automatisierungsgrad ermöglichen, sollte der Mensch bei dessen Einsatz weiter im Mittelpunkt der Betrachtung stehen [7]. CPS sind in der Lage, durch eine geeignete Gestaltung von Benutzeroberflächen Mitarbeiter bei Montagetätigkeiten zu unterstützen. Die Aufgabe der CPS liegt hier nicht in der Fertigung von Bauteilen, sondern in der Präsentation von Tätigkeitsbeschreibungen, sowie der Unterstützung von Produktionsplanungs- und Steuerungsprozessen. Unter Nutzung des human-centered Design (HCD)- Ansatzes ist es möglich die Mitarbeiter stärker in den Digitalisierungsprozess mit einzubinden. Boy definiert in [9] diesen HCD-Ansatz wie folgt:

„HCD is the mandatory upstream process that enables a design team to incorporate human requirements into the design of a system. Usually, HCD is scenario-based and prototype-based. It consists in gathering human factors issues from an appropriate community of users or, more generally, actors who are anticipated to act on the system being designed. These actors may be direct end-users but also maintainers

who will have to repair the system in case of failure for example. In this case, it is not only design for usability, but also design for maintainability.“

Es geht folglich darum, den Menschen unter Beachtung dessen Anforderungen in das Design eines Systems oder Prozess zu integrieren. Diese Methode ist nicht durch den Fortschritt der Digitalisierung begründet, bringt jedoch weitere Ansätze hervor, um die Digitalisierung in den Unternehmen weiter voran zu bringen. Ein Beispiel hierfür ist die digitale Werkerassistenz. Mitarbeiter werden mit digitalisierten Arbeitsplätzen [26] oder mobilen Endgeräten, wie Smartglasses und Tabletcomputer ausgestattet, um unter anderem aktuelle Auftragsinformationen, wie in der Lagerhaltung [14] zu erhalten. Im Herstellungsprozess kommen diese Geräte zur Darstellung aktueller Prozess- und Auftragsinformationen oder zur Entscheidungsunterstützung zum Einsatz. Im Abschnitt 5 dieser Arbeit wird ein solches System vorgestellt. Die Mitarbeiter auf der Produktions- und Planungsebene erhalten durch die Verwendung eigens erstellter Systeme die teilweise vom MNP generierten Informationen auf mobilen Endgeräten und Windowssystemen. Durch die Nutzung des HCD-Ansatzes ist es möglich die Anforderung an die Systeme direkt auf Basis der Nutzer Anforderung zuzuschneiden. Durch den Einsatz der digitalen Endgeräte kann der Mensch als direkte Ressource der Digitalisierung betrachtet werden. Hierzu existieren Ansätze die human-zentrierte Entwicklungsweise direkt auf CPS und cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) zu adaptieren [73]. CPPS stellen hierbei die Implementierung von CPS - Elementen in das Produktionssystem dar [95].

3.7 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es eine Methode auf Basis der Netzplantechnik zu entwickeln, die es erlaubt neben den regulären Beziehungen zusätzliche alternative Vorgangsbeziehungen abzubilden. Hierbei sollen redundante Vorgänge vermieden und die alternativen Beziehungen ausschließlich mit zusätzlichen Kanten abgebildet werden. Es ist explizit herauszustellen, dass die Arbeit sich nicht mit dem Erarbeiten der Alternativprozessschritte befasst, wie es die beschriebenen CAPP- und AAPP-Methoden ermöglichen. Der Fokus obliegt auf der Erarbeitung einer Darstellungsform, welche die (bekannten) Alternativen abbildet. Darüber hinaus wird eine automatisierte numerische Evaluation und Präsentation der Alternativen angestrebt. Die Methodik soll das Backend eines Produktionsplanungs- und -steuerungswerkzeug bilden. Innerhalb des Kapitels „Stand der Kenntnisse“ wurden daher mit der Graphentheorie die Ursprünge der Netzplantechniken und verwandten Verfahren, wie den Petrinetzen dargelegt. Dieses beinhaltet neben den Grundlagen für die grafische Darstellung die digitalen Speichermöglichkeiten der Graphen mittels Adjazenzliste und Adjazenz- als auch Inzidenzmatrix. Hierbei wurden die Vorteile der Adjazenz-

matrix gegenüber der weiteren Verfahren bei Graphen mit einer hohen Knotendichte dargelegt. Weiterführend wurden die bekanntesten Netzplantechniken in deterministische und stochastische Verfahren unterteilt und dessen Eigenschaften erläutert. Hierbei wurde die Begründung für die Verwendung eines deterministischen Vorgangsknotennetzplans als Basis für den Maximalnetzplan erörtert. Darauffolgend wurde unter Darlegung der Petrinetze eine Methode beschrieben, die in einigen Arbeiten zur Beschreibung von automatisierten Prozessabläufen verwendet wird. Weiterführend wurde mit dem Aufzeigen des Mangels zur Beschreibung von unterschiedlichen Zeitattributen, wie sie in den Vorgangsknotennetzplänen möglich sind, begründet, warum für die Beschreibung alternativer Vorgänge und deren Evaluierung auf die Verwendung von Petrinetzen verzichtet wird.

Das Konzept des zu erarbeitenden Netzplans ist auf die Daten aus der Produktionsumgebung angewiesen. Um eine Einordnung der Methodik in das Produktionsumfeld vornehmen zu können, wurden innerhalb des Abschnitts 3.4 ERP-Systeme und MES beschrieben. Bei diesen Systemen handelt es sich um Datenverwaltungssysteme von denen der in dieser Arbeit erarbeitete Netzplan die benötigten Daten beziehen soll. Weiterführend wurden innerhalb des Abschnitts 3.4 Methoden zur Prozessplanung dargelegt. Hierbei handelt es sich um CAPP- und AAPP-Algorithmen, die es ermöglichen automatisiert auf Basis von Computer Aided Design (CAD)-Daten Prozessabfolgen zu erarbeiten. Erstgenannte Algorithmen werden vornehmlich in der Zerspanung zur Beschreibung der Prozessabfolge innerhalb der Maschinen verwendet. Die AAPP-Algorithmen dienen zur automatisierten Erarbeitung von Montagereihenfolgen. Diese Verfahren unterscheiden sich somit von der gestellten Zielsetzung dieser Arbeit, bei der die Darstellung der Alternativen und deren Evaluierung, jedoch nicht die grundsätzliche Definition der Vorgangreihenfolgen, zu definieren ist.

Ein wesentlicher Bestandteil der in dieser Arbeit beschriebenen MNP-Methodik besteht in der automatisierten Evaluierung möglicher Alternativen für Vorgänge, die aufgrund eines Störungseintritts nicht weiter bearbeitet werden können. Mit den bewerteten Alternativen, soll der Anwender in die Lage versetzt werden den Prozess unmittelbar durch die Verwendung einer Alternative fortführen zu können. Für diesen Zweck wurden innerhalb des Abschnitts 3.5 Verfahren dargelegt, die es erlauben die entsprechenden Alternativen zu bewerten und zu priorisieren. Hierbei wurde herausgearbeitet, dass die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse einen wichtigen Faktor darstellt und damit der Einsatz von Heuristiken, im speziellen Prioritätsregelverfahren, begründet wird.

Neben Verfahren der KI sind die CPS ein wesentlicher Pfeiler der digitalisierten Industrie. CPS sind in der Lage in der Produktion autark, ohne die Notwendigkeit des menschlichen Eingreifens, die Prozesse zu steuern und benötigte Daten zu generieren sowie untereinander auszutauschen. Hingegen existieren jedoch auch Produktionsprozesse in denen die Tätigkeiten von Mitarbeitern

im Zentrum der Herstellung steht. In derartigen Prozessen führt eine direkte Kommunikation zwischen Werkern mit dem Planungssystem, unter Verwendung von mobilen Endgeräten, zu einer umfassenden Digitalisierung der Prozesse. Dieser Ansatz entspricht dem Zweck des Einsatzes der in dieser Arbeit zu entwickelnden Methode. Aus diesem Grund wurden innerhalb des Abschnitts 3.6 die Grundlagen derartiger Systeme und human-zentrierte Ansätze vorgestellt.

Kapitel 4

Maximalnetzplan

Aus der mangelnden Darstellungsmöglichkeit alternative Prozessschritte innerhalb eines deterministischen Netzplanmodells ohne die Hinzunahme zusätzlicher Knoten ergibt sich die Notwendigkeit eines Netzplans, welcher einen Mehrwert an Informationen in Störungssituation bietet. Netzpläne, die ausschließlich den Soll-Netzplan, also idealen Projektablauf abbilden, sind dazu nicht geeignet. Hingegen verlieren diese bei unerwarteten Prozesseinwirkungen, wie sie durch Störungen verursacht werden, ihre Gültigkeit und finden keine weitere Verwendung innerhalb der PPS. In derartigen Situationen müssen manuell, oft auf Basis der Erfahrungswerte der Mitarbeiter aus Mangel an zusätzlichen Informationen, Entscheidungen über alternative Prozessabfolgen getätigt werden. Folglich werden in derartigen Situationen unter Umständen nicht die geeignetsten Alternativen zur Fortführung des Produktionsprozesses gewählt. Die Folge sind nicht kalkulierte Mehraufwände. Eine Möglichkeit derartige Missstände zu vermeiden, ist die Abbildung zusätzlicher Informationen auf Basis von generierten Planungswissen. Zur Erarbeitung eines Soll-Prozesses bedarf es während der Planungsphase vor dem Beginn der eigentlichen Produktion einen Vergleich zwischen den durchführbaren Prozessvarianten. Unter definierten Vorgaben stellt sich eine Prozessabfolge heraus, die am geeignetsten für die Einhaltung dieser Vorgaben erscheint. Die weiteren Varianten bieten Informationen über alternative Produktionsabläufe zur Herstellung des Produkts, die in Störungssituationen zweckdienlich wären. Eine Netzplanmethodik, die geeignet ist diese Informationen abzubilden kann die Entscheider in der beschriebenen Situation unterstützen. Hierbei sei erwähnt, dass der in dieser Arbeit erläuterte Maximalnetzplan die möglichen Produktionssequenzen ausschließlich abbildet. Eine bereits erfolgte Erarbeitung der einzelnen Varianten wird hingegen vorausgesetzt und stellt keinen Teil der hier beschriebenen Methodik dar.

Mit Hilfe des von Russel und Norvig dargelegten Beispiels soll im Folgenden die Grundidee des MNPs erläutert werden. Sie definieren in ihrem Buch [79] einen Netzplan, beschreiben dessen Prinzip und geben Auskunft über dessen Aussagekraft. In der Abbildung 4.1 ist der Prozessablauf zum Anziehen von Socken und Schuhen unter Verwendung eines vertikalen Netzplans veranschaulicht. Besonders zu unterstreichen bei dieser Betrachtung ist das Nachvollziehen der Lesart eines solchen Netzplans im Kontext der (Produktions-) Ablaufplanung. Es geht nicht darum, die Knoten und Kanten einmalig, wie bei Euler- oder Hamiltonkreisproblemen [1], zu durchlaufen. Vielmehr steht im Mittelpunkt der Betrachtung die Beschreibung der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der abzuarbeitenden Knoten. Eine Kante zwischen zwei Knoten sagt aus, dass der Vorgänger vor dem Nachfolger abzuarbeiten ist.

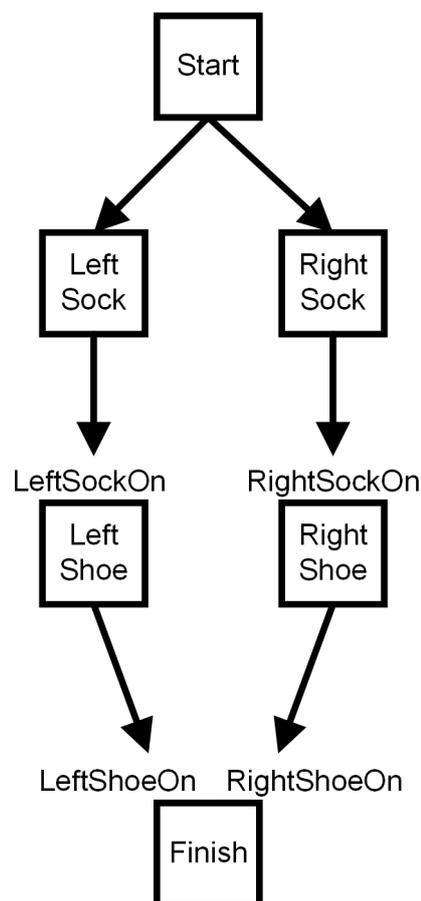


Abbildung 4.1: Darstellung des Prozessablaufs zum Anziehen von Socken und Schuhen mittels Netzplan [79]

Aus diesem dargestellten Prozessablauf ergeben sich verschiedene mögliche und untereinander gleichwertige Abarbeitungsfolgen. Für das gezeigte Beispiel sind sechs Varianten möglich:

- Variante 1: Start, Left Sock, Left Shoe, Right Sock, Right Shoe, Finish
- Variante 2: Start, Left Sock, Right Sock, Left Shoe, Right Shoe, Finish
- Variante 3: Start, Left Sock, Right Sock, Right Shoe, Left Shoe, Finish
- Variante 4: Start, Right Sock, Left Sock, Right Shoe, Left Shoe, Finish
- Variante 5: Start, Right Sock, Left Sock, Left Shoe, Right Shoe, Finish
- Variante 6: Start, Right Sock, Right Shoe, Left Sock, Left Shoe, Finish

Nach der Fertigstellung eines Knotens kann dieser gedanklich aus dem Netzplan entfernt werden. Der nachfolgende Knoten wird zum neuen Netzplananfang. Die nächste freie Ressource wird diesem Knoten zugewiesen. Stehen auf Basis der Netzplanstruktur, wie im obigen Beispiel, mehrere parallele Netzplanstränge zur Verfügung, kann es während der Abarbeitung Zwischenstufen mit mehreren gleichrangigen Anfängen geben. Die Anzahl bei der Bearbeitung notwendiger Ressourcen hängt ausschließlich von praktischen Restriktionen ab. Hierbei kann es sich beispielsweise um die Anzahl an Mitarbeitern oder die Maße des zur Verfügung stehenden Bauraums handeln. In dem gezeigten Beispiel handelt es sich um vier Ressourcen (linke und rechte Socke, linker und rechter Schuh), eine je Vorgang. Jede von ihnen ist einmalig einsetzbar. Stehen mehrere Ressourcen aus einem Ressourcenpool gleichzeitig zur Verfügung, können die Stränge auch parallel abgearbeitet werden. In der Praxis kann die Notwendigkeit bestehen Knoten von mehreren Ressourcen abarbeiten lassen zu müssen. Außerdem kann der Bedarf an differenten Betriebsmitteln zu Bearbeitung eines Knotens bestehen. Ist ein Knoten erledigt, stehen diese Ressourcen wieder zur Verfügung; sie wandern zurück in den Ressourcenpool. Betriebsmittel können somit die Stränge beliebig wechseln, nachdem der ihnen zugeordnete Knoten abgearbeitet wurde.

Andere Varianten als die oben genannten sechs sind sowohl theoretisch gemäß des Modells in der Abbildung 4.1 als auch praktisch ausgeschlossen, da es unmöglich ist, am selben Fuß erst den Schuh und dann die Socke anzuziehen. In der Realität sind die technisch möglichen Produktionsabläufe insbesondere bei der Montage und Ausrüstung von Großstrukturen jedoch nicht so streng sequentiell. Bereits während der Erstellung des originären Netzplans erkennen die Planer häufig mehrere alternative gleichwertige oder unterschiedlich gute, jedoch technisch mögliche alternative Abarbeitungsfolgen. Auch während der Herstellung der ersten Produkte werden weitere mögliche Baufolgen erkannt. Vergleichbar wäre das mit dem Zusammensetzen eines Selbstbaumöbels oder dem Einbau einer Heizungsanlage in einen Gebäuderohbau. Um zum Ziel zu gelangen, müssen alle Komponenten verbaut werden und es gibt Abhängigkeiten

unter den Komponenten sowie zwischen den Komponenten und der Umgebung. Dennoch gibt es mehr als eine Abarbeitungsfolge, die diese Abhängigkeiten berücksichtigt und zum Ziel führt. Die bisherige Netzplanmethodik zwingt die Planer jedoch, sich auf eine Variante festzulegen. Damit ist auch das bereits erlangte Wissen um alternative Abarbeitungsmöglichkeiten wieder weitestgehend verloren, weil es nicht systematisch dokumentiert werden kann.

Das Konzept des MNPs erlaubt es hingegen Alternativen differenter Rangfolgen zu beschreiben und bietet somit den Planern die Möglichkeit das erarbeitete Wissen abzubilden, wodurch dieses während des Produktionsprozesses nutzbar wird. Im nachfolgenden Abschnitt wird das Grundkonzept des Maximalnetzplans anhand der Montage eines Spielzeugautos dargelegt. Es werden die Struktur als auch die Speicherung dieser erweiterten Netzplanvariante beschrieben und Unterschiede zu der Beschreibungsweise von Russel und Norvig hervorgehoben. Darüber hinaus werden Begrifflichkeiten wie Vorbedingungen und Alternativen in diesem Kontext definiert.

4.1 Grundkonzept des Maximalnetzplans

Das erörterte Beispiel von Russel und Norvig [79] über den Prozessablauf des Anziehens von Socken und Schuhen zeigte die Lesart von Netzplänen und die damit einhergehende Bearbeitungsabfolgen von Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen auf. Darüber hinaus wurde die Notwendigkeit von alternativen Prozessvorgängen erneut hervorgehoben. Unter Verwendung dieses Wissens wird Anhand der Montage eines Spielzeugautos die Methodik des MNPs erläutert. Dieses Beispiel eignet sich insbesondere für die Beschreibung der Methodik, da es unter der Verwendung verschiedenartiger Vorgänge die Abläufe innerhalb einer Montage anschaulich darstellt. Zudem ist es sehr gut verständlich und somit für den Leser entsprechend gut nachzuvollziehen. In der Abbildung 4.2 ist der Aufbau des Produkts dargestellt.

Es bedarf zehn Bauteile das Produkt zusammenzufügen. Des Weiteren sind Qualitätskontrollen notwendig, damit das Spielzeug in geforderter Qualität lieferbar ist. Somit ergeben sich insgesamt zwölf Prozessvorgänge zur Herstellung des Autos. Zwei weitere Vorgänge werden implementiert, um einen Projektanfang und ein Projektende mittels Netzplan abbilden zu können. Diese Vorgehensweise ist bei der Verwendung von VKN nicht zwingend erforderlich, jedoch der Strukturierung des Netzplans zweckdienlich.

Durch mögliche parallele Vorgänge, ähnlich wie bei dem Socken und Schuhen Beispiel von Russel und Norvig, ergeben sich mehrere gleichrangige Abfolgen. Diese können bei einer ausreichenden Anzahl an zur Verfügung stehenden Ressourcen sowohl parallel, als auch sequentiell abgebildet werden. Zwei von diesen Sequenzen werden nachfolgend aufgeführt.

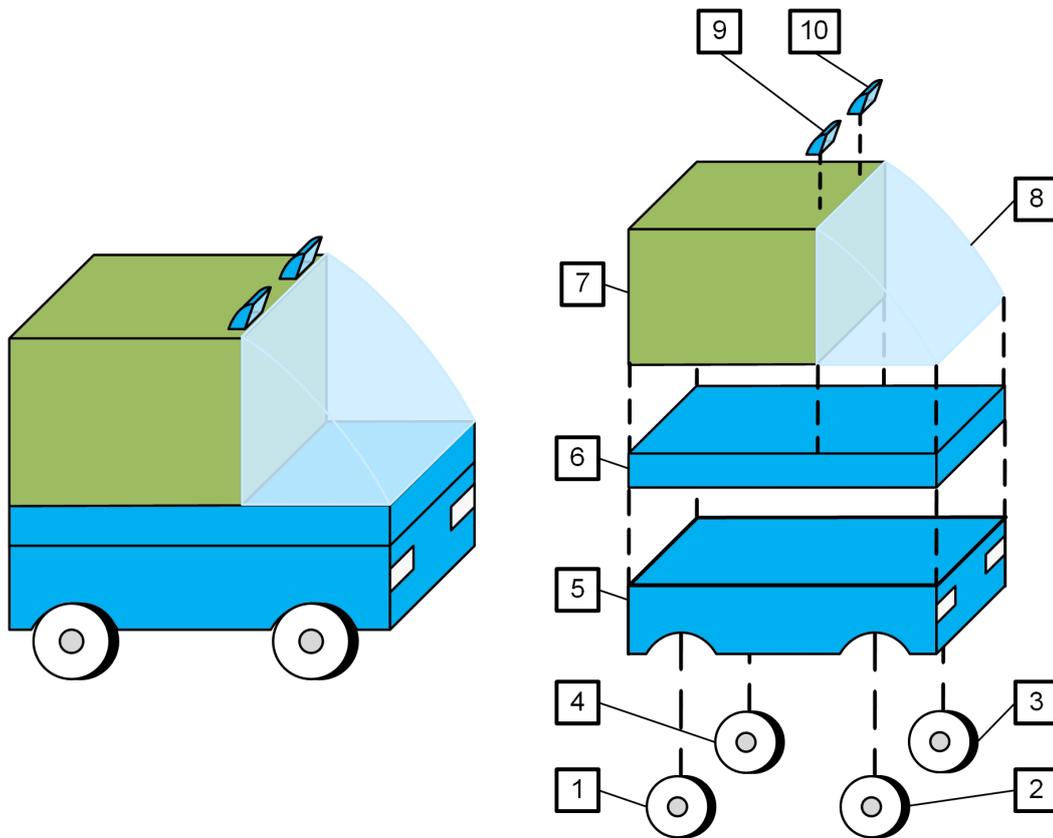


Abbildung 4.2: Montage eines Spielzeugautos: 1-4 - Räder; 5 - unterer Korpus; 6 - obere Korpus; 7 - Aufsatz Laderaum; 8 - Frontscheibe; 9 - Scheinwerfer 1; 10 - Scheinwerfer 2

Beachtung finden hierbei nicht ausschließlich die Prozessvorgänge der Montage, sondern die zusätzlichen Qualitätsprüfungen.

- Variante 1: Vorgang (V)1 - Start, V2 - Montage Reifen 1 mit unteren Korpus (Bauteil 5), V3 - Montage Reifen 2 mit unteren Korpus, V4 - Montage Reifen 3 mit unteren Korpus, V5 - Montage Reifen 4 mit unteren Korpus, V6 - Qualitätsprüfung, V7 - Montage Baugruppe mit oberem Korpus (Bauteil 6), V8 - Qualitätskontrolle, V9 - Montage Baugruppe mit Laderaum (Bauteil 7), V10 - Montage Baugruppe mit Frontscheibe (Bauteil 8), V11 - Montage Baugruppe mit Scheinwerfer 1 (Bauteil 9), V12 - Montage Baugruppe mit Scheinwerfer 2 (Bauteil 10), V13 - Endkontrolle, V14 - Ende

- Variante 2: V1 - Start, V2 - Montage Reifen 1 mit unteren Korpus (Bauteil 5), V4 - Montage Reifen 3 mit unteren Korpus, V3 - Montage Reifen 2 mit unteren Korpus, V5 - Montage Reifen 4 mit unteren Korpus, V6 - Qualitätsprüfung, V7 - Montage Baugruppe mit oberen Korpus (Bauteil 6), V8 - Qualitätskontrolle, V10 - Montage Baugruppe mit Frontscheibe (Bauteil 8), V9 - Montage Baugruppe mit Laderaum (Bauteil 7), V12 - Montage Baugruppe mit Scheinwerfer 2 (Bauteil 10), V11 - Montage Baugruppe mit Scheinwerfer 1 (Bauteil 9), V13 - Endkontrolle, V14 - Ende

Die gezeigten Varianten beschreiben den Aufbau des Spielzeugs von den Reifen beginnend. Dieses bedarf die wenigsten Handgriffe zur Montage, da die Bauteile nicht erneut abgelegt oder aufgenommen werden müssen, wodurch die Zeit bis zum Zusammenbau am geringsten ausfällt. Die beschriebenen Varianten unterscheiden sich lediglich in der Abarbeitung der Reihenfolge paralleler gleichrangiger Prozessschritte bei sequentieller Durchführung durch einen Mitarbeiter. Die Darstellung einiger möglicher Sequenzen des idealen Prozessablaufs wird durch den in der Abbildung 4.3 veranschaulichten Netzplan wiedergegeben. Im Vergleich zu der Darstellung von Russel und Norvig wird dieser Netzplan horizontal von links nach rechts gelesen. Neben den beschriebenen Sequenzen existieren weitere mögliche Abfolgen, die mit den bekannten Netzplanmethoden nicht innerhalb eines Modells abgebildet werden können. Ein Beispiel hierfür stellt die Sequenz Variante 3 auf der folgenden Seite.

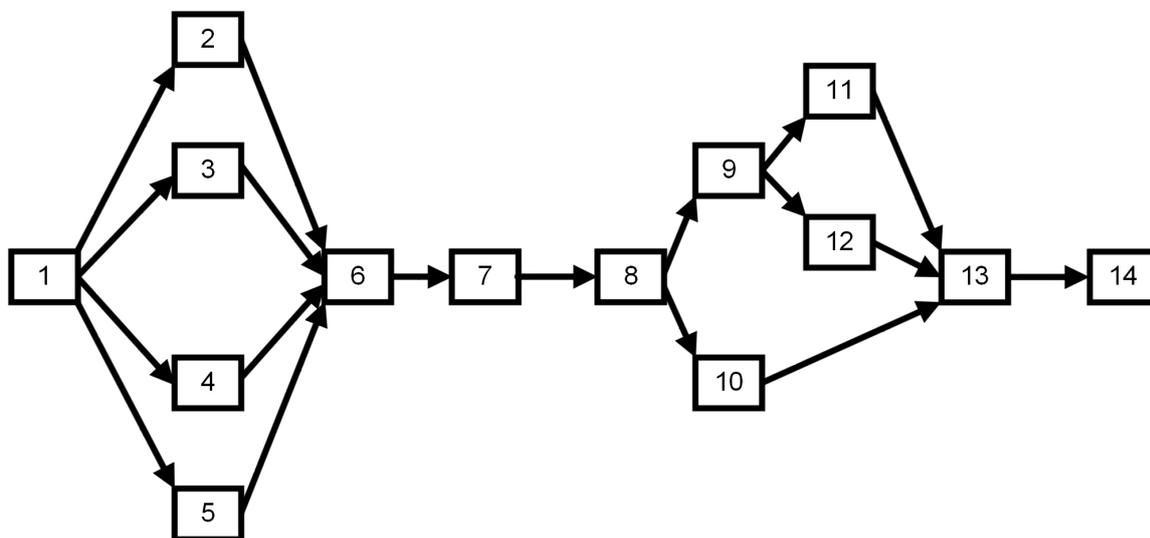


Abbildung 4.3: Darstellung des idealen Produktionsablaufs zur Herstellung des Spielzeugautos in Form eines Netzplans

- Variante 3: Vorgang (V)1 - Start, V2 - Montage Reifen 1 mit unteren Korpus (Bauteil 5), V3 - Montage Reifen 2 mit unteren Korpus, V4 - Montage Reifen 3 mit unteren Korpus, V5 - Montage Reifen 4 mit unteren Korpus, V6 - Qualitätsprüfung, V7 - Montage Baugruppe Scheinwerfer 1 (Bauteil 9), V8 - Montage Baugruppe Scheinwerfer 2 (Bauteil 10), V9 - Qualitätsprüfung, V10 - Montage Baugruppe unterer Korpus mit Bauteil 6, V11 - Montage Aufsatz Laderaum + Scheinwerfer mit Baugruppe, V12 - Montage Baugruppe mit Frontscheibe, V13 - Endkontrolle, V14 - Ende

Hier wurde nach der Qualitätsprüfung im Vorgang V6 mit der Montage der Scheinwerfer 1 (Bauteil 9) und 2 (Bauteil 10) an dem Bauteil 7 begonnen und anschließend mit der Montage des Bauteils 6 an den unteren Korpus fortgefahren. Dieses ist eine durchführbare Sequenz, welche bei Eintritt einer Störung am Bauteil 6 durchgeführt werden kann. Diese Sequenz würde gegenüber den Sequenzvarianten 1 und 2 einen höheren Aufwand bedeuten, da die Bauteile zur Fertigstellung des Produkts des Öfteren in die Hand genommen werden müssten. Diese begründet sich darin, dass bei einer Prozessdurchführung auf Basis der Sequenzen 1 und 2 das Produkt bei den Reifen beginnend ohne eine zusätzliche Drehung oder wiederholtes Handhaben eines Bauteils aufeinander aufbauend montiert werden kann. Bei der dritten Variante hingegen muss die erste montierte Baugruppe, bestehend aus den Bauteilen 1 - 5, nach der Durchführung der Vorgänge V7 - V9 erneut gehandhabt werden, um mit dem Bauteil 6 montiert werden zu können. Dieses Beispiel soll verdeutlichen, dass bei hochkomplexen Produkten, trotz einer hohen Anzahl an bauteilbedingten Restriktionen, eine große Vielfalt an möglichen Kombinationen existiert, die mit den praktizierten Netzplantechniken nicht abgebildet werden können. Daher wird eine Methode erarbeitet, welche mit zusätzlichen Kanten ideale und alternative Sequenzen in einem Modell abbildet. Dieses Konzept soll in Anlehnung an den in der Produktionsorganisation bekannten Begriff Maximalarbeitsplan als Maximalnetzplan bezeichnet werden. Ein Maximalarbeitsplan bezeichnet einen Arbeitsplan, der die Gesamtheit aller Varianten der Fertigung eines konfigurierbaren Produkts beschreibt [33]. In der Umsetzung ist das Konzept des Maximalnetzplans mit weiteren Fragen verbunden:

- Wie werden Soll-Kanten und alternative Kanten unterschieden?
- Wie wird zwischen unterschiedlich guten alternativen Lösungen differenziert?
- Wie wird sichergestellt, dass der übersprungene Knoten nicht vergessen, sondern baldmöglichst nachgeholt wird?

Die theoretischen Grundlagen und das Verfahren des Maximalnetzplans werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

4.2 Maximalnetzplandarstellung und erweiterte Adjazenzmatrix

Eines der Ziele dieser Arbeit besteht darin einen Netzplan zu entwickeln, der mit möglichst geringer Darstellungskomplexität und ohne Verwendung zusätzlicher Knoten erlaubt, alternative Prozessabläufe abzubilden. Dem Anwender sollen die Abhängigkeiten der jeweiligen Vorgänge, sowie entsprechende Alternativen, deutlich präsentiert und somit eine einfache Verwendung im operativen Geschäft ermöglicht werden. Zur Lösung dessen wurde sich an der Darstellungsweise von Vorgangsknotennetzplänen (Abschnitt 3.2.1) orientiert. Dieses begründet sich in der Notwendigkeit, dass in Vorgangspfeilnetzplänen wie den CPM-Netzplänen, Scheinvorgänge zur Prozessdarstellung zu verwenden sind sobald mehrere Vorgänge differente Vorgänger oder Nachfolger aufweisen. Diese Scheinvorgänge erhöhen die Anzahl an Knoten innerhalb des Prozessgraphs und expandieren somit die Darstellung des Prozesses. Wie bereits innerhalb des Abschnitts 3.2.1 erläutert, weisen derartige Vorgänge eine Vorgangsdauer von Null auf und werden ausschließlich zur Wahrung der Darstellungsformen von CPM-Netzplänen und deren Planungseigenschaften eingeführt. Im direkten Produktionsablauf bieten Scheinvorgänge jedoch keinen inhaltlichen Mehrwert. Die Netzplanart der Vorgangsknotennetzpläne erlauben hingegen eine Prozessübersicht ohne die Notwendigkeit von Scheinvorgängen. Einzig können zur Verbesserung der Darstellung Start- und Endknoten dem VKN hinzugefügt werden. Bei mehreren parallelen möglichen Anfangs- und Endvorgängen ist diese Verfahrensweise durchaus für eine verbesserte Lesbarkeit zweckdienlich. Aus diesen Gründen wird auf die Verwendung von Vorgangspfeilnetzplänen zur Erarbeitung des MNPs verzichtet.

Der korrespondierende Netzplan zur Herstellung des Spielzeugautos ist in Abbildung 4.3 veranschaulicht. Dieser stellt ein entsprechendes Beispiel eines MNPs dar. Die gewählte Darstellungsform als Vorgangsknotennetzplan veranschaulicht durch die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen des Netzplans einen gerichteten Graphen. Dieses Fundament ermöglicht es den MNP zusätzlich zu der grafischen Darstellung in der Form einer Adjazenzmatrix der Größe $(n \times n)$ zu beschreiben. Wie bereits innerhalb des Kapitels der Graphentheorie (Kapitel 3.1) erörtert, eignen sich Adjazenzmatrizen bei einer erhöhten Knoten- und Kantenanzahl insbesondere zur Speicherung der Verbindungsinformationen der Knoten des Graphen. Hingegen ist es ebenfalls möglich Graphen mittels Inzidenzmatrix oder Adjazenzliste zu repräsentieren. Bezogen auf den benötigten Speicherbedarf erscheint die Inzidenzmatrix jedoch als ungeeignet. In Produktionsprozessen besteht eine entsprechende Quantität an zu bearbeitenden Vorgängen und deren Abhängigkeiten zueinander. Bei hochtechnisierten Produkten, wie in der Luft- und Raumfahrtindustrie, sind

mehrere hundert Vorgänge keine Seltenheit sondern stellen die Regel dar. Eine hohe Knoten- und Kantenanzahl in Netzplänen ist daher nicht unüblich. Die Adjazenzliste hingegen weist zwar bei einer geringen Kantenanzahl einen geringeren Speicherplatzbedarf auf, bietet jedoch aufgrund ihrer Struktur nicht die Möglichkeit zusätzliche Informationen, wie Vorgangstatus, zu hinterlegen. Die Verwendung der Adjazenzmatrix erscheint folglich als begründet.

Innerhalb der Adjazenzmatrix des MNPs werden die Kanten zwischen einzelnen Knoten durch einen Eintrag im korrespondierendem Feld in der oberen Dreiecksmatrix dargestellt. Hierbei werden durch Verwendung unterschiedlicher Integer die idealen und alternativen Vorgangsabfolgen repräsentiert. Wie durch das Beispiel von Russel und Norvig beschrieben, sind in der originären Netzplandarstellung prinzipiell alle Kanten gleichrangig, weshalb üblicherweise eine 1 innerhalb der Adjazenzmatrix zur Beschreibung der Knotenrelationen Verwendung findet. Diese Vorgehensweise wird in der MNP-Methodik ausschließlich zur Speicherung des idealen Soll-Ablaufs übernommen. Die Abbildung 4.4 zeigt eine Adjazenzmatrix mit vierzehn Prozessschritten. Diese beschreibt den Produktionsablauf des Spielzeugautos aus der Abbildung 4.2. Die Matrix stellt die Beziehungen der einzelnen Vorgänge des Produktionsprozesses unter Verwendung der oberen Dreiecksmatrix dar. Die Beschreibung der alternativen Abläufe wird im späteren Verlauf des Abschnitts im Detail erläutert, weshalb diese noch nicht in der genannten Abbildung aufgeführt werden. Die Hauptdiagonale der Adjazenzmatrix dient innerhalb der Graphentheorie zur Beschreibung von Knoten die mit sich selbst in Beziehung stehen. In der MNP-Technik wird die Hauptdiagonale hingegen nicht für die Darstellung von Vorgangsrelationen belegt, da die Knoten mit sich selbst nicht in Verbindung stehen können. Andernfalls müsste ein Vorgang nach dessen Fertigstellung wieder von neuem beginnen. Dieses ist in Projekten oder Produktionsprozessen im Allgemeinen nicht zielführend. Schlussfolgernd existieren keinerlei Kanten im Netzplan, die denselben Knoten als Eingangs- und Ausgangsknoten aufweisen.

Sollten dennoch die wiederholte Durchführung eines Vorgangs innerhalb eines Produktionsprozesses notwendig sein, so ist die Einführung eines weiteren Knotens, der die wiederholende Durchführung eines Vorgangs repräsentiert, der Umsetzung und Nutzung des MNPs dienlich. Die untere Dreiecksmatrix ist der verbliebene zur Verfügung stehende Bereich der Adjazenzmatrix. Dieser Matrixabschnitt dient generell zur Hinterlegung von rückwärts gerichteten Kanten innerhalb eines Graphen. In der Maximalnetzplanmethodik findet die untere Dreiecksmatrix zur Beschreibung des idealen Ablaufs und dazugehörigen Alternativen keine Verwendung. Daher wird dieser vorerst als unbesetzt bezeichnet und ausschließlich mit den Zellenwert 0 belegt. Eine 0 indiziert das nicht Bestehen einer Anordnungsbeziehung zweier Knoten [97]. Diese Interpretation wird sowohl für die obere als auch untere Dreiecksmatrix angewandt.

Im späteren Verlauf der Arbeit wird eine Verfahrensweise beschrieben die Hauptdiagonale der Matrix als auch die untere Dreiecksmatrix ebenfalls für die Speicherung von additionaler Pro-

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14
V1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
V7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
V8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
V9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
V10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 4.4: Adjazenzmatrixdarstellung des idealen Prozessablaufs zur Herstellung des Spielzugautos

zessinformation zu verwenden. Diese zusätzlichen Prozessinformationen erweisen ihren Zweck bei der Evaluation möglicher Alternativen im Störfall.

Um alternative Abläufe in der Adjazenzmatrix abbilden zu können, resultiert das im Eintrag weiterer Werte in der oberen Dreiecksmatrix. Als *Alternativvorgänge* oder kurz *Alternativen* (engl. **alternative Nodes**) $AN(i)$ werden diejenigen Knoten bezeichnet, die für einen aktuellen betrachteten Knoten i als Alternativmöglichkeiten bearbeitet werden können. Im Detail werden die Alternativen in die Zeilen des direkten Vorgängers und der Spalte der entsprechenden Alternativen $a \in AN(i)$ in der Adjazenzmatrix eingetragen. Als Beispiel hat der Vorgang $V7$ vier mögliche Vorgänge als Alternativen ($V9 - V12$). Die Anzahl der Alternativen kann folglich durch die Menge $AN(V7) = \{V9, V10, V11, V12\}$ beschrieben werden. In der Adjazenzmatrix (Abbildung 4.5) sind derartige Relationen Blau hervorgehoben. Die entsprechenden Werte befinden sich in der Zeile von $V6$, dem Vorgänger von $V(V7) = \{V6\}$ und den Spalten $V9 - V12$. Dieses definiert innerhalb der Netzplandarstellung zusätzliche Kanten zwischen den Vorgängern des fehlerhaften Knotens und dessen Alternativen. Für das genannte Beispiel veranschaulicht die Menge der Kanten $\{(V6, V9), (V6, V10), (V6, V11), (V6, V12)\}$ diese Vorgehensweise.

Alternativen werden nachrangig gegenüber dem Soll-Prozess und somit gegenüber den parallelen Strängen behandelt. Daher werden Alternativknoten in der Adjazenzmatrix mit einem höheren Wert als 1 belegt und die additionalen Kanten im Netzplan entsprechend dargestellt. Durch den Vorzug paralleler Vorgänge entspricht der höhere Kantenwert einer Priorisierung beziehungsweise einer „Strafe“. Als *Parallelvorgänge* (engl. **parallel Nodes**) $PN(i)$ werden die Knoten bezeichnet, die den selben Vorgänger eines Knotens i aufweisen $V(p) = V(i)$. Am Beispiel des

Vorgangs $V3$ lässt sich die Menge an parallelen Vorgängen durch $PN(V3) = \{V2, V4, V5\}$ beschreiben. Die Gesamtheit der alternativen und parallelen Vorgänge wird als *Ausweichvorgänge* (engl. *evasive Nodes*) $EN(i) = AN(i) \cup PN(i)$ definiert. Sie ist folglich die Vereinigung der Mengen an alternativen und parallelen Vorgängen eines Störvorgangs.

Die Menge für Ausweichvorgänge des Vorgangs $V3$ beinhaltet somit die Elemente $EN(V3) = \{V2, V4, V5, V6, V7\}$. Die Abbildung 4.5 veranschaulicht das entsprechende Beispiel. Für die Berechnungen und Speicherung der Netzplaninformationen eignet sich die Adjazenzmatrix außerordentlich, jedoch erscheint die derartige Darstellung von Vorgangsrelationen im operativen Geschäft eher als hinderlich. Dem Anwender wird ein unverzüglicher Überblick über die Prozessabfolgen verwehrt. Dieses ist insbesondere der Fall sobald komplexere Prozessabläufe mit einer höheren Knoten- und Kantenanzahl in einer solchen Matrix hinterlegt sind. Daher bedarf es die Verwendung der Netzplantechnik. Diese veranschaulicht in verständlicher Form auf Basis der Adjazenzmatrix die Beziehungen der jeweiligen Vorgänge zueinander. Im Vergleich der beiden Darstellungsarten ist der Vorteil der Übersichtlichkeit des Vorgangsknotennetzplans gegenüber der Adjazenzmatrix unverkennbar. Den Produktionsprozess in einer solchen Netzplandarstellung wiederzugeben, ermöglicht es dem verantwortlichen Personal einen Zusammenhang der einzelnen Prozessvorgänge zu erkennen.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14
V1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V3	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V4	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V5	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V6	0	0	0	0	0	0	1	0	3	3	4	4	0	0
V7	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0
V8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3	0
V9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0
V10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 4.5: Erweiterte Adjazenzmatrix mit blauen Markierungen zur Darstellung alternativer Vorgänge

In der Abbildung 4.6 wird das um alternative Kanten erweiterte Beispiel aus der Abbildung 4.3 in Form eines MNPs veranschaulicht. Der Netzplan weist neben der Darstellung von alternativen Kanten eine Erweiterung zu bekannten Netzplandarstellungsverfahren, wie sie unter anderem in der entsprechenden Norm [20] zu finden sind, auf. Die Kanten des idealen Ablaufs erhalten, dass innerhalb der Adjazenzmatrix hinterlegte Kantengewicht (engl. *weight*) $w_{ij} = 1$ als Markierung, wodurch eine Identifikation des bestmöglichen Ablaufs bei zusätzlichen Kanten eingängiger ausfällt. Die alternativen Kanten erhalten, der Einträge der Adjazenzmatrix entsprechend, ebenfalls eine Kantengewichtung. Um eine quantitative Unterscheidung der alternativen Kanten bei mehreren Auswahlmöglichkeiten zu erreichen, wird die Höhe der Strafe anhand der Anzahl der übersprungenen Knoten +1 ermittelt. Dieses entspricht den Verknüpfungen (Kanten) der jeweiligen Vorgänge zueinander. Überspringt eine alternative Kante, zwischen zueinander parallelen Strängen, eine unterschiedliche Anzahl an Knoten, wird standardmäßig der höhere Wert gewählt. Dieses kann aus der Abbildung 4.8 entnommen werden. Der Vorgang V_{13} kann für die Vorgänge V_9 und V_{10} als Alternative durchgeführt werden. Die Anzahl an Kanten zwischen dem Vorgänger von Knoten V_9 und V_{10} und der alternative Knoten V_{13} unterscheidet sich aufgrund der Anzahl an Nachfolgern. Die Bewertung von Alternativen beruht grundsätzlich in der Annahme, dass nach der Bearbeitung einer Alternative unverzüglich zum übersprungenen Vorgang zurück gekehrt werden soll. Dieses soll eine möglichst geringe Abweichung vom Soll-Prozess sicherstellen. Die Strafe dient hierbei als Indikator über das Ausmaß der Abweichung zum Soll-Prozess durch die Bearbeitung der Alternative.

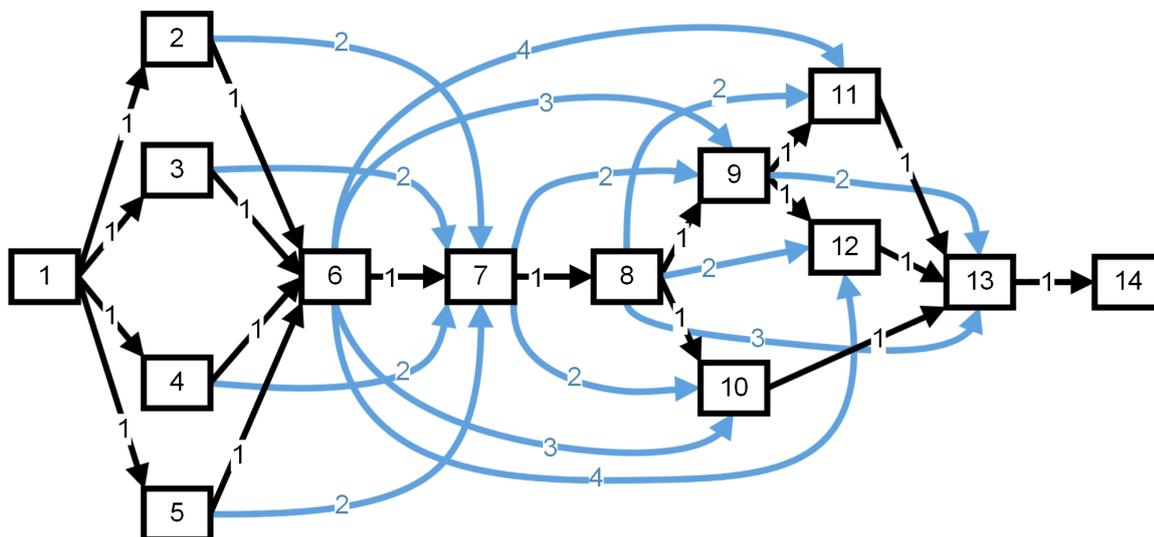


Abbildung 4.6: Darstellung des Maximalnetzplans - Erweiterung des idealen Ablaufs durch die Präsentation von Alternativvorgängen

Eine detaillierte Berechnung des möglichen Mehraufwands, der in der Bearbeitung von Alternativen begründet ist, wird hingegen nicht durchgeführt. Für solch ein Vorhaben müssten innerhalb der Planungsphase des Produktionsprozesses alle Restriktion, unter anderem Montage- und Verarbeitungsvorgaben, Beachtung finden und alle denkbaren alternativen Prozessschritte im Detail betrachtet werden. Dieses würde zu einer drastischen Erhöhung des planerischen Aufwands führen. Aus diesem Grund wurde ausschließlich eine Abschätzung und keine umfassende Berechnung des Mehraufwands in das MNP-Konzept integriert. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen dieses Konzept auch in Unternehmen zu integrieren, die solch einen hohen Planungsaufwand nicht zu leisten vermögen.

Um innerhalb des Netzplans die Notwendigkeit der Bearbeitung eines Ausweichknotens ermitteln zu können, bedarf es die Kennzeichnung von Statusinformation der einzelnen Knoten. Ist ein Knoten abgearbeitet, entfällt dieser gedanklich aus dem Netzplan und seine Nachfolger können begonnen werden, sofern sie keine unvollendeten Vorgänger vorweisen. Befindet sich ein Knoten in Bearbeitung ist er blockiert und bindet eine Ressource. Wenn eine Störung auftritt ist der betroffene Knoten gesperrt. Gibt es keine gleichrangigen parallelen Knoten im Soll-Netzplan, kommen die alternativen Kanten zum Tragen. Alle übrigen Knoten sind bereit in dem Sinne, dass sie, sobald alle Vorgänger abgearbeitet sind, unmittelbar begonnen werden können. Der Status jedes Knotens wird als numerisch verschlüsselte Information auf der Hauptdiagonalen hinterlegt und wurde, wie in der Abbildung 4.7 beschrieben, definiert. Wechselt nach der Aufhebung einer Störung ein zuvor gesperrter Knoten seinen Status von -2 zu -1 , steht er unmittelbar zur Abarbeitung zur Verfügung. Innerhalb des Netzplans wechselt dessen Farbcodierung von Rot (Störung) zu Blau (Störung behoben).

Status	Numerischer Wert	Farbcodierung
gesperrt	-2	 (rot)
behooben	-1	 (blau)
bereit / kein Status	0	 (weiß)
in Bearbeitung	1	 (orange)
erledigt	2	 (grün)

Abbildung 4.7: Übersicht der möglichen Knotenstatus im Maximalnetzplan und in der erweiterten Adjazenzmatrix

Dieser wird solange mit der blauen Farbcodierung versehen, bis eine aktive Bearbeitung durch einen Mitarbeiter erneut aufgenommen worden ist. Es wurde sich hier bewusst für eine Verwendung der Farbcodierung entschieden. Es hätten auch mittels rückwärts gerichtete Pfeile das Wiederaufnehmen des Vorgangs repräsentiert werden können, jedoch werden diese Pfeile für die Hinterlegung von zusätzlichen Knotenbeziehungen benötigt. In den Abbildungen 4.8 und 4.9 sind die unterschiedlichen Codierungsschemata im Maximalnetzplan und in der Adjazenzmatrix veranschaulicht. Wird das gedankliche Modell des Entfallens von abgearbeiteten Kanten und Knoten aus dem Netzplan herangezogen, steht ein derartiger Knoten allein, ohne jegliche Vorgänger, „vor“ dem verbliebenen Netzplan. Demnach ist er gleichrangig zu jedem im Soll-Prozess befindlichen Knoten, der keine weiteren verbliebenen Vorgänger hat, und kann unmittelbar begonnen werden, wenn eine Ressource zur Verfügung steht. Eine weitere Vereinbarung betrifft die Nachfolger. So lange ein Knoten gesperrt ist, können seine Nachfolger niemals erledigt sein. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der im Soll-Netzplan definierte Bauzustand auch tatsächlich hergestellt wird. In der beispielhaften Darstellung des Netzplans (Abbildung 4.8) werden für den fehlerbehafteten Knoten V_9 dessen alternativen Knoten V_{11} , V_{12} und V_{13} per zusätzlicher Kanten dargestellt. Die übrigen alternativen Kanten des MNPs (Abbildung 4.6) bestehen weiterhin, sind aber aufgrund der Irrelevanz für den fehlerbehafteten Knoten ausgeblendet. Dieses Vorgehen trägt positiv zur Erhöhung der Lesbarkeit des MNPs bei. Eine zusätzliche Erweiterung dient der Vermeidung von Fehlern in sehr umfangreichen und komplexen Netzplänen.

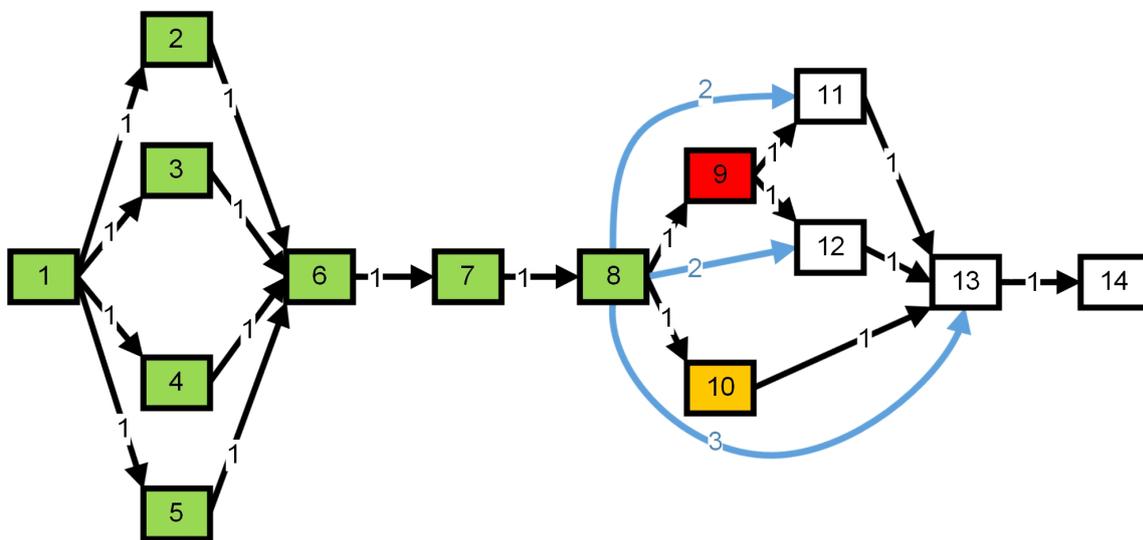


Abbildung 4.8: Beispiel eines fehlerverknüpften Vorgangs und Veranschaulichung differenter Vorgangstatus

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14
V1	2	1	1	1	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0
V2	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V3	0	0	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V4	0	0	0	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V5	0	0	0	0	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0
V6	0	0	0	0	0	2	1	0	3	3	4	4	0	0
V7	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	0
V8	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2	3	0
V9	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	1	1	2	0
V10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
V11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
V14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0

Abbildung 4.9: Darstellung der erweiterten Adjazenzmatrix einschließlich der bekannten Vorbedingungen

Wurde eine Vielzahl von alternativen Kanten definiert kann es vorkommen, dass sich unbewusst technisch unmögliche Abläufe ergeben. Bereits während der Planung fallen bestimmte Zustände auf, die zwingend gegeben sein müssen, um einen anderen Prozess überhaupt beginnen zu können. Es wurde deshalb die Möglichkeit implementiert, ebenso wie alternative Kanten definieren zu können, einzelne Vorbedingungen zu spezifizieren, um derartige unmögliche technische Abläufe zu vermeiden. Als Vorbedingungen (engl. **preconditions**) $P(i)$ werden somit Prozessschritte bezeichnet die essentiell für die Bearbeitung eines in Abhängigkeit stehenden Vorgangs notwendig sind. Hierfür wurden rückwärts gerichtete Kanten eingeführt, die zwei verschiedene Aussagen beinhalten können. Die entsprechenden Beziehungen wurden in den unteren Bereich der bereits bekannten Adjazenzmatrix hinterlegt. Die Abbildung 4.9 zeigt die entsprechend um Vorbedingungen erweiterte Version. Muss bei einem Vorbedingungsknoten ein bestimmter Bauzustand erreicht werden, der jedoch nicht dessen vollständiger Abarbeitung entspricht, wird die Vorbedingung als restriktiv angesehen und mit dem Wert 1 in der unteren Dreiecksmatrix verschlüsselt. Dieses verhält sich ähnlich zu der beschriebenen Prozent-Beziehung nach [44], wie sie im Abschnitt 3.2.1 erwähnt wurde. Die Beurteilung und Freigabe muss in dem Falle manuell erfolgen, da sie eine Überprüfung vor Ort am Produkt erfordert. Muss ein Vorgängerknoten vollständig abgeschlossen worden sein, um den aktuellen Knoten überhaupt beginnen zu können, wird diese Vorbedingung als unabdingbar definiert und mit dem Wert 2 hinterlegt. Eine unabdingbare Vorbedingung muss im vollen Umfang bearbeitet worden sein, bevor die beeinflusste Alternative begonnen werden kann. Sinnvoll sind diese Erweiterungen vor allem dann, wenn

die Vorbedingungen nicht den unmittelbaren Vorgänger, sondern einen im Netzplan noch weiter davor befindlichen Knoten betreffen. Die Abbildung 4.9 beschreibt eine um Vorbedingungen erweiterte Adjazenzmatrix. Die Abbildung 4.10 zeigt den zugehörigen Graphen. Es existieren nicht zu allen (bekannten) alternativen Prozessschritten dazugehörige Vorbedingungen. Dieses zeigt ein Vergleich der Abbildungen 4.6 und 4.10. Die Begründung hierfür liegt darin, dass nicht jeder Prozessschritt eine unmittelbare Abhängigkeit aufweist. Ein Beispiel wäre der Knoten V11, dieser hat keinen rückwärts gerichteten Adjazenten, ausgedrückt durch eine gelbe Kante. Die Durchführung des Vorgangs bedarf ausschließlich das Vorhandensein der Materialien Bauteil 7 und Bauteil 9 oder Bauteil 10. Eine Notwendigkeit der Durchführung der anderen Vorgänge besteht jedoch nicht.

Im Praxiseinsatz dieser erweiterten Netzplanmethode ist davon auszugehen, dass sich die Inhalte in Bezug auf die Anzahl von vorhandenen alternativen Kanten und Vorbedingungen stetig weiterentwickeln. Bereits vor Produktionsbeginn bei der originären Erstellung können derartige Informationen nunmehr abgebildet werden. Dennoch ergeben sich durch die wachsende Erfahrung während des Produktionsverlaufs eine Vielzahl neuer Abarbeitungsmöglichkeiten, wie auch Einschränkungen in Form von Restriktionen. Der MNP wächst also mit der Zeit und erhöht stetig seine Aussagefähigkeit, Flexibilität und Genauigkeit. Um im Störfall dem Anwender eines solchen MNPs eine Auswahl geeigneter Alternativen unterbreiten zu können, wurden Prioritätskriterien definiert. Innerhalb des nachfolgenden Abschnitts werden diese differenziert betrachtet.

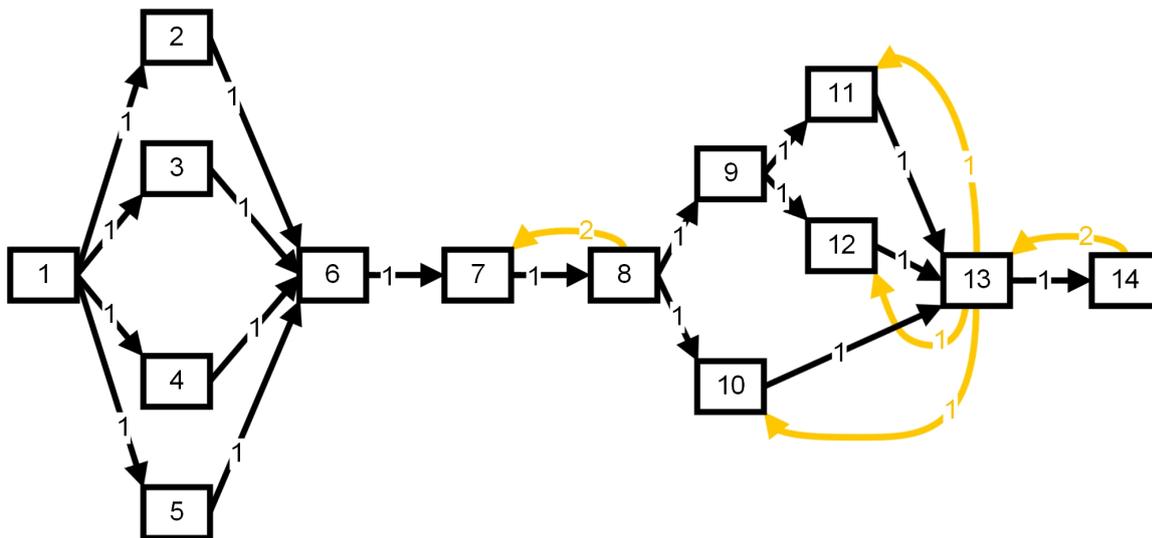


Abbildung 4.10: Darstellung des Vorbedingungsgraphen

4.3 Entscheidungskriterien für die Evaluierung von Ausweichvorgängen

Im produktionstechnischen Kontext kommen heuristische Verfahren zur Unterstützung der Entscheidungsfindung zum Einsatz. In vielen Fällen finden Prioritätsregelverfahren Verwendung, da diese auf verständliche Weise durch das Programm getroffene Auswahlen für den Anwender als nachvollziehbar erscheinen lassen können. Durch die Verwendung möglichst anschaulicher Heuristiken wird die Akzeptanz zur Verwendung einer solchen im Unternehmen erhöht. Aus diesem Grund wurde eine Heuristik entwickelt die dem Prozessverantwortlichen nachvollziehbare Ausweichvorgänge präsentiert.

Eine zusätzliche Begründung für die Einfachheit der erarbeiteten Heuristik, ist die geforderte Allgemeingültigkeit der MNP-Methodik. Diese beinhaltet die Anwendbarkeit der Theorie auf andere als den im Anwendungsbeispiel dargestellten Produktionsprozess. Deshalb wurden Parameter verwendet die im Allgemeinen in einer Vielzahl von Herstellungsprozessen zu finden sind. Ist ein Knoten aufgrund eines technischen Problems gesperrt und verfügt über keine unmittelbaren Nachfolger im Soll-Prozess, jedoch über mehrere mittelbare Nachfolger aufgrund von vorhandenen alternativen Kanten, ist eine Priorisierung der in Frage kommenden alternativen Knoten erforderlich. Wie viele alternative Knoten zur Auswahl stehen, hängt vom Suchhorizont ab. Möglich sind Einschränkungen bezüglich der maximal zulässigen Penalty und somit der Anzahl übersprungener Knoten im Soll-Prozess. Je mehr Knoten übersprungen werden, umso größer ist der zu erwartende negative Einfluss auf den Montageablauf insgesamt. Typisch für derartige Netzpläne ist jedoch auch das Vorhandensein sogenannter Sammelknoten, bei denen es sich in der Regel um Systemprüfungen handelt, die erst möglich sind, wenn alle zum System gehörigen Komponenten vollständig verbaut wurden. Im Netzplan bündeln sie demnach alle zuvor parallelen Stränge. Der Suchhorizont kann also auch bis zum nächsten Sammelknoten ausgedehnt werden. Die Auswahl und Priorisierung der innerhalb des gewählten Suchhorizonts in Betracht kommenden alternativen Knoten erfolgt in mehreren Stufen.

Der Ausgangspunkt hierbei sind die alle registrierten Ausweichvorgänge für den jeweiligen Knoten. Diese beinhalten alle parallelen Vorgänge, sowie die während der Planungsphase definierten Alternativvorgänge. In der Abbildung 4.11 sind die einzelnen Stufen des Prioritätsregelverfahrens zusammenfassend dargestellt. Das Verfahren stützt sich auf insgesamt sechs Ebenen, bei denen zwischen jeweils drei Auswahl- und drei Priorisierungsschritten unterschieden wird.

Zur Verdeutlichung dieser Evaluierungsvorgehensweise werden unter Verwendung des MNPs aus der Abbildung 4.8 die jeweiligen Parameter anhand des gestörten Knotens V9 erläutert.

(I) Auswahl:

Im ersten Schritt werden die Ausweichvorgänge auf die Freigabe zur Produktion untersucht. Die im Netzplan dargestellten Vorgänge sind für die erfolgreiche Produktherstellung notwendig. Jedoch ist zu beachten, dass nicht alle aufgeführten Prozessschritte zeitgleich in die Produktion eingesteuert werden. Dieses ist darin begründet, dass für die Erstellung eines Netzplans alle grundlegenden Vorgänge bekannt sein müssen. Deren Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen sind essentiell, um einen Netzplan zu generieren. Jedoch sind bei Produktionsstart nicht immer alle Ressourcen, wie Produktionskapazitäten oder Vorgangsinformationen vorhanden oder bekannt, um alle Vorgänge für die Produktion freizugeben. Zusätzlich müssen für einige Prozessvorgänge definierte Prozessfortschritte erreicht sein, um diese Aufträge durchführen zu können. In diesen Fällen ist eine frühere Freigabe bevor dieser Fortschritt erreicht werden konnte nicht notwendig. Somit kann es vorkommen, dass für einen fehlerbehafteten Prozessschritt Ausweichvorgänge hinterlegt sind, die noch nicht für die Produktion zu Verfügung stehen. Daher besteht die Notwendigkeit die jeweiligen Schritte auf Produktionsfreigabe zu prüfen, damit diese als Ausweichvorgänge in Betracht gezogen werden können.

Die Menge der Ausweichvorgänge für $V9$ entspricht $EN(V9) = \{V10, V11, V12, V13\}$. Aufgrund der unmittelbaren Beziehungen der Ausweichvorgänge zu den gestörten Vorgang wird die Annahme getroffen, dass alle Ausweichvorgänge bereits für die Produktion freigegeben sind und folglich als Ausweichvorgänge zur Verfügung stehen. Es wird somit kein Ausweichvorgang aus der Menge $EN(V9)$ entfernt.

(II) Auswahl:

Im zweiten Schritt wird die Materialverfügbarkeit der jeweiligen Prozessschritte geprüft. Um erhöhte Lagerkosten zu vermeiden, verwenden Unternehmen Just-in-Time Prinzipien. Materialien werden erst angeliefert, sobald diese am Produktionsstandort benötigt werden. Daher kann es vorkommen, dass Materialien für Ausweichvorgänge nicht im Unternehmen vorrätig sind. Unter Verwendung dieses Selektionsparameters wird die Nichtdurchführbarkeit von Ausweichvorgängen aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Materialien vermieden. Eine Überprüfung ist daher unumgänglich und stellt eine Prozessdurchführbarkeit sicher.

Unter Anwendung des Filters der Materialverfügbarkeit wird die Menge $EN(V9)$ um den Vorgang $V12$ reduziert. Es wird angenommen, dass die Materialien zur Bearbeitung zum derzeitigen Zeitpunkt nicht zur Verfügung stehen. Potentielle Gründe könnten Lieferschwierigkeiten des Lieferanten sein. Die Menge der Ausweichvorgänge umfasst somit $V10, V11$ und $V13$.

(III) Auswahl:

Im dritten Schritt werden das Vorhandensein und die Erfüllung von Vorbedingungen geprüft. Es bleiben nur Knoten in der engeren Auswahl, die keine unerfüllten unabdingbaren oder restriktiven Vorbedingungen aufweisen. Überprüft wird diese Restriktion auf Basis der möglichen Knotenstatus (-2 bis 2). Vorbedingungen mit einem Status eines negativen Integers (-2 oder -1) befinden sich selbst in dem Prozess der Wiedereingliederung und werden daher als nicht hinreichend bearbeitet angesehen. Folglich werden Alternativen mit derartigen Vorbedingungen nicht für die Menge möglicher Ausweichvorgänge berücksichtigt. Analog verhält es sich bei dem Status mit dem Wert 0 , wodurch ein nicht begonnener Vorgang spezifiziert wird. Ein derartiger Knoten entfällt aus der Auswahl, da mit Sicherheit kein definierter Bearbeitungsstand vorliegt. Diese Vorgehensweise ist bei beiden Vorbedingungsarten identisch. Bei Existenz einer restriktiven Bedingungen ist eine manuelle Entscheidung erforderlich, wenn der mit der Vorbedingung verknüpfte Knoten den Status 1 „in Bearbeitung“ aufweist und damit zwar begonnen aber noch nicht vollständig abgearbeitet ist. In diesem Fall bedarf es einen Experten, um zu prüfen, ob der Bearbeitungsfortschritt der restriktiven Vorbedingung ausreichend ist, um die abhängige Alternative durchführen zu können. Ist der Status hingegen 2 kann der Knoten in der Auswahl verbleiben, da er vollständig abgeschlossen ist und somit jeder Zwischenstand als erfüllt betrachtet werden kann. Hinsichtlich der Erfüllung der unabdingbaren Vorbedingungen ist eine automatisierte Entscheidung auf Basis der Status der entsprechenden Vorgängerknoten wie zuvor beschrieben leicht möglich, da solch eine Vorbedingung voll umfassend abgeschlossen sein muss.

In der Abbildung 4.8 ist der Knoten $V10$ orange gefärbt. Dieser befindet sich somit aktuell in Bearbeitung, wodurch eine Durchführung als Ausweichvorgang für $V9$ nicht realisierbar ist. Das Ergebnis dieses Selektionsschrittes ist folglich die Reduzierung von $EN(V9)$ um das Element $V10$.

(I) Priorisierung:

Im vierten Schritt, die erste Priorisierungsstufe, werden die alternativen Knoten nach ihrem Kantengewicht w_{ij} sortiert. Dieses beschreibt die Abweichung vom Soll-Prozess durch die Bearbeitung eines Ausweichvorgangs. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass der störende Einfluss auf den Soll-Prozess umso größer ist, je mehr Knoten übersprungen werden. Eine höhere Anzahl übersprungener Knoten, erhöht das Kantengewicht und damit die Strafe zur Nutzung der Alternative. Das Ziel der Planung ist es, mit möglichst geringem Einfluss nach der Bearbeitung eines Ausweichvorgangs zum idealen Prozessablauf zurückkehren zu können. Knoten mit einer geringeren Strafe sind daher bevorzugt gegenüber solchen mit einem höheren Wert abzuarbeiten. Vorgänge paralleler Stränge, wie sie beispielsweise in der Abbildung 4.6 vorzufinden sind,

weisen ein Kantengewicht von $w_{ij} = 1$ und somit auch eine Strafe mit identischen Wert auf. Bei Durchführung im Störfall führen diese nicht zu einer Abweichung vom Soll-Prozess, weshalb Parallelvorgänge grundsätzlich als mögliche Ausweichvorgänge bevorzugt behandelt werden.

Die Priorisierungsschritte dienen nicht zur Reduktion der Menge an Ausweichvorgängen. Es wird ausschließlich deren Reihenfolge unter Vergleich der Kantengewichte in der Liste neu sortiert. Die Alternativen weisen ein Kantengewicht $w_{V8,V11} = 2$ und $w_{V8,V13} = 3$ auf. Ergo wird bei der Bearbeitung von $V13$ die Abweichung zum Soll-Prozess als größer eingeschätzt und der Vorgang daher geringer im Vergleich zu $V11$ priorisiert. Infolgedessen behält die bereits angewandte Reihenfolge der Ausweichvorgänge ihre Gültigkeit. Diese Reihenfolge wird aufgrund der Anzahl an Ausweichvorgängen unter Anwendung der nachfolgenden Parameter nicht verändert. Dennoch werden auch die nachfolgenden Parameter unter Nutzung dieses Beispiels erläutert.

(II) Priorisierung:

Im zweiten Priorisierungs- und fünften Gesamtschritt wird der Einfluss der alternativen Knoten auf den Gesamtprozess bewertet. Es werden die Anzahl an eingehenden und ausgehenden Kanten und somit der Knotengrad des jeweiligen Alternativknotens im Soll-Prozess bestimmt. Hieraus ergeben sich die Anzahl an regulären Vorgängern und Nachfolgern der Alternativknoten. Dementsprechend werden Beziehungen zu Alternativen anderer Störvorgänge außer Acht gelassen und nicht für die Zählung von Nachfolgeknoten berücksichtigt. Verbindungen zu Alternativen anderer Störvorgänge sind bestehenden Verknüpfungen, die eine spezifizierte Alternative vorweist, wenn diese als Vorgänger eines Knotens auftritt für den ebenfalls Alternativknoten im Falle einer Störung deklariert sind. Verfügt ein Knoten über viele Vorgänger und/oder Nachfolger, ist er im Gesamtablauf von einer höheren Bedeutung als ein Knoten, der nur wenige oder sogar nur einen Vorgänger und einen Nachfolger aufweist. Daraus schlussfolgernd führen Alternativknoten mit einer geringeren Prozessrelevanz zu einer geringeren Abweichung des Soll-Prozesses, weshalb derartige Alternativen höher priorisiert werden.

Würden die vorangegangenen Parameter ergeben, dass $V11$ und $V12$ weiterhin gleichgestellt sind, so würden diese Alternativen für $V9$ nun auf Basis der Anzahl an Vorgänger und Nachfolger verglichen werden. In der Abbildung 4.8 ist zu erkennen, dass beide Knoten den identischen Vorgänger $V9$ und identischen Nachfolger $V13$ vorweisen. Dementsprechend ist der Knotengrad von $V11$ und $V12$ übereinstimmend. Die Anwendung des dritten Priorisierungsparameters würde somit weiterhin eine Gleichstellung beider Alternativen ergeben.

(III) Priorisierung:

Abgeschlossen wird das Priorisierungsverfahren mit dem sechsten Schritt unter Einbeziehung der Durchführungsdauer der Alternative. Derjenige, der eine Störung im System anlegt und damit einem Knoten im Netzplan den Status „blockiert“ zuweist, wird angehalten, die erwartete Dauer bis zur Behebung des Fehlers anzugeben. Damit soll vermieden werden, dass alternative Knoten begonnen werden, die eine längere Vorgangsdauer t_i haben als die Fehlerbehebungszeit des übersprungenen Knotens beträgt. Es werden also alle Knoten schlechter bewertet, deren Bearbeitung länger dauert als die Zeit bis zur Behebung des Problems und damit bis zur Rückkehr zum Soll-Prozess erforderlich ist.

Dennoch kann die Durchführung einer Alternative mit einer längeren Vorgangsdauer, als die Dauer zur Behebung der Störung die geeignetere Wahl gegenüber des Wartens bis zur Störungsbeseitigung sein. Mit der Durchführung der Alternative wird ein Fortschritt innerhalb des Produktionsprozesses erzielt. Wird hingegen die Beseitigung der Störung abgewartet und anschließend der Prozess fortgeführt, kann kein Progress erzielt werden.

Die Ausweichvorgänge des Beispiels $V11$ und $V13$ würden bei weiteren Ausweichvorgängen mit identischen Kantengewicht mit den zusätzlichen Alternativen auf Basis der Vorgangsrechnung gegenübergestellt werden. Angenommen $V12$ stünde weiterhin zur Verfügung, so würden die Vorgangszeiten von $V11$ und $V12$ mit der Behebungsdauer der Störung verglichen werden. Begründet ist dieses durch das identische Kantengewicht von $V11$ ($w_{V8,V11} = 2$) und $V12$ ($w_{V8,V12} = 2$). Erkennbar ist dieses in der Abbildung 4.8. Wäre die Bearbeitungsdauer von $V12$ geringer als die Dauer von $V11$ und geringer als die Behebungsdauer der Störung, würde $V12$ in der Liste der Ausweichvorgänge an erster Stelle stehen. $V13$ wird in die Betrachtung nicht mit einbezogen, da diese Alternative aufgrund des höheren Kantengewichts $w_{V8,V13} = 3$ bereits schlechter bewertet wurde als $V11$.

Das Resultat der Evaluation auf Basis der vorgestellten Parameter ist eine nach den Prioritäten sortierte Liste, die anstelle des blockierten Knotens zur Verfügung stehende Ausweichvorgänge darlegt. Verbleibt aufgrund des Ausschlusses von Knoten in den ersten beiden Schritten kein Knoten in der Liste ist es am günstigsten, auf die Behebung der Störung zu warten. In der Praxis wird es in einer derartigen Situation auch vorkommen, dass manuell nach noch nicht im Netzplan hinterlegten Alternativen gesucht wird. Sofern diese dann umsetzbar sind und im Netzplan hinterlegt werden, stehen sie bei einem nächsten Durchlauf als zusätzliche Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung. Die vorgestellten Parameter ermöglichen die Evaluierung der jeweiligen Ausweichvorgänge für einen durch eine Störung blockierten Knoten. Dieses generierte Wissen unterstützt die Entscheider eine fundierte Wahl zur Prozessfortführung zu treffen.

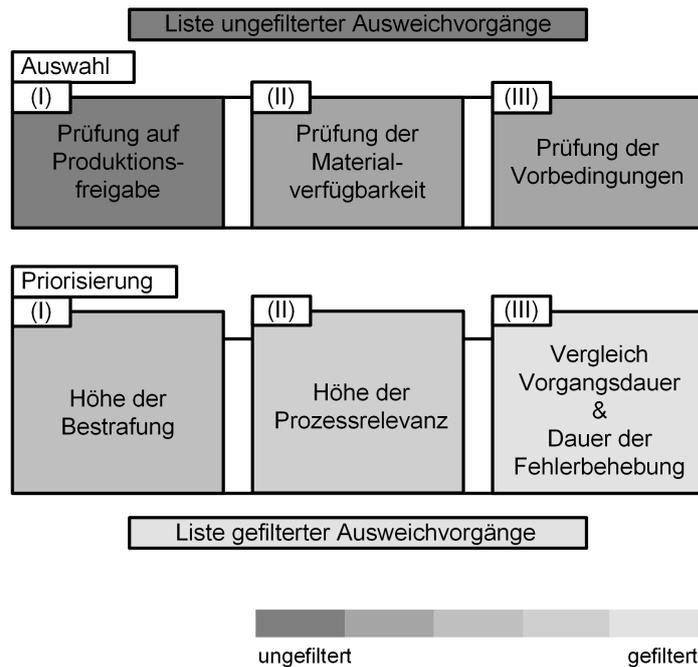


Abbildung 4.11: Prioritätsregelverfahren zur Unterstützung der Entscheidungsfindung

Neben der Auswahl einer geeigneten Alternative, sind, im Interesse des Prozesses und auch des Managements, veränderte Prozesszeiten durch die Störung und gewählte Alternative ebenfalls von Bedeutung.

4.4 Vorgangszeitberechnung im Maximalnetzplan

Ein bedeutender Vorteil bei der Nutzung von Netzplantechniken liegt in der Möglichkeit, unterschiedliche Zeitattribute zu berechnen. Im Abschnitt 3.2.1 wurden bereits einzelne Formeln für die Berechnung eines Netzplans der Metra Potential Methode vorgestellt. Besonders prägnant ist das Potential, zeitkritische Vorgänge in den Fokus der Betrachtung zu legen. Solch ein zeitkritischer Vorgang liegt vor, sofern die Formel 3.7 für GP eines Vorgangs i den Wert Null ergibt. In derartigen Fällen ist ein zeitlicher Puffer zwischen FAZ und SAZ nicht existent, wodurch eine zeitliche Verzögerung in der Vorgangsdurchführung sich negativ auf den Gesamtprozess auswirkt. Eine Störung eines solchen Knotens führt zu einer Verlängerung der Prozesslaufzeit, welche nachfolgend auch als Durchlaufzeit (DLZ) bezeichnet wird. Daraus können verspätete Lieferungen inklusive Strafzahlungen gegenüber den Kunden resultieren. Diese Vorgänge sollten deshalb im Laufe der Prozesssteuerung einem besonderen Fokus unterliegen. Durch die beschriebene Problematik, ist es daher eine Notwendigkeit innerhalb des MNPs ebenfalls eine

Zeitberechnung zu hinterlegen. Nachfolgend wird ein Vorschlag zur Berechnung der Vorgangszeiten innerhalb der MNP-Methodik beschrieben. Hierbei wird zwischen der Berechnung des Soll-Prozessablaufs und alternativen Abläufen im Falle von Störungsereignissen unterschieden. Der Soll-Prozess wird unter der Prämisse berechnet, dass im Laufe des Produktionsprozesses die geplanten Prozesssequenzen ohne den Eintritt einer Störung durchgeführt werden können. Diese Berechnung ist somit analog zu der Zeitberechnung eines MPM-Netzplans mit der Ausnahme der zeitlichen Kantenattribute, vergleichen Sie hierzu Abschnitt 3.2.1. Diese sind innerhalb der MNP-Methodik nicht existent. Die Methodik dieser Berechnung basiert auf der Analogie zum genannten deterministischen Netzplan. Sie umfassen die Identifizierung zeitkritischer Vorgänge, sowie des frühesten und spätesten Endzeitpunkts des letzten Prozessvorgangs und somit den Fertigstellungszeitpunkt des Gesamtprozesses. Zudem ist die DLZ zur Herstellung des Produktes durch die Differenz des FAZ des ersten Vorgangs und des FEZ des letzten Vorgangs quantifizierbar.

4.4.1 Terminierung des Soll-Prozesses

Die Berechnung ist auf analoge Weise zu dem MPM-Verfahren in eine Vorwärts- und Rückwärtsrechnung unterteilt, mithilfe dessen die frühesten und spätesten Anfangs- und Endzeiten kalkuliert werden können. Basiert die Kalkulation der Parameter auf dem idealen Prozessablauf, werden diese mit dem griechischen Buchstaben ι gekennzeichnet.

Frühester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i im idealen Prozessablauf:

$$FAZ_i^\iota := \max \{ FEZ_h^\iota \mid h \in V(i) \}, \quad \text{für } i = 2, \dots, n. \quad (4.1)$$

Wird die Prozessterminierung unter Verwendung der Vorwärtsrechnung begonnen, kann die Produktionsplanung und -steuerung einen Produktionsstarttermin annehmen. Für Beispielrechnungen wird im Allgemeinen der Zeitpunkt Null gewählt [77]. Aus diesem Grund beginnt die Kalkulation von FAZ_i^ι mit dem zweiten Vorgang des Netzplans. Der FAZ_i^ι basiert auf dem Maximum der FEZ_h^ι . Dieses begründet sich in der Nichtexistenz von zeitlichen Kantenattributen innerhalb des MNPs. Innerhalb der deterministischen Netzplantechniken ermöglichen diese Kantenattribute die Abbildung von Wartezeiten zwischen den einzelnen Vorgängen [22]. In der Abbildung 3.5 ist ein entsprechender Netzplan abgebildet. Unter Nutzung des MNPs können solche Wartezeiten durch Wartevorgänge beschrieben werden, wodurch eine gesonderte Addition der zeitlichen Kantenattribute entfällt. Der früheste Anfangszeitpunkt eines Folgevorgangs entspricht somit dem maximalen frühesten Endzeitpunkt seiner Vorgänger.

Die Berechnung des frühesten Endzeitpunkts eines Vorgangs erfolgt hingegen auf der identischen Vorgehensweise zu dem MPM-Verfahren.

Frühester Endzeitpunkt eines Vorgangs i im idealen Prozessablauf:

$$FEZ_i^t := FAZ_i^t + t_i^t, \quad \text{für } i = 1, \dots, n. \quad (4.2)$$

Mit Definition des FEZ des letzten Prozessvorgangs n ist die Vorwärtsrechnung innerhalb des MNPs abgeschlossen.

Für die Durchführung der Rückwärtsrechnung entspricht bei zuvor erfolgter Vorwärtsrechnung der SEZ von n dessen berechneten FEZ . Demgemäß erfolgt der Berechnungsbeginn auf analoge Weise wie von den MPM-Netzplänen. Die Formeln für die Rückwärtsrechnung sind nachfolgend aufgeführt.

Spätester Endzeitpunkt eines Vorgangs i im idealen Prozessablauf:

$$SEZ_i^t := \min \{SAZ_j^t \mid j \in N(i)\}, \quad \text{für } i = n - 1, \dots, 1. \quad (4.3)$$

Innerhalb des MNPs entspricht der SEZ eines Vorgangs i dem Minimum der SAZ seiner Nachfolger. Die Zeitrechnung differenziert sich hier erneut zu den bekannten deterministischen Verfahren aus dem Abschnitt 3.2.1. Die Begründung fundiert sich wiederholt auf die nicht benötigten zeitlichen Kantenattribute.

Der SAZ berechnet sich hingegen analog zu den dargelegten deterministischen Verfahren.

Spätester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs i im idealen Prozessablauf:

$$SAZ_i^t := SEZ_i^t - t_i^t, \quad \text{für } i = n, \dots, 1. \quad (4.4)$$

Nach erfolgter Berechnung dieser unterschiedlichen Prozesszeiten ist es möglich, die GP unter Verwendung der Formel 4.5 eines jeden Vorgangs i zu bestimmen. Dieses führt zur Identifikation der kritischen Wege oder auch Pfade im MNP. Nach Verwendung der innerhalb des Abschnitts 3.2.1 erläuterten Definition sind Vorgänge und ihre Nachfolger mit einem $GP = 0$ als kritische Wege erkennbar. Durch die Beschreibung der GP eines Vorgangs kann dargelegt werden, welcher Vorgang einer Störung mit der GP entsprechenden zeitlichen Ausmaß unterliegen kann ohne einen zeitlichen Einfluss auf nachfolgende Vorgänge vorzuweisen.

Gesamte Pufferzeit eines Vorgangs i im idealen Prozessablauf:

$$GP_i^l := SAZ_i^l - FAZ_i^l, \quad \text{für } i = 1, \dots, n. \quad (4.5)$$

Hinzukommend ist anzumerken, dass diese Vorgehensweise in Abhängigkeit zu den verwendeten Planungsverfahren eines Unternehmens steht. Die dargelegte Beschreibung terminiert den Soll-Ablauf unter Verwendung der Vorwärtsrechnung, ergo wird der Startzeitpunkt des Prozesses vorgegeben. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, mit der Rückwärtsrechnung beginnend die Terminierung durchzuführen. Hierbei wird ein Fertigstellungstermin definiert und ausgehend von SAZ und SEZ die Vorgangszeitplanung getätigt.

Die Tabelle 4.1 listet die unter Verwendung der beschriebenen Zeitrechnung kalkulierten Vorgangszeiten des Beispiels aus Abschnitt 4.1 auf. Ausführlich dargelegt wird die Terminierung unter Anwendung eines gewünschten Startzeitpunkts, dem Zeitpunkt Null. $V1$ und $V14$ dienen zur strukturellen Ausrichtung des Netzplans, um diesen mit einem Knoten (Quelle) beginnen und mit einem Knoten (Senke) beenden zu können. Derartige Vorgänge beinhalten keinerlei Tätigkeiten für die Durchführung des Produktionsprozesses und weisen deshalb eine Dauer von $t_i^l = 0$ auf. Die durchgeführte Terminierung hat die Existenz mehrerer kritischer Pfade innerhalb des Prozesses zum Ergebnis. Ausschließlich der Prozessvorgang $V10$ weist einen zeitlichen Puffer auf, wodurch ein verzögertes Beginnen oder Beenden dieses Vorgangs im Rahmen der GP ohne Auswirkung auf den Gesamtprozess möglich wird [77]. Eine Verzögerung während der Bearbeitung aller übrigen Vorgänge würde hingegen zu einer Verlängerung der DLZ und damit einhergehend zur Verschiebung des Produktfertigstellungsdatums führen.

Die entsprechend berechneten Vorgangszeitpunkte unter Vorgabe eines Fertigstellungstermins und damit die Terminierung beginnend mit der Rückwärtsrechnung sind im Anhang A dieser Arbeit aufgeführt.

Neben der zeitlichen Konkretisierung des idealen Prozesses wird in den nachfolgenden Abschnitten ein Vorschlag für die Berechnung von Vorgangszeiten im Falle von Störungsvorkommnissen unterbreitet. Die entsprechenden Definitionen werden in den Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 vorgenommen. Der Wiedereingliederungszeitpunkt des störungsbehebenden Knotens steht in Abhängigkeit der durchzuführenden Alternative. Es besteht hierbei keine Notwendigkeit, die Gesamtheit an Ausweichvorgängen in diese Vorgangsterminierung mit einzubeziehen. Die parallelen Vorgänge, deren Vereinigung mit den Alternativen eines Vorgangs die Menge an Ausweichvorgängen bilden, lösen keine terminliche Anpassung aus. Die parallelen Vorgänge verursachen keine Abwei-

Tabelle 4.1: Vorwärtsterminierung des Prozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter der Annahme fiktiver Vorgangszeiten

Vorgangsnummer	t_i^l	FAZ_i^l	FEZ_i^l	SAZ_i^l	SEZ_i^l	GP_i^l
1	0	0	0	0	0	0
2	10	0	10	0	10	0
3	10	0	10	0	10	0
4	10	0	10	0	10	0
5	10	0	10	0	10	0
6	20	10	30	10	30	0
7	7	30	37	30	37	0
8	15	37	52	37	52	0
9	13	52	65	52	65	0
10	16	52	68	53	69	1
11	4	65	69	65	69	0
12	4	65	69	65	69	0
13	11	69	80	69	80	0
14	0	80	80	80	80	0

chung des Soll-Prozesses, weshalb eine bereits erfolgte Terminierung mittels Vorwärtsrechnung weiterhin ihre Gültigkeit besitzt. Dieses gilt ebenso für die direkten und indirekten Nachfolger der parallelen Knoten, sofern diese nicht mit dem Störvorgang oder dessen Nachfolgern per Kanten verbunden sind. Hingegen muss die Rückwärtsterminierung ebenfalls für die Parallelknoten erfolgen. Aufgrund der Störung können sich deren spätesten Endzeiten verändern.

Es ist nicht erforderlich, die Neuberechnung der Alternativen zu Beginn der Produktion während der Planungsphase für jede mögliche Alternative durchzuführen. Andernfalls müsste für jeden Vorgang die Annahme eines Ausfalls getätigt werden und in Abhängigkeit der möglichen Anzahl an Alternativen ein entsprechendes Szenario berechnet werden. Der Eintritt einer ungeplanten Störung ist jedoch nicht deterministisch bestimmt. Eine Aussage über die Verlängerung der Prozesszeit durch die Bearbeitung einer Alternative vor dem Produktionsbeginn würde ausschließlich einen Vorteil bieten, sofern die Störung des Vorgangs mit berechneter Alternative inklusive der kalkulierten Behebungsdauer tatsächlich eintritt und die spezifische Alternative Verwendung finden würde. Hierbei ist fraglich, ob der Mehrwert an Informationen über den zeitlichen Umfang bei der Durchführung einer Alternative den Planungsaufwand zur Kalkulation jedes Störungsszenarios rechtfertigt. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Auswirkungen ausschließlich bei Eintritt einer Störung von Relevanz sind. Aus diesem Grund wird die Terminierung für die vakanten Alternativen zu dem Zeitpunkt des Störungseintritts getätigt. Weiterführend können

in solch einem Fall bereits aufgetretene zeitliche Veränderung durch Störungsaufkommnisse und durchgeführten Alternativen in der Kalkulation berücksichtigt werden.

Hinzukommend kann auf die Neuberechnung der beendeten Vorgänge verzichtet werden. Diese können gedanklich aus dem Netzplan entfernt werden. Deren Aufgaben sind umfänglich abgeschlossen, daher unterliegen abgeschlossene Knoten keinerlei Beeinflussung durch nachfolgenden Störungsvorkommnisse.

4.4.2 Vorwärtsterminierung im Störfall

Die hier vorgeschlagene Vorwärtsterminierung basiert auf den bereits beschriebenen Formeln 4.1 - 4.3 für früheste und späteste Anfangszeitpunkte des MNPs für die Durchführung eines Prozessablaufs ohne Störungseintritt. Die Kalkulation der frühesten Zeitattribute basiert nicht mehr auf den direkten Vorgängern der Alternativen innerhalb des Soll-Ablaufs, sondern auf den Vorgängern des störungsbehafteten Knotens mit denen die Alternative über eine Kante verbunden ist. Im Falle einer Störung erlangen diese innerhalb des MNPs in Blau dargestellten und mit einem Kantengewicht bewerteten Relationen ihre Relevanz. Ein Beispiel entnommen aus der Abbildung 3.5 soll dieses verdeutlichen. Unterliegt der Vorgang $V7$ einer Störung so basiert die Berechnung der Vorgangszeiten auf Kanten $(V6, V9)$, $(V6, V10)$, $(V6, V11)$, $(V6, V12)$ in Abhängigkeit der gewählten Alternative $AN(V7) = \{V9, V10, V11, V12\}$ und nicht auf den Kanten des geplanten Prozessablaufs $(V8, V9)$, $(V8, V10)$, $(V9, V11)$, $(V9, V12)$.

Anstelle des im vorigen Abschnitts 4.4.1 verwendeten Indizes ι zur Beschreibung des Soll-Prozessablaufs werden die nachfolgenden Formeln für den störungsbehafteten Prozessablauf mit einem σ indiziert. Die Menge der fehlerbehafteten Vorgänge wird durch den Buchstaben S beschrieben, somit ist $s \in S$.

Die dargelegte Terminierung ist in Abhängigkeit der Anzahl an aufgetretenen Störungen sowie deren entsprechenden Alternativen durchzuführen. Die Vorgangszeiten sind bei jeder Verwendung eines alternativen Vorgangs erneut zu kalkulieren. Es sind lediglich diejenigen Prozessvorgänge neu zu terminieren, deren Bearbeitungen noch nicht begonnen wurden. Darüber hinaus sind Störvorgänge, bei denen bereits eine Behebung der Störung durchgeführt wird, ebenfalls aus der Terminierung auszuschließen.

Die Berechnung wird mit den alternativen Vorgängen begonnen, da diese gedanklich den neuen Anfang des MNPs repräsentieren. Anschließend werden die Vorgangszeiten des störungsbehafteten Vorgangs und daraufhin dessen Nachfolger kalkuliert.

Die frühesten Anfangszeitpunkte der Alternativen des störungsbehafteten Knotens sind aufgrund der gleichbleibenden Vorgänger des Störknotens für alle $j = a_1, \dots, a_n$ identisch.

Frühester Anfangszeitpunkt der Alternative $a \in AN(s)$ des Störknotens s :

$$FAZ_j^\sigma := \max \{FEZ_h^\sigma \mid h \in V(s)\}, \quad \text{für } j = a_1, \dots, a_n. \quad (4.6)$$

Die Kalkulation des FAZ_i^σ unterscheidet sich zum Soll-Ablauf auf der bereits beschriebenen Verwendung des Maximums des FEZ_i^σ der Vorgänger des Störknotens. Die Alternative wird im MNP gedanklich zwischen den Störknoten und dessen Vorgänger eingefügt.

Die Berechnung des FEZ_i^σ wird auf Basis des FAZ_i^σ und der regulären Dauer t_a^t der Alternative sowie einer Strafzeit t_a^σ definiert.

Frühester Endzeitpunkt der Alternative $a \in AN(s)$ des Störknotens s :

$$FEZ_j^\sigma := FAZ_j^\sigma + t_j^t + t_j^\sigma, \quad \text{für } j = a_1, \dots, a_n. \quad (4.7)$$

Da die Durchführung einer Alternative eine Abweichung vom geplanten Soll-Prozess hervorruft, wird zur Berechnung der Prozesszeit die Berücksichtigung einer Strafzeit t_a^σ vorgeschlagen. Der FEZ erhöht sich auf Basis der Veränderung zum Soll-Prozess um diese Strafzeit. Das Ausmaß dieser additionalen Zeit ist von der jeweiligen Alternative abhängig. Die Strafzeit reflektiert den Einfluss der Alternative auf den Produktionsprozess aufgrund eines möglichen Mehraufwands in deren Durchführung begründet durch die vorzeitige Bearbeitung. Die jeweiligen Parameter sind Vorgangs spezifisch und daher für jede Alternative zu bestimmen. Die Priorisierungsparameter der Ausweichvorgänge, die im Abschnitt 4.3 definiert sind, stellen die Grundlage für die Berechnung der Strafzeit. Sie dienen zur Einschätzung differenter Auswirkungen der Alternativen auf den Prozess. Bei der Kalkulation der Strafzeit wird das Kantengewicht w_{ij} der Alternative, der Knotengrad g_i , ein Strafzeitfaktor (SF), sowie mögliche zusätzliche Zeiteinheiten (zZE) berücksichtigt. w_{ij} spiegelt hierbei die Abweichung vom Soll-Prozess aufgrund der Durchführung der Alternative wieder. g_i beschreibt die Relevanz des alternativen Vorgangs innerhalb des Gesamtprozesses. SF überführt diese Werte unter Verwendung eines wählbaren Faktors in Zeiteinheiten (ZE). Die Berechnung der Strafzeit unterscheidet sich in zwei Fällen. Die zZE unterstreichen diese Unterscheidung.

$$t_j^\sigma := \begin{cases} (w_{ij} + g_j) \cdot SF + zZE & \text{falls } t_j^t > t_b^\sigma, \\ (w_{ij} + g_j) \cdot SF & \text{falls } t_j^t \leq t_b^\sigma, \end{cases} \quad \text{für } j = a_1, \dots, a_n. \quad (4.8)$$

Die Differenzierung in zwei Fälle fundiert auf der Verwendung des zweiten Priorisierungsparameters. Dieser besagt, dass Ausweichvorgänge mit einer kleineren oder gleichen Vorgangsdauer t_a^t als die Fehlerbehebungsdauer t_b^s bevorzugt verwendet werden. Der erste Fall beschreibt die unmittelbare Durchführung des Vorgangs nach der Fertigstellung eines Alternativknotens $a \in AN(s)$. Dieses impliziert, dass die Vorgangsdauer der Alternative t_a^t größer ist als die geschätzte Dauer zur Beseitigung der Störung t_b^s . Folglich ist die Störungsbeseitigung in der Zeit der Durchführung des alternativen Vorgangs abgeschlossen, wodurch der behobene Störvorgang s unmittelbar nach dem Beenden der Alternative begonnen werden kann. Jedoch erhöht sich die Zeit bis zur Wiedereingliederung dieses Störvorgangs aufgrund der länger andauernden Bearbeitung der Alternative. Die Wiedereingliederungszeit t_w beträgt $t_w = (t_a^t + t_a^s)$.

Dieser Fall tritt ein sofern keinerlei anderen Alternativen mit einer geringeren oder identischen Dauer zur Verfügung stehen oder jede Dauer der alternativen Vorgänge größer als die geschätzte Störungsbehebungszeit ist. Andernfalls würde die Alternative bevorzugt bearbeitet werden, deren Vorgangsdauer kleiner ist als die geschätzte Dauer zur Störungsbeseitigung. Der ideale Prozessablauf ist vorrangig gegenüber des alternativen Ablaufs zu behandeln. Daher wird eine unverzügliche Wiedereingliederung des behobenen Störvorgangs in den Prozess angestrebt.

Der zweite Fall beachtet die Situation, dass die Beseitigung der Störung mehr Zeit als die Durchführung der Alternative benötigt. Die Wiedereingliederungszeit beträgt in diesem Fall $t_w = t_b^s$. Somit ist der früheste Anfangszeitpunkt des störungsbehafteten Knotens der Endzeitpunkt der Störungsbehebung. Während der Fehlerbehebung können Alternativen bearbeitet werden, wodurch die verbleibende Anzahl von offenen Vorgängen reduziert werden kann. Die Wiedereingliederungszeit fällt im zweiten Fall somit geringer im Vergleich zu Fall eins aus. Es bedarf bei einer ausreichend großen t_w eine situative Entscheidung, ob eine weitere Alternative begonnen oder bis zur Störungsbeseitigung gewartet werden soll. Bei letzterer Wahl ist eine erneute Kalkulation der Vorgangszeiten nicht notwendig.

Die Durchführung einer weiteren Alternative sollte unter Berücksichtigung der Liste mit den priorisierten Ausweichvorgängen getroffen werden, um den Einfluss auf den Prozess begrenzen zu können. Das verfolgte Ziel ist die schnellstmögliche Wiedereingliederung des behobenen Störvorgangs in den Produktionsprozess. Es wird daher vorgeschlagen die Strafzeit bei einer Alternative mit $t_a^t > t_b^s$ mit zZE zu belegen. Dieses unterstreicht die Aspekte der Priorisierung in der zeitlichen Berechnung.

Nach der Beschreibung der frühesten Anfangs- und Endzeitpunkte der Alternativvorgänge erfolgt die Ermittlung des frühesten Anfangs- und Endzeitpunkts des Störvorgangs s . Die Kalkulation des FAZ basiert ebenfalls auf der Unterscheidung der zwei Fälle $t_a^t > t_b^s$ oder $t_a^t \leq t_b^s$.

Frühester Anfangszeitpunkt des behobenen Störknotens s :

$$FAZ_s^\sigma := \begin{cases} FEZ_j^\sigma & | j \in AN(s) \text{ falls } t_j^t > t_b^\sigma, \\ FEZ_b^\sigma & \text{falls } t_j^t \leq t_b^\sigma. \end{cases} \quad (4.9)$$

Die Bestimmung der frühesten Endzeit ist analog zu der Terminierung mittels bereits dargelegten Formel 4.7 zur Berechnung der frühesten Endzeitpunkte der alternativen Vorgänge. Die Dauer der Störungsbeseitigung wurde in der Definition des frühesten Anfangszeitpunkts berücksichtigt und muss daher nicht für die Kalkulation des FEZ beachtet werden. t_s^σ entspricht der benötigten Dauer zur Beendigung des Vorgangs, nachdem die Störung behoben wurde. Wurde die Störung vor Beginn des Auftrags dokumentiert, ist $t_s^\sigma = t_i^t | s = i$. Andernfalls beschreibt t_s^σ die verbleibende benötigte Dauer für die Fertigstellung des Vorgangs s .

Frühester Endzeitpunkt des behobenen Störvorgangs s :

$$FEZ_s^\sigma := FAZ_s^\sigma + t_s^\sigma. \quad (4.10)$$

Die Berechnung ist für jede bekannte Alternative des gestörten Vorgangs durchzuführen. Der Berechnungsaufwand steht folglich in einem direkten Zusammenhang mit der Anzahl an möglichen Alternativen für den Knoten s . Der Eintritt einer Störung führt zu einer Verspätung des Störvorgangs, die sich im schlechtesten Fall auf den gesamten nachfolgenden Prozess auswirken kann.

Die zeitliche Verzögerung (engl. *time lag*) TL entspricht der Differenz zwischen den frühesten Endzeitpunkt FEZ_s^σ eines Störvorgangs s und dessen frühesten Endzeitpunkt im idealen Prozessablauf FEZ_s^l :

$$TL_s := FEZ_s^\sigma - FEZ_s^l. \quad (4.11)$$

Die Neukalkulation der nachfolgenden Vorgänge $N(i)$ ist bis zu dem Knoten im Prozess durchzuführen, der eine Nivellierung der durch den Störungseintritt verursachten zeitlichen Verzögerung hervorruft. Dieser Knoten wird als Nivellierungsknoten (engl. *leveling node*) l bezeichnet. Ein solcher Knoten weist ein FAZ_l^t auf, welches größer oder identisch mit dem FEZ_i^σ ist. Die zeitliche Nivellierung der Störung unterliegt der Prämisse, dass der Vorgang s sich nicht auf einem kritischen Pfad des Prozesses befindet und die Dauer der Störungsbehebung kleiner oder identische mit dem Gesamtpuffer des Störvorgangs ist. Andernfalls würde der FEZ_s^σ den maximalen frühesten Endzeitpunkt definieren und die nachfolgenden Prozesse diesen als FAZ_i^σ übernehmen.

Liegt der störungsbehaftete Knoten auf einem kritischen Pfad des Netzplans und somit $GP_s^l = 0$, wirkt sich die Verzögerung bis zum letzten Prozessknoten aus. In diesem Fall existiert kein Nivellierungsknoten, bzw. ist $l = n$. Eine Verschiebung des Fertigstellungsdatums ist dann eine Notwendigkeit.

Liegt die Störung auf einem Knoten mit parallelen Vorgängen, kann es vorkommen, dass der Störknoten nicht den maximalen FEZ aufzeigt. Der Störknoten dient dann nicht als Grundlage zur Berechnung der FAZ der Nachfolger. Dieses ist jedoch ausschließlich möglich, sofern die Durchführung der Alternative addiert mit der Dauer des behobenen Störknotens geringer ausfällt als die Fertigstellung der parallelen Vorgänge. Bei der Berechnung der Nachfolgeknoten ist es daher notwendig, das Maximum der frühesten Endzeitpunkte der entsprechenden Vorgänger zu beachten.

Frühester Anfangszeitpunkt der Folgeknoten des Störvorgangs s bis zu den Vorgängern des Nivellierungsknotens l :

$$FAZ_k^\sigma := \max \{FEZ_h^\sigma \mid h \in V(k)\}, \quad \text{für } k = s + 1, \dots, l. \quad (4.12)$$

Die Berechnung des frühesten Endzeitpunkts der Folgeknoten des Störvorgangs s ist ebenfalls bis zu den Vorgängern des Nivellierungsknotens l durchzuführen.

$$FEZ_k^\sigma := FAZ_k^\sigma + t_k^\sigma, \quad \text{für } k = s + 1, \dots, l - 1. \quad (4.13)$$

Die Rückwärtsterminierung ist für die Knoten eine Notwendigkeit, deren GP die zeitliche Verschiebung durch den Störungseintritt nicht ausgleichen können. Eine Anpassung von SEZ ist somit erforderlich.

4.4.3 Rückwärtsterminierung im Störfall

Die Rückwärtsterminierung beeinflusst im Gegensatz zur Berechnung von FAZ und FEZ ebenfalls die parallelen Vorgänge des Störvorgangs $PN(s)$. Die Folge kann eine Vergrößerung der GP der parallelen Knoten sein. Dieses ist darin begründet, dass der FEZ eines parallelen Vorgangs nicht neu berechnet wird. Hingegen dessen SEZ aufgrund der Störung sowie auf dem damit einhergehenden TL beruht und deshalb sich die GP vergrößert werden könnte. Eine Verringerung der GP ist hingegen ausgeschlossen, da eine Verzögerung nicht zu einer Verringerung des SEZ führen kann. Die Rückwärtsterminierung im Falle eines Störungsprozesses ist bei dem Knoten l oder n zu beginnen. Könnte die zeitliche Verzögerung der Störung aufgrund einer ausreichend

großen GP s nivelliert werden, ist die Berechnung ausgehend von Knoten l zu starten und mit dem Nachfolger des abgeschlossenen Vorgängers des Störvorgangs abzuschließen. Andernfalls dient der letzte Vorgang n als Ausgangsknoten. Die direkten Nachfolger des Störknotens $N(s)$ entsprechen dessen direkten Nachfolger im idealen Prozessablauf vorausgesetzt die $N(s)$ wurden nicht als Alternative verwendet. In diesem Fall würden die regulären direkten Nachfolger des Alternativknotens als $N(s)$ für die Bemessung der SAZ und SEZ herangezogen werden.

Die Rückwärtsterminierung im Störfall ist weitestgehend mit der Berechnung des idealen Prozessablaufs identisch. Ausschließlich bei den Alternativen bedarf es der Verwendung der bereits in der Vorwärtsrechnung erläuterten Strafzeit t_a^σ bei der Bestimmung des SAZ .

Spätester Endzeitpunkt eines Vorgangs im Störfall:

$$SEZ_i^\sigma := \min \{SAZ_j^\sigma \mid j \in N(i)\}, \quad \text{für } i = l, \dots, a_n. \quad (4.14)$$

Spätester Anfangszeitpunkt eines Vorgangs im Störfall:

$$SAZ_i^\sigma := SEZ_i^\sigma - t_i^t, \quad \text{für } i = l, \dots, s. \quad (4.15)$$

Spätester Anfangszeitpunkt der Alternative im Störfall:

$$SAZ_j^\sigma := SEZ_j^\sigma - (t_j^t + t_j^\sigma), \quad \text{für } j = a_1, \dots, a_n. \quad (4.16)$$

Die Berechnung der GP ist zu der bereits dargelegten Formel 4.5 identisch, weshalb die Formel nicht erneut aufgeführt wird. Es ist lediglich zu beachten, dass die zu verwendeten Endzeitpunkte der Vorgänge eine Verschiebung aufgrund des Störungseintritts unterliegen.

Zur Terminierung des idealen Ablaufs konnte von einem Start- oder Endzeitpunkt ausgehend die Kalkulation begonnen werden. Es kann somit die Reihenfolge der Vorwärts- und Rückwärtsrechnung durch die Anwender frei gewählt werden. Die Reihenfolge der Vorwärts- und Rückwärtsterminierung ist im Falle eines Störfalls hingegen nicht anpassbar. Die Berechnung der Zeitpunkte ist vom Zeitpunkt des Störungseintritts und der damit einhergehenden Blockade des Vorgangs durchzuführen und folglich mit der Vorwärtsrechnung zu beginnen.

Zur Darlegung der zeitlichen Unterschiede zwischen dem Soll-Ablauf und einem gestörten Ablauf werden nachfolgend die Vorgangszeiten bei Störungseintritt während der Montage des Spielzeugautos dargelegt. Für das Beispiel wird der Vorgang $V7$ des Beispielprozesses als gestört angenommen und dessen Alternative $V10$ verwendet. Die Wahl basiert auf der vorgegebene Reihenfolge $V10, V9, V11, V12$ durch die Verwendung der Priorisierungsparameter aus Abschnitt 4.3.

$V9$ und $V10$ weisen ein identisches Kantengewicht $w_{ij} = 3$ auf, jedoch weist $V10$ eine geringere Anzahl an Nachbarn auf. Daher wird $V10$ vor $V9$ priorisiert. Die Alternativen $V11$ und $V12$ weisen eine identische Priorität auf. Sie könnten folglich beliebig gewählt werden. Die Ergebnisse der Berechnung der weiteren Alternativen $V9, V11, V12$ sind dem Anhang B dieser Arbeit zu entnehmen. Gedanklich wird ein Behebungs Vorgang Vb in den Netzplan eingefügt. Dieser wird daher in der Tabelle 4.2 unter der Vorgangsnummer „b“ aufgeführt. Die Dauer des Behebungs Vorgangs Vb wird mit fünfundsiebzig ZE angenommen. Die Verwendung der Alternative $V10$ führt zu einer Strafzeit von $t_{V10}^\sigma = 50$ ZE basierend auf einem $SF = 10$. Unter Berücksichtigung der Vorgangszeit innerhalb des Soll-Prozesses von $t_{V10}^t = 16$ ZE ergibt sich daraus eine Bearbeitungsdauer von sechsundsechzig ZE. Diese Dauer ist kleiner als die Dauer zur Behebung der Störung. Es werden somit keine zusätzlichen ZE der Strafzeit von $V10$ hinzugefügt. Folglich basiert die Wiedereingliederung des Störvorgangs $V7$ auf dem FEZ bzw. SEZ von Vb . Der Prozess verzögert sich folglich um die exakte Dauer der Störungsbehebung. Der Soll-Ablauf bedarf bis zur Fertigstellung achtzig ZE bzw. ist zu dem Zeitpunkt achtzig ZE bei einem angenommenen Startzeitpunkt Null fertiggestellt. Dieses verdeutlicht der Knoten $V14$ in der Tabelle 4.1. Der Störungseintritt sorgt somit für eine dementsprechende Verlängerung des Prozesses. Der neu terminierte früheste und späteste Endzeitpunkt liegt bei 155 ZE.

Tabelle 4.2: Terminierung des Beispielprozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Berücksichtigung des Störungseintritts des Vorgangs $V7$ und der Alternative $V10$

Vorgangsnr.	t_i^t	t_a^σ	FAZ_i^σ	FEZ_i^σ	SAZ_i^σ	SEZ_i^σ	GP_i^σ
1	0	0	0	0	0	0	0
2	10	0	0	10	0	10	0
3	10	0	0	10	0	10	0
4	10	0	0	10	0	10	0
5	10	0	0	10	0	10	0
6	20	0	10	30	10	30	0
b	0	75	30	105	30	105	0
10	16	50	30	96	39	105	0
7	7	0	105	112	105	112	0
8	15	0	112	127	112	127	0
9	13	0	127	140	127	140	0
11	4	0	140	144	140	144	0
12	4	0	140	144	140	144	0
13	11	0	144	155	144	155	0
14	0	0	155	155	155	155	0

Eine Bearbeitung der Alternative sorgt nicht zur Reduzierung der DLZ der Produktherstellung. Dieses begründet sich auf der Struktur des Soll-Ablaufs und der damit einhergehenden Zeitrechnung. Jedoch reduziert es die verbleibende Vorgänge, die nach der Behebung der Störung noch zu bearbeiten sind.

Eine ausführliche Analyse der Berechnung zu diesem und weiterer Beispiele wird innerhalb des Abschnitts 6.1 vorgenommen. Es werden zufälligkeitsbasierte Netzpläne erstellt, berechnet und hinsichtlich der Terminierung unter Berücksichtigung der Priorisierungsparameter verglichen.

Der MNP bietet neben der Terminierung der Vorgangszeiten die Bestimmung eines Flexibilitätsgrads. Dieser basiert auf der Anzahl an möglichen Ausweichvorgängen, die es ermöglichen den Prozess während eines Störungsereignisses fortführen zu können.

4.5 Flexibilitätsbegriff innerhalb der Maximalnetzplanmethodik

Unternehmen müssen durch stetig wechselnde Bedingungen kontinuierlich eine Anpassung ihrer Prozesse vornehmen. Ein häufiger Grund liegt in dem Eintritt unvorhergesehener Störungen. Innerhalb des Industrie 4.0 Konzepts wird mit dem Bestreben einer Prozessflexibilitätssteigerung versucht auf solche Prozessvariationen adäquat reagieren zu können. Unternehmen sollen durch die Digitalisierung und der damit einhergehenden Implementierung von CPS die Qualitäten erhalten auf unvorhergesehene Unterbrechungen adäquat reagieren zu können. Unter Flexibilität wird die Fähigkeit eines Systems verstanden sich an interne oder externe Einflüsse anzupassen [19]. Schonenberg et al. verwenden 2008 [82] eine ähnliche Definition zur Beschreibung der Prozessflexibilität:

„Process flexibility can be seen as the ability to deal with both foreseen and unforeseen changes, by varying or adapting those parts of the business process that are affected by them, whilst retaining the essential format of those parts that are not impacted by the variations.“

Sie definieren den Begriff folglich so, dass ausschließlich die von einer Störung betroffenen Prozessbestandteile variiert werden und die verbleibenden Bestandteile durch die Variationen nicht beeinflusst werden sollen. Innerhalb von Montageabläufen könnte dies bedeuten, Mitarbeiter können aufgrund eines Fehlers oder Störung den eigentlichen Montagevorgang nicht durchführen und führen stattdessen einen Ausweichvorgang aus. Nach Möglichkeit sollten andere Vorgänge von diesen Ausweichvorgängen nicht beeinflusst werden. Durch die Beschreibung von Ausweichvorgängen innerhalb des MNPs unterstützt dieser den Anspruch an die Erhöhung der Flexibilität von Unternehmensprozessen und adaptiert damit einen bedeutenden Industrie 4.0 Kerngedan-

ken. Die Dokumentation bekannten Know-hows in der Form alternativer Vorgangsbeziehungen erlaubt einen schnellen Zugriff auf wichtige Informationen im Falle der Notwendigkeit, wie es der Eintritt einer Störung darstellt. Anwender können durch die Auswahl eines Ausweichvorgangs flexibel auf den Ausfall eines geplanten Vorgangs reagieren und damit den Einfluss der Unterbrechung auf den Produktionsprozess reduzieren.

4.5.1 Flexibilitätsgrad des Maximalnetzplans

Das Ausmaß dieser Fähigkeit des MNPs wird als *Flexibilitätsgrad (FG)* bezeichnet. Anhand der jeweiligen Quantität definierter Alternativen sowie zu Verfügung stehender Parallelvorgänge wird die Höhe der Prozessflexibilität unter Berücksichtigung der zu beachtenden Vorbedingungen abgebildet. Folglich gilt, je umfangreicher die Anzahl an alternativen und parallelen Vorgänge ausfällt, die in der Gesamtheit die Menge der Ausweichvorgänge eines Knotens bilden, desto höher fällt die Anpassungsfähigkeit des Herstellungsprozesses auf eintretende Störungen und die Höhe des *FGs* aus.

Im direkten Zusammenhang mit der Anzahl an alternativen Vorgangsrelationen steht die Komplexität des MNPs. Durch die Erhöhung der möglichen Kombination der Vorgänge, wiedergegeben durch die jeweiligen Vorgangsbeziehungen, erhöht sich der Umfang des MNPs. Die Komplexität ist eine quantifizierbare Größe, sofern sie unter Verwendung der Kombinatorik ausgedrückt wird. Ohne die Beachtung von Bauteil- oder Montagerestriktionen können die Vorgänge untereinander beliebig kombiniert werden. Unter dieser Annahme kann die Komplexität des MNPs mit $n!$ beziffert werden, da n der Anzahl an Knoten des MNPs entspricht. Mit dem Ziel, den Grad der Flexibilität in gleicher Weise quantifizieren zu können, wird dieser unter Bezugnahme der Kombinationsmöglichkeiten und der damit einhergehenden Komplexität beschrieben. Unter Zuhilfenahme der bereits verwendeten Montage eines Spielzeugautos (Abbildung 4.2) sowie des dazugehörigen MNPs aus der Abbildung 4.6 wird der Umfang der theoretischen Komplexität, also die Kombination der einzelnen Vorgänge ohne die Beachtung von Prozessrestriktionen, dargestellt. Der MNP des Beispielprodukts weist eine Knotenanzahl von $n = 14$ auf. Unter Verwendung der beschriebenen Berechnung der Komplexität mit $14!$ ergeben sich somit 87.178.291.200 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten zur Herstellung des Spielzeugautos. Werden technologische Restriktionen beachtet, wird die Anzahl an Herstellungsvarianten entsprechend verringert. Zwei durchführbare Prozessvarianten sind im Abschnitt 4.1 über die Darlegung des Grundkonzepts des MNPs bereits aufgeführt. Das Beispielprodukt ist mit $n = 14$ Prozessschritten im Vergleich zu hoch technisierten Produkten von bis zu mehreren Hundert Prozessknoten ein simples Erzeugnis, dennoch ist das Ausmaß an theoretischen Kombinationsmöglichkeiten händisch unüberschaubar.

Der Umfang der Montagevorgänge und die damit einhergehende Anzahl an Variationen wird unter anderem durch die Auflösung des Prozessplans beeinflusst. Je detaillierter die einzelnen Aufgaben untergliedert werden, desto höher fällt die Anzahl an Knoten, deren Kombinationsmöglichkeiten und damit die Komplexität des Prozesses aus. Beispielsweise kann eine Unterscheidung zwischen separaten Vorgängen und Vorgangsschritten durchgeführt werden. Ein Vorgang kann hierbei ein Konglomerat aus verschiedenen Schritten darstellen. Eine Gruppierung der Schritte zu Vorgängen kann auf Basis des notwendigen Arbeitsplatzes, an dem die Schritte durchgeführt werden müssen, vorgenommen werden. Bedürfen nachfolgende Schritte einen Arbeitsplatzwechsel, so könnte die Gruppierung dieser Schritte als nächster Vorgang deklariert werden. Ebenfalls möglich wären Vorgänge auf Basis der Arbeitszeiten unterteilbar. Ein Vorgang könnte alle Tätigkeiten umfassen, die innerhalb einer Schicht durchgeführt werden müssten. Die Wahl der Prozessauflösung führt folglich maßgeblich zur Erhöhung oder Verringerung der darzustellenden Knoten im Netzplan in Abhängigkeit, ob die Knoten des Netzplans Vorgänge oder einzelne Schritte repräsentieren. In Folge dessen kann die Quantität der Kombinationsmöglichkeiten als abhängig von der Art der Prozesswiedergabe betrachtet werden, da diese im direkten Zusammenhang mit der Anzahl der Knoten n steht. Weiterführend wirkt sich der Detaillierungsgrad auf zu Verfügung stehende Alternativ- und Parallelknoten aus und somit auf die Menge der Ausweichvorgänge. Die Planung sollte jedoch nicht bestrebt sein eine maximal detaillierte Prozessauflösung unter dem Ziel eine theoretisch maximale Flexibilität auf Basis der höheren Anzahl an Vorgangsbeziehungen und denen damit möglichen höheren Anzahl an Ausweichknoten zu erreichen. Der Aufwand der Planung und die in diesem Zusammenhang zu definierenden Abhängigkeiten der Knoten untereinander würde den Nutzen der erhöhten Flexibilität übersteigen. Dieses wird durch die hohe Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten zur Herstellung des Spielzeugautos dargelegt. Zur Reduktion dieser Möglichkeiten fundiert die Kalkulation des FGs daher auf den von dem MNP vorgegebenen Relationen. Zu diesen gehören die Vorgänger eines betrachteten Knotens, dessen Anzahl an Ausweichvorgängen sowie die Vorbedingungen der jeweiligen Alternativen. Durch diese Relationen können die notwendigen Abhängigkeiten und möglichen Variationen des Prozesses dargelegt werden, daher eignen sich diese als Basis zur Kalkulation des FGs .

Für die Darlegung des Flexibilitätsgrads des MNPs wird der MNP in α - Abschnitte unterteilt. Der Wert α entspricht somit der Anzahl an definierten Unterteilungen. Für jeden Abschnitt wird eine separate Berechnung zur Bestimmung des FGs vorgenommen. Der Flexibilitätsgrad der einzelnen MNP-Bereiche wird durch FG^k mit $k = 1, \dots, \alpha$ symbolisiert.

Die Unterteilung des MNPs in separate Teilstücke ist erforderlich, da eine hohe Anzahl an Ausweichvorgängen am Ende eines Netzplans keinerlei Mehrwert für die Reaktionsfähigkeit zum Prozessbeginn bietet. Tritt eine Störung am Anfang des Prozesses ein, kann kein Vorgang, welcher zum Prozessende angeordnet ist, als Ausweichvorgang verwendet werden. Dieses wird besonders deutlich, wenn ein Prozess mehrere Hundert Knoten aufweist, wodurch eine große „Entfernung“ zwischen dem Prozessanfang und -ende besteht. Würde eine Aussage über die Flexibilität des Gesamtnetzplans anhand der Anzahl an Ausweichknoten vorgenommen werden, würde es folglich zu Fehlinterpretation über die Anpassungsfähigkeit des Prozesses führen. Daher wird eine Berechnung auf Grundlage der einzelnen Abschnitte durchgeführt. Der *FG* des gesamten MNP wird anschließend auf Basis des Durchschnittswerts der Abschnittswerte ermittelt und durch *FG* deklariert.

Die Abschnittsunterteilung wird unter Verwendung der Menge an Bottleneck-Knoten (*BN*) innerhalb des Netzplans vorgenommen. Im Abschnitt 4.1 wird ein Bottleneck-Knoten als Vorgang definiert, der im Verhältnis zu anderen Vorgängen eine höhere Anzahl an Relationen aufweist. Zusätzlich verfügen derartige Knoten über einen Mangel an möglichen Ausweichvorgängen. Sollte solch ein Knoten aufgrund einer Störung nicht fortgeführt werden können, besteht daher die Gefahr eines Prozessstillstands. Die Anzahl an Relationen wird auch als Knotengrad definiert, vergleichen Sie hierzu den Abschnitt 3.1. Ein zum Vergleich zu anderen Knoten hoher Knotengrad spiegelt sich in einer Verzögerung und/oder Ausdehnung des Netzplans wieder. Innerhalb des Prozesses sind solche Vorgänge im Allgemeinen sehr kritisch, da eine Vielzahl von Nachfolgeknoten von der Durchführung eines Bottleneck-Knotens abhängig sind. In einem idealen ablaufenden Prozess können derartige Nachfolger erst begonnen werden, sofern der Bottleneck-Knoten erfolgreich abgeschlossen wurde. Die Durchführung des Bottleneck-Knotens hingegen steht zu dessen vorangegangenen Knoten in Abhängigkeit. Diese müssen innerhalb des ideal ablaufenden Prozesses abgeschlossen sein, damit der Bottleneck-Knoten begonnen werden kann. Derartige Knoten können folglich als Start und Ende von einzelnen Prozessabschnitten verstanden werden. Durch diese Eigenschaften werden diese Knoten daher als besonders geeignet betrachtet, als Basis zur Einteilung des MNPs zu dienen. Ausgenommen von der Identifizierung eines Bottleneck-Knotens sind dessen eventuellen Alternativrelationen. Es finden ausschließlich die Beziehungen des Soll-Prozesses Beachtung. Dieses ist dadurch begründet, dass eine Alternative nicht zwingend nach der Bearbeitung des über eine blaue Kante in Verbindung stehenden Knotens durchzuführen ist. Es handelt sich hierbei um einen ausschließlich bedingten Nachbarn. Diese Beziehung besteht alleinig aufgrund eines Störungseintritts. Folglich kann eine Alternative als nicht kontinuierlicher Nachbar betrachtet und für die Bezifferung des Knotengrads außer Acht gelassen werden. Ein neuer Abschnitt beginnt immer nach einem Bottleneck-Knoten, da dieser aufgrund der dargelegten Definition eines derartigen Knotens den gedanklichen Abschluss des vorherigen Bereichs

symbolisiert. Die Abbildung 4.12 verdeutlicht die Unterteilungen des Beispielnetzplans aus der Abbildung 4.2. Der MNP wird in $\alpha = 3$ Abschnitte unterteilt, die durch im Netzplan existente Bottleneck-Knoten $BN = \{V6, V8\}$ begrenzt werden. Für die Berechnung wird ein Störfall im jeweiligen Netzplanabschnitt angenommen, da in Störungssituationen das Maß an Flexibilität und damit die Reaktionsfähigkeit am entscheidendsten ist. Es bedarf schließlich in einem ideal ablaufenden Prozess ohne Störungseintritt keine Abweichung von dem aktuellen Prozessablauf. Die Einschätzung der möglichen Flexibilität in störffreien Abläufen ist daher weniger aussagekräftig. Die einzelnen, einer Störung unterliegenden, Vorgänge werden innerhalb der jeweiligen MNP-Unterteilung rot markiert. Diese werden ebenfalls unter Nutzung der Abbildung 4.12 veranschaulicht. Es wird der Knoten im entsprechenden Abschnitt mit der geringsten Anzahl an Ausweichvorgängen als gestört und somit zur Kalkulation des FGs verwendet. Bei dieser Betrachtung sind die Vorbedingungen von alternativen Vorgängen mit einzubeziehen. Die für den Beispielprozess deklarierten Vorbedingungen sind in der Abbildung 4.10 visualisiert. Sollte ein Alternativvorgang erst begonnen werden können, sobald eine Vorbedingung umfänglich oder teilweise erfüllt sein muss, so wird die Flexibilität des MNPs verringert. In einem Störfall könnten die Alternativen aufgrund der Vorbedingungen nicht beliebig gestartet werden, wodurch folglich die Prozessvariabilität eingeschränkt wird. Daher werden derartig abhängige Alternativknoten nicht in die Berechnung des FGs einbezogen und die Menge an Ausweichvorgängen $EN(i)$ entsprechend um die Elemente reduziert. Diese Annahme ist unabhängig von der Art der Vorbedingungen und wird daher sowohl bei restriktiven als auch unabdingbaren Vorbedingungen angewandt. Knoten mit der kleinsten Anzahl an Ausweichvorgängen würden bei Eintritt eines Ausfalls aufgrund der geringen Ausweichmöglichkeiten am ehesten zu einem Prozessstillstand führen.

Im Falle des Vorhandenseins mehrere Knoten mit einer identischen Anzahl an Ausweichknoten ist es von Nöten, die Anzahl der Vorgänger dieser Knoten zu untersuchen. Die möglichen Kombinationen der Vorgänger des betrachteten Knotens und dessen Ausweichvorgänge bestimmen den Umfang des FGs . Es würde folglich bei einer identischen Anzahl an Ausweichvorgängen, aber einer unterschiedlichen Anzahl an Vorgängern der Knoten mit der geringsten Anzahl an Vorgängern für die Berechnung verwendet werden. Die Quantität an Kombinationen aus Vorgängerknoten und Ausweichknoten fällt bei dieser Betrachtung am minimalsten aus, wodurch der FG ebenfalls am geringsten ist. Die Formel 4.17 verdeutlicht diese Vorgehensweise.

Eine zweite Variante bestünde in der Verwendung aller Prozessvorgänge des Abschnitts, anstatt ausschließlich die Quantifizierung auf den unflexibelsten Knoten zu stützen. Diese Vorgehensweise würde die Anzahl an Ausweichvorgängen des jeweiligen Bereichs in die Kalkulation des FGs mit einbeziehen. Auf Basis des Durchschnittswerts der Ausweichvorgänge über die Anzahl an Knoten könnte so der FG des Abschnitts ebenfalls ermittelt werden. Andererseits kann diese

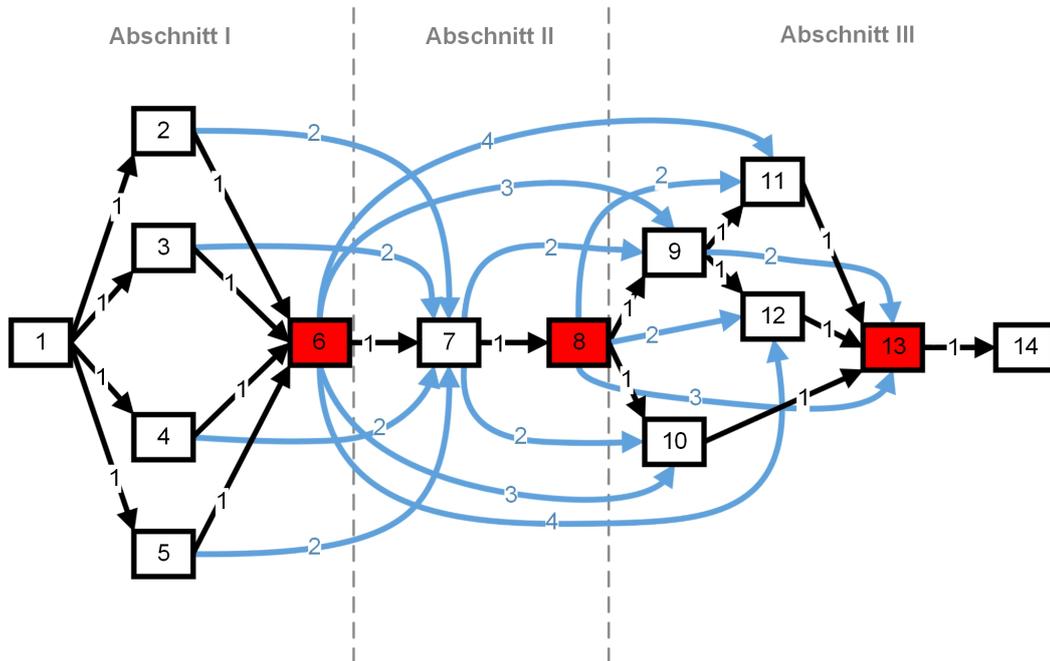


Abbildung 4.12: Einteilung des Maximalnetzplans in Prozessabschnitte zur Quantifizierung des Flexibilitätsgrads auf Basis des Vorgangs mit der geringsten Anzahl an Ausweichvorgängen innerhalb eines Abschnittes

Vorgehensweise dazu führen, dass eine Vielzahl an Ausweichvorgängen den Prozesseinfluss des unflexibelsten Knotens verfälscht. Jedoch ist gerade ein derartiger Knoten bei einem Störungseintritt am kritischsten zu betrachten. Aus diesem Grund wird auf die Verwendung der zweiten Variante verzichtet und die Berechnung des FGs allein auf den Vorgängen innerhalb der Abschnitte mit der geringsten Anzahl an Ausweichvorgängen gestützt. Aus den vorab dargelegten Überlegungen unter Beachtung ergibt sich die Berechnung des FGs eines Abschnittes somit wie folgt:

$$FG^k := \sum_{i=1}^{v_s} |EN_s^i|, \quad \text{für } k = 1, \dots, \alpha. \quad (4.17)$$

Der FG eines Abschnittes α fundiert auf den Relationen der jeweiligen Vorgänger des störungsbehafteten Knotens $V(s)$, deren Anzahl durch v_s beschrieben wird und dessen Ausweichvorgängen $EN(s)$. Die Menge der Ausweichvorgänge vom gestörten Knoten s , die mit dem Vorgänger i von s verbunden sind, wird mit EN_s^i bezeichnet. Dementsprechend wird somit die Anzahl aller möglichen Kombinationen der Ausweichvorgänge mit den Vorgängern des Störknotens s mit dem in der Formel 4.17 aufgeführten Betrag dargelegt. Je höher der Umfang an Vorgängern und die Anzahl an Ausweichvorgängen ist, desto variabler kann in dem jeweiligen Abschnitt auf Störungsvorkommnisse reagiert werden.

Ein Minimalbeispiel soll die dargelegte Vorgehensweise verdeutlichen. Das Beispiel aus der Abbildung 4.13 zeigt einen MNP-Ausschnitt mit $n = 7$ Vorgängen. Der Knoten $V4$ wird als am unflexibelsten Vorgang innerhalb des betrachteten Abschnitts angenommen und daher als störungsbehafteter Knoten (Knoten $s = V4$) betrachtet. Der Knoten besitzt zwei nominelle Vorgänger $V(V4) = \{V1, V2\}$, zwei parallele Vorgänge $PN(V4) = \{V3, V5\}$, sowie zwei Alternativen $AN(V4) = \{V6, V7\}$. Die Vereinigung der Menge der parallelen und alternativen Knoten bilden die Menge der Ausweichvorgänge $EN(V4) = \{V3, V5, V6, V7\}$. Entsprechend der Formel 4.17 ergeben die möglichen Kombinationen zwischen den Ausweichvorgängen und den Vorgängern des Knotens $V4$ den FG für den entsprechenden MNP-Abschnitt.

- Variante 1: Vorgang 1, Vorgang 3, Vorgang 4,...
- Variante 2: Vorgang 1, Vorgang 5, Vorgang 4,...
- Variante 3: Vorgang 1, Vorgang 6, Vorgang 4,...
- Variante 4: Vorgang 2, Vorgang 5, Vorgang 4,...
- Variante 5: Vorgang 2, Vorgang 7, Vorgang 4,...

Aus dem veranschaulichten Beispiel wird deutlich, dass nicht ausschließlich die Anzahl an Ausweichvorgängen über das Ausmaß des FG s entscheidet. Die Kombinationen der Vorgängerknoten und der Ausweichvorgänge definieren den FG des jeweiligen Abschnitts. Der FG des MNP-Ausschnitts basierend auf dem Knoten $V4$ beträgt somit $FG^\alpha = 5$.

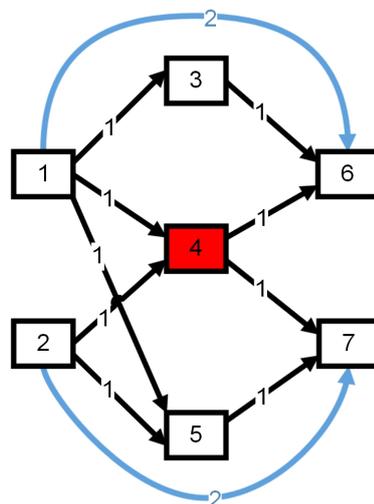


Abbildung 4.13: Minimalbeispiel zur Erläuterung der Berechnung des Flexibilitätsgrads eines Abschnitts des Maximalnetzplans

Wie bereits erläutert wird der FG des vollständigen MNPs auf der Grundlage des Durchschnittswerts aller Abschnitte $k = 1, \dots, \alpha$ ermittelt:

$$FG := \frac{1}{\alpha} \cdot \sum_{k=1}^{\alpha} FG^k. \quad (4.18)$$

Auf die Anwendung der Formel für die Berechnung des FG s des Gesamtnetzplans wird für das Minimalbeispiel verzichtet, da ausschließlich ein Ausschnitt eines MNPs betrachtet wurde.

Eine beispielhafte Berechnung auf Basis eines umfangreicheren MNPs mit der Beachtung der Prozessrelevanz und Vorbedingungen der jeweiligen Knoten wird im nachfolgenden Abschnitt 4.5.2 detaillierter aufgeführt.

Durch Modifikationen der Prozesse und der damit einhergehenden Variationen der Vorgangsrelationen können sich unterschiedliche Maximalnetzpläne mit unterschiedlichen Flexibilitätswerten für die Herstellung eines Produkts ergeben. Der vorgestellte FG kann den Prozessplanern eine Quantifizierung der Anpassungsfähigkeit einzelner Modellvarianten eines Produkts ermöglichen. Auf Basis dessen ist es möglich die Anpassungsfähigkeit der einzelnen Prozesse zu vergleichen und bei Notwendigkeit die Prozesse im Hinblick auf einen höheren FG anzupassen.

4.5.2 Beispielberechnung zur Beschreibung des Flexibilitätsgrads

Ebenfalls auf dem Fundament des MNPs zur Montage des Spielzeugautos wird die Berechnung des FG s nachfolgend verdeutlicht. Der entsprechende MNP ist in drei Abschnitte unterteilt. Diese Einteilung ist der Abbildung 4.12 zu entnehmen. Die Abgrenzung fundiert auf den bereits ausführlich dargelegten Bottleneck-Knoten $BN = \{V6, V8\}$. Diese Knoten führen zu einer Verzüngung beziehungsweise einer Ausdehnung der Prozessabfolge und weisen die höchsten Nachbarschaftsgrade innerhalb des jeweiligen Abschnitts auf. Vorgang $V6$ ist mit fünf anderen Vorgängen benachbart $NB(V6) = \{V2, V3, V4, V5, V7\}$. Der Vorgang $V8$ weist drei Relationen zu anderen Knoten auf $NB(V8) = \{V7, V9, V10\}$. Begründet durch die Anzahl an Nachbarn des Vorgangs $NB(V9) = \{V8, V11, V12\}$ könnte der Verdacht aufkommen, den Knoten $V9$ zur Einteilung der Netzplanabschnitte zu verwenden. Dieser weist ebenso viele Abhängigkeiten wie der Vorgang $V8$ auf, kann aber aufgrund dessen Parallelvorgangs Knoten $V10$ als weniger prozesskritisch im Vergleich zu Vorgang $V8$ angesehen werden. Im Falle eines Ausfalls von Vorgang $V9$ kann Vorgang $V10$ durchgeführt werden, sofern dieser noch nicht begonnen wurde. Es existiert somit eine Ausweichmöglichkeit, die nicht zu einer Abweichung vom Soll-Plan führt. Vorgang $V9$ wird daher nicht zur Einteilung verwendet.

Für die erwähnte Annahme eines Störknotens wird im ersten Bereich der Vorgang $V6$ als rot gekennzeichnet und folglich für die Berechnung des Flexibilitätsgrads von Abschnitt I verwendet.

Der Knoten besitzt vier nominelle Vorgänger $V(V6) = \{V2, V3, V4, V5\}$, einen Nachfolger $N(V6) = \{V7\}$ sowie eine Alternative $AN(V6) = \{V7\}$. Der Vorgang $V7$ beschreibt die Verbindung des mittleren Korpus Bauteil 6 mit dem unteren Korpus Bauteil 5 und den Rädern 1 bis 4. $V7$ beeinflusst nicht den Vorgang $V6$, der die Qualitätsprüfung der Vorgänge $V2$ bis $V5$ umfasst. Diese Vorgänge beinhalten die Montage der einzelnen Räder des Spielzeugautos an den unteren Korpus Bauteil 5. Während $V6$ wird eine ordnungsgemäße Durchführung dieser Tätigkeiten überprüft. Die Qualitätsprüfung $V6$ kann daher auch im Anschluss nach der Durchführung von $V7$ durchgeführt werden. Aus diesem Grund kann $V7$ eine Alternative zu $V6$ darstellen und wird daher als dessen Ausweichvorgang deklariert. Im Abschnitt 4.2 wird dargelegt weshalb der direkten Nachfolger des Vorgangs auch als Alternative verwendet werden kann. Aus der Abbildung 4.10 ist ersichtlich, dass die Alternative $V7$ keinerlei Vorbedingung aufweist, wodurch sie uneingeschränkt in die Kalkulation des FGs mit einbezogen werden kann. Die Menge der zu beachtenden Ausweichvorgänge von $V6$ umfasst somit lediglich $V7$, $EN(V6) = \{V7\}$. Dieser kann bei Ausfall von $V6$ mit dessen Vorgängern $V(V6) = \{V2, V3, V4, V5\}$ kombiniert werden. Die Verwendung der Formel 4.17 führt somit zu vier unterschiedlichen Möglichkeiten nach der Durchführung der Vorgänger von $V6$ den Prozess fortzuführen:

- Variante 1: Vorgang 2, Vorgang 7, Vorgang 6,...
- Variante 2: Vorgang 3, Vorgang 7, Vorgang 6,...
- Variante 3: Vorgang 4, Vorgang 7, Vorgang 6,...
- Variante 4: Vorgang 5, Vorgang 7, Vorgang 6,...

Der FG des ersten Abschnitts auf der Basis des Knotens $V6$ beträgt folglich $FG^1 = 4$.

Der zweite Teilabschnitt des MNPs besteht durch die Einteilung auf Basis der Bottleneck-Knoten aus zwei Knoten, den Vorgängen $V7$ und $V8$. Die Berechnung des FGs basiert innerhalb diesen Abschnitts auf dem Vorgang $V8$. Dieser besitzt zwei Alternativen $AN(V8) = \{V9, V10\}$ und verfügt aufgrund dessen über eine geringere Anzahl von Ausweichvorgängen im Vergleich zu $V7$ mit vier Alternativen $AN(V7) = \{V9, V10, V11, V12\}$. Beide Vorgänge weisen keine Parallelvorgänge auf, wodurch deren Ausweichvorgänge ausschließlich deren Alternativknoten $EN(V7) = AN(V7)$ und $EN(V8) = AN(V8)$ entsprechen. Zudem verfügen die betrachteten Knoten über eine identische Anzahl an Vorgängern, die mit deren Ausweichknoten über blaue Kanten verbunden sind. Die betrachteten Ausweichknoten $V9$ und $V10$ weisen keine Vorbedingungen auf, weshalb beide für die Quantifizierung des FGs herangezogen werden. Durch die Basis $V8$ für die Berechnung des FGs für Abschnitt II ergibt sich unter Verwendung der beschriebenen Relationen und der Formel 4.17 ein $FG^2 = 2$.

Die dazugehörigen Kombinationsmöglichkeiten entsprechen

- Variante 1: Vorgang 7, Vorgang 9, Vorgang 8,...
- Variante 2: Vorgang 7, Vorgang 10, Vorgang 8,...

Die Vorgehensweise zur Berechnung des FGs des dritten Bereichs ist analog zu den vorherigen Teilen des Maximalnetzplans. Es dient der Vorgang mit der geringsten Anzahl an Ausweichvorgängen als Basis für die Kalkulation. Im Teilabschnitt III entspricht der Vorgang $V13$ diesem Kriterium. Dieser Vorgang umfasst die Qualitätskontrolle des montierten Produkts und besitzt keine parallelen und keine alternativen Vorgänge. Die Menge an Ausweichvorgängen entspricht deshalb einer leeren Menge $EN(V13) = \emptyset$. Enthält ein Knoten, wie in diesem Beispiel keine Ausweichvorgänge, so kann die Bestimmung des FGs des entsprechenden Abschnitts beendet werden. Eine Verwendung der Formel 4.17 ist nicht notwendig, da aufgrund der leeren Menge an Ausweichvorgängen keine Kombinationen mit den Vorgängern des Knotens möglich sind. Der FGs des Abschnitts III weist folglich einen $FG^3 = 0$ auf. In dem Fall einer Störung während der Durchführung des Vorgangs $V13$ kann kein Prozessfortschritt unter Verwendung eines Ausweichknotens erreicht werden, wodurch es zu einem Prozessstillstand kommen würde. Die Flexibilität des betrachteten MNP-Abschnitts ist im angenommenen Worst Case Szenario dahingehend nicht vorhanden. An diesem Punkt könnte die Vermutung getroffen werden, dass der letzte Abschnitt eines MNPs grundsätzlich einen $FG^\alpha = 0$ aufweist. Dieses ist zutreffend, sofern davon ausgegangen wird, dass der Herstellungsprozess mit einem einzelnen aktiven Vorgang, wie es in dem verwendeten Beispiel der Fall ist, beendet wird. Ein derartiger Fall muss jedoch nicht zwingend vorkommen. Es wird die richtige Annahme getätigt, dass letzte Vorgänge innerhalb eines MNPs keine alternativen Knoten vorweisen können. Es liegen schließlich keine Nachfolger vor, die als Alternativen durchgeführt werden könnten, dennoch können am Netzplanende mehrere Parallelvorgänge vorhanden sein, die als Ausweichvorgänge Verwendung finden könnten. Beispielsweise kann das Produkt einen erheblichen Prüfungsumfang bedürfen, wodurch Qualitätsprüfungen an verschiedenen Bereichen des Produkts parallel durchgeführt werden könnten. In derartigen oder ähnlichen Situationen wären Ausweichvorgänge für die einzelnen Vorgänge vorhanden, die eine Flexibilität bei einem Ausfall eines Vorgangs erlauben würden. Somit würde die Kalkulation des FGs auf Basis der parallelen Knoten fundieren und in Kombination mit der Anzahl an Vorgängern das Ausmaß der Flexibilität des Abschnitts definieren.

Nach der Bestimmung aller Abschnittswerte kann die Quantifizierung des Gesamtflexibilitätsgrads FG mittels der Formel 4.18 durchgeführt werden. Hierzu werden die Werte der einzelnen Abschnitte addiert und durch die Anzahl an Abschnitten α dividiert. Die Formel ergibt für das verwendete Beispiel einen Gesamtflexibilitätsgrad $FG = 2$.

Es sei wiederholt verdeutlicht, dass der *FG* nicht zur Auffindung aller zur Verfügung stehender Kombinationen zur Herstellung des Produkts unter Beachtung von etwaigen Restriktionen Verwendung finden kann. Hingegen dient das kalkulierte Beispiel zum Aufzeigen der Grundlage für die Flexibilitätsberechnung auf Basis der Komplexität des MNPs. Unternehmen können unter Verwendung des *FGs* einzelne Prozessvarianten auf ihre Fähigkeit der Prozessanpassung untersuchen und vergleichen. Ist es ein Bestreben des Unternehmens eine möglichst hohe Prozessflexibilität zu erreichen, kann es auf der Basis des MNPs diese beziffern und eine begründete Wahl für eine Prozessvariante zur Herstellung des spezifischen Produkts tätigen.

4.6 Zusammenfassung

Am Ende der Einleitung dieses Kapitels wurden drei grundlegende Fragen aufgeführt, die es galt unter Darlegung der darauffolgenden Abschnitte zu beantworten. Diese Fragen werden zur Zusammenfassung des Kapitels nun erneut dargelegt und direkt mit Hilfe der Zusammenfassung der Inhalte des Kapitels beantwortet.

Der MNP veranschaulicht unter Verwendung additionaler Kanten Prozessalternativen, die im Fall einer Störung verwendet werden können, ohne dass Experten während des Störungszeitpunkts weitere Informationen sammeln müssen. Die erste Frage befasste sich daher mit der Unterscheidung zwischen den Kanten des Soll-Ablaufs und den alternativen Kanten. Diese Unterscheidung basiert im Wesentlichen auf einem erhöhten Kantengewicht dieser Alternativen im Vergleich zu den Kanten des Soll-Ablaufs. Bei der Durchführung einer Alternative ist es notwendig, eine konkrete Anzahl von Vorgängen im Netzplan zu überspringen. Diese Abweichung wird auf Basis der Kantenzahl zwischen den Vorgänger des gestörten Vorgangs und der Alternative ermittelt. Wird ausschließlich der Störvorgang übersprungen beträgt das Kantengewicht der Alternative $w_{ij} = 2$. Dieses wird innerhalb der oberen Dreiecksmatrix der Adjazenzmatrix des MNPs hinterlegt. Alle Integer mit einem Wert gleich eins entsprechen somit dem idealen Prozessablauf und Integer, die größer eins sind, stellen folglich alternative Vorgangsabfolgen dar. Um dem Anwender dieser Methodik einen einfacheren und umfassenderen Überblick über den Prozess gewährleisten zu können, wurde die Adjazenzmatrix in eine grafische Darstellung in Form des MNPs überführt. Ein gerichteter Graph stellt hier die Grundlage, um die Adjazenzmatrix in einer entsprechenden Darstellung zu beschreiben. Innerhalb der grafischen Umsetzung, können die jeweiligen idealen und alternativen Knotenbeziehungen mittels des erläuterten Kantengewichts unterschieden werden. Zusätzlich wird unter Verwendung der farblicher Kanten, der Soll-Ablauf in Schwarz und die alternativen Möglichkeiten in Blau visualisiert. Dies grafische Werkzeug wird genutzt, um den Anwender eine Differenzierung zu ermöglichen.

Die zweite Frage greift die mögliche Unterscheidung der jeweiligen Alternativen auf. Bei der

Vielzahl von Prozessvarianten und dadurch zur Verfügung stehender Alternativen besteht die Notwendigkeit die einzelnen Alternativen auf ihre Eignung in der Störungssituationen entsprechend zu untersuchen. Hierfür werden in der MNP-Methodik Entscheidungskriterien definiert, die es ermöglichen bei Störungseintritt die jeweiligen Alternativen zu evaluieren. Neben den Alternativen werden auch Parallelvorgänge untersucht. Die Gesamtheit an Parallel- und Alternativvorgängen wird als Ausweichvorgänge bezeichnet. Als Ergebnis dieser Evaluation wird eine Liste generiert, die dem Anwender die möglichen Ausweichvorgänge präsentiert. Auf Grundlage dieser Zusammenstellung kann der Anwender einen geeigneten Vorgang zur Prozessfortführung wählen.

Die dritte Frage innerhalb der Einleitung befasste sich mit der Problematik von übersprungenen Knoten und wie sichergestellt wird, dass derartige Knoten schnellstmöglich wieder bearbeitet und nicht vergessen werden. Die Antwort der Fragestellung kann in zwei separate Teile untergliedert werden. Der erste Teil basiert auf der grundlegenden Vorgehensweise zur Abarbeitung des Prozesses und auf der Darstellung der Vorgänge innerhalb des MNPs. Die Methode des MNPs stellt heraus, dass grundsätzlich der Soll-Prozess des Netzplans zu bevorzugen ist. Wird nun ein Vorgang des Soll-Prozesses als gestört gemeldet und dadurch begründet eine Alternative bearbeitet, so ist nach Fertigstellung der Alternative zu prüfen, ob die Störung behoben wurde und dieser Vorgang wieder in den Prozessablauf integriert werden kann. Dieses Vorhaben wird informatorisch auf der Hauptdiagonale der Adjazenzmatrix als auch mittels Farbcodierung im MNP veranschaulicht. Es wird zwischen den Status *gesperrt* (-2), *behooben* (-1), *kein Status* bzw. *bereit* (0), *in Bearbeitung* (1) und *abgeschlossen* (2) innerhalb der Adjazenzmatrix unterschieden. Diese Status werden mittels Farbcodierung der Knoten im MNP dargestellt. Dieses ermöglicht dem Anwender eine schnelle Übersicht über die einzelnen Prozessfolge durch abgeschlossene Knoten oder Prozessmisserfolge durch gestörte Vorgänge. Durch Wechsel des Status eines Vorgangs von *gesperrt* auf *behooben*, wird somit dem Anwender verdeutlicht, welcher Knoten nach erfolgter Bearbeitung einer Alternative umgehend in den Prozess zu integrieren ist. Der zweite Teil zur Sicherstellung der Wiedereingliederung eines ehemals gestörten und somit störungsbeholdenen Vorgangs beruht auf der Integration des MNPs in das Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssystem des Unternehmens. Um eine umfassende Nutzung des MNPs zu erreichen, benötigt dieser entsprechende Prozessdaten, wie die Abhängigkeiten der jeweiligen Vorgänge untereinander oder den Zugriff auf Störungsmeldungen.

Weiterführend wurde innerhalb dieses Kapitels eine mögliche Beschreibung der Vorgangszeitrechnung durchgeführt. Ausgangspunkt hierfür ist die bestehende Analogie des MNPs zur den MPM-Netzplänen. Unter Verwendung der MPM ist es mögliche früheste Anfangs- und Endzeitpunkte der einzelnen Vorgänge zu ermitteln und somit die Prozessdurchlaufzeit des Produkts zu definieren. Diese Vorgehensweise wird innerhalb der MNP-Methodik übernommen, um die

Vorgangszeiten im idealen Prozessablauf zu berechnen. Unter idealen Bedingungen, worunter der Prozessablauf ohne Störungseintritt verstanden wird, können die kalkulierten Zeiten zur Prozessplanung herangezogen werden. Zusätzlich bedarf es in Störungssituationen die zeitliche Beschreibung von alternativen Vorgangsabfolgen. Daraus hervorgehend wird in den entsprechenden Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 unter Verwendung der Vorwärts- und Rückwärtsrechnung die Vorgehensweise zur Quantifizierung differenter Vorgangszeiten aufgeführt. Unter Beachtung des jeweils gestörten Vorgangs ist es möglich die zeitliche Auswirkung auf zum gestörten Vorgang in direkter und indirekt Abhängigkeit befindende Knoten zu spezifizieren. Die Planung von Ressourcen kann aufgrund dessen aktualisiert werden.

Der letzte Abschnitt des Kapitels befasst sich mit der Beschreibung des *FGs* eines MNPs. Das verfolgte Ziel besteht darin unterschiedliche Modellvarianten eines Produkts auf Basis der darauf basierenden MNPs hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit in Störungssituationen untersuchen zu können. Für diesen Zweck wird der MNP unter Berücksichtigung von Bottleneck-Knoten in Bereiche unterteilt und für jeden Abschnitt ein separater *FG* berechnet. Der Knoten mit der geringsten Anzahl an Ausweichvorgängen innerhalb des jeweiligen Abschnitts fundiert als Grundlage für die Kalkulation. Es werden die jeweiligen Kombinationsmöglichkeiten der Vorgänger und Ausweichknoten des betrachteten Vorgangs zur Bestimmung des *FGs* quantifiziert. Zur Quantifizierung des *FGs* des gesamten MNPs werden die Werte der einzelnen Bereiche summiert und in das Verhältnis über die Anzahl der Abschnitte gesetzt. Das Ergebnis ist ein Durchschnittswert über alle Bereiche, der einen Vergleich im Hinblick auf die Anpassungsfähigkeit des Prozesses ermöglicht.

Das Konzept des Maximalnetzplans wurde in Kooperation mit der Hochschule Bremen (HS Bremen), der ArianeGroup GmbH Bremen (ArianeGroup) und der Ubimax GmbH in ein Gesamtkonzept überführt und mit Beispielprozessdaten der ArianeGroup getestet. Im nachfolgenden Abschnitt 5 wird dieses Anwendungsbeispiel vorgestellt. Der MNP dient hierbei als Backend des Systems. Das Frontend bezeichnet die Verwendung von mobilen Endgeräten auf Produktionsebene. Die Mitarbeiter erhalten automatisiert ihre als nächstes zu bearbeitenden Vorgänge inklusive aller dafür benötigten Informationen. Sie können unter Verwendung dieser Endgeräte direkt mit dem Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssystem interagieren. Das Bindeglied des Front- und Backends stellt eine Datenbank, die alle benötigten Prozessdaten beinhaltet. Zur Sicherstellung der Wiedereingliederung behobener Störvorgänge, weist das System dem Mitarbeiter nach der Fertigstellung der Alternative diese automatisch zu.

Kapitel 5

Anwendungsbeispiel

Der MNP wurde exemplarisch umgesetzt und im Rahmen der Planung der Montage der Oberstufe einer Ariane Rakete im Werk Bremen der ArianeGroup erprobt. Deren Produktion ist ein typisches Beispiel für die zugrundeliegende Anwendung. Es handelt sich um ein hochtechnisiertes Produkt mit einer aufwändigen manuell durchgeführten Montage und einer im Verhältnis zu typischen automatisierten Produktionsprozessen geringen Kadenz. Bisher wird in der Produktion überwiegend papierbasierte Dokumentation eingesetzt. Die Mitarbeiter erhalten ihre Arbeitsinformationen auf analoge Weise. Es wird von ihnen verlangt, sich die Informationen vor Beginn des Arbeitsschritts einzuprägen. Die Arbeitsplätze der Mitarbeiter befinden sich innerhalb der Baustruktur der Raketen. Daher ist die Mitnahme der Arbeitspapiere aufgrund enger Platzverhältnisse an den Montageplätzen nicht möglich. Die benötigten Informationen stehen folglich nur zeitlich begrenzt zur Verfügung. Eine regelmäßige Unterbrechung der Arbeit scheint als notwendig, sofern keine umfänglichen Kenntnisse und Routinen über den Arbeitsschritt bestehen. Falls die Mitarbeiter mögliche Hinweise zu einem Arbeitsschritt für die Kollegen oder Änderungen für die Planer haben, werden die Notizen handschriftlich in den Arbeitspapieren vermerkt. Aktuelle Informationen werden so mit Verzögerungen in die Unterlagen eingepflegt. An den Montagearbeitsplätzen kommen keinerlei Maschinen zum Einsatz, die den Digitalisierungsprozess nach dem I4.0 Gedanken fördern könnten. Somit ist der Begriff „Industrie 4.0“ hier als die Ausstattung der Mitarbeiter mit mobilen Endgeräten zu verstehen. Diese erhöhen die Kommunikationsfähigkeit zwischen Mitarbeiter und Planungssystem des Unternehmens und erlauben so den Zugang zu aktuellen Auftragsinformationen. Durch die Nutzung der mobilen Endgeräte können die Mitarbeiter so in den Digitalisierungsprozess integriert werden.

5.1 Implementierung des Maximalnetzplans

Die Implementierung erfolgte strukturiert nach Frontend und Backend. Eine SQL-Datenbank dient als verbindendes Element zwischen beiden Systemteilen. Entsprechender Aufbau ist in der Abbildung 5.1 veranschaulicht. Das Frontend wird als Synonym für die Verwendung der mobilen Endgeräte auf der Produktionsebene verwendet und entsprechend das Backend für den MNP. Durch die Nutzung unterschiedlicher mobiler Endgeräte, wie Smartglasses, Mobiltelefone und Tabletcomputer, können Benutzer mit verschiedenen Rollen Auftragsdaten abrufen oder Statusinformationen eines Auftrags ändern. Jeder Auftragsabruf führt zur Bestimmung des nächst günstigsten Prozessschritts unter Zugrundelegung der aktuellen Status aller Aufträge und des MNPs.

Als Erprobungsbeispiel wurde eine Komponente der Ariane Oberstufe ausgewählt, der sogenannte Acceleration Rocket Frame (ARF). Dessen Funktion darin besteht, Zusatzbooster zum Beschleunigen und Steuern der Oberstufe nach der Trennung von der ersten Stufe aufzunehmen. Es wurde ein Testbauteil der Grundstruktur hergestellt, die zu montierenden Komponenten wurden soweit möglich beschafft und fehlende Elemente mittels additiver Verfahren gefertigt. Zudem wurden unter Einbeziehung der Planer die notwendigen Vorgangsrelationen für die Erstellung des MNPs aufgestellt und im System hinterlegt. Ebenfalls diente der ARF als Grundlage für eine Testumgebung der mobilen Endgerätenutzung. Die einzelnen Geräte wurden für eine Nutzung entsprechend evaluiert, vergleichen Sie hierzu den Abschnitt 5.2. Da die Geräte einen geringen Platzbedarf vorweisen und mittels geeigneten Halterungen am Personal befestigt werden können, ist die Mitnahme zu auftragsspezifischen Arbeitsplätzen gewährt. Das Abrufen benötigter Informationen ist folglich im Vergleich zu der papierbasierten Dokumentation außerhalb des Arbeitsplatzes nicht zeitlich beschränkt. Ein weiteres Produktionsszenario bei denen die mobilen

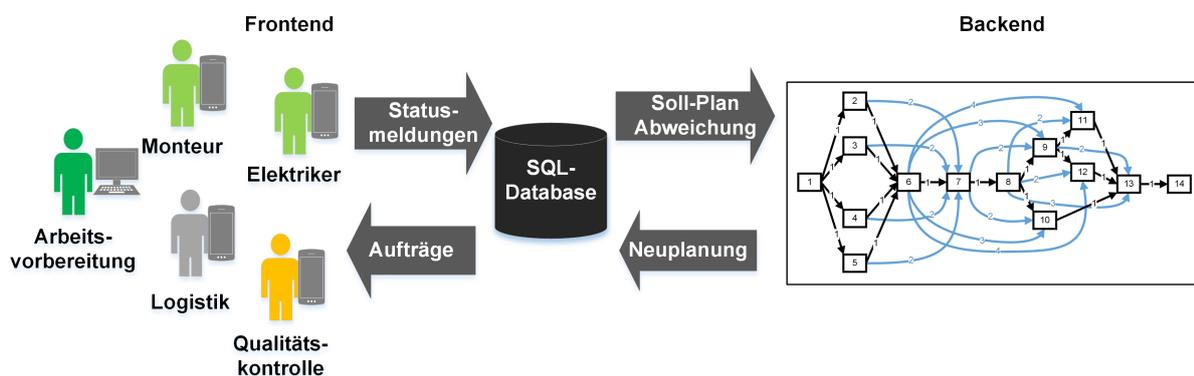


Abbildung 5.1: Implementierungskonzept des auf den Maximalnetzplan basierenden Planungs- und Steuerungssystems

Endgeräte ihre Vorteile präsentieren sind ungeplante Störungsereignisse während des Produktionsprozesses. Diese verhindern eine Fortführung der Arbeiten an einem störungsverknüpften Vorgang. In derartigen Fällen wird von den Mitarbeitern die Erstellung einer Störungsmeldung verlangt. Die mobilen Endgeräte können mit einer geeigneten Benutzeroberfläche diesem Prozess dienlich sein. Nach erfolgreicher Meldung der Störung bedarf der Mitarbeiter eine alternative Aufgabe. Üblicherweise werden diese Alternativen erst bei Störungseintritt evaluiert. Solche Prozesse können von mehreren Tagen bis hin zu mehreren Wochen benötigen. Der im Kapitel 4 beschriebene MNP verkürzt diesen Prozess durch Verwendung der in Produktionsplanungsphase generierten Informationen. Für die umfängliche Nutzung bedarf es jedoch einige Voraussetzungen.

5.1.1 Voraussetzung zur Implementierung des Maximalnetzplans

Beide Systemteile (Frontend, Backend) sind durch eine SQL-Datenbank verbunden. Die Kommunikation erfolgt über das Internet Protocol (IP), wodurch es ermöglicht wird die Geräte sowohl über WiFi als auch Ethernet mit einander verbinden zu können. Die Datenbank dient zur Speicherung benötigter Prozessdaten analog zu einem PPS-/ERP-System. Das Front- und Backend verwendet diese Daten zur Anzeige der Prozessinformationen. Bei der Speicherung dieser Daten wurde sich an der bereits existenten Vorgehensweise der ArianeGroup orientiert und diese in einigen Bestandteilen erweitert. In zahlreichen produzierenden Unternehmen sind diese Systeme auf analoge Weise aufgebaut. Essentiell ist die Trennung zwischen den Planungsdaten, auch als Stammdaten bezeichnet und den aktuellen Produktionsdaten. Die Stammdatentabelle beinhaltet die in der Planungsphase des Produktionsprozesses erarbeiteten Daten. Es werden unter anderem die Vorgangsrelationen (Nachfolger, Alternativen, Vorbedingungen) der einzelnen Vorgänge sowie grundlegende Vorgangsdaten, wie Bearbeitungszeiten hinterlegt. Die Abbildung 5.2 zeigt einen Ausschnitt der Stammdatentabelle. Das System erlaubt mit der Speicherung, des innerhalb der Planungsphase aufwendig generierten Wissens, insbesondere den erarbeiteten Alternativen und Vorbedingungen einzelner Aufträge, zu dokumentieren und der PPS zur Verfügung zu stellen. Zur Darstellung des idealen Prozessablaufs sind alleine die Nachfolgebeziehungen von Notwendigkeit. Im MNP wird dieser durch die schwarzen Kanten mit einem Kantengewicht $w_{ij} = 1$ repräsentiert. Die Erweiterung zum MNP ergibt sich durch die Verwendung der zusätzlichen Information über die Alternativen sowie die Vorbedingungen, die insbesondere bei der Evaluation der Alternativen Beachtung finden. Innerhalb der Stammdaten werden für diesen Zweck in den entsprechenden Spalten die Vorgang ID's hinterlegt. In den Spalten „nachfolger“ und „alternativen“ werden die hinterlegten Vorgänge nicht unterschieden und durch Kommata getrennt. Die entsprechende Gewichtung der Alternativen wird nach dem Einlesen der Daten vom Algo-

mitarbeiteranzahl	abteilung	qualifikationen	vorbedingung	nachfolger	alternativen	vorgabezeit _{IM}	status	version
1	ARQ			2,3		25	1	1-5
0	ARINT			4		100	1	1-5
1	ARINT			4		25	1	1-5
1	ARQ			5,6,7	16	5	1	1-5
1	ARINT			8		80	1	1-5
1	ARINT			9	15	70	1	1-5
1	ARINT			10		80	1	1-5
1	ARQ			11,12		5	1	1-5
1	ARQ		\$6	11,12		5	1	1-5
1	ARQ			11,12		5	1	1-5
1	ARINT		8	13	15,14	70	1	1-5
1	ARINT			14	15,14	90	1	1-5

Abbildung 5.2: Ausschnitt Stammdatentabelle; Speicherung notwendiger Prozessinformationen zur Erzeugung des Maximalnetzplans

rithmus des MNPs durchgeführt. Hingegen ist eine Unterscheidung der Vorbedingung bereits in der Datenbank implementiert. Die Vorbedingungsarten restriktiv und unabdingbar werden durch das \$-Symbol unterschieden. Der Algorithmus interpretiert jede Vorgangsnummer vor diesem Symbol als restriktive Vorbedingungen. Jede auf das \$-Symbol folgende Vorbedingung wird als unabdingbar interpretiert. In beiden Fällen werden, wie in den Spalten für Nachfolger und Alternativen, mehrere Vorbedingungen durch Kommata getrennt. Zur Erzeugung des MNPs werden zum Start des Programms die Vorgangsrelationen aus der Datenbank abgerufen und in die erweiterte Adjazenzmatrix überführt. Die Darstellung des MNPs wird je nach Produktionsstatus aktualisiert. Zur Aktualisierung der Statusinformation werden Informationen aus der Produktionsdatentabelle benötigt. Im Gegensatz zu der Stammdatentabelle sind innerhalb der Produktionsdaten ausschließlich Vorgänge hinterlegt, die für eine Bearbeitung bereits freigegeben

wurden. Die Produktionsdaten beschreiben neben dem aktuellen Ist-Stand des Auftrags weitere Daten, wie zuständige Mitarbeiter oder aktuelle Statusinformationen. Neben der Visualisierung der Prozessabfolge agiert das System reaktiv auf Störungsereignisse indem es Ausweichvorgänge evaluiert und dem Anwender in priorisierter Reihenfolge zur Auswahl präsentiert. Für diesen Zweck sind innerhalb der SQL-Datenbank eine Triggerliste und eine Störungstabelle hinterlegt. Erst genannte enthält Werte, die durch die Veränderung eines Vorgangstatus oder die Meldung einer Störung beeinflusst werden. Mit einer Abtastrate von zehn Sekunden überprüft der MNP die Triggerwerte. Hierbei ist es nicht von Belangen eine möglichst geringe Abtastrate zu wählen. Es sollte lediglich gewährleistet sein, dass eine Statusänderung nicht mit einer Verzögerung von mehreren Minuten registriert wird.

Nachdem die Änderung des Triggers vom MNP registriert wurde, weist die Benutzeroberfläche den Nutzer auf die Hinterlegung einer Störung hin. Es wird die Darstellung des MNPs durch Veränderung der Vorgangsfarbe entsprechend der möglichen Status aus Tabelle 4.7 aktualisiert. Dem Entscheider ist es nun möglich sich die Alternativvorgänge eines Vorgangs anzuschauen und dem Mitarbeiter entsprechend zuzuweisen.

Anschließend wird eine Meldung erzeugt und der MNP, sobald der entsprechende Vorgang durch den Mitarbeiter begonnen wurde, aktualisiert.

Die Störungstabelle enthält alle Störungen, die während des gesamten Produktionsprozesses auftraten. Um eine umfängliche und schnelle Behebung der Störung gewährleisten zu können, ist es notwendig, dass der Produktionsmitarbeiter eine umfassende Beschreibung der Störung durchführt. Durch die Nutzung von digitalen Medien, wie Fotos, Videos, Texten und Sprache, vergleichen Sie Abschnitt 5.2, ist es möglich einen entsprechenden Detaillierungsgrad der Störungsdokumentation zu erstellen. Diese Informationen werden unter anderem mittels Verwendung der Auftragsidentifikationsnummer (Auftrags-ID), dem Namen des Mitarbeiters und dem Störungseintritt in der Tabelle gespeichert. Darüber hinaus ist ein Bearbeitungsstatus der Störung angegeben. Diese Informationen werden dem Entscheider bei der Auswahl einer Alternative zur Verfügung gestellt.

Die detaillierte Beschreibung der Benutzeroberfläche folgt im nachfolgenden Abschnitt.

5.1.2 Bedienung des Maximalnetzplans mittels Benutzeroberfläche

Der Entscheider soll mit Hilfe des MNPs in Situationen des Störungseintritts unverzüglich in dessen Entscheidungsprozess unterstützt werden können. Um eine Interaktion mit dem Netzplan zu ermöglichen und um zusätzliche Informationen für Entscheidungsprozesse darbieten zu können, wurde der MNP in eine Benutzeroberfläche integriert. Bei der Erarbeitung einer Benutzeroberfläche wurde sich an den Grundsätzen von Cooper und seinen Kollegen [16] orientiert. Die

nachfolgenden Abbildungen 5.3 bis 5.6 stellen eine verkürzte Darstellung des Programms dar. Ein Video abrufbar über den Link: <https://youtu.be/EOL6eafT3BE> zeigt ausführlich die Bedienung der Software. Die Abbildung 5.3 zeigt den Programmstart. Zum Start des Programms wird dem Anwender ermöglicht, auf die gewünschten Datensätze zum Produktionsablauf zugreifen zu können. Hierzu wird eine IP-Schnittstelle zur Kommunikation mit der SQL-Datenbank verwendet. In diesem Startfenster ist es möglich, die speziellen Verbindungsinformationen unter „Verbindungsdetails“ angeben zu können. Hier können vordefinierte Verbindungen verwendet oder entsprechende Serveradressen eingetragen werden. Für weiterführende Verwendung können diese Verbindungsinformationen unter Nutzung der Taste „Als Vorlage speichern“ langfristig bewahrt werden. Zudem kann durch Betätigen „gewählte Vorlage löschen“, sofern eine vordefinierte Verbindung mit Hilfe des entsprechendem Reiters ausgewählt wurde, eine bereits definierte Verbindung gelöscht werden. Nach Auswahl des Datensatzes bedarf es die Eingabe von Benutzerinformationen. Diese sind ebenfalls in der Datenbank hinterlegt und bedürfen das Anlegen vor der Verwendung der MNP-Software. Durch klicken auf „Verbinden“ werden die eingegebenen Benutzerinformationen mit denen in der Datenbank hinterlegten Informationen verglichen. Sofern die Daten übereinstimmen, ist der Anwender in der Lage einen aus denen in der Datenbank gespeicherten Datensätzen zu wählen.

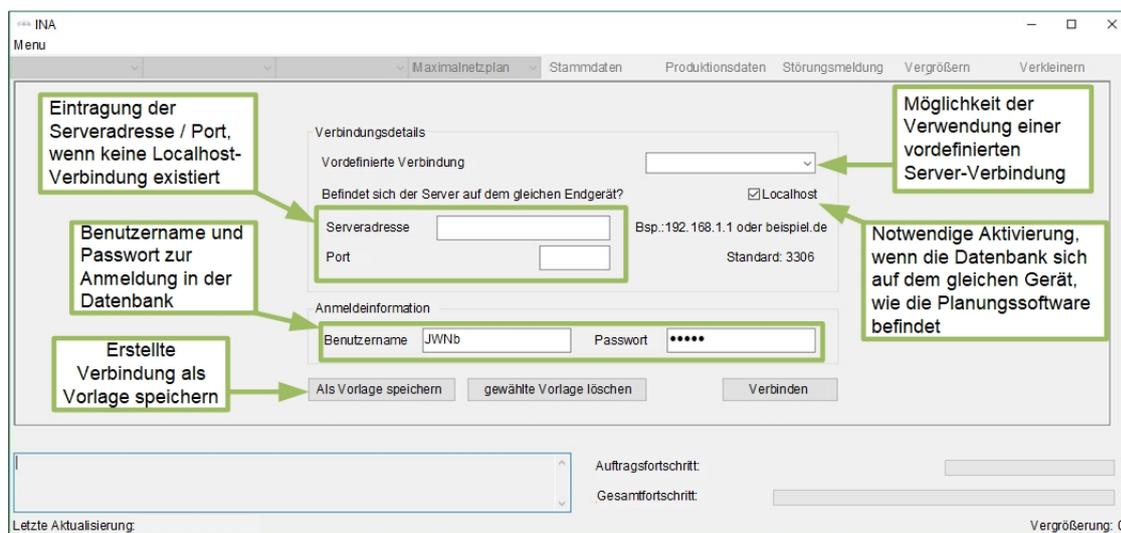


Abbildung 5.3: Darstellung des Startbildschirms der Maximalnetzplan-Bedienungssoftware

Im Beispiel aus der Abbildung 5.4 findet der Datensatz „arf_demo“ Verwendung. Anschließend bedarf es der Auswahl einer Modellnummer. Diese beschreibt die herzustellende Produktvariante. Innerhalb des Beispieldatensatzes ist lediglich eine Variante hinterlegt. Es ist hingegen möglich weitere Modellnummern anzubieten, wodurch abweichende Vorgangsabfolgen der einzelnen Produktvarianten mittels MNP beschreibbar sind. Die Modellnummer kann beispielgebend eine Entwicklungsstufe des Produkts referenzieren. Eine Weiterentwicklung des Produkts kann zur Änderung von Vorgangsrelationen führen, wodurch die Einführung differenter Modellnummern begründet ist. Nachdem durch den Nutzer eine Modellnummer gewählt worden ist, erfolgt die Darstellung des MNPs. Es werden die innerhalb der Stammdatentabelle hinterlegten Vorgangsrelationen visualisiert. Innerhalb des dargestellten Beispiels sind die ersten vier Vorgangsknoten bereits abgeschlossen. Aus diesem Grund werden diese mit einer grünen Umrandung wiedergegeben. Je nach Vorgangstatus verändert sich die Umrandung entsprechend der möglichen definierten Produktionsstatus, wie Sie in dem Kapitel 4 definiert sind. Die bereits beschriebene Abtastrate im Abschnitt 5.1.1 wird dem Anwender durch die letzte Aktualisierung im linken unterem Rand der Benutzeroberfläche wiedergegeben. Somit wird verdeutlicht, ob das Überprüfen des Datensatzes gewährleistet ist. Zusätzlich werden mittels Textfeld Informationen über Statusänderungen in Kombination mit einem Zeitstempel dem Anwender dargelegt. Aufgrund beschränkter Bildschirmgrößen wurde die Anzahl an zeitgleich angezeigten Vorgängen begrenzt. Diese fördert die Bedienbarkeit des Systems. Über die Auswahl „Zentraler Knoten“ kann der Fokus der Visualisierung selbst bestimmt werden. Innerhalb des Reiters sind alle im Netzplan enthaltenen Knoten hinterlegt.

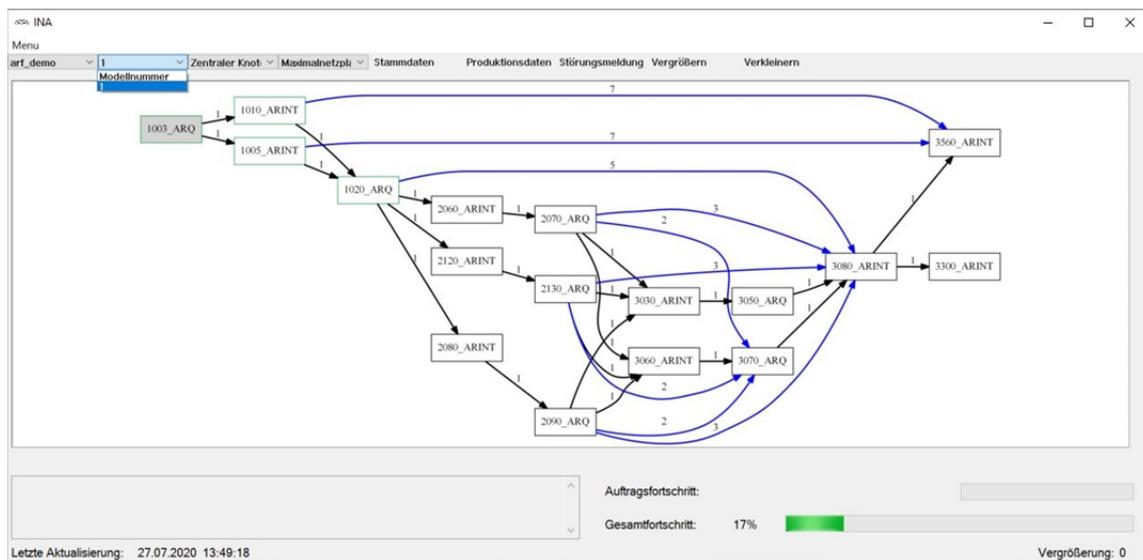


Abbildung 5.4: Darstellung vom Simulationsbeginn des Beispielprodukts

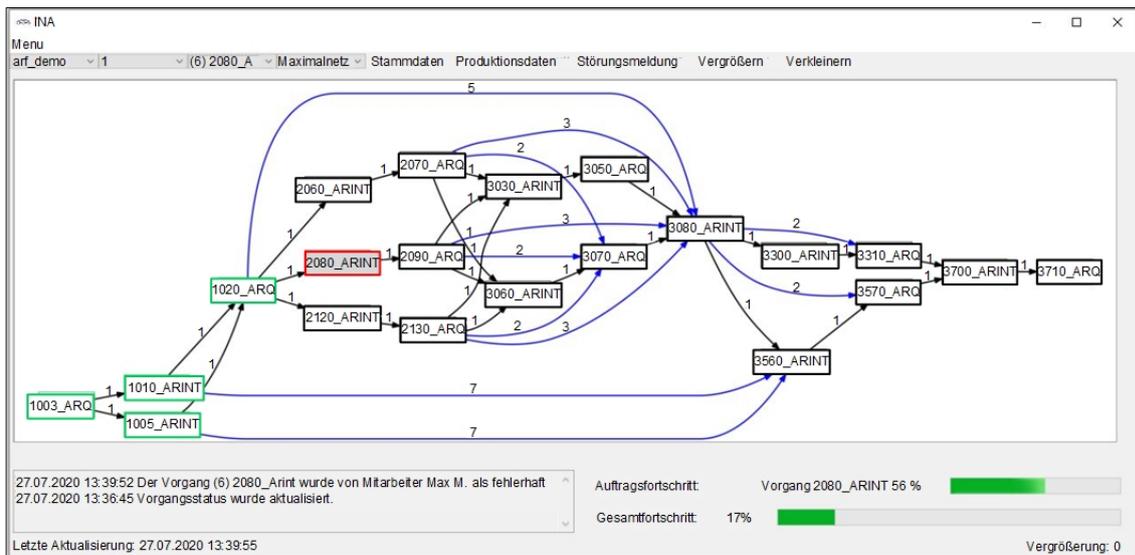


Abbildung 5.5: Darstellung eines fehlerhaften Vorgangs unter Nutzung des Maximalnetzplans

Der gewählte Knoten wird im Netzplan grau markiert und die Darstellung je nach Position des Knotens im Netzplan angepasst. Darüber hinaus ist es dem Nutzer möglich den Netzplanausschnitt als MNP, Soll-Netzplan oder Alternativ-Netzplan anzuzeigen. Dieses soll eine visuelle Überlastung des Anwenders vermeiden und den Informationsgehalt entsprechend reduzieren. Der MNP zeigt, wie im entsprechenden Kapitel beschrieben, alle Soll-Relationen (schwarze Pfeile) einschließlich den Alternativen (blaue Pfeile). Der Soll-Netzplan unterdrückt die Darstellung von Alternativen. Es werden ausschließlich die Relationen mit dem Kantengewicht 1 angezeigt. Die Abbildung 5.6 veranschaulicht die dritte MNP Darstellungsoption, der Alternativ-Netzplan. Diese ermöglicht es in Störungssituationen ausschließlich die Alternativen anzuzeigen, die für den fehlerhaften Vorgang als Alternative durchgeführt werden können. Der Algorithmus entnimmt hierzu die Vorgänge aus der Zeile des Fehlervorgangs innerhalb der Adjazenzmatrix und stellt die Einträge mit einem Wert größer als eins auf entsprechende Visualisierungsart dar. Der Nutzer erhält über die Taste „Störungsmeldung“ die Information über gemeldete Störungen, sowie die mittels Entscheidungskriterien (Abschnitt 4.3) evaluierten Alternativen eines fehlerhaften Vorgangs. Weiterführende Information über den aktuellen Produktionsprozess und das herzustellende Produkt können über die Tasten „Stammdaten“ und „Produktionsdaten“ eingesehen werden.

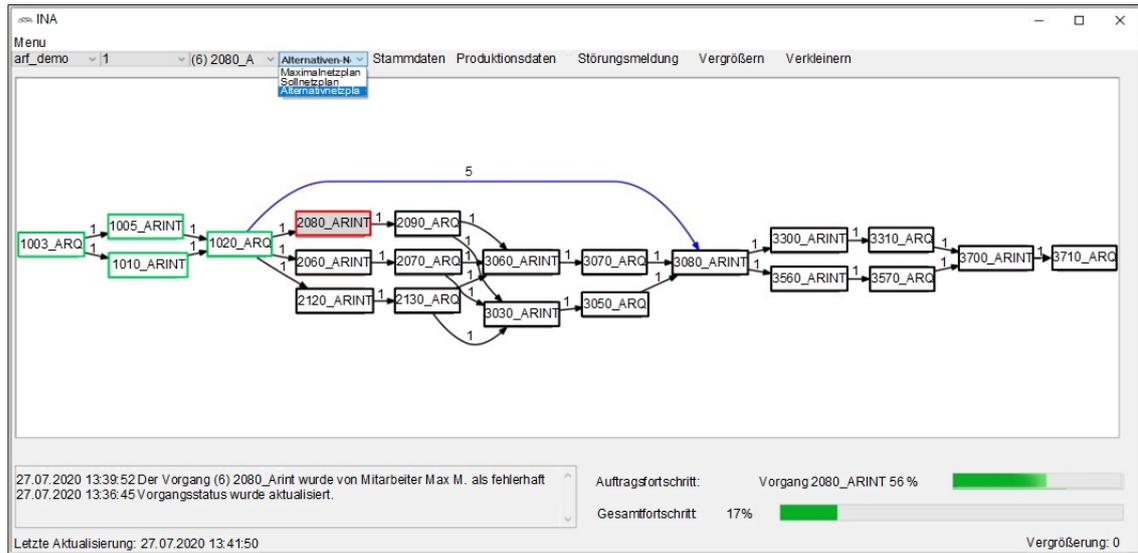


Abbildung 5.6: Darstellung der Alternativen des Fehlerknotens unter Nutzung des Alternativ-Netzplans

5.2 Kommunikation und Interaktion mit mobilen Endgeräten

In vielen Unternehmen werden papierbasierte Dokumente, wie als exemplarisches Beispiel bei der ArianeGroup, eingesetzt, um den Mitarbeitern auf der Produktionsebene die Auftragsinformationen zukommen zu lassen. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht zukunftsfähig. Das Papier wird als Informationsträger vollständig durch digitale Medien abgelöst werden [104]. Das Gesamtkonzept in dem der MNP implementiert wurde bedient sich daher der Benutzung mobiler Endgeräte. Diese sollen den Mitarbeitern als Frontend die benötigten Auftragsinformationen zur Verfügung stellen und ihnen bei Störungseintritt ermöglichen einen umfassenden Bericht inklusive digitaler Medien zu verfassen. Bevor eine geeignete Anwendung erarbeitet werden konnte, galt es die Rahmenbedingungen für verwendbare mobile Endgeräte zu definieren. Zusammenfassend sind die untersuchten Eigenschaften in der Abbildung 5.7 dargestellt. Die einzelnen Geräte sind unter Beachtung der Bildschirmgröße und deren allgemein üblichen Interaktionsmöglichkeiten gegenüber gestellt und verglichen worden. Diese Kriterien sind im Umfang des erstellten Konzepts von Interesse, da die Mitarbeiter sich in einem räumlich sehr begrenzten Arbeitsumfeld aufhalten, wodurch die Bewegungsfreiheit nur eingeschränkt vorhanden ist. Zudem sollten die verwendeten Geräte den Mitarbeitern dienlich in der Erstellung von Störungsmeldungen sein und keine zusätzliche potentielle Fehlerquelle darstellen. Die Mitarbeiter benötigen ihre Hände zur Montage von Bauteilen und Bedienung von Werkzeugen. Dies führt zur Notwendigkeit, dass die untersuchten Geräte nach Möglichkeit gänzlich ohne Hände, somit per Sprachsteuerung, oder einhändig bedient werden können. Hierbei wurden die Nachteile eines Tablet-PCs/Smartphones und einer

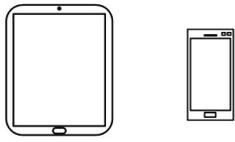
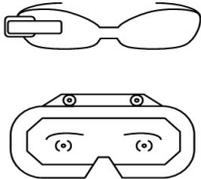
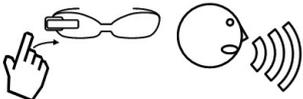
Art des mobilen Endgeräts	Tablet/Smartphone 	Smartwatch 	Smartglass 
Bildschirmgröße	5-14 Zoll	0,7 - 2 Zoll	~ 4 Zoll; komplettes Sichtfeld
Interaktionsmöglichkeiten	 Swipe-/Touch-Funktion, virtuelle Tastatur	 Swipe-/Touch-Funktion	 Gestensteuerung, Spracherkennung

Abbildung 5.7: Evaluierung der möglichen mobilen Endgeräte zur Nutzung im Frontend Bereich

Smartwatch gegenüber Head-Mounted Displays (HMD), den sogenannten Smartglasses deutlich. Smartwatches bedürfen zwar weniger Bauraum, jedoch wirkt sich die geringe Bildschirmgröße nachteilig auf die Informationswiedergabe und Interaktionsmöglichkeiten aus. Durch die Montage am Handgelenk bedarf die Interaktion grundsätzlich beide Hände; eine zur Rotation des Handgelenks, die zweite zur Bedienung. Ebenfalls auf die geringe Bildschirmgröße zurück zu führen, ist die Größe virtueller Tasten. Ein einfaches Erstellen textbasierter Störungsmeldung ist damit nicht gegeben. Smartwatches mit Sprachbedienungsfunktion wurden zur Verwendung nicht untersucht. Zudem verfügen diese Geräte nicht über eine integrierte Kameralinse, wodurch das Anheften von Videos und Fotos an Störungsmeldungen mittels Smartwatch nicht durchführbar ist. Für diesen Zweck bedürfte es eine externe Digitalkamera zur Bildaufnahme sowie einen PC zur Verknüpfung der Störungsmeldung und den Bildern. Dieses würde einen ähnlichen Umfang zur Meldung einer Störung, wie der Ist-Zustand bedeuten und folglich keinen Mehrwert bieten. Tablet-PCs und Smartphones hingegen verfügen über einen hinreichend großen Bildschirm, um den Mitarbeitern die benötigten Informationen auf unkomplizierte Weise wiedergeben zu können und um die Bedienung einer virtuellen Tastatur bequem zu ermöglichen. 2019 verwendeten 79,9% der deutschen Bevölkerung ein Smartphone [62], wodurch die Nutzung in den meisten Fällen im privaten Gebrauch als bekannt angenommen werden kann. Eine lange Eingewöhnungszeit der Nutzung dieser Geräte innerhalb der Produktion wäre somit nicht notwendig. Zudem verfügen Smartphones und Tablets über Kameras und Mikrofone, wodurch die beschriebenen Nachteile von Smartwatches nicht zum tragen kommen. Jedoch ist auch bei diesen Endgeräten mindestens eine Einhandbedienung notwendig, was während der Tätigkeiten, bei denen der Mitarbeiter keine freie Hand zur Interaktion hat, von Nachteil ist. Hier ist

die letzte Gerätekategorie im Vorteil. Smartglasses werden am Kopf des Mitarbeiters befestigt, wodurch sie keine zusätzliche Ablagefläche, wie bei Verwendung von Smartphones oder Tablets benötigen. Die Sprachsteuerung ist bei einigen Smartglasses so ausgereift, dass auch im produktionstechnischen Arbeitsumfeld eine Bedienung möglich ist. Insbesondere die Realwear HMT-1 bewies eine gute Eignung zur Interaktion per Sprache.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde sich bei der App Entwicklung auf die vordergründige Verwendung von HMD konzentriert. Anhand der Realwear HMT-1 wurde die Applikation zur Verwendung der Sprachsteuerung optimiert, jedoch so konstruiert, dass eine Nutzung auf Smartphone oder Tablet-PCs ebenfalls möglich ist.

Es ist jedoch eine Ablösung der papierbasierten Dokumentation durch eine digitale Version und folglich den Schritt zu papierlosen Produktion ohne die Unterstützung der Mitarbeiter nicht umsetzbar. Diese müssen das digitale System nutzen und pflegen. Wird dieses verweigert, so ist eine umfängliche Digitalisierung und der Schritt zur I4.0 nicht möglich. Zur Steigerung der Akzeptanz von digitalen Auftragsinformationen und der Verwendung von mobilen Endgeräten, ist es daher sinnvoll in der Software gängige Praktiken der Mitarbeiter zu implementieren. Beispielsweise notieren die Mitarbeiter bei der ArianeGroup handschriftlich auf den Auftragspapieren zusätzliche Informationen, die ihnen und ihren Kollegen bei der weiteren Tätigkeitsdurchführung von Nutzen sind. Bei der Umsetzung des Frontends galt es daher, die Mitarbeiter aktiv in den Umsetzungsprozess einzubinden und ihnen so die Möglichkeit zu bieten aktuelle Gewohnheiten, wie die Erstellung von Notizen, auch bei der Nutzung digitaler Medien beibehalten zu können. Folglich galt es sowohl eine geeignete, verlustfreie Darstellung der benötigten Informationen zu ermöglichen, als auch die Gewohnheiten der Mitarbeiter in die Android Applikation zu integrieren.

Innerhalb des CoRiFe-Projekts wurde eine App geschrieben, die diesen Anforderungen gerecht werden konnte. Die Abbildungen 5.8 - 5.11 geben einen Überblick über den Funktionsumfang der Software.

Zur Nutzung der App muss der Mitarbeiter sich mit einem benutzerspezifischem QR-Code anmelden. War dieses erfolgreich, so sind für den Benutzer zwei Hauptbereiche der Anwendung erkennbar. Im rechten Bereich werden Notizen der Mitarbeiter zu den jeweiligen Aufträgen angezeigt. Diese Notizen sind wie Klebenotizen innerhalb von papierbasierten Auftragsdokumenten zu interpretieren. Auf eine langfristige Speicherung wird verzichtet. Nachdem die Notiz erstmalig gelesen wurde, wird diese unwiderruflich gelöscht. Am linken Bildschirmrand werden die für den Mitarbeiter freigegebenen Aufträge aufgelistet (Abbildung 5.8). Die einzelnen Aufgaben sind mit einem Farbcode versehen. Der in der Abbildung gelb dargestellte Vorgang ist für die Fertigung freigegeben und wurde bisher von keinem Mitarbeiter begonnen. Die Zahl rechts innerhalb des gelben Felds, impliziert diesen Status ebenfalls. Daneben existieren noch weitere Status, wie

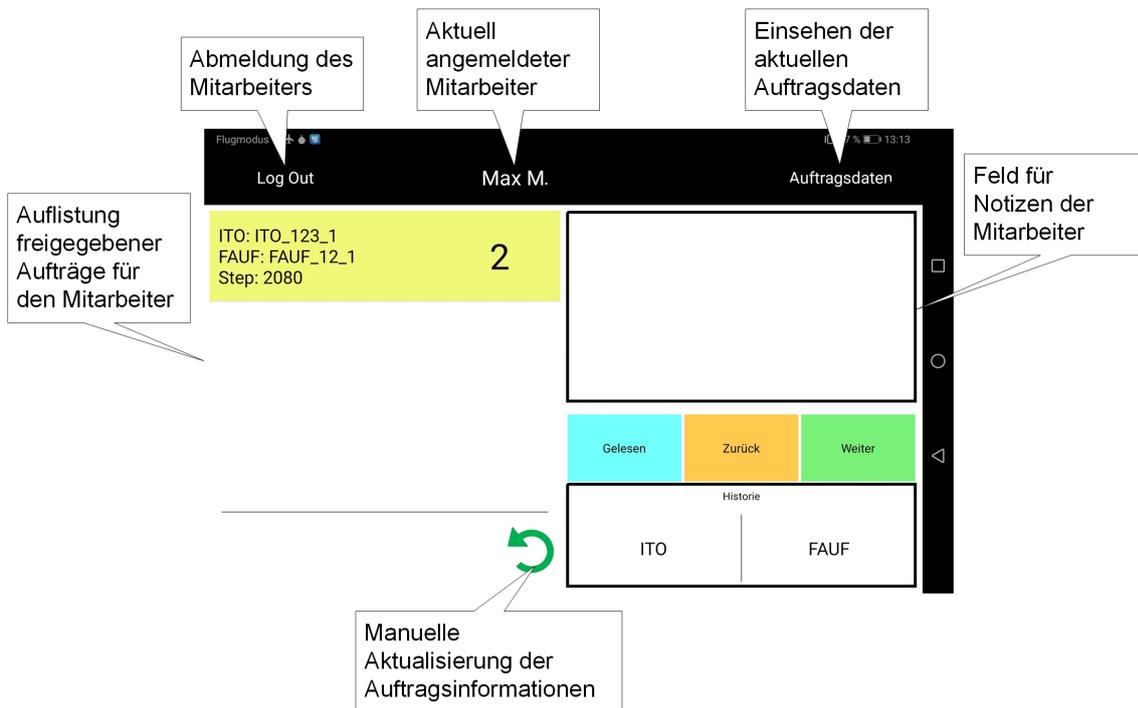


Abbildung 5.8: Oberfläche zur Darstellung aktueller Aufträge für den jeweiligen Mitarbeiter

„gestört“, „pausiert“ oder „Störung behoben“. Diese werden gleichermaßen durch Farb- und Zahlencodierungen innerhalb der Applikation repräsentiert. Der Nutzer kann durch diese prägnanten Codierungsschemata der Vorgangstatus die Dringlichkeit eines Auftrags schnell erfassen. Als Beispiel dienen blau dargestellte Vorgänge. Bei diesen ist eine eingetretene Störung bereits behoben worden. Der Mitarbeiter hat verfügbare behobene Aufträge, sobald er seinen aktuellen Auftrag beendet hat, umgehend zu beginnen. Der aufgrund der Störung übersprungene Vorgang wird dadurch wieder in den Prozess integriert. Im Sinne des MNPs kehrt der Mitarbeiter durch diese Vorgehensweise auf den Soll-Prozess zurück. Die Applikation ruft die Auftragsdaten automatisch aus der Datenbank ab, wodurch die Liste in einem definierten zeitlichen Abstand aktualisiert wird. Hierzu ist im Quellcode eine entsprechende Abtastrate hinterlegt. Zusätzlich wird dem Anwender durch die Nutzung des grünen Pfeils am unterem Rand des Bildschirms ebenfalls eine manuelle Abfrage ermöglicht. Innerhalb der Liste können mehrere Aufträge angezeigt werden. Dieses steht in Abhängigkeit mit der Anzahl für den Mitarbeiter freigegebenen Tätigkeiten. Gespeichert sind diese Informationen in der Datenbank.

Wählt der Anwender durch Klicken auf den jeweiligen Job diesen aus, so können detaillierte Auftragsdaten eingesehen werden. Es wird dadurch zugelassen sich vor dem Beginn der Tätigkeit mit den jeweiligen Anforderungen vertraut zu machen. Diese Vorgehensweise ist eine Analogie

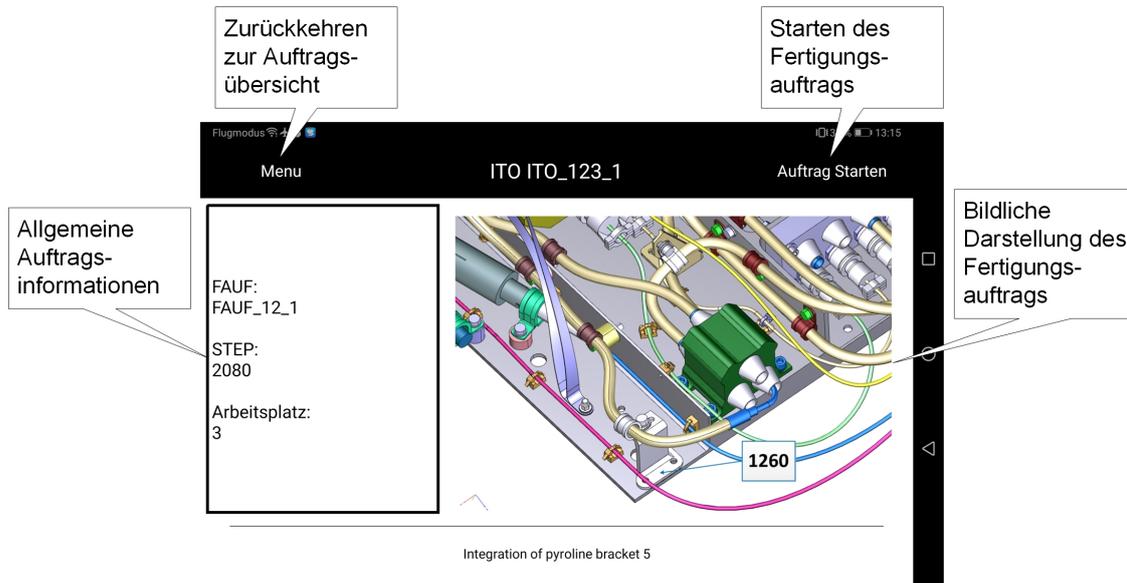


Abbildung 5.9: Übersicht der Auftragsinformationen zur Einsicht vor dem eigentlichen Auftragsstart

zu der Verwendung der papierbasierten Auftragsdaten. Bevor die Mitarbeiter mittels Betriebsdatenerfassungssystem den Auftrag als gestartet melden, ist es ihnen möglich die Dokumente des Auftrags zu sichten. In der Abbildung 5.9 ist die dazugehörige Darstellung veranschaulicht. Dem Mitarbeiter werden neben den allgemeinen schriftlichen Auftragsdaten (links) eine bildliche Darstellung (rechts) zur Verfügung gestellt. Den Auftragsstart vollführt dieser über den gleichnamigen Button im oberen rechten Rand der Applikation, wodurch eine Rückmeldung in die Datenbank erfolgt und dieses somit online in den Auftragsdaten vermerkt wird. Möchte der Anwender den Arbeitsauftrag noch nicht starten und in das Hauptmenü zurückkehren, so ist dieses über die entsprechende virtuelle Taste „Menu“ durchführbar. Dem Nutzer wird so eine gewisse Entscheidungsfreiheit eingeräumt. Diese Freiheit kann durch die Entscheider mit der Anzahl an für den Mitarbeiter freigegebenen Aufträge beschränkt werden. Weniger Aufträge weisen folglich auf eine geringere Entscheidungsfreiheit für den Werker hin. Beginnt der Werker hingegen den Auftrag, so werden die spezifischen Informationen entsprechend der Arbeitsschritte Seitenweise präsentiert, veranschaulicht in der Abbildung 5.10. Die Navigation erfolgt mittels an der linken Bildschirmseite fixierten virtuellen Pfeiltasten. Eine Schwierigkeit in der Darstellung der Auftragsdaten ist die Menge an Informationen, die zeitgleich zur Verfügung gestellt werden muss. Eine Überanstrengung des Nutzers soll schließlich vermieden werden. Aus diesem Grund wurde versucht die schriftliche Tätigkeitsbeschreibung zu reduzieren, die Inhalte seitenweise zur Verfügung zu stellen und durch eine bildliche Darstellung zu ergänzen. Dem Anwender wird durch einen Wechsel der Ansicht zwischen schriftlicher und bildlicher Beschreibung erlaubt,

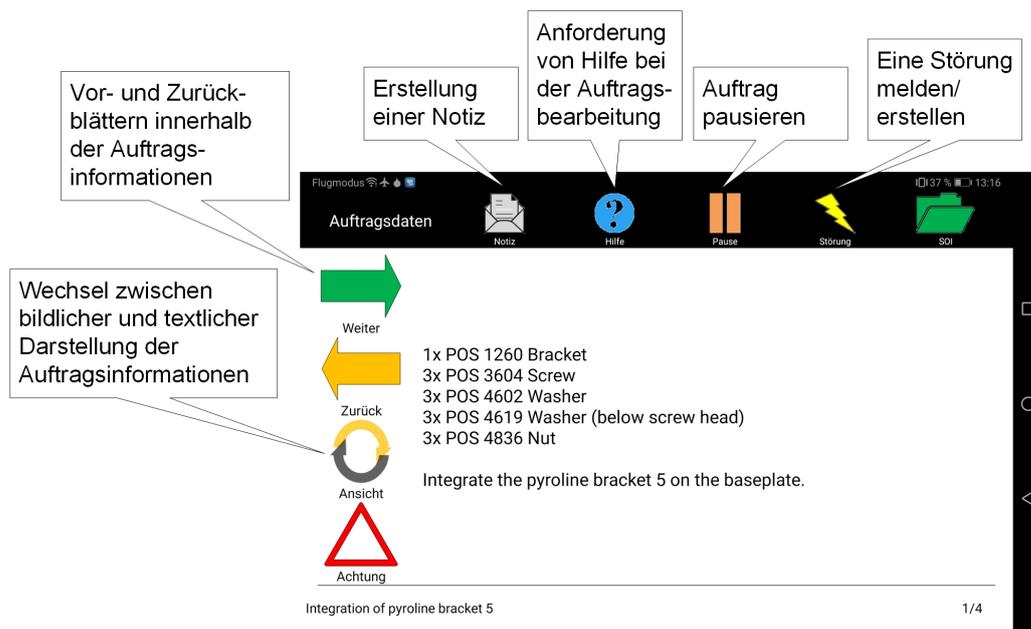


Abbildung 5.10: Seitenbasierte Darstellung der Auftragsinformationen

sich die Art der Informationsbereitstellung eigens einzurichten. Neben Fotografien der Bauteile können Ausschnitte aus CAD-Dateien und technischen Zeichnungen angezeigt werden. Hierzu ist es notwendig die entsprechenden Dateien in der Datenbank zu hinterlegen. So können umfassende schriftliche Tätigkeitsbeschreibungen vermieden und Arbeitsabläufe stattdessen unter Verwendung von bildlichen Darstellungen erläutert werden. Zu Beginn dieses Abschnitts wurde erwähnt, dass die Mitarbeiter sich für die Hilfestellung ihres Arbeitslaufes und den ihrer Kollegen Hinweise in die Auftragspapiere notieren und dass diese Notizen in dem Startbildschirm der Applikation angezeigt werden. Diese Anmerkungen können während der Auftragsbearbeitung erstellt und einem Kollegen hinterlassen werden. Die entsprechende Taste befindet sich am oberen Rand des Bildschirms, dargestellt durch einen Brief in einem Umschlag. Eine wichtige und gängige Praktik konnte so in die Applikation implementiert werden. Darüber hinaus wird dem Anwender ermöglicht Hilfe bei der Bearbeitung anzufordern oder den Auftrag nach Bedarf zu pausieren.

Ein weiteres Hauptkriterium bei der Erstellung der Android-Applikation bestand in der Option auftragsbezogene Störungsmeldungen generieren zu können. Damit eine umfassende Analyse und umgehende Behebung einer Störung durchführbar ist, bedarf es eine Deskription dieser Störung seitens des Produktionsmitarbeiters.

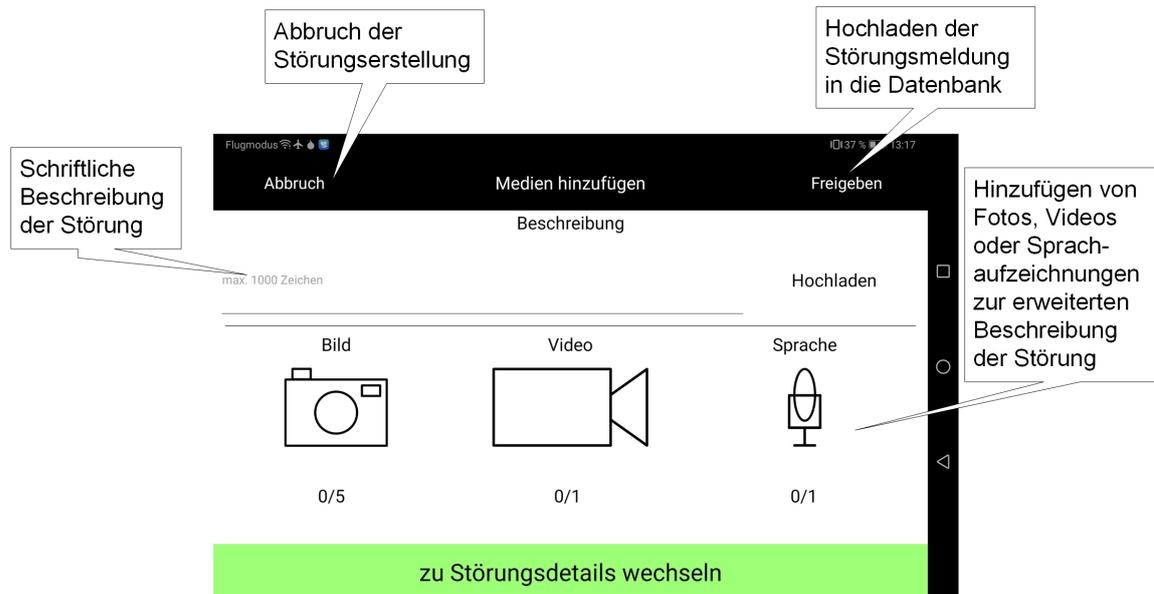


Abbildung 5.11: Oberfläche zur Erstellung von Störungsmeldungen

Die vorgefundene Ist-Situation beschreibt sich wie folgt. Zur Beschreibung des Bauteildefekts oder der Beeinträchtigung des Arbeitsablaufs muss der Werker seinen derzeitigen Arbeitsplatz verlassen und einen zentralen Computerarbeitsplatz aufsuchen. Die auftragspezifischen Arbeitsunterlagen bedarf er ebenfalls. Am PC erstellt dieser eine textbasierte Beschreibung des Fehlers. Sind weitere Medien, wie Fotos oder Videos notwendig, so muss der Mitarbeiter mit einer Digitalkamera an seinen Arbeitsplatz zurück kehren, um die notwendigen Bilder aufzunehmen. Anschließend bedarf es erneut den PC, um die aufgenommenen Bilder an die Fehlermeldung anzuhängen und diese an die entsprechende Abteilung weiterzuleiten.

Die Nutzung von mobilen Endgeräten und einer entsprechenden Applikation sollte diesen Prozess deutlich verkürzen und vereinfachen. Mobile Endgeräte erlauben durch ihre Ausstattungsmerkmale (Memofunktion, integrierte Kamera, etc.) eine dezentrale Erstellung von Störungsmeldungen. Smartphones, Tabletcomputer und Smartglasses eignen sich dazu eine derartige Berichterstattung direkt am Arbeitsplatz durchzuführen. Innerhalb der im CoRiFe-Projekt entstandenen Applikation ist es den Mitarbeitern möglich diese Funktionen der mobilen Endgeräte zu verwenden. Dadurch kann der Bericht per Text- oder Memofunktion generiert und mit Medien, wie Fotos und Videos unmittelbar verknüpft werden. Die Störungsmeldungsfunktion wird in der App-Oberfläche in der Abbildung 5.10 als Blitz dargestellt und kann durch Betätigung der hinterlegten virtuellen Taste aufgerufen werden. Die Abbildung 5.11 veranschaulicht das dazugehörige Menü. Hier kann eine schriftliche Beschreibung des Fehlers erfolgen und diese mit Fotos, Videos oder Memos verknüpft werden. Die Anzahl der jeweiligen Medien ist aufgrund der

notwendigen Speichernutzung begrenzt. Zudem haben Unternehmen für auftretende Störungen standardisierte Fehlercodes, mit Hilfe derer diese Störungen entsprechend kategorisiert werden können. Unter Verwendung der App lassen sich diese Codes ebenfalls aufrufen und somit die Störungsmeldung der jeweiligen Kategorie zuordnen. Die erstellten Berichte samt Medien werden nicht auf den Geräten gespeichert. Nach Freigabe, also Fertigstellung der Störungsmeldung durch den Mitarbeiter wird die Störungsmeldung inklusive der additionalen Medien in die Datenbank geladen und die entsprechenden Daten vom mobilen Endgerät gelöscht. So wird sichergestellt, dass bei Mitnahme des Endgeräts kein externer Zugriff auf die Störungsdaten möglich ist.

Mit Hilfe der mobilen Endgeräte wurde eine Möglichkeit geschaffen die Mitarbeiter in die Digitalisierung zu integrieren. Ihnen ist es dadurch erlaubt einen Teil der cyber-physischen Produktionssysteme und folglich von Industrie 4.0 zu werden. Die Mitarbeiter selbst erzeugen durch ihre Tätigkeiten die notwendigen Prozessdaten, um eine umfangreiche Prozessüberwachung und -analyse zu ermöglichen. Unter der Verwendung der mobilen Endgeräte ist es ihnen ohne umfangreichen additionalen Aufwand möglich diese Daten an MES und ERP-Systeme zu übergeben. Diese wiederum können die Daten den Planern so zur Verfügung stellen, um die Produktionsplanung zu verfeinern und zu verbessern.

Es wurden durch die letzten beiden Abschnitte die MNP-Technik und dessen Integration in eine Beispielumgebung dargestellt. Innerhalb des nachfolgenden Abschnitts werden der Vorteil der alternativen Vorgangspräsentation auf Basis der zeitlichen Aspekte untersucht. Hierzu werden zufallsbedingt MNPs erstellt. Die Prozesszeiten der einzelnen Pläne werden unter dem Aspekt des Störungseintritts mit und ohne der Verwendung einer Alternative untersucht. Weiterführend werden die Eigenschaften der MNP-Technik mit denen innerhalb dieser Arbeit dargelegten Verfahren tabellarisch verglichen. Durch diese Vorgehensweise werden die Vorteile der MNP-Technik zusammenfassend dargelegt.

Kapitel 6

Evaluation und Ergebnisse

Mit der Erweiterung der Netzplantechnik durch die Darstellung von allen bekannten alternativen Prozessschritten ist es möglich benötigte Alternativen zur Verfügung zu stellen, um den Einfluss einer Störung auf den Produktionsprozess möglichst zu minimieren. Die folgenden Kernpunkte des Kapitels „Einleitung und Problemstellung“ zeigen zusammenfassend die Notwendigkeit des MNPs erneut auf:

- Gängige Netzplantechniken bilden ausschließlich den Soll-Plan ab,
- Netzpläne verlieren bei Störungsereignissen ihre Gültigkeit,
- Planer müssen situationsbedingt Ausweichvorgänge analysieren und evaluieren,
- Entscheidungen der Planer basieren auf deren Erfahrungen,
- Alternativvorgänge werden während des Planungsprozesses erarbeitet, jedoch nicht nachhaltig dokumentiert.

Im Kapitel „Stand der Kenntnisse“ wurden die Grundlagen verschiedener Netzplantechniken erörtert. Für die Erarbeitung des MNPs wurde sich an deterministischen Netzplänen unter der Annahme orientiert, dass mit Hilfe von Zeitbestimmungsverfahren, wie der REFA- oder der MTM-Methode die Vorgangszeiten eindeutig bestimmt werden können. Es wird in einigen Arbeiten darüber gesprochen, dass Fertigungsabläufe stochastisch basiert sind, da der Eintritt von unerwarteten Störungen nicht vorhergesehen werden kann. Innerhalb des Abschnitts 3.2.2 sind einige entsprechende Arbeiten zu finden. Diese Annahme ist in Bezug auf die Störungen begründet, jedoch bedarf die unternehmerische Kostenrechnung deterministische Zeiten, da sonst eine Bilanzierung nicht durchführbar ist. Zudem sind alle Vorgänge in einem strukturierten Pro-

duktionsablauf zwingend bekannt. Eine durchführbare Planung und Steuerung des Prozesses kann andernfalls als nicht gegeben angenommen werden. Es kann folglich ebenfalls die Annahme, Fertigungsabläufe als deterministisch zu bezeichnen, getätigt werden. Die Verwendung eines deterministischen Verfahrens zur Prozessbeschreibung inklusive verwendbarer Alternativvorgänge ist somit hinreichend begründet.

6.1 Zeitliche Analyse von Maximalnetzplänen unter Annahme einer Störung

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Eigenschaften der deterministischen Vorgangzeiten dazu verwendet, die Prozessfortführung mittels Alternativen bei Eintritt einer Störung zeitlich zu untersuchen. Hierzu wird ein Generator beschrieben, welcher differente Maximalnetzpläne erstellt und deren Vorgangzeiten unter Eintritt einer Störung und Nutzung einer Alternative kalkuliert. Zu Beginn werden die Bestandteile des Programms erläutert. Darauffolgend werden die Ergebnisse der Berechnungen beschrieben und analysiert.

6.1.1 Aufbau des Generators

Der verwendete Generator wurde in MATLAB entworfen. Dieser erzeugt stochastisch unter Angabe der Knotenanzahl und einem maximalen Kantengewicht unterschiedliche MNPs. Jeder Vorgang, der Alternativen aufweist, wird als gestörter Knoten angenommen. In jeder Berechnung wird ausschließlich von einem Störvorgang ausgegangen. Auf Basis dessen werden die Vorgangzeiten des Soll-Prozessablaufs ohne Störung, eines gestörten Ablaufs ohne Verwendung einer Alternative und unter Verwendung einer Alternative berechnet. Weist ein Störvorgang mehrere Alternativen auf, wird der Prozess unter Verwendung der jeweiligen Alternative separat berechnet. Diese Zeiten werden im Abschnitt 6.1.2 mit den Vorgangzeiten des ungestörten Prozesses verglichen. In der Abbildung 6.1 ist eine zusammenfassende Beschreibung des Generatorsaufbaus veranschaulicht. Zu Beginn der Berechnung bedarf es die Größenangabe des MNPs unter Eingabe der Knotenanzahl. Bei der getätigten Untersuchung wurden MNPs mit einer Größe von fünfzehn bis neunzig Knoten erstellt. Hierbei wurde eine Schrittweite zwischen den einzelnen Größen von fünfzehn Knoten verwendet, wodurch sich folglich sechs MNP-Größen ergeben. Weiterführend ist es für die Generierung der Zufallsadjazenzmatrix notwendig das höchst mögliche Kantengewicht der Alternativen anzugeben. Mit Hilfe dessen kann der Suchradius für Alternativen definiert und entsprechend begrenzt werden.

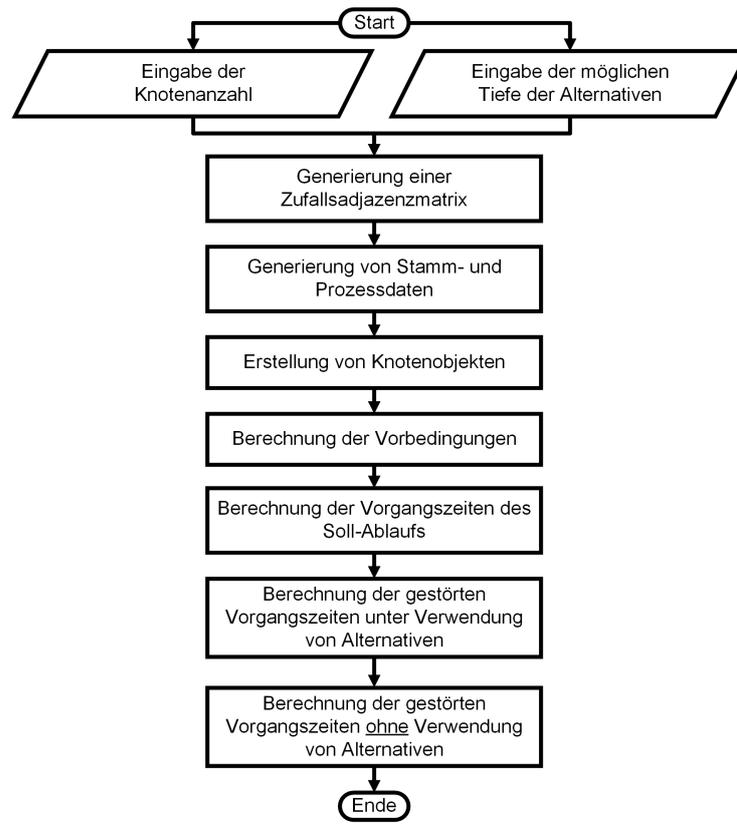


Abbildung 6.1: Zusammenfassender Generatorkaufbau zur Berechnung der Vorgangszeiten bei Störungseintritt

Für die getätigten Berechnungen wurde das maximal zu berücksichtigende Kantengewicht auf vier gesetzt. Die zufallsbedingte Erstellung der Adjazenzmatrix stellt die Datengrundlage der MNP-Berechnung dar.

Generierung einer zufallsbedingten Adjazenzmatrix

Die Knotenanzahl und die Tiefe der Alternativen werden als Eingangsvariablen zur Erstellung der Zufallsadjazenzmatrix verwendet. Die Anzahl der Knoten entspricht der Größe der Matrix. Begonnen wird die Erstellung des stochastischen MNPs mit der Definition der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen des Soll-Prozesses. Für die Berechnung wird die Matrix in drei Bereiche unterteilt und für jeden einzelnen Knoten des Netzplans auf einander aufbauend die Nachfolgeknoten bestimmt.

Innerhalb der einzelnen Bereiche können unterschiedliche Wahrscheinlichkeitswerte spezifiziert werden, um einen Knoten als Nachfolger des untersuchten Knotens zu definieren. Die Wahrscheinlichkeitswerte werden mit dem Random Number Generator (RNG) von MATLAB be-

rechnet. Unter Nutzung dessen wird die Spezifizierung eines *Seeds* für die Wiederholbarkeit der Ergebnisse ermöglicht. Es werden die natürlichen Zahlen von eins bis zehn für den *Seed* verwendet. Somit werden bei Verwendung identischer Eingangsparameter identische Maximalnetzpläne generiert, wodurch die erzielten Ergebnisse der Analyse stets überprüft werden können. Die Nutzung verschiedener Wahrscheinlichkeitswerte innerhalb der einzelnen Bereiche verringert die Anzahl möglicher Nachfolger mit fortschreitender Knotennummer. Dieses Vorgehen folgt der Analogie, dass mit fortschreitender Knotennummer die Anzahl an möglichen Nachfolgern aufgrund der Endlichkeit des MNPs abnimmt. Eine weitere beachtete Bedingung stellen Knoten mit identischen Vorgängern, die nicht als gegenseitige Nachfolger in Betracht gezogen werden. Andernfalls würde eine direkte Verbindung zwischen einem Vorgänger und einem Nachfolger generiert werden, wodurch ein Überspringen eines Knotens innerhalb des Soll-Prozesses dargestellt werden würde. Die Abbildung 6.2 veranschaulicht ein entsprechendes Minimalbeispiel dieser zu vermeidenden Relationen.

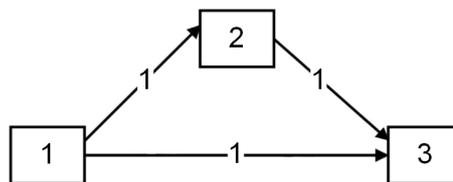


Abbildung 6.2: Darstellung einer zu vermeidenden Relation innerhalb eines zufällig generierten Netzplans

Im Anschluss an der Definition des Soll-Prozesses werden die Alternativverbindungen der Knoten spezifiziert. Eine Bedingung stellt hierbei die Erreichbarkeit vom untersuchten Knoten bis zu dem Alternativknoten. Dieses ist eine Notwendigkeit aufgrund der Berechnungsgrundlage des Kantengewichts der alternativen Vorgangsrelationen. Im Abschnitt 4.2 wird die Berechnung mittels der Anzahl an übersprungenen Knoten plus eins bzw. der Anzahl an Kanten zwischen dem Vorgänger des spezifischen Knotens und dessen Alternative angegeben. Besteht die Erreichbarkeit zwischen dem untersuchten Knoten und der möglichen Alternative, so wird auch die Bedingung erfüllt, dass die Alternative von den Vorgängern des untersuchten Knotens zu erreichen sein muss. Bei dieser Untersuchung müssen alle möglichen Pfade zum Erreichen der Alternative aufgezeigt werden. Aus dem längsten Kantenzug ergibt sich das Kantengewicht des Alternativvorgangs. Hierbei wird die Länge des längsten Kantenzugs verwendet, um die maximale Abweichung zum Soll-Prozessablauf zu erhalten. Dieses Vorgehen ist im Abschnitt 4.2 detailliert erläutert. Der erste, vor- und letzte Knoten des Plans erhalten keine Alternativen. Weiterführend werden diese Knoten nicht als Alternativvorgang für andere Vorgänge hinterlegt. Der erste Knoten kann keine Alternativen erhalten oder als Alternative verwendet werden,

da dieser den Prozessbeginn darstellt. Er beinhaltet daher keine aktive Vorgangsdurchführung. Der vorletzte Knoten beschreibt die Abschlussarbeiten des Prozesses. Diese können nicht durchgeführt werden, bevor alle vorangegangenen Arbeiten zur Herstellung des Produkts erfolgreich beendet wurden. Daher kann dieser nicht als Alternative verwendet und für diesen keine Alternative hinterlegt werden. Der letzte Knoten veranschaulicht ausschließlich das Ende des Prozesses. Eine aktive Prozessbearbeitung wird nicht durchgeführt, wodurch die Verwendung als Alternative nicht möglich ist.

Auf Basis dieser Matrix erfolgt die Erstellung der Stamm- und Produktionsdaten.

Generierung von Stamm- und Produktionsdaten

Die Stamm- und Produktionsdaten beinhalten neben den Vorgangsrelationen, wie Vorgänger-Nachfolger, Alternativen und Vorbedingungen weiterführende Informationen zu den jeweiligen Vorgängen. Hierbei handelt es sich um grundlegende Informationen zu den einzelnen Vorgängen. Es können unter anderem die Mitarbeiteranzahl und die Mitarbeiterqualifikationen generiert werden. Diese Informationen sind für die zeitliche Analyse des MNPs nicht von Bedeutung, könnten jedoch für weitere Analysebetrachtungen Verwendung finden und wurden deshalb integriert.

Die Nachfolger eines Knotens als auch dessen Alternativen werden auf Basis der Informationen innerhalb der Adjazenzmatrix in dem Datensatz hinterlegt.

In der Produktionsdatentabelle sind unter anderem die Daten des Vorgangstatus und über die Materialverfügbarkeit definiert. Diese werden für die Zeitrechnung als erfüllt angenommen. Der Status ist bei allen Knoten auf zwei gesetzt, wodurch zum Start der Prozesszeitberechnung alle Vorgänge für die Produktion freigegeben sind und begonnen werden können. Die Materialien werden für alle definierten Alternativen ebenfalls als vorhanden angenommen. Ein Ausschließen eines Knotens als Alternative auf Basis dessen Status (1. Auswahlschritt) und der Nichtverfügbarkeit von Materialien (2. Auswahlschritt) entfällt somit.

Die zufällig erstellten Daten dienen als Grundlage für die Definition von Knotenobjekten.

Erstellung des Knotenobjektes

Diese Knotenobjekte werden auf Basis einer eigens geschriebenen Klasse der *Vorgangsklasse* erstellt. In dieser Klasse sind einzelne Knotenattribute definiert. Es können unter anderem die Vorgänger, Nachfolger, Alternativen, Vorbedingungen und Vorgangszeiten für jeden einzelnen Knoten hinterlegt werden. Die Knotenobjekte eignen sich im besonderen Maße zur Berechnungsdurchführung, da sie eine einfache Berechnung der einzelnen Vorgangszeiten im idealen und

gestörten Prozessen ermöglichen. Durch die direkte Hinterlegung der Vorgänger, Nachfolger, Alternativen und der Vorbedingungen als auch der spezifischen Bearbeitungsdauer eines Knotens, können die Vorgangszeiten sowohl für den Soll-Ablauf, als auch für die alternativen Abläufe kalkuliert werden. Die Verwendung der Adjazenzmatrix würde diese direkte Umsetzung so nicht ermöglichen. Es würden Informationen aus der Stammdatentabelle und der Adjazenzmatrix benötigt werden, um die Kalkulation durchführen zu können. Beispielsweise sind innerhalb der Adjazenzmatrix die jeweiligen Vorgangszeiten der Knoten nicht hinterlegt.

Berechnung der Vorbedingungen

Weiterführend werden für die jeweiligen Vorgänge einzelne zufallsbedingte Vorbedingungen generiert. Diese Vorbedingungen werden in restriktive und unabdingbare Vorbedingungen unterteilt. Hierbei werden für die ersten vier Knoten keine Vorbedingungen hinterlegt. Wie bei der zufälligen Erstellung der Adjazenzmatrix, werden auch die Vorbedingungen unter der Nutzung des in MATLAB integrierten Zufallszahlengenerators RNG verwendet. Für dieses Vorhaben werden innerhalb eines definierten Radius ausgehend von dem aktuell betrachteten Knoten die möglichen Vorbedingungen gesucht. Dieser Radius wird auf zwei Vorbedingungen begrenzt, dadurch wird die Anzahl definiert, wie häufig eine zufällige Vorbedingung generiert werden soll. Für die Suche werden alle vorangegangenen Knoten des untersuchten Knotens in Betracht gezogen. Diesen möglichen Knoten werden anschließend zufallsbedingt eine Position (1,2) innerhalb des Vorbedingungsvektors per RNG zugewiesen. Die Position 1 beschreibt das Hinterlegen als restriktive Vorbedingung, die Position 2 bedeutet entsprechend das Hinterlegen als unabdingbare Vorbedingung des zu definierenden Knotens.

Die zufallsbedingte Erstellung von MNPs dient zur Darlegung der Unterschiede der Vorgangszeiten bei der Durchführung von alternativen Abläufen. Verglichen werden hierbei die Prozesszeit des Soll-Ablaufs, des Ablaufs mit Störungsereignis ohne die Verwendung einer Alternative und mit Berücksichtigung einer alternativen Vorgangsdurchführung.

Berechnung der Vorgangszeiten des Soll-Ablaufs

Die Quantifizierung basiert auf der im Abschnitt 4.4.1 dargelegten Berechnung der Vorgangszeiten. Durchgeführt wird sie unter Verwendung der beschriebenen Vorwärts- und Rückwärtsrechnung innerhalb des Abschnitts 4.4. Beide Vorgehensweisen nutzen die Attribute der Knotenobjekte, um die frühesten und spätesten Anfangs- und Endzeiten der Vorgänge zu kalkulieren. Diese Zeiten können daraufhin als Vergleichszeiten für die Berechnung des gestörten Prozesses mit und ohne der Berücksichtigung eines Alternativvorgangs angenommen werden.

Berechnung der Vorgangszeiten im Störfall

Für die Berechnung im Störfall wurden die Prozesse mit und ohne die Durchführung einer Alternative unter der Nutzung von unterschiedlichen Parametern berechnet. Bei der Berechnung des ersten Falls wird ausschließlich die jeweilige Störungsbehebungsdauer zu der regulären Vorgangszeit des Störknoten addiert. Die Vorgangszeit verlängert sich somit um die Störungsbehebungsdauer. Die Kalkulation der Alternativzeiten fundiert auf der Vorwärts- und Rückwärtsvorgehensweise, wie diese in den entsprechenden Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 beschrieben wurden. Die alternative Zeitrechnung wird ausgehend von der durchzuführenden Alternative begonnen und über den reintegrierten Störknoten bis zum letzten Prozessknoten durchgeführt.

Nachfolgende Bedingungen wurden für die Prozesszeitkalkulation angenommen:

- Jeder Alternativen aufweisender Vorgang wird als Störvorgang angenommen.
- Die Prozesszeiten werden auf Basis eines einzeln eintretenden Störungsereignisses berechnet.
- Für jede Alternative wird eine separate Berechnung durchgeführt.

Daraus folgt, dass eine Kombination aus mehreren eintretenden Störereignissen und mehreren durchgeführten Alternativen in den hier beschriebenen Ergebnissen keine Berücksichtigung gefunden haben.

6.1.2 Beschreibung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Zur Analyse, ob es unter gesetzten Rahmenbedingungen zeitlich einen Vorteil bietet, eine Alternative zu verwenden oder auf die Behebung der Störung zu warten, wurden insgesamt sechzig MNP-Varianten erstellt. Die Anzahl ergibt sich aus der Multiplikation der Anzahl an verwendeten MNP-Größen und verwendeten *Seeds*. Für alle Berechnungen wurde die Dauer der Störungsbehebungen mit [15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 200, 300, 400] ZE angenommen. Diese Dauer wurde so definiert, dass die Störung einen niedrigen, mittleren und hohen zeitlichen Unterschied zu den Vorgangszeiten aufweist. Der Unterschied variiert in Abhängigkeit der einzelnen Vorgangszeiten innerhalb des Prozesses. Einen Ausschnitt der Berechnungsergebnisse wird innerhalb des Diagramms in der Abbildung 6.3 dargelegt. Neben den bereits beschriebenen Parametern MNP-Größe, *Seed* und Störungsbehebungsdauer wurden für die aufgezeigten Ergebnisse die Parameter der Strafzeitkalkulation (Formel 4.8) der jeweiligen Alternativen definiert. Es wurde der *SF* mit zehn und die *zZE* ebenfalls mit zehn spezifiziert. Die ersten Berechnungen ergaben eine durchschnittliche Dauer für Vorgänge, die als Alternativen Verwendung fanden von gerundeten einunddreißig ZE über alle Netzplangrößen und Störungsbe-

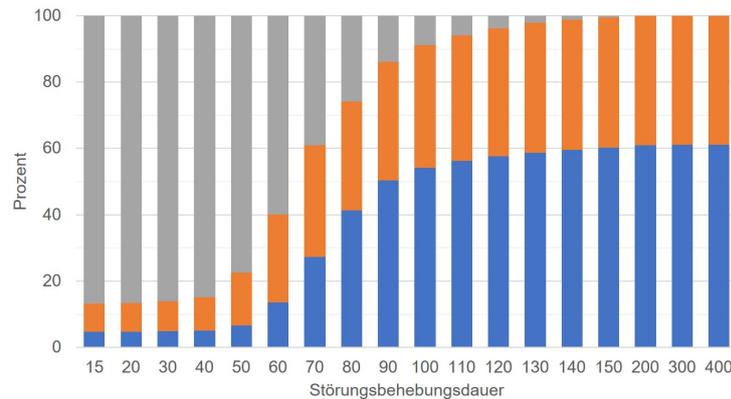


Abbildung 6.3: Untersuchungsergebnisse für die Berechnung eines Störungseintritts - 1) Der obere graue Bereich der Balken zeigt die Prozentanteile an Fällen in denen das Warten auf die Störungsbehebung ohne die Durchführung von Alternativvorgängen zu einer geringeren Prozesszeit führte. 2) Der mittlere Bereich verdeutlicht die Fälle in denen das Warten auf die Störungsbehebung und die Durchführung einer Alternative zu einer identischen Prozesszeit führten. 3) Der untere blaue Bereich der Balken zeigt die Fälle in denen die Durchführung einer Alternative während der Störungsbehebung zeitliche Vorteile ergab.

hebungszeiten. Diese Zeiten basieren auf den beschriebenen Formeln und Parametern. Explizit spezifiziert wurde die durchschnittliche Dauer der Alternativen in den Berechnungen nicht.

Das Diagramm beschreibt die Anzahl an Fällen in denen das Warten auf die Störungsbehebung oder die Durchführung einer Alternative von Vorteil war und die Fälle in denen es zu keinem zeitlichen Unterschied kam. Für die Auswertung wurde der *SEZ* des letzten Prozessknotens im Störfall unter Verwendung einer Alternative mit dem *SEZ* im Störfall ohne die Durchführung einer Alternative subtrahiert. Sofern das Ergebnis größer null war, war das Warten auf die Störung von Vorteil. War das Ergebnis gleich null, ergab sich kein zeitlicher Vorteil. War hingegen das Ergebnis kleiner null, so führte die Nutzung einer Alternative zu einer kürzeren Prozesszeit und ergab somit einen zeitlichen Vorteil. Das Diagramm zeigt die zeitlichen Vorteile auf das Warten der Störungsbehebung in den niedrigen Störungsbehebungszeiten von fünfzehn bis vierzig ZE auf. In annähernd sechsundachtzig Prozent der Fälle, welches 2650 von insgesamt 3054 Berechnungen für die einzelnen Behebungszeiten entspricht, verursachte das Warten auf die Störungsbehebung die zeitlich günstigere Prozesszeit im Vergleich zu der Durchführung einer Alternative. In gerundeten fünf Prozent der Fälle (circa 156 von 3054 durchgeführte Berechnungen) lieferte die Bearbeitung der Alternative einen zeitlichen Vorteil gegenüber dem Warten auf die Störungsbeseitigung. In dieser Anzahl an Fällen führte die Bearbeitung einer Alternative zu einer kürzeren Prozesszeit.

Dieser Vorteil beginnt ab einer Behebungszeit von fünfzig ZE weiter zu steigen. Weiterführend ist aus dem Diagramm zu entnehmen, dass der prozentuale Anteil an Fällen, in denen die Bear-

behebung eines Alternativvorgangs aus zeitlichen Aspekten einen Vorteil bietet, mit zunehmender Behebungsdauer der Störung steigt. Ab einer Behebungsdauer von 200 ZE ist das Maximum bei einundsechzig Prozent erreicht. In den verbleibenden neununddreißig Prozent der Fälle existiert keine Differenz der spätesten Endzeitpunkte des letzten Prozessvorgangs durch die Bearbeitung einer Alternative oder durch das Warten bis zur Beseitigung der Störung. Die Durchführung einer Alternative ist folglich besonders in lang andauernden Störungsbeseitigungen im Vergleich zu der durchschnittlichen Vorgangsdauer von Vorteil.

Ein Grund für die Verteilung der Vorteile ist auf die zusätzliche Strafzeit der Alternativen aus der Formel 4.8 sowie auf die Vorgangszeit der Alternativen zurückzuführen. Die Strafzeit beträgt im besten Fall bei einer Alternative mit einem Kantengewicht von zwei, einem Knotengrad ebenfalls von zwei und einem SF von zehn bereits vierzig ZE. Mit zunehmender Dauer der Störungsbeseitigung steigt die Anzahl an Vorgängen, die dieser Behebungsdauer unter Berücksichtigung der Strafzeit zeitlich unterliegen. Somit wird die Bearbeitung der Alternativen in der Zeit der Störungsbehebung ermöglicht. Bei geringeren Behebungszeiten muss die Differenz zwischen Behebungsdauer und Vorgangszeit und zusätzlicher Strafzeit in der Prozesszeit zusätzlich berücksichtigt werden. Dieses wirkt sich daher von Nachteil auf die alternative Vorgangsbearbeitung aus.

Neben der Störungsbehebungsdauer wirkt sich der Eintritt der Störung innerhalb des Netzplans selbst auf die Vorteile in der Durchführung der alternativen Vorgänge aus. In den Diagrammen aus der Abbildung 6.4 sind die Untersuchungsergebnisse dargelegt, in denen Störungsereignisse zu Beginn der Netzpläne in den Vorgängen $V2$ bis $V4$ und zum Ende der Prozesse eintraten. Es ist zu erkennen, dass die Vorteile der Alternative sich erhöhen, sofern die Störung zum Ende und nicht zum Anfang des Prozesses eintritt. Der zeitliche Nutzen stellt sich bereits bei geringeren Störungsbehebungszeiten ab sechzig ZE ein. Die Anzahl an Fällen in denen die Durchführung einer Alternative zeitlich sinnvoll ist erhöht sich von gerundeten vierzehn Prozent auf ungefähr siebenundzwanzig Prozent. Zudem sinken die Anteile in denen keine zeitliche Differenz in den jeweiligen Betrachtungsfällen existiert. Die erläuterten Ergebnisse legen dar, dass zwar nicht in allen Fällen ein zeitlicher Vorteil in der Bearbeitung einer Alternative entsteht. In den hier untersuchten Prozessen mit den definierten Rahmenbedingungen jedoch bei steigenden Störungsbehebungszeiten auch kein Nachteil zu erkennen ist. Ein Bearbeitungsfortschritt innerhalb des Prozesses kann durch die Durchführung einer Alternative während der Störungsbeseitigung in jedem Fall erzielt werden.

Neben den beschriebenen Parametern wurden weitere Berechnungen unter der Anpassung des Strafzeitfaktors und der Erhöhung der durchschnittlichen Vorgangsdauer vorgenommen. Die Ergebnisse sind innerhalb des Anhangs C zusammenfassend aufgezeigt. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein sinkender Strafzeitfaktor zu einer Vorteilsverschiebung der Alternativen in die gerin-

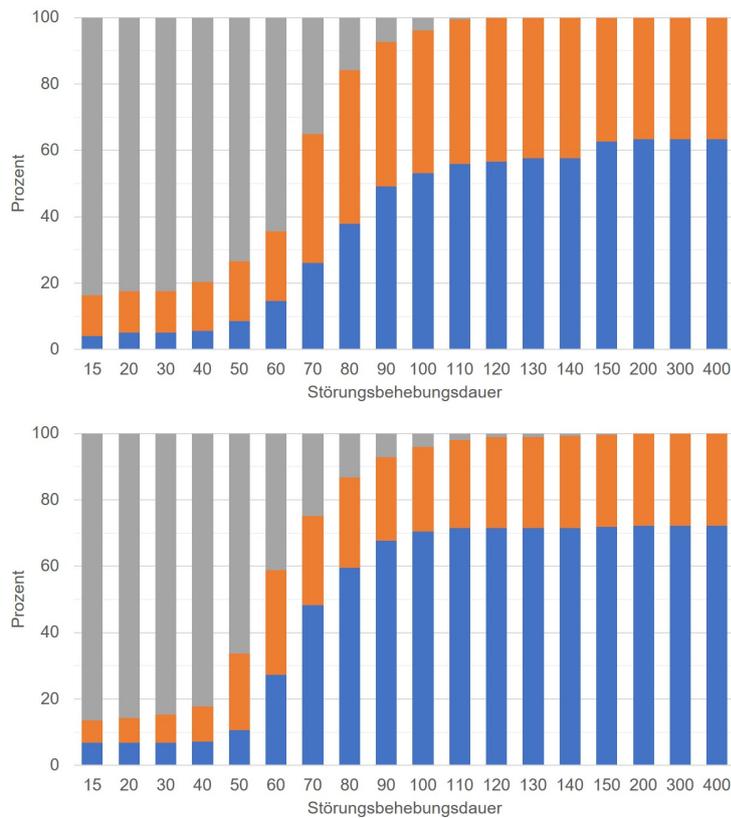


Abbildung 6.4: Untersuchungsergebnisse für die Berechnung eines Störungseintritts am Anfang (oberes Diagramm) und am Ende (unteres Diagramm) der generierten MNPs.

geren Behebungszeiten stattfindet. Je höher die Strafzeitfaktoren und damit die Strafzeiten für die Alternativen ausfallen, umso mehr liegt der zeitliche Vorteil beim Warten auf die Störungsbehebung. Zusätzlich verdeutlichen die Diagramme, dass die Größe der MNPs ebenfalls einen Einfluss vorweisen. Die Prozentanteile der Vorteile der Alternativen sinken mit zunehmender Größe zu Gunsten, dass zeitlich kein Unterschied in dem Abwarten auf die Störungsbehebung und der Durchführung der Alternative existiert.

Diese Betrachtungen stellen jedoch nur einen eingeschränkten Blick auf die zeitlichen Vorteile in der alternativen Vorgangsbearbeitung. Zum einen wird innerhalb jeder Kalkulation ausschließlich ein eintretendes Störungsereignis und eine bearbeitete Alternative berechnet. Zum anderen werden eher kleine Prozessgrößen mit unter hundert Knoten betrachtet. Die zeitlichen Vorteile bei mehreren Störungsereignissen während einer Prozessdurchführung und mehreren bei einem Störereignissen durchgeführten Alternativen müssten in weiteren Analysen betrachtet werden. Eine Vorgabe dieser Arbeit bestand darin, keine zusätzlichen Knoten innerhalb eines Netzplans zur Prozessdarstellung zu verwenden, als die für die Herstellung des Produkts notwendigen

Vorgänge. Dieses soll eine vermeidbare Expansion der Darstellung verhindern und folglich das Risiko der Unübersichtlichkeit minimieren. Es soll ausschließlich durch das Hinzufügen zusätzlicher Relationen die Abbildung von alternativen Vorgängen ermöglicht werden. Es werden somit keine alternativen Prozesssequenzen mit der möglichen Vernachlässigung anderer Knoten aufgezeigt. Innerhalb des Maximalnetzplans sind alle dargestellten Knoten abzarbeiten, um eine erfolgreiche Produktherstellung zu gewährleisten. Zur Begründung der Entscheidung für eine derartige Erweiterung werden nachfolgend grafische Prozessplanungswerkzeuge analysiert und mit dem Maximalnetzplan verglichen. Die Analyse beginnt mit der Beschreibung der VKN. Die Kenntnisse aus dem Abschnitt 3.2.1 werden für den Vergleich prägnant zusammengefasst. Im Mittelpunkt der Betrachtung dieser Netzpläne liegen die durchzuführenden Prozessschritte. Diese stehen im Rahmen von Montagetätigkeiten bei hoch technisierten Produkten besonders im Fokus, deshalb werden Netzplanarten, die Ereignisse in den Vordergrund stellen, wie die EKN, nicht weiter diskutiert. Ebenfalls werden die VPN nicht in den nachfolgenden Vergleich einbezogen. Auf die allgemeine Beschreibung von VKN folgt anschließend die Darlegung von UND/ODER - Graphen. Diese Graphenart ermöglicht es, durch die Unterscheidung von Kantenarten, unterschiedliche Prozesssequenzen abzubilden. Darauf folgend werden die Kenntnisse über Petrinetze zusammengefasst. Diese sind im besonderen Maße für die Beschreibung nebenläufiger diskreter Systeme befähigt. Als Abschluss dieser Ausführung wird eine tabellarische Zusammenfassung der beschriebenen Erkenntnisse aufgeführt und die wiedergegebenen Verfahren mit der MNP-Technik verglichen. Dadurch werden die Vorteile des MNPs im Bezug auf die zu Beginn dieses Abschnitts beschriebenen Kernpunkte dargelegt.

6.2 Konkretisierung der Charakteristiken der MNP-Methode und vergleichbaren grafischen Planungsverfahren

Innerhalb der nachfolgenden Abschnitte werden einzelne Prozessplanungswerkzeuge mit der Methodik des MNPs verglichen. Mit einer derartigen Gegenüberstellung werden die Defizite anderer Techniken gegenüber des MNPs aufgezeigt. Zusätzlich werden die Vorteile des MNPs im Hinblick auf dessen Einsatzzweck zusammenfassend hervorgehoben.

6.2.1 Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von Vorgangsknotennetzplänen

Die VKN sind eine Netzplanart, die den Fokus der Betrachtung auf die durchzuführenden Tätigkeiten innerhalb eines Prozessablaufs legen. Sie stellen grafisch Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen einzelner Prozessschritte dar. Dadurch erlauben sie einen Überblick über die Beziehungen der

jeweiligen Vorgänge zueinander. Im entsprechenden Abschnitt 3.2 in der Abbildung 3.5 ist ein VKN veranschaulicht. Den einzelnen Prozessschritten können differente Charakteristiken wie Vorgangsbezeichnungen oder unterschiedliche Zeitattribute zugeteilt werden. Die unterschiedlichen Zeitattribute erlauben es dem Anwender, eine Analyse des zeitlichen Ablaufs des Prozesses durchführen zu können. Durch die Berechnung frühester und spätester Anfangs- und Endzeiten können zeitkritische Vorgänge analysiert und somit der Fokus auf die störungsfreie Durchführung dieser Schritte gelegt werden. Des Weiteren lässt sich auf Basis dieser Zeitattribute die zu erwartende Durchlaufzeit des Prozesses berechnen, was im Hinblick auf die Produktionsplanung einen wichtigen Vorteil darstellt.

Ein weiteres Werkzeug, welches in der Prozessplanung insbesondere in der Montageablaufplanung seinen Einsatz findet, sind die Vorranggraphen. Im Nachfolgenden werden diese kurz erläutert.

6.2.2 Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von Vorranggraphen

Vorranggraphen sind ebenfalls ein grafisches Werkzeug, um Prozessabläufe darzulegen. Ein entsprechendes Beispiel eines Vorranggraphen zeigt die Abbildung 6.5. Ihren Einsatz finden sie in der Montageplanung, beispielsweise bei der Austaktung von Fließlinien (engl. assembly line balancing problem) [10]. Die einzelnen Knoten der Vorranggraphen stellen die Vorgänge dar. Die Kanten entsprechen der jeweiligen Montagereihenfolge. Die zeitliche Analyse der Vorranggraphen hat eine optimale Austaktung der Fließlinie zum Ziel. Hierbei gilt es entweder eine minimale Taktzeit, eine minimale Stationszahl oder das minimale Produkt aus Taktzeit und Anzahl an Stationen zu erhalten [18]. Sie finden darüber hinaus aber auch ihren Einsatz in nicht getakteten Montageabläufen. Rochow et al. haben in [72] einen Ansatz präsentiert, der die Darstellung alternativer Montagesequenzen unter der Nutzung von Vorranggraphen ermöglicht. Sie beschreiben alle durchführbaren Sequenzen in separaten Graphen. Eine Darstellung aller bekannter Lösungen innerhalb eines Graphen ist nicht möglich. Im nächsten Abschnitt erfolgt eine Beschreibung der UND/ODER - Graphen, welche gleichermaßen für die Verwendung zur Darstellung von Prozessabläufen untersucht wurden.

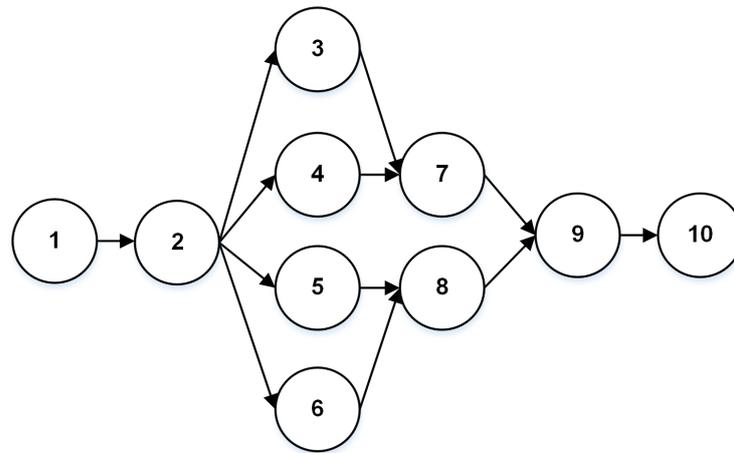


Abbildung 6.5: Beispiel eines einfachen Vorranggraphen für die Planung von Montageabläufen

6.2.3 Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von UND/ODER - Graphen

Ein weiteres auf der Graphentheorie basierendes Werkzeug sind UND/ODER - Graphen. Diese können ebenfalls dazu dienen, Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen durch Knoten und Kanten abzubilden. Im Unterschied zu den bisher genannten Verfahren integrieren diese UND/ODER - Beziehungen in ihre Darstellung. Mit dieser Eigenschaft können Entscheidungsprozesse innerhalb des Graphen abgebildet werden. Homem de Mello et al. nutzen dieses Potenzial, um alternative Montageabläufe auf Basis der Demontagedarstellung eines Produkts zu repräsentieren [39]. Ein entsprechendes Beispiel ist in der Abbildung 6.6 dargestellt.

Mit einem Bogen verknüpfte Kanten stellen hierbei die UND - Beziehungen des Graphen dar. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Verwendung eher für kleine Bauteile als für umfangreiche Produkte geeignet sei. Eine mögliche Nutzung bei hochtechnisierten Erzeugnissen wie in der Luft- und Raumfahrtbranche ist somit nicht gegeben. In [42] gebrauchen Johannsmeier und Haddadin einen UND/ODER - Graphen zur Darstellung von Montageabläufen innerhalb eines Mensch-Roboter-Kollaborationsarbeitsplatzes. Im Gegensatz zu Homem de Mello et al. verwenden sie unterscheidbare Knoten. In der Darstellungsform sind Ähnlichkeiten zu Petrinetzen erkennbar. In ihrer Arbeit stehen nicht die einzelnen Montagesequenzen, sondern ausschließlich deren Präsentation im Vordergrund.

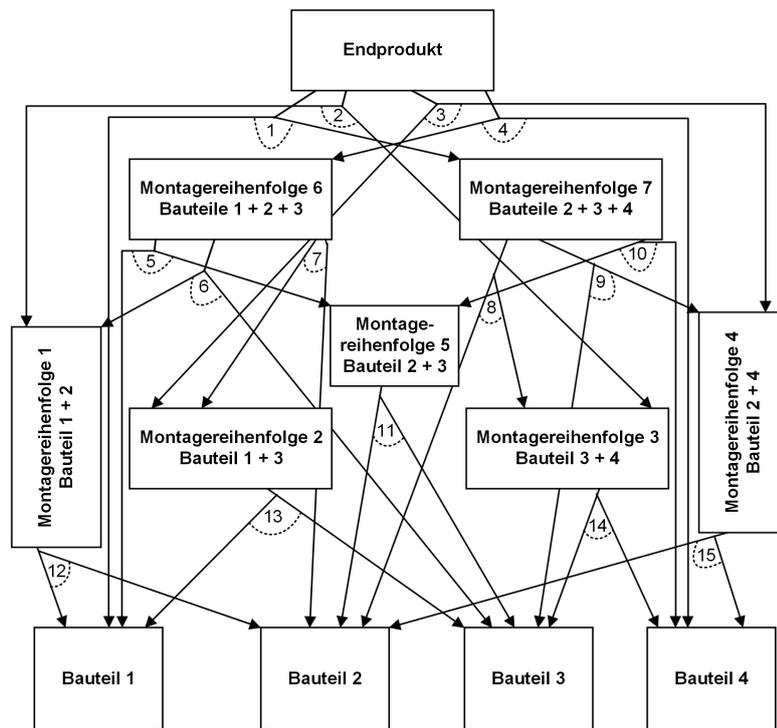


Abbildung 6.6: Darstellung alternativer Montagesequenzen unter Verwendung eines UND/ODER - Graphen in Anlehnung an [39]

Das zuletzt in dieser Auflistung untersuchte Prozessplanungswerkzeug stellen die Petrinetze dar.

6.2.4 Prägnante Beschreibung der Eigenschaften von Petrinetzen

Die Petrinetze wurden ursprünglich von Carl Adam Petri entwickelt. Er erörterte diese Methode in seiner Dissertation [64]. Diese Netze verwenden zur Darstellung von Prozessabläufen zwei Arten von Knoten, bezeichnet als Plätze und Transitionen. Die Plätze stellen passive Komponenten und die Transitionen aktive Komponenten dar. Innerhalb eines Produktionsprozesses könnten die Plätze Puffer und die Transitionen Bearbeitungsstationen repräsentieren. Petrinetze eignen sich insbesondere zur Abbildung nebenläufiger diskreter Systeme. Als nebenläufig werden Abläufe definiert, die unabhängig voneinander durchgeführt werden können. Hierbei kann keinerlei Aussage über den Zeitpunkt getätigt werden, da Petrinetze als zeitlose Systeme verstanden werden [81]. Darüber hinaus existieren jedoch auch Erweiterungen, sogenannte höhere Petrinetze. Zu ihnen zählen zeitbehaftete Petrinetze. Diese berücksichtigen Zeitkomponenten. Eine Art der zeitbehafteten Petrinetze sind *Time Petri Nets*. In der Abbildung 6.7 ist ein derartiges Petrinetz veranschaulicht.

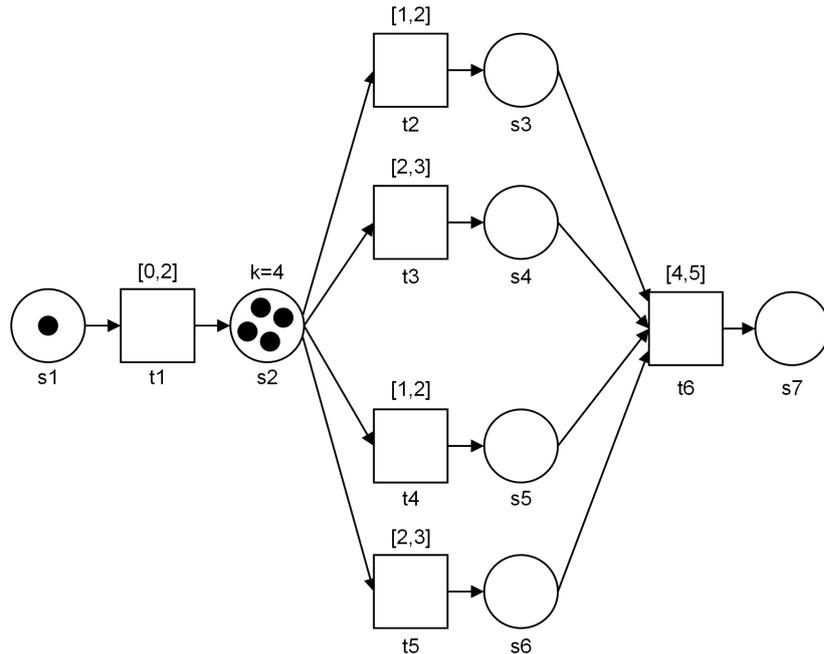


Abbildung 6.7: Darstellung eines Time Petri Nets zur beispielhaften Veranschaulichung von Zeitattributen innerhalb von Petrinetzen

Bei diesen können Transitionen mit einer frühesten und spätesten Feuerungszeit versehen werden. Die eckigen Klammern über den Transitionen beinhalten die entsprechenden Feuerungszeiten. Ist die späteste Feuerungszeit einer Transition erreicht, so muss diese feuern. Dieses gilt nur, sofern die Transition nicht von einer anderen Transition aufgehoben wurde [41].

6.2.5 Zusammenfassung der Vorteile des Maximalnetzplans

Alle genannten Methoden haben die Basis der Graphentheorie gemein, wodurch sie mit mehr oder minder ähnlichen Bestandteilen Montageabläufe abbilden können. Nachfolgend werden die dargelegten Eigenschaften tabellarisch mit denen der MNP-Technik verglichen. Das Ziel ist die Darstellung der Vorteile des MNPs gegenüber den anderen aufgeführten Verfahren. Die Vergleichsparameter beziehen sich auf folgende Punkte:

- Verwendung von Vorgangs- und Prozesszeiten in nicht gestörten und gestörten Prozessen
- Zeitliche Analyse von kritischen Vorgängen
- Darstellung und Bewertung alternativer Vorgänge
- Berücksichtigung von Vorgangstatus

Planungs- werkzeug	Petrinetze	Zeit- behaftete Petrinetze	UND/ODER -Graphen	Vorrang- graphen	Netzplan- technik	Maximal- netzplan
Anforderung						
Berücksichtigung von Prozesszeiten	✗	✓	✗	✓	✓	✓
Zeitliche Analyse kritischer Vorgänge	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Darstellung alternativer Vorgänge	✗	✗	✓	✓	✗	✓
Bewertung alternativer Vorgänge	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Darlegung von Vorgangstatus	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Analyse der Prozesszeiten unter Störungseintritt	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Ermittlung eines Flexibilitätsgrad	✗	✗	✗	✗	✗	✓

Abbildung 6.8: Tabellarischer Vergleich zwischen Attributen der genannten Planungswerkzeuge und der Maximalnetzplantechnik

- Ermittlung eines Flexibilitätsgrads zur Beurteilung der Anpassungsfähigkeit des Prozesses bei Eintritt von Störungsereignissen

Die genannten Parameter sind in der Abbildung 6.8 unter Bezugnahme auf die jeweiligen Prozessplanungsmethoden aufgeführt. Mit der oberen Zeile beginnend werden diese in nachfolgenden Abschnitten unter Betrachtung der beschriebenen Prozessdarstellungswerkzeuge dargelegt und näher erläutert. Begonnen wird folglich mit der Berücksichtigung von Prozesszeiten innerhalb der einzelnen Werkzeuge. Die Kreuze in der Tabelle beschreiben ein Nicht-Vorhandensein des jeweiligen Attributs in der spezifischen Methodik. Die Haken legen entsprechend konträre Informationen dar.

Berücksichtigung von Prozesszeiten und zeitliche Analyse kritischer Vorgänge

Der erste Parameter *Berücksichtigung von Prozesszeiten* bezieht sich auf die Möglichkeit, die jeweilige Dauer der Vorgänge innerhalb des Graphen aufzuzeigen. Auf Basis dessen können die spezifischen Zeitpunkte des Durchführungsbeginns der Tätigkeiten berechnet werden. Petrinet-

ze sind zeitlose Systeme [81], daher können mit ihnen keinerlei Berechnungen zu den einzelnen Vorgangszeiten durchgeführt werden. Eine Erweiterung hierzu stellen Teile der höheren Petri-netzarten dar, die zeitbehafteten Petrinetze. Hier können Zeiten entweder mit den Plätzen oder den Transitionen verbunden werden [54]. Je nach Art des zeitbehafteten Petrinetzes ist es möglich, den Transitionen früheste und späteste Feuerungszeiten, als Schaltintervall bezeichnet, oder eine Schaltdauer zu zuordnen. Mittels Schaltdauer kann die Zeit zwischen Verbrauch und Erzeugen einer Marke durch eine Transition definiert werden [41]. Eine Berechnung des frühesten und spätmöglichen Eintritts eines Vorgangs und die zu erwartende Gesamtdurchlaufzeit des Produkts kann jedoch nicht erfolgen. Hinzukommend sind verschiedene Zeitattribute nicht miteinander kombinierbar, wodurch eine zeitliche Analyse zu potentiell kritischen Prozessen nicht durchführbar ist. In Produktionsprozessen ist es für Steuerungszwecke von Bedeutung, wie hoch der Zeitpuffer eines Prozessschritts ist, also der zeitliche Rahmen, der eine Verzögerung des Vorgangs zulässt, ohne dass sich diese auf die Gesamtdurchlaufzeit eines Prozesses auswirkt. Ein solcher Zeitpuffer wird auch als *GP* eines Vorgangs bezeichnet, wie es bereits im Abschnitt 3.2.1 erörtert wurde. Tätigkeiten, die einen Puffer gleich Null aufweisen, werden als kritische Vorgänge deklariert. Beschränkt wird sich in dieser Begründung auf die Zeitattribute von Transitionen, da diese die aktiven Komponenten eines Petrinetzes darstellen und folglich die durchzuführenden Schritte innerhalb eines Prozesses wiedergeben können. Die zeitlichen Parameter von den Plätzen innerhalb eines Petrinetzes sind daher weniger von Interesse. Aus diesem Grund werden diese nicht tiefgreifender diskutiert. UND/ODER - Graphen weisen diese Nachteile ebenfalls auf, da sie keinerlei Prozesszeiten innerhalb des Graphen wiedergeben können und folglich die Betrachtung der kritischen Prozessschritte gleichermaßen nicht erfolgen kann.

Vorranggraphen hingegen können zwar durch die Abbildung von Taktzeiten der einzelnen Stationen und damit das Zieldatum festlegen, jedoch geben auch dieses keine Hinweis auf die kritischen Schritte einer Durchführungssequenz wieder. Eine Benennung differenter Zeitattribute ist nicht zulässig. Hier zeigen sich die Vorteile der Netzplantechniken, welche durch die definierten Zeitparameter (frühester, spätester Anfangs- und Endzeitpunkt, Dauer des Vorgangs, Gesamtpuffer) einen Gesamtüberblick über den zeitlichen Ablauf des Prozesses erlauben. Die Erläuterung dieser Attribute ist im Abschnitt 3.2.1 über Vorgangsknotenetzpläne zu finden. Aufgrund dieser Basis werden innerhalb des MNPs die Berechnung solcher Zeitattribute für den idealen Prozessablauf ermöglicht. Dadurch kann unter Verwendung der MNP-Methode die Analyse von zeitlich kritischen Vorgängen erfolgen.

Darstellung und Bewertung alternativer Vorgänge innerhalb eines Graphen

Die Petrinetze eignen sich insbesondere für nebenläufige Systeme. Unabhängige Prozessschritte können folglich gut nebeneinander dargestellt werden. Dieses bezieht nicht die Darstellung möglicher alternativer Vorgänge mit ein. Petrinetze werden zwar für die Erarbeitung alternativer Prozesssequenzen verwendet, wie innerhalb des Computer Aided Process Plannings (CAPP), wie es in der Arbeit [108] aufgezeigt ist. Jedoch können ausschließlich vollumfassende Ablaufsequenzen erarbeitet werden. Die alleinige Darstellung einer zusätzlich durchführbaren Aktivität ist sowohl in den einfachen als auch höheren Petrinetzen nicht möglich. Diese Darstellung eines Ausweichvorgangs würde bedeuten, dass eine zusätzliche Kante von einem Platz zu einer später durchzuführenden Transition existiert. Durch diese Kante würde zwischen liegende Plätze und Transitionen umgangen werden, jedoch werden zum Aktivieren von Transitionen Marken verbraucht und erzeugt. Alle vor einer Transition liegenden Plätze müssen genügend Marken und alle nachfolgenden Plätze ausreichende Kapazitäten zur Verfügung stellen, damit eine Transition aktiviert werden kann. Diese Bedingung wäre bei einem Umgehen einzelner Plätze und Transitionen nicht gegeben, da übersprungene Plätze nicht ausreichend Marken zum Feuern der Transition vorweisen können. Diese konnten von ihren vorgelagerten Transitionen keine Marken zur Weitergabe erhalten.

Die UND/ODER - Graphen erlauben durch deren Unterscheidung zwischen den Kanten die Abbildung alternativer Vorgänge. Wie bereits beschrieben zeigen Momem De Mello und Sanderson einen Ansatz, aber sie implementieren keine Differenzierung der einzelnen Möglichkeiten innerhalb des Graphen, ähnlich wie in [72], wodurch folglich alle Alternativen im Falle einer Störung gleichrangig behandelt werden müssen.

Rochow et al. zeigen mit ihrer Arbeit [72] die Möglichkeit, wie alternative Vorgänge innerhalb der Vorranggraphen abgebildet werden können. Jedoch können mit ihrem Verfahren nicht alle Lösungen innerhalb eines Graphen beschrieben werden. Über die Qualität der Lösungen in Bezug auf die praktische Umsetzung wird ebenfalls keine Aussage getroffen und somit müssen per se alle als gleich gut geeignet angesehen werden. Durch die verschiedenartigen Beziehungen der einzelnen Vorgänge in Produktionsprozessen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich Alternativen in ihrer Eignung zur Durchführbarkeit differenzieren. Die Netzplantechniken hingegen, weisen diese Möglichkeiten nicht auf, wodurch die Erarbeitung des MNPs begründet wird.

Fähigkeit zur Beschreibung von Vorgangstatus der einzelnen Methoden

Keine der aufgeführten Verfahren erlaubt es innerhalb der grafischen Darstellung einzelne Bearbeitungsstatus abzubilden. Sie bieten folglich in aktiv durchgeführten Produktionsabläufen

keinen Mehrwert in der Prozessüberwachung. Es ist jedoch für die verantwortlichen Mitarbeiter durchaus von Interesse, welcher Vorgang in der Produktion welchen Status aufzeigt. Der MNP ermöglicht es daher unter Verwendung farbiger Knoten differente Zustände des Produktionsablaufs aufzuzeigen. Eine detaillierte Erläuterung unter Verwendung eines Beispiels ist im entsprechenden Abschnitt 4.2 aufgeführt.

Fähigkeit zur Analyse der Prozesszeiten im Falle eines Störungseintritts

Die dargelegten Methoden erlauben auf Basis ihrer eingeschränkten Möglichkeiten in der Berücksichtigung von Prozesszeiten nicht die Analyse von zeitlichen Auswirkungen eines Störungseintritts. Hingegen ermöglicht die MNP-Methodik unter Verwendung der im Abschnitt 4.4 vorgeschlagenen Zeitberechnung den Eintritt einer Störung und die Verwendung von Alternativen zu simulieren und dahingehend die Anpassung des Fertigstellungsdatums anzupassen. Darüber hinaus ist die Terminierung bei Störungsvorkommnissen auch in akuten Situationen anwendbar. Sobald eine Störung eingetreten ist, können unter Nutzung der Zeitrechnung die differenten Alternativen analysiert und die Auswirkung auf den Produktionsprozess abgeschätzt werden. Hierunter fallen die Wiedereingliederungszeitpunkte des gestörten Vorgangs als auch die Verschiebung der Vorgangszeiten der beeinflussten Nachfolgevorgänge, einschließlich des letzten Prozessknotens und die damit einhergehende Verschiebung des Fertigstellungszeitpunkts.

Fähigkeit zur Ermittlung eines Flexibilitätsgrads

Die MNP-Methode beschreibt die Vorgehensweise zur Berechnung eines *FGs*, welcher in Abschnitt 4.5 erläutert ist. Unter Verwendung eines solchen *FGs* ist die Prozessanpassung in Störungssituationen analysierbar. Der Anwender wird dahingehend in die Lage versetzt, die unterschiedlichen Varianten des Prozessablaufs zu vergleichen und unter diesen Aspekten die am ehesten geeignete Variante für den betrachteten Produktionsprozess zu wählen. Mitunter sind Verfahren zu Beschreibung eines Flexibilitätsgrads existent und eine Auswahl innerhalb des entsprechenden Abschnitts beschrieben. Wie innerhalb des tabellarischen Vergleichs in der Abbildung 6.8 aufgezeigt, ist jedoch eine derartige Vorgehensweise in keinem der zum Vergleich herangezogenen Prozessdarstellungswerkzeuge, aufgrund der mangelnden Fähigkeit zur Beschreibung von Alternativen, vorgesehen.

6.3 Zusammenfassung

Die Gründe für die Entwicklung des MNPs sind in den einzelnen dargelegten Aspekten zu Beginn dieses Kapitels begründet. Die Netzplantechnik ermöglicht eine zeitbasierte Prozessanalyse, verliert hingegen durch die alleinige Darstellung des Soll-Prozesses ihre Aussagekraft bei Störungsereignissen. Andere Prozessdarstellungswerkzeuge erlauben zwar die Darbietung von Alternativen, weisen jedoch ein Defizit in deren Bewertung im Hinblick auf die Durchführbarkeit auf. Weiterführend verfügen diese Methodiken nicht über eine mit den Netzplantechniken vergleichbare zeitliche Beschreibung des Prozesses.

Diese zeitliche Prozessbeschreibung der MNP-Technik wurde für eine zeitliche Untersuchung der MNPs verwendet. Hierzu wurden die MNPs auf Basis von zufallsbedingten Vorgangsrelationen generiert. Innerhalb der jeweiligen Netzpläne wurde bei jeder Kalkulation ein Störungsereignis und eine zu diesem Vorgang gehörende Alternative berücksichtigt. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen zeitliche Vorteile bei der Durchführung von Alternativen insbesondere bei länger andauernden Störungsbehebungen.

Auf der Grundlage der Vorgangsknotennetzpläne und deren Möglichkeit der Vorgangszeitanalyse wurde ein MNP entwickelt. In nachfolgender Abbildung 6.9 ist ein solcher dargestellt. Dieser beinhaltet eine zeitliche Prozessanalyse des Soll-Prozesses (schwarze Pfeile) sowie die Darstellung von alternativen Abläufen. Die Darstellung der Alternativen erfolgt durch zusätzliche bewertete Kanten (blaue Pfeile). Diese werden bei der Erarbeitung des Soll-Prozesses während der Produktionsplanungsphase definiert. Die Bewertung erfolgt auf Basis der Anzahl an Kanten zwischen den Vorgängern des störungsbehafteten Knotens und der Alternative. Der MNP gestattet somit einen detaillierten Überblick über den Prozess und unterstützt bei der Wahl eines Alternativvorgangs. Der MNP ermöglicht folglich die Dokumentation von innerhalb der Planungsphase generierten Wissens. In Störungssituationen sind Anwender somit nicht ausschließlich auf ihre Erfahrungen angewiesen, sondern können auf bereits existentes Know-How zurückgreifen. Darüber hinaus werden den Anwendern nicht ausschließlich die alternativen Relationen innerhalb des MNPs angezeigt, sondern aktiv unter Verwendung einer Heuristik, genauer formuliert einem Prioritätsregelverfahren, aktiv Alternativen vorgeschlagen. Im Abschnitt 4.3 ist dieses erläutert. Weiterführend können durch farbige Knoten die Status einzelner Vorgänge dargelegt werden. Anwender können hierdurch beispielsweise erkennen, dass Vorgänge noch nicht begonnen wurden, obwohl genügend Ressourcen zur Verfügung stehen und etwaige Vorgänge nicht mit einer Störung verknüpft sind. Der Nutzer ist in Folge dessen in der Position, die Gegebenheiten zu untersuchen und entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Ein Aufkommen an vermeidbaren Verzögerungen kann durch derartige Transparenz vorgebeugt werden. Der hier durchgeführte Vergleich legt deutlich die Vorteile des MNPs gegenüber den anderen beschriebenen Darstellungs-

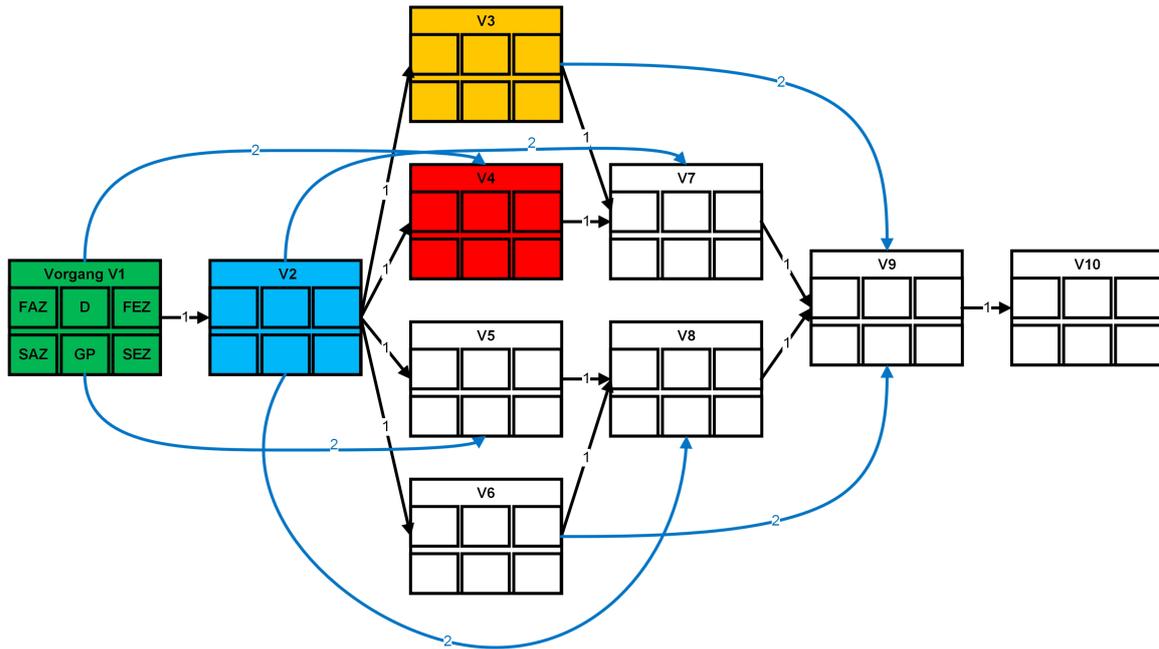


Abbildung 6.9: Beispiel eines Maximalnetzplans unter Berücksichtigung von Vorgangstatus

werkzeugen im operativen Einsatz dar. Die MNP-Methode ermöglicht es den Anwendern einen aussagekräftigen Überblick über den Prozessablauf inklusive der Beachtung von einzelnen Vorgangszuständen, Prozesszeiten in gestörten und ungestörten Prozessen zu erhalten. Darüber hinaus bietet diese Methode eine Möglichkeit zur Bestimmung der Prozessanpassungsfähigkeit.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit werden innerhalb des nachfolgenden Abschnitts 7 zusammengefasst und im Rahmen des gesetzten analytischen, deskriptiven und pragmatischen Ziels eingeordnet. Weiterführend werden Entwicklungsmöglichkeiten der MNP-Technik dargelegt und ergänzende Potentiale hinsichtlich der zeitlichen Analyse in der Nutzbarkeit von Alternativvorgängen aufgeführt.

Kapitel 7

Schlussfolgerung und Ausblick

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war es eine Methodik auf Basis der Netzplantechniken zu erarbeiten, die es ermöglicht in Störungssituationen alternative Prozessabfolgen zu präsentieren und zu evaluieren. Dieses Hauptziel wurde in drei Teilziele dem analytischen, dem deskriptiven und dem pragmatischen Ziel untergliedert.

Das **analytische Ziel** befasst sich mit der Analyse der Ist-Situation und der damit einhergehenden Untersuchung, Beschreibung und Bewertung von bereits existenten Methoden, die es ermöglichen alternative Prozessabfolgen darzulegen. Zur Erreichung dieses Ziels, wurden zu Beginn dieser Arbeit die Graphentheorie als Grundlage von grafischen Prozessplanungsmethoden analysiert. Im Fokus hierbei standen die Bedeutung von Kanten und Knoten innerhalb eines Graphen sowie dessen essentiellen informatischen Speichermöglichkeiten. Ziel der Untersuchung bestand darin die geeignetste Speichervariante für die Umsetzung des zu erreichenden Hauptziels hervorzuheben. Die Adjazenzmatrix wurde als zweckmäßig befunden, da diese die Beziehungsinformationen des Graphen auf Basis der Knotenanzahl beinhaltet. Die Anzahl an Kanten ist unerheblich, wodurch es keinen Einfluss auf die benötigte Speichergröße hat, mit welcher Anzahl zusätzlichen Kanten der ursprüngliche Graph zur Beschreibung von alternativen Beziehungen erweitert wurde. Der Speicherbedarf des ursprünglichen Graphen und des erweiterten Graphen in Form einer Adjazenzmatrix beträgt $O(n^2)$.

Weiterführend wurden stochastische und deterministische Netzplantechniken analysiert und herausgearbeitet warum die zu erarbeitende Methodik auf den VKN basieren sollte. Es wurde dargelegt, dass die VKN in der Lage sind Prozesse verständlich und aussagekräftig zu beschreiben. Zudem erlauben sie durch die Kalkulation von deterministischen Vorgangszeiten eine detaillierte Planungsgrundlage für den Einsatz benötigter Ressourcen zur Bearbeitung der einzelnen Vorgänge. Die weiterführenden Beschreibungen von Verfahren, wie den Petrinetzen oder

Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungswerkzeugen dienen zur thematischen Einordnung der Zielsetzung dieser Arbeit. Zusätzlich zur grafischen Darlegung des Prozesses und der bekannten Alternativen, analysiert und evaluiert das erarbeitete System bei Störvorkommnissen, die zu Verfügung stehenden Alternativen. Die Ergebnisse werden den Anwender in Form einer priorisierte Liste dargelegt. Für die erfolgreiche Umsetzung dieses Vorhabens wurde sich im analytischen Kontext mit möglichen Verfahren der künstlichen Intelligenz befasst. Das System sollte dem Anwender auf nachvollziehbare und rechtfertigbare Weise die jeweiligen alternativen Prozessschritte darlegen können, aus diesem Grund wurde sich für eine Heuristik entschieden und dieses im entsprechenden Abschnitt 3.5 hinreichend begründet. Weiterführend wurde die Thematik der cyber-physische Systeme aufgegriffen. Begründet wird dieses mit dem Ansatz, die Digitalisierung von Unternehmen auch in die Branchen zu überführen, die kein vergleichbares Maß an Automatisierung wie innerhalb der Automobilindustrie vorweisen können. Das erarbeitete System unter dem dargestellten Anwendungsszenario aus Kapitel 5 erlaubt es, in entsprechenden Branchen, die Digitalisierung auf der Produktionsebene voranzubringen.

Mit der Erreichung des analytischen Ziels wurden die Rahmenbedingung für das **deskriptive Ziel**, die Erarbeitung einer Methode zur Beschreibung von alternativen Prozessabläufen ohne die Verwendung zusätzlicher Knoten, geschaffen. Im Kapitel 4 wurde diese Erweiterung eines VKNs mit gewichteten additionalen Kanten erläutert. Es werden die Grundlagen beschrieben, die es ermöglichen alternative Prozessabläufe innerhalb eines Netzplans darzustellen. Hierzu zählt die Grundannahme, dass eine Vielzahl von Varianten besteht, um einen definierten Prozess mit der Netzplanmethodik beschreiben zu können. Für die entsprechenden Erläuterungen wurde ein Beispiel entwickelt. An der Montage eines Spielzeugautos wurde die MNP-Methodik erörtert. Dieses beinhaltet die Charakterisierung der alternativen Vorgangsbeziehungen. Die alternativen Vorgangsbeziehungen sind alternative Prozessabläufe die im Falle der Notwendigkeit, wie der Eintritt einer Störung, Möglichkeiten beschreiben den Prozess fortführen zu können. Dieses impliziert eine Abweichung zum Soll-Prozess. Der Soll-Prozess ist der ursprünglich geplante Prozess, der verspricht die Zielvorgaben der Produktionsplanung bestmöglich zu erreichen. Aus diesem Grund bestand die Notwendigkeit die Alternativen zu Gewichten. Die Gewichtungen dienen zum einen zur Unterscheidung zwischen dem Soll-Ablauf und den Alternativabläufen und zum anderen zur Gewichtung der durchführbaren Alternativen. Die Gewichtung basiert auf der Anzahl an Kanten zwischen den Vorgängern eines betrachteten Knotens und deren definierten Alternativen. Existieren mehrere Pfade, um die Alternative innerhalb des MNPs zu erreichen, so wird die höchstmögliche Anzahl an Kanten zur Beschreibung des Gewichts verwendet. Die reguläre Netzplanmethodik setzt voraus, dass zur Durchführung eines Vorgangs alle vorangegangenen Knoten erfolgreich bearbeitet sein müssen, andernfalls kann der betrachtete Knoten nicht begonnen werden. Bei der Implementierung von Alternativen kann dieser Logik nicht ge-

folgt werden. Zur Bearbeitung von Alternativen ist das Überspringen von Knoten innerhalb des MNPs eine unvermeidbare Notwendigkeit. Daher wurde die Definition der Vorbedingungen vorgenommen. Diese Bedingungen beschreiben technische notwendige Knoten die zu einem definierten Anteil durchgeführt oder voll umfänglich abgeschlossen sein müssen, um eine Alternative beginnen zu können.

Wie bereits dargelegt sollte die Methode, nicht nur in der Lage sein die bekannten Alternativen zu beschreiben, sondern darüber hinaus auch die Anwendbarkeit des MNPs in Störsituationen zu evaluieren. Für diesen Zweck wurden Entscheidungskriterien innerhalb des Abschnitts 4.3 definiert, die zur Evaluierung der Ausweichvorgänge angewandt werden. Das Ergebnis ist eine priorisierte Liste der zur Verfügung stehenden Ausweichvorgänge. Zur Fortführung des Prozesses kann der Anwender einer dieser Vorgänge verwenden. Der Einsatz einer Heuristik im Form des Priorisierungsalgorithmus verspricht die größte Akzeptanz der Endanwender, da diese verantwortlich für die Prozessumsetzung sind und gegebenenfalls sich für die Wahl des Ausweichvorgangs rechtfertigen müssen. Ist in einem derartigen Fall vom Anwender nicht erkennbar, warum welcher Vorgang eher als eine Alternative geeignet ist als ein anderer Vorgang, wird der Anwender eher Alternativen suchen, bei denen die Durchführung begründet werden kann.

Mit der Beschreibung des Anwendungsbeispiels wird das **pragmatische Ziel** dieser Arbeit erreicht, die erarbeitete Methode in eine Beispielanwendung zu überführen und damit die Nutzbarkeit des MNPs darzulegen. Unter Verwendung des beschriebenen Systems im Kapitel 5 ist es möglich die Prozesse zur Erstellung von Störungsmeldungen auf Produktionsfreigabe zu digitalisieren und den Mitarbeitern auf Produktionsebene eine direkte Interaktion mit dem Planungssystem zu ermöglichen. Zudem verkürzt das dargelegte Konzept den Störungsmeldungsprozess. In der Abbildung 7.1 ist dieser schematisch veranschaulicht. Bei Störungseintritt ist es dem Mitarbeiter nicht möglich die Berichtserstellung direkt am Arbeitsplatz durchzuführen, da mobile Endgeräte mit entsprechenden Softwareanwendungen bisher nicht in den Produktionsprozess integriert wurden. Hingegen ist die Nutzung zentral aufgestellter Computer notwendig. Hierbei treten gegebenenfalls Wartezeiten auf, sofern der PC von einem Kollegen verwendet wird, wodurch die Störungsmeldung sich verzögert. Neben der schriftlichen Beschreibung des Fehlers werden in einigen Fällen zusätzliche Medien, wie Fotos oder Videos, zur Abbildung des Fehlers gefordert. Die Mitarbeiter müssen sich in solchen Fällen das entsprechende Equipment organisieren. Nicht jeder Mitarbeiter verfügt über ein eigenes Gerät. Anschließend kehren die Mitarbeiter zum PC zurück und verknüpfen dort die Medien mit dem Bericht. Nach Fertigstellung kann die Störungsmeldung zur Weiterbearbeitung an die Qualitätsabteilung übergeben werden. Unter Nutzung des MNPs auf der Planungsebene und mobilen Endgeräten auf der Produktionsebene kann dieser Arbeitsablauf deutlich verkürzt werden. Unnötige Wege der Mitarbeiter zur Beschaffung von notwendigem Equipment können durch die Anschaffung einer ausreichenden Anzahl

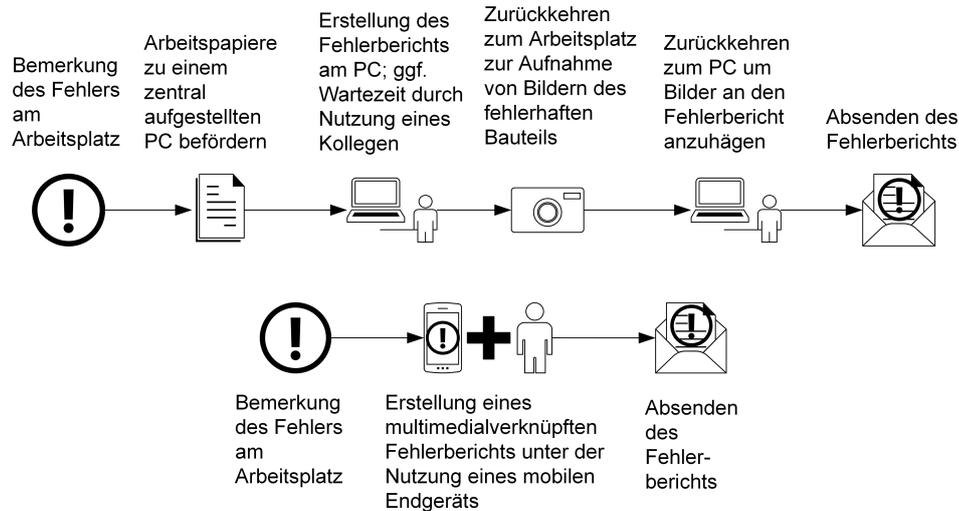


Abbildung 7.1: Vergleich der Arbeitsläufe zur Erstellung eines Fehlerberichtes auf konventioneller Weise und unter der Nutzung eines mobilen Endgeräts mit beschriebener Android Applikation

an mobilen Endgeräten und Zuordnung dieser zu den jeweiligen Mitarbeitern vermieden werden. Mögliche Wartezeiten an Computern, um eine Störungsmeldung zu generieren, wären unter dieser Voraussetzung nicht länger existent. Die Berichterstattung kann somit unmittelbar nach Eintritt und Erkennen der Störung direkt an der Arbeitsstation erfolgen.

Für die Evaluation der erfolgten Zielerreichung wurde mittels der Berechnung der Vorgangszeiten und zeitlichen Analyse des letzten Prozessvorgangs unter Einfluss eines Störungseintritts und der Verwendung differenter Alternativen die zeitlichen Vorteile der Nutzung von Alternativen unter gesetzten Rahmenbedingungen dargelegt. Hinzukommend zeigte der Vergleich des MNPs mit anderen Werkzeugen den Nutzen des MNPs im Hinblick auf die eindeutige Beschreibung von alternativen Vorgängen in zeitlich deterministisch bestimmten Prozessen im Hinblick auf die jeweiligen Vorgangszeiten.

Das Konzept des Maximalnetzplans und die Anwendung in Kombination mit mobilen Endgeräten bieten eine Möglichkeit die Digitalisierung in Unternehmen zu etablieren in denen vorrangig händische Montagetätigkeiten die Wertschöpfung der Produkte gewährleisten. Die Mitarbeiter auf der Planungs- und Produktionsebene werden in ihren Tätigkeiten unterstützt. Dennoch bietet das dargelegte Konzept des MNPs weitere Entwicklungsmöglichkeiten.

Eine potentielle Option bestünde in der Berechnung der Vorgangszeiten. Wie innerhalb des Abschnitts 4.4 erörtert, beeinflussen Störungen und die Verwendung von Alternativen die einzelnen Zeiten der Vorgänge. Im ungünstigsten Fall führen sie zur Verschiebung der Prozessfertigstellung.

Diese Eigenschaft könnte in der Priorisierung der Alternativen beachtet werden. Alternativen, die eine geringere Verschiebung des Fertigstellungsdatums verursachen, würden bevorzugt werden.

Die Gewichtung der Kanten innerhalb des Maximalnetzplans fundiert auf der graphenbasierten Abweichung zwischen den alternativen Relationen und dem idealen Prozessablauf. Eine Weiterentwicklung dieser Methode, könnte die Hinterlegung von Erfahrungswerten bei der Prozessdurchführung berücksichtigen. Existieren bei der Herstellung des Produkts bereits Erfahrungswerte hinsichtlich der Wahl von alternativen Vorgängen, könnten diese in die Bewertung der Kanten mit einfließen. Hierzu könnten nach der Durchführung der gewählten Alternativen, diese hinsichtlich ihrer praktischen Eignung bewertet werden. Bei einer weiteren Prozessdurchführung und eines identischen Störungseintritts könnten die Gewichtungen dieser Alternativen auf Basis der praktischen Bewertung höher oder schlechter im Vergleich zum vorigen Prozessdurchlauf gewichtet werden. Eine numerische Anpassung der Kantengewichte wäre die Folge.

Wie durch die UND/ODER-Graphen beschrieben, bedarf es bei einigen Prozessen eine Entscheidung zur Bearbeitung einzelner Pfade. In derartigen Prozessen bilden parallel Stränge die Möglichkeit ab einen Prozessfortschritt auf unterschiedliche Weise zu erreichen. Hierbei ist es nicht notwendig alle Entscheidungspfade zu bearbeiten. Derartige UND/ODER-Relationen können in der vorgestellten MNP-Methodik nicht abgebildet werden. Deren Integration könnte daher für zukünftige MNP-Entwicklungen ein Potential darstellen.

Ein letztes Potential bietet die grafische Erweiterung des MNPs. Aktuell bildet dieser eine im Vorfeld definierte Prozessauflösung ab. Innerhalb dieser Ausarbeitung liefern die Vorgänge die Basis zur grafischen Darstellung des Prozessablaufs. Weiterführend wäre es jedoch denkbar, die einzelnen Schritte, die zur Durchführung der Vorgänge von Nöten sind ebenfalls abzubilden. Das Ergebnis wäre ein mehrdimensionaler MNP. Unter Verwendung einer derartigen Darstellung wären die Prozessfortschritte nicht nur auf Vorgangsebene abbildbar sondern zusätzlich auf Schritzebene. Dieses würde den Planern einen umfassenderen Gesamtüberblick über den Prozess darbieten.

Neben den dargelegten Entwicklungsmöglichkeiten der MNP-Technik bietet die Generierung von differenten MNPs und in diesem Zusammenhang stehende Vorteilsanalyse zusätzliche Potentiale. Ein Faktor, der die Vorteilsverteilung in der Alternativbearbeitung beeinflusst, ist die Position der Alternative innerhalb des MNPs. Befindet sich die Alternative und der Störvorgang auf dem kritischen Pfad des Netzplans, so wird der Alternativvorgang bereits in der Kalkulation der Prozesszeit berücksichtigt. Im Fall einer Störung wird der Alternativvorgang vor dem Störvorgang bearbeitet. Es wird somit ausschließlich deren Reihenfolge auf dem kritischen Pfad vertauscht. Die Prozesszeit wird mit Ausnahme der Strafzeit nicht weiter beeinflusst. Befindet sich die Alternative innerhalb des Soll-Prozesses hingegen auf einem nicht kritischen Pfad, so

wird dessen Vorgangszeit in der Kalkulation der ungestörten Prozesszeit nicht berücksichtigt. Wird diese Alternative nun aufgrund der Störung auf dem kritischen Pfad durchgeführt, muss dessen Vorgangszeit ebenfalls in der Berechnung der Prozesszeit Beachtung finden. In zukünftigen Untersuchungen müsste somit analysiert werden, inwieweit diese Veränderung die Prozesszeit im Vergleich zur Störungsbehebung beeinflusst.

Ein letztes Potential bietet die zeitliche Analyse hinsichtlich der Anzahl an auftretenden Störungsereignissen sowie die Anzahl an durchgeführten Alternativen innerhalb eines Prozesses. Bei der aufgezeigten Analyse wurde ausschließlich ein Störungsereignis je Prozessdurchführung angenommen und je Störungsereignis nur die Durchführung einer Alternative betrachtet. Somit könnte die zeitliche Analyse durch den Eintritt mehrere Störungen und der Durchführung mehrere Alternativen ergänzt werden.

Anhang A

Rückwärtsterminierung des Soll-Ablaufs zur Montage des „Spielzeugautos“

Tabelle A.1: Rückwärtsterminierung des Prozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Vorgabe eines Projektzeitpunkts

Vorgangsnr.	t_i^t	FAZ_i^t	FEZ_i^t	SAZ_i^t	SEZ_i^t	GP_i^t
1	0	20	20	20	20	0
2	10	20	30	20	30	0
3	10	20	30	20	30	0
4	10	20	30	20	30	0
5	10	20	30	20	30	0
6	20	30	50	30	50	0
7	7	50	57	50	57	0
8	15	57	72	57	72	0
9	13	72	85	72	85	0
10	16	72	88	73	89	1
11	4	85	89	85	89	0
12	4	85	89	85	89	0
13	11	89	100	89	100	0
14	0	100	100	100	100	0

Anhang B

Terminierung der Alternativen bei der Montage des „Spielzeugautos“

Tabelle B.1: Terminierung des Störungsprozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Verwendung der Alternative V9

Vorgangsnr.	t_i^t	t_a^σ	FAZ_i^σ	FEZ_i^σ	SAZ_i^σ	SEZ_i^σ	GP_i^σ
1	0	0	0	0	0	0	0
2	10	0	0	10	0	10	0
3	10	0	0	10	0	10	0
4	10	0	0	10	0	10	0
5	10	0	0	10	0	10	0
6	20	0	10	30	10	30	0
b	0	75	30	105	30	105	0
9	13	60	30	103	32	105	2
7	7	0	105	112	105	112	0
8	15	0	112	127	112	127	0
10	16	0	127	143	127	143	0
11	4	0	127	131	139	143	12
12	4	0	127	131	139	143	12
13	11	0	143	154	143	154	0
14	0	0	154	154	154	154	0

Die Verwendung der Alternative V9 würde gegenüber der Alternative V10 eine kürzere Prozesszeit hervorrufen.

Tabelle B.2: Terminierung des Störungsprozesses „Montage eines Spielzeugautos“ unter Verwendung der Alternative V11

Vorgangsnr.	t_i^t	t_a^σ	FAZ_i^σ	FEZ_i^σ	SAZ_i^σ	SEZ_i^σ	GP_i^σ
1	0	0	0	0	0	0	0
2	10	0	0	10	0	10	0
3	10	0	0	10	0	10	0
4	10	0	0	10	0	10	0
5	10	0	0	10	0	10	0
6	20	0	10	30	10	30	0
b	0	75	30	105	30	105	0
11	4	60	30	94	41	105	11
7	7	0	105	112	105	112	0
8	15	0	112	127	112	127	0
9	13	0	127	140	127	140	0
10	16	0	127	143	128	144	1
12	4	0	140	144	140	144	0
13	11	0	144	155	144	155	0
14	0	0	155	155	155	155	0

Aufgrund der identischen Parameter (Vorgangszeit, Anzahl an Nachbarn und Kantengewicht) ist die Zeitrechnung für die Alternative V12 zu V11 identisch. Aus diesem Grund wird die Berechnung für V12 nicht gesondert aufgeführt.

Anhang C

Auswertung Prozesszeitberechnung unter Anpassung einzelner Parameter

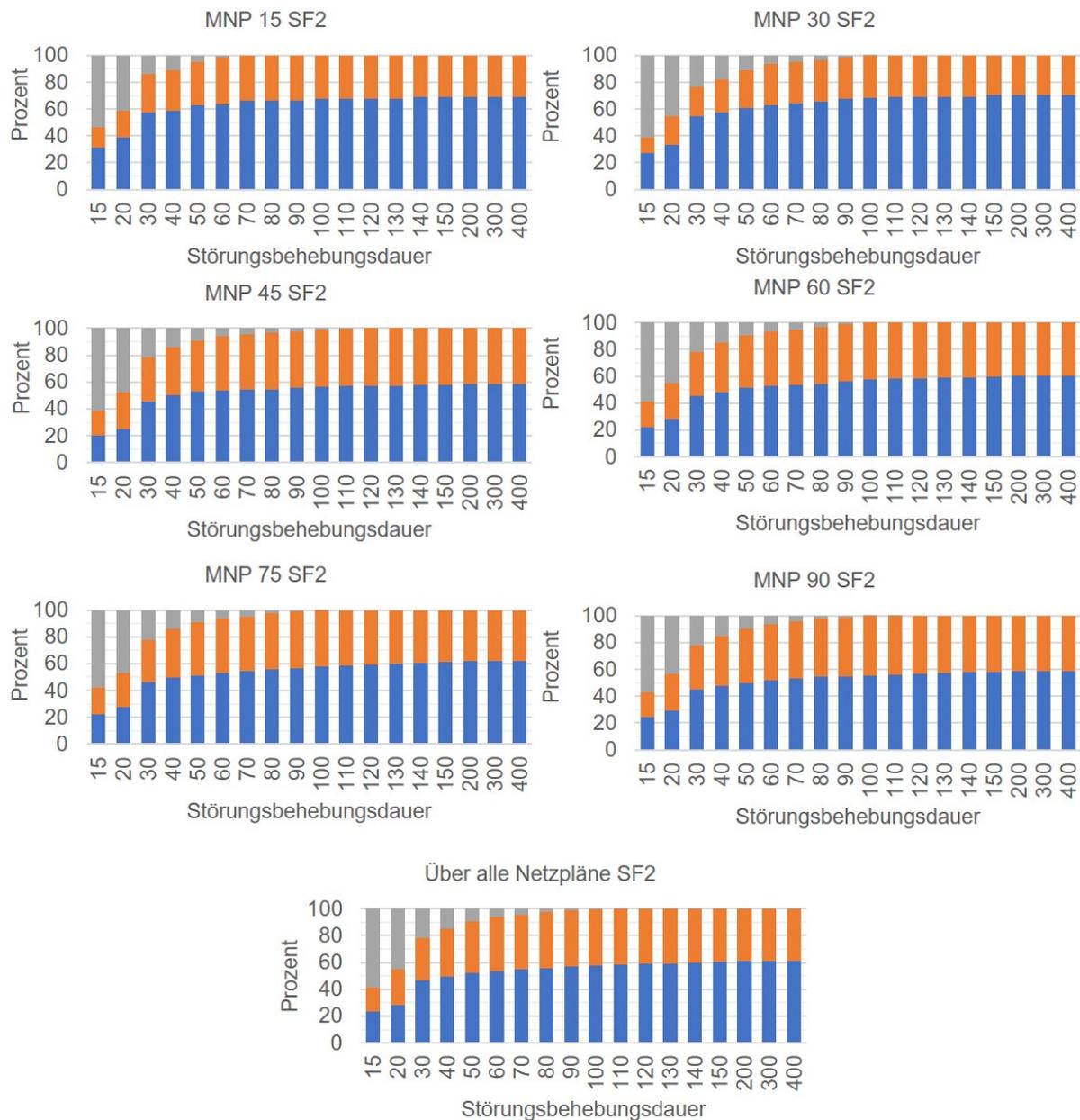


Abbildung C.1: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE;
Strafzeitfaktor = 2; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

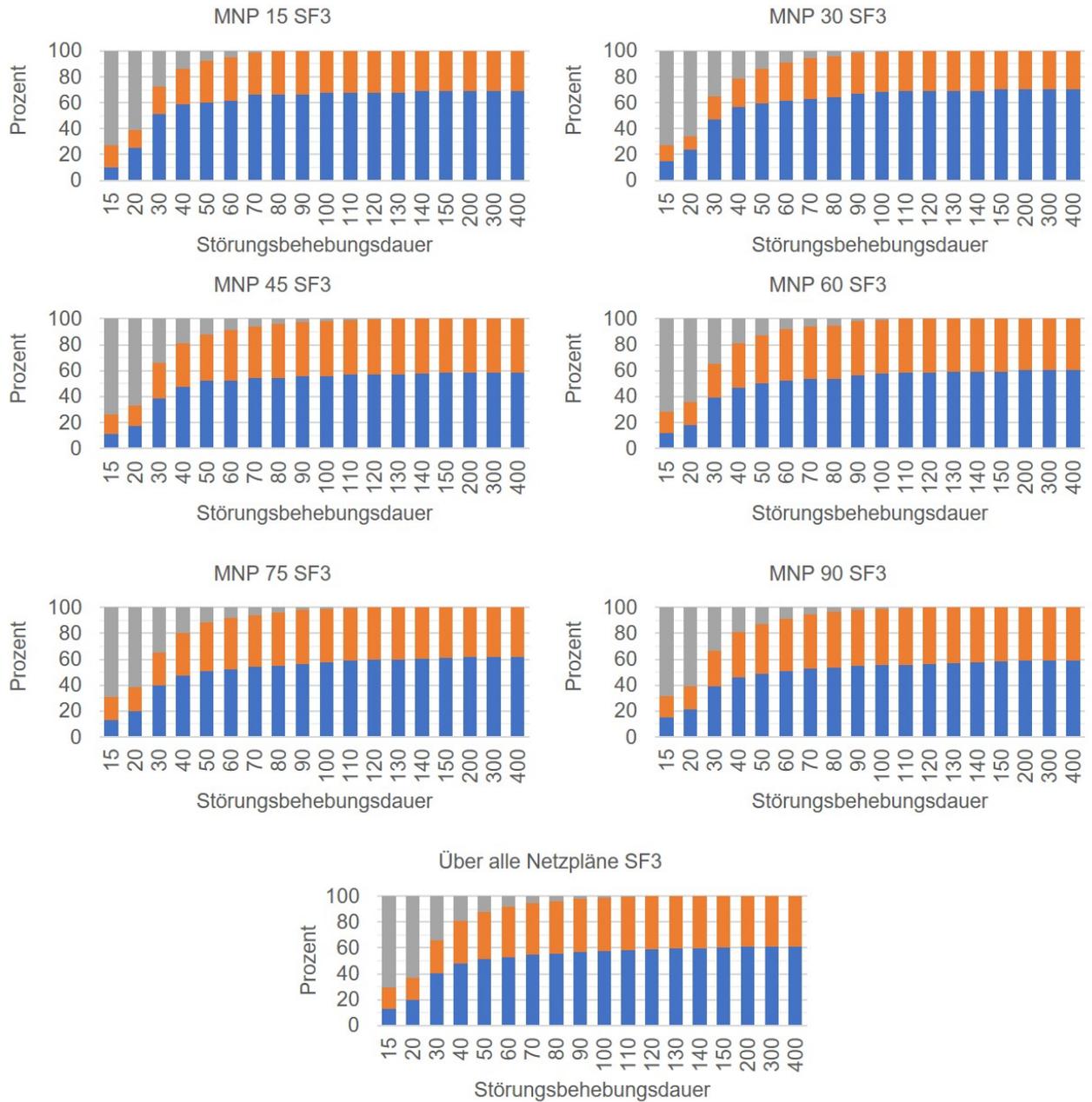


Abbildung C.2: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE;

Strafzeitfaktor = 3; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

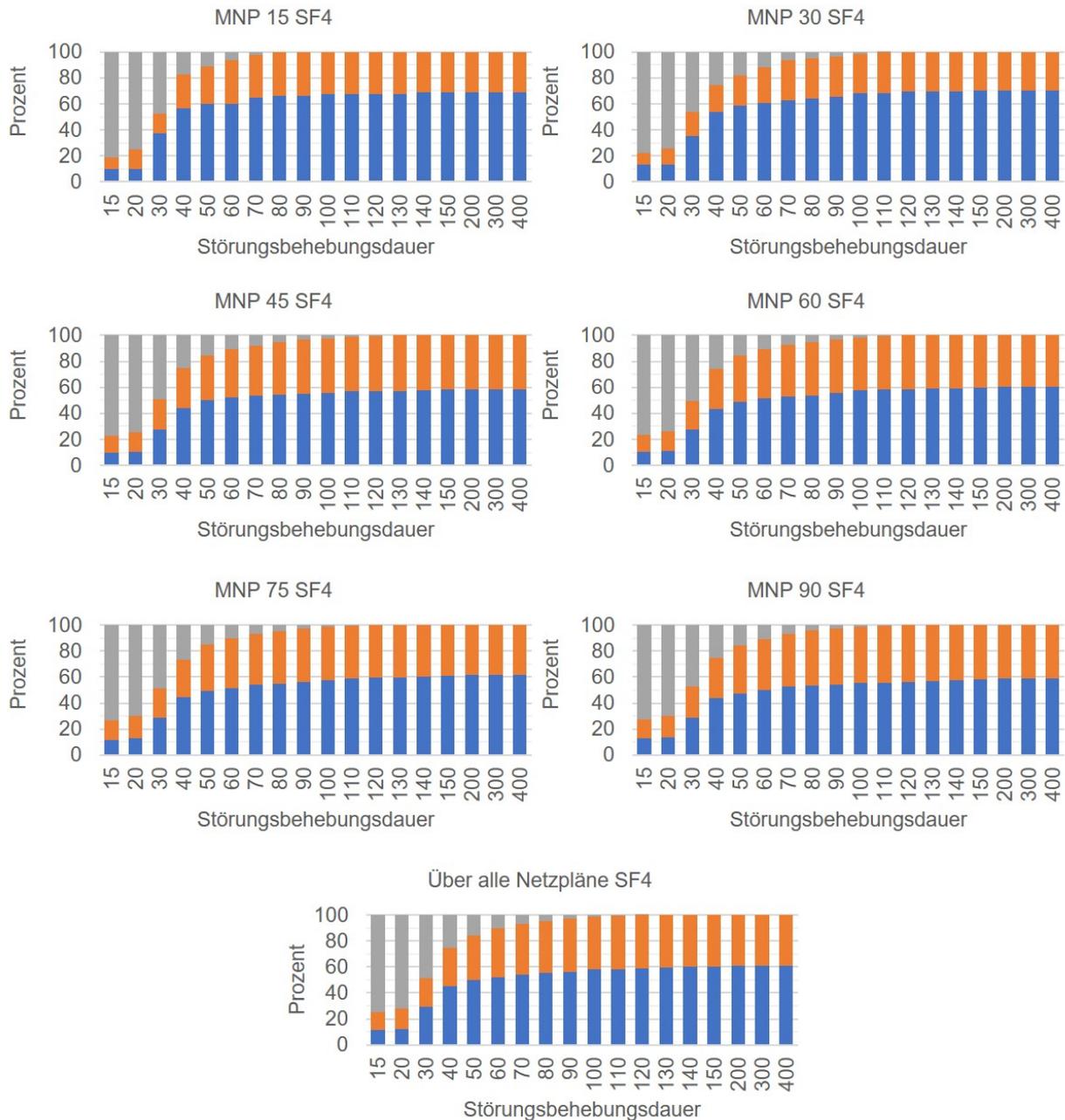


Abbildung C.3: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE;
Strafzeitfaktor = 4; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

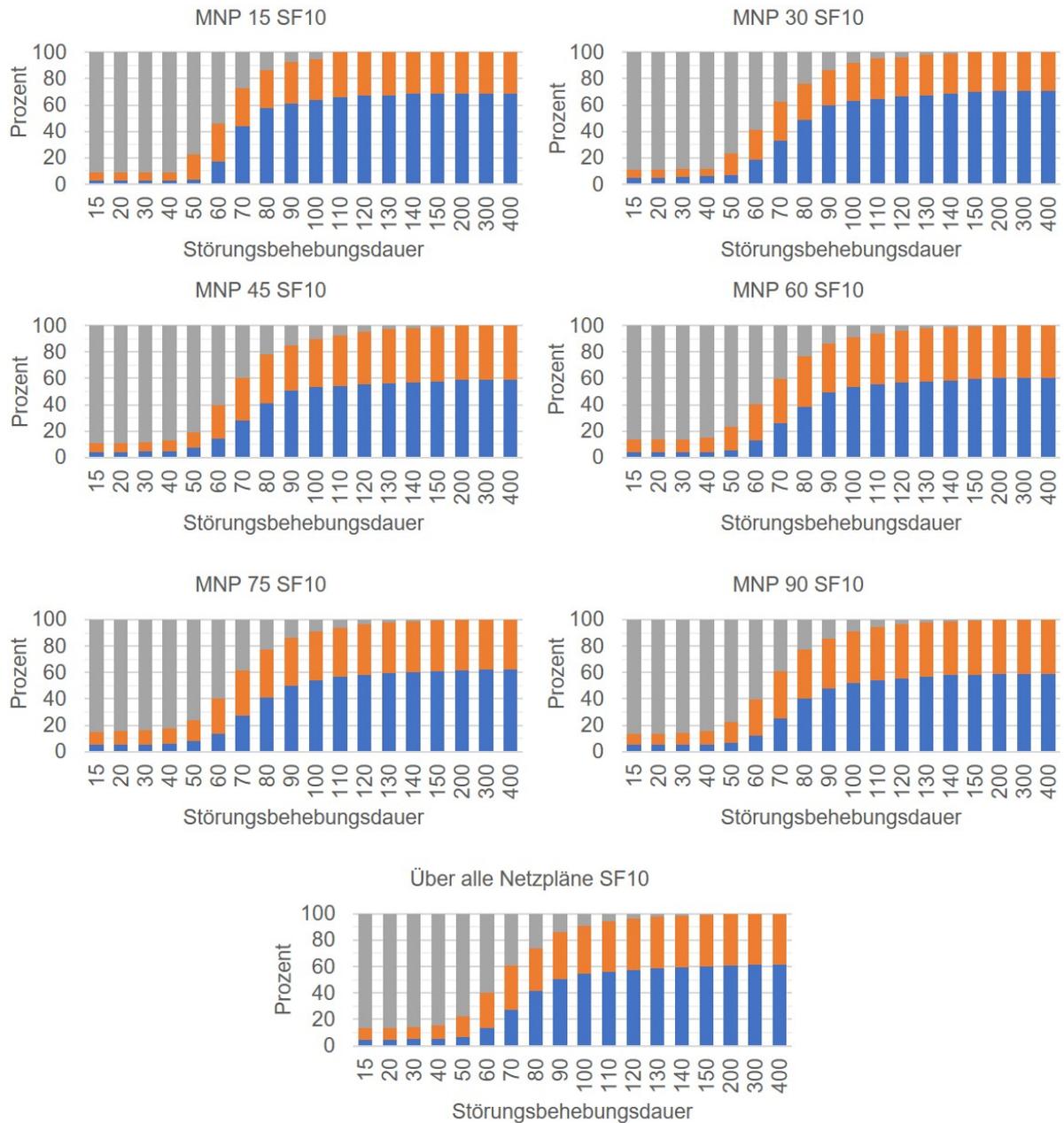


Abbildung C.4: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE;

Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

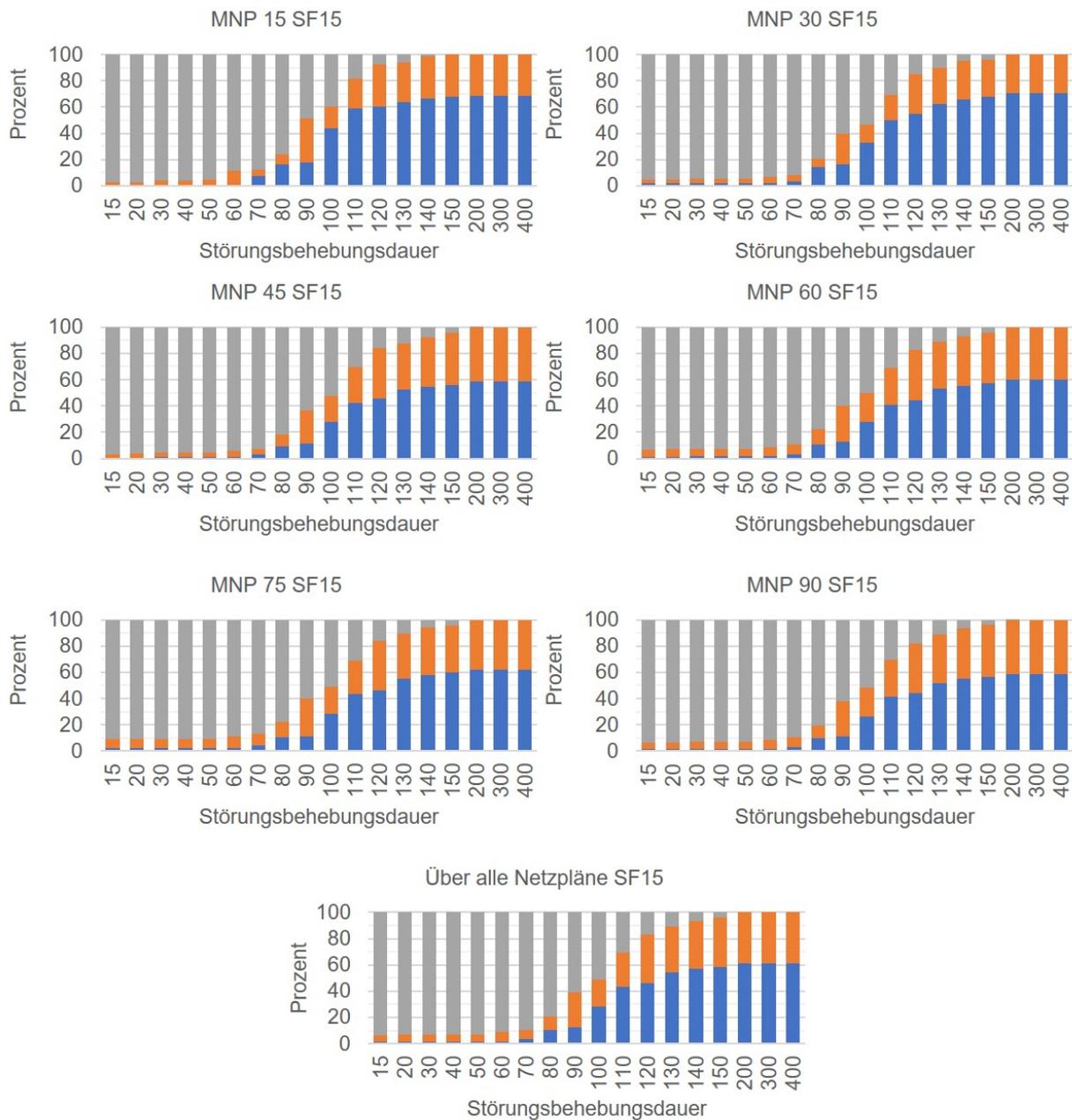


Abbildung C.5: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE;

Strafzeitfaktor = 15; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

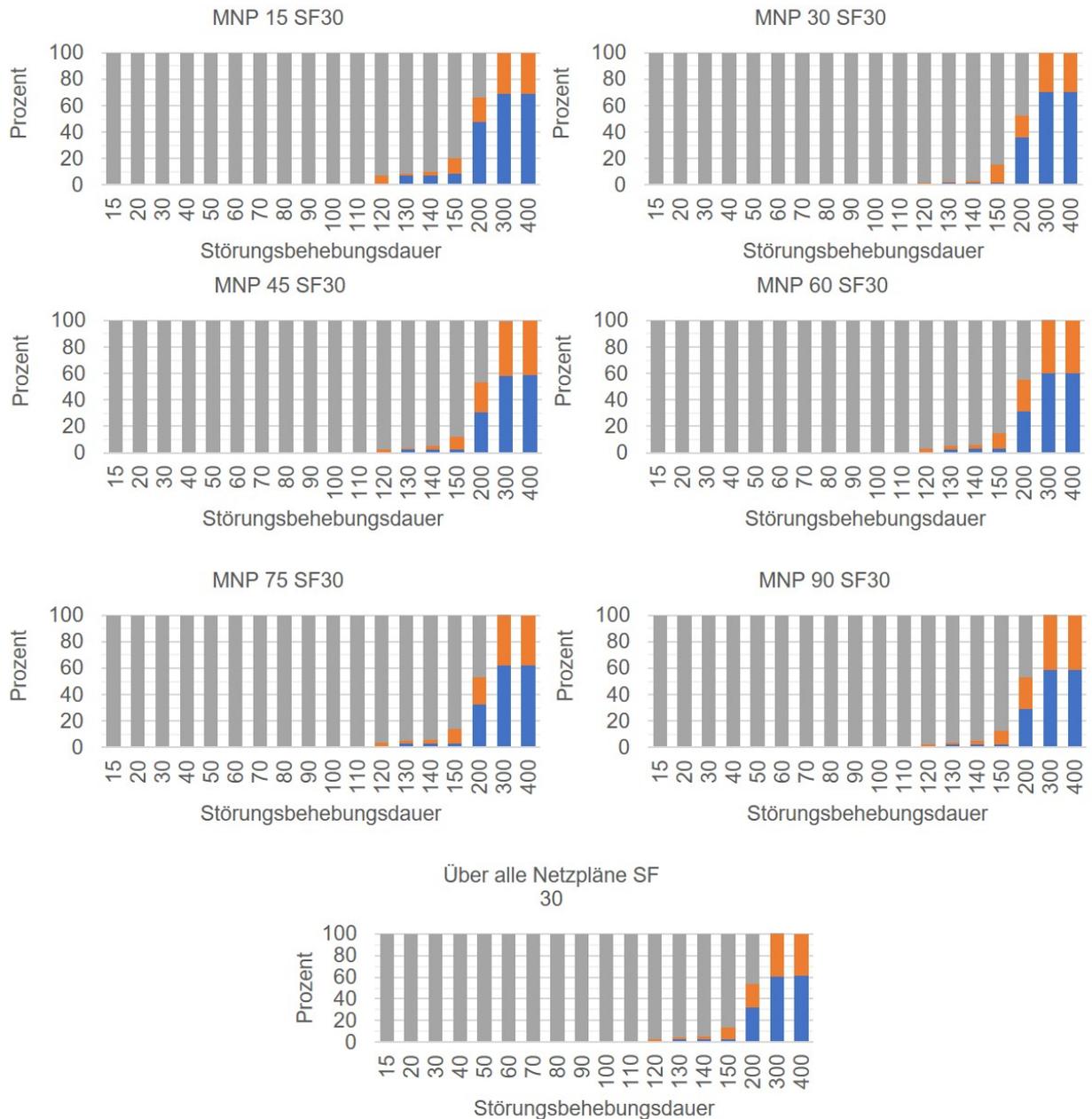


Abbildung C.6: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: Durchschnittliche Dauer der Alternativen = 31 ZE;

Strafzeitfaktor = 30; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

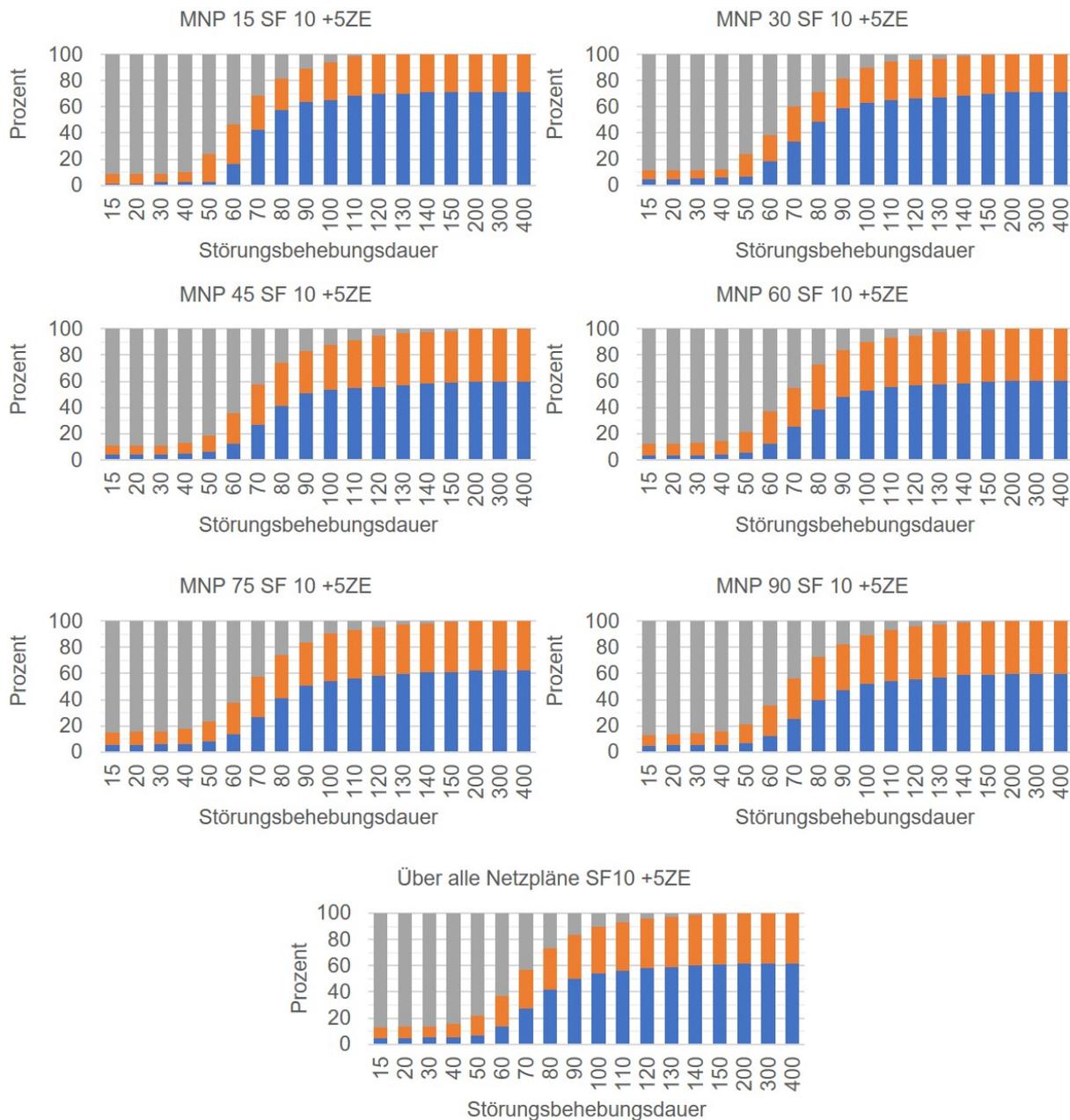


Abbildung C.7: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +5 ZE;

Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

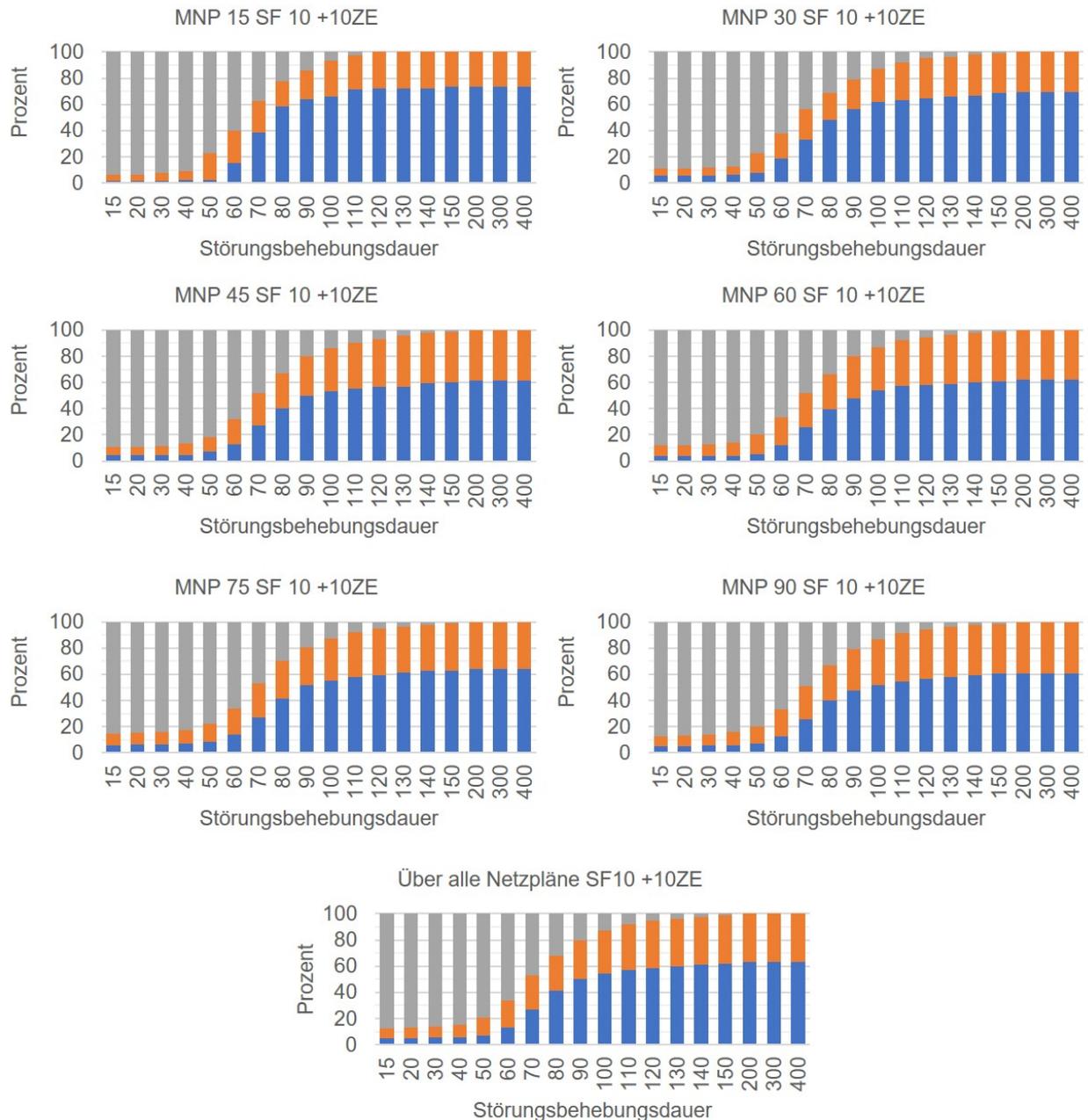


Abbildung C.8: Vorteilverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +10 ZE;

Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

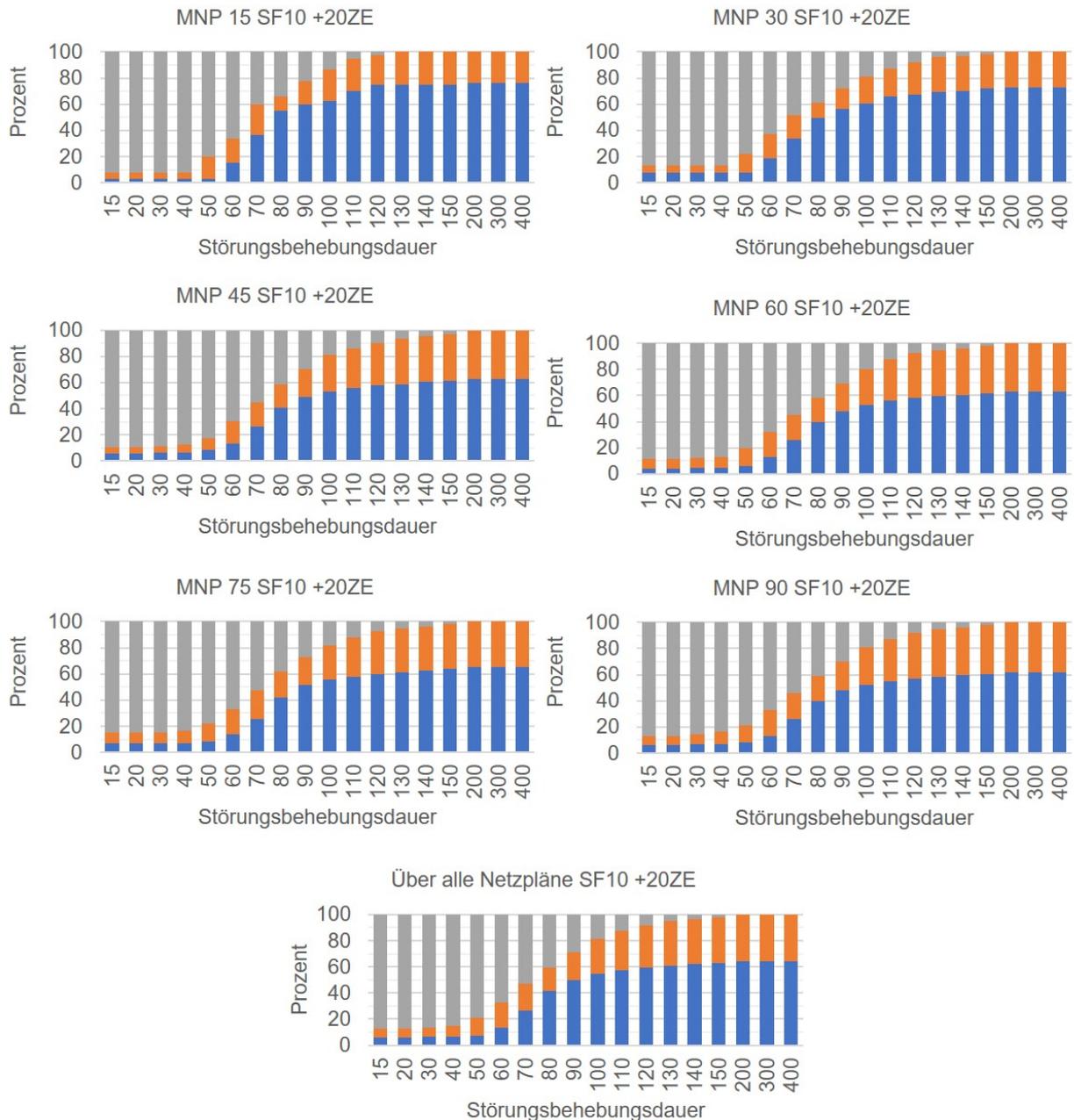


Abbildung C.9: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +20 ZE;
Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

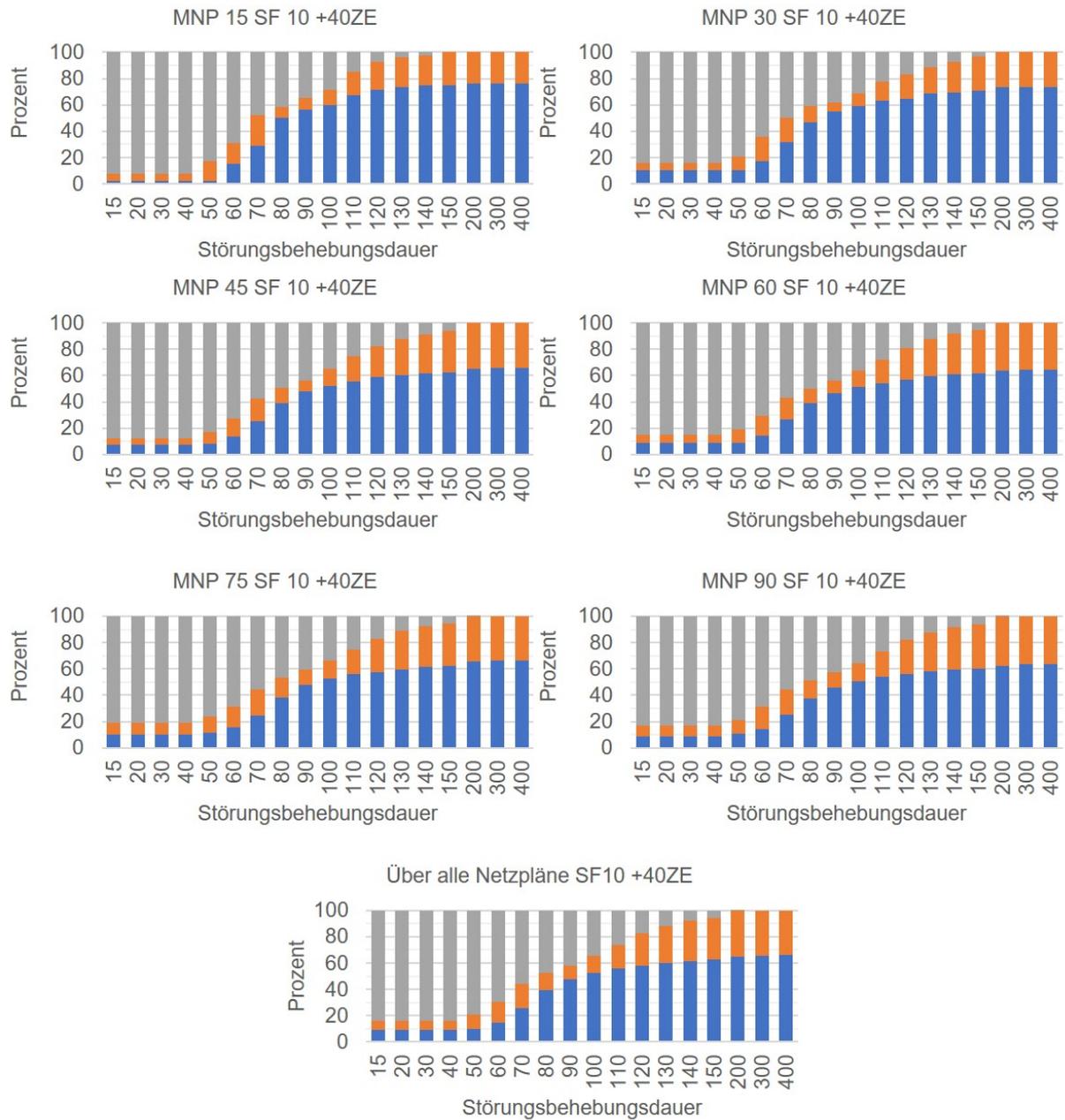


Abbildung C.10: Vorteilsverteilung bei der Durchführung von Alternativen innerhalb der untersuchten MNP-Größen.

Verwendete Parameter: erhöhte Dauer Alternativvorgänge = +40 ZE;

Strafzeitfaktor = 10; zusätzliche Zeiteinheiten = 10 ZE

Literaturverzeichnis

- [1] AIGNER, Martin: *Graphentheorie: Eine Einführung aus dem 4-Farben Problem*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Springer Spektrum, 2015 (Springer Studium Mathematik - Bachelor). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-10323-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-10323-1>. – ISBN 978-3-658-10322-4
- [2] ALTING, Leo; ZHANG, Hongchao: Computer aided process planning: The state-of-the-art survey. In: *International Journal of Production Research* 27 (1989), Nr. 4, S. 553–585. – ISSN 0020-7543
- [3] BANDOW, Gerhard (Hrsg.); HOLZMÜLLER, Hartmut H. (Hrsg.): *"Das ist gar kein Modell!": Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2010 (Gabler Research). – ISBN 978-3-8349-1842-0
- [4] BAUERNHANSL, Thomas; HOMPEL, Michael ten; VOGEL-HEUSER, Birgit: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>. – ISBN 978-3-658-04681-1
- [5] BEACH, R.; MUHLEMANN, A. P.; PRICE, D.H.R.; PATERSON, A.; SHARP, J. A.: A review of manufacturing flexibility. In: *European Journal of Operational Research* 122 (2000), Nr. 1, S. 41–57. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00062-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00062-4). – DOI 10.1016/S0377-2217(99)00062-4. – ISSN 03772217
- [6] BEHNKE, Heinz: *Netzplantechnik und operative Planung in der Industrie*. Verlag Moderne Industrie, 1970

- [7] BETTENHAUSEN, Kurt D.; KOWALEWSKI, Stefan: *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. Düsseldorf, 2013 <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/cyber-physical-systems-chancen-und-nutzen-aus-sicht-der-automation>
- [8] BOKRANZ, Rainer (Hrsg.); LANDAU, Kurt (Hrsg.); BECKS, Carl (Hrsg.): *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 2006 http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2646369&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm. – ISBN 9783791021331
- [9] BOY, Guy A.: *The Handbook of Human-Machine Interaction : A Human-Centered Design Approach*. Farnham, UNITED KINGDOM : CRC Press LLC, 2011 <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ub-wuerzburg/detail.action?docID=674526>. – ISBN 9781409411710
- [10] BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte; SCHOLL, Armin: Assembly line balancing: Which model to use when? In: *International Journal of Production Economics* 111 (2008), Nr. 2, S. 509–528. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026>. – DOI 10.1016/j.ijpe.2007.02.026. – ISSN 09255273
- [11] BRANDSTÄDT, Andreas: *Graphen und Algorithmen*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1994. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-94689-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-94689-8>. – ISBN 978-3-519-02131-5
- [12] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *Zukunftsbild Industrie 4.0*. Bonn, 2013 https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/zukunftsbild-industrie-4-0.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D4
- [13] BUNDESVERBAND INFORMATIONSWIRTSCHAFT (Hrsg.); VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (Hrsg.); ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E.V. (Hrsg.): *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*. Bitkom Research GmbH, 2015
- [14] CIRULIS, Arnis; GINTERS, Egils: Augmented reality in logistics. In: *Procedia Computer Science* 26 (2013), Nr. 11, S. 14–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.12.003>. – DOI 10.1016/j.procs.2013.12.003

- [15] CLAUSEN, Jens; LARSEN, Jesper; LARSEN, Allan; HANSEN, Jesper: Disruption management-operations research between planning and execution. In: *Or/ms Today* 28 (2001), Nr. 5, S. 40–52. – ISSN 1085–1038
- [16] COOPER, Alan; REIMANN, Robert; CRONIN, David: *About Face 3: The Essentials of Interaction Design*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007 <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=3056923>. – ISBN 978–0–470–08411–3
- [17] CROWSTON, Wallace; THOMPSON, Gerald L.: Decision CPM: A method for simultaneous planning, scheduling, and control of projects. In: *Operations research* 15 (1967), Nr. 3, S. 407–426
- [18] DANGELMAIER, Wilhelm: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00633-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00633-3>. – ISBN 978–3–642–00632–6
- [19] DAS, Sanchoy K.: The measurement of flexibility in manufacturing systems. In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 8 (1996), Nr. 1, S. 67–93. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00167801>. – DOI 10.1007/BF00167801. – ISSN 0920–6299
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibung und Begriffe*. 2009
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91345/250940128>. Version: 2016
- [22] DOMSCHKE, Wolfgang; DREXL, Andreas; KLEIN, Robert; SCHOLL, Armin: *Einführung in Operations Research*. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015. Berlin and Heidelberg : Springer Gabler, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48216-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48216-2>. – ISBN 9783662482155
- [23] DOMSCHKE, Wolfgang; SCHOLL, Armin: Heuristische verfahren. (2006). – ISSN 1611–1311
- [24] EISNER, Howard: A generalized network approach to the planning and scheduling of a research project. In: *Operations research* 10 (1962), Nr. 1, S. 115–125

- [25] ELMAGHRABY, Salah E.: An Algebra for the Analysis of Generalized Activity Networks. In: *Management Science* 10 (1964), Nr. 3, S. 494–514. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.10.3.494>. – DOI 10.1287/mnsc.10.3.494. – ISSN 0025–1909
- [26] ENDER, J.: *Design of Industrial Workplaces to relieve Workers when Interacting with Joint-Arm-Robots*, Liverpool John Moores University, Diss., 2021
- [27] ENDER, Johanna; WAGNER, Jan C.; KUNERT, Georg; GUO, Fang B.; LAREK, Roland; PAWLETTA, Thorsten: CONCEPT OF A SELF-LEARNING WORKPLACE CELL FOR WORKER ASSISTANCE WHILE COLLABORATION WITH A ROBOT WITHIN THE SELF-ADAPTING-PRODUCTION-PLANNING-SYSTEM. In: *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 9 (2019), Nr. 4, S. 4–9. <http://dx.doi.org/10.35784/iapgos.36>. – DOI 10.35784/iapgos.36. – ISSN 2083–0157
- [28] ENDER, Johanna; WAGNER, Jan C.; KUNERT, Georg; LAREK, Roland; PAWLETTA, Thorsten; GUO, Fang B.: Design of an Assisting Workplace Cell for Human-Robot Collaboration. In: *2019 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW)*, 2019
- [29] GAUSEMEIER, Jürgen (Hrsg.); WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20204-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20204-9>. – ISBN 978–3–642–20203–2
- [30] GEISBERGER, Eva (Hrsg.); BROY, Manfred (Hrsg.): *agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Springer, 2012 (acatech Studie)
- [31] GOUDA, A.; MONHOR, D.; SZÁNTAI, T.: Stochastic Programming Based PERT Modeling. Version: 2006. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-35262-7_{ }14. In: BECKMANN, M. (Hrsg.); KÜNZI, H. P. (Hrsg.); FANDEL, G. (Hrsg.); TROCKEL, W. (Hrsg.); BASILE, A. (Hrsg.); DREXL, A. (Hrsg.); DAWID, H. (Hrsg.); INDERFURTH, K. (Hrsg.); KÜRSTEN, W. (Hrsg.); SCHITTKO, U. (Hrsg.); MARTI, Kurt (Hrsg.); ERMOLIEV, Yuri (Hrsg.); MAKOWSKI, Marek (Hrsg.); PFLUG, Georg (Hrsg.): *Coping with Uncertainty* Bd. 581. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006. – DOI 10.1007/3–540–35262–7_14. – ISBN 978–3–540–35258–7, S. 241–255
- [32] GRENDL, Heiko; LAREK, Roland; RIEDEL, Felix; WAGNER, Jan C.: Enabling manual assembly and integration of aerospace structures for Industry 4.0 - methods. In: DENKENA,

- Berend (Hrsg.): *New production technologies in aerospace industry*. Garbsen : PZH Verlag TEWISS -Technik und Wissen GmbH, 2017 (Berichte aus dem IFW). – ISBN 978-3-95900-170-0
- [33] GÜNTHNER, W. A.; WILKE, M.; ZÄH, M. F.; RUDOLF, H.: Planung von Produktionsprozessen und Materialflusssteuerung. In: LINDEMANN, Udo (Hrsg.); REICHWALD, Ralf (Hrsg.); ZÄH, Michael F. (Hrsg.): *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-25506-2, S. 151-161
- [34] GURSKI, Frank; ROTHE, Irene; ROTHE, Jörg; WANKE, Egon: *Exakte Algorithmen für schwere Graphenprobleme*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 (eXamen.press). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04500-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04500-4>. – ISBN 978-3-642-04499-1
- [35] GUTENBERG, Erich: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1951. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-21965-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-21965-2>. – ISBN 978-3-662-21966-9
- [36] HAESSLER, Robert W.: Developing an Industrial-Grade Heuristic Problem-Solving Procedure. In: *Interfaces* 13 (1983), Nr. 3, S. 62-71. <http://dx.doi.org/10.1287/inte.13.3.62>. – DOI 10.1287/inte.13.3.62. – ISSN 0092-2102
- [37] HENNICKE, Ludwig: *Wissensbasierte Erweiterung der Netzplantechnik*. Bd. 47. Heidelberg : Physica-Verlag HD, 1991. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-46918-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-46918-3>. – ISBN 978-3-7908-0544-4
- [38] HENRIOUD, J-M; RELANGE, Laurent; PERRARD, Christophe: Assembly sequences, assembly constraints, precedence graphs. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, IEEE, 2003. – ISBN 0780377702
- [39] HOMEM DE MELLO, L. S.; SANDERSON, A. C.: AND/OR Graph Representation of Assembly Plans. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 6 (1990), Nr. 2, S. 188-199. <http://dx.doi.org/10.1109/70.54734>. – DOI 10.1109/70.54734
- [40] HÜNING, Felix: *Embedded Systems für IoT*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-57901-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-57901-5>. – ISBN 978-3-662-57900-8

- [41] HUPF, Katharina: *Zeitbewertete Prädikat/Transitions-Netze zur Modellierung, Simulation und Analyse sicherheitskritischer Echtzeitsysteme*, Universität Koblenz Landau, Dissertation, 03.11.2008
- [42] JOHANNSMEIERS, Lars; HADDADIN, Sami: A hierarchical human-robot interaction-planning framework for task allocation in collaborative industrial assembly processes. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 2 (2016), Nr. 1, S. 41–48. <http://dx.doi.org/10.1109/LRA.2016.2535907>. – DOI 10.1109/LRA.2016.2535907. – ISSN 2377–3766
- [43] KACPRZYK, Janusz; PENCZEK, Wojciech; PÓLROLA, Agata: *Advances in Verification of Time Petri Nets and Timed Automata*. Bd. 20. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32870-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32870-4>. – ISBN 978–3–540–32869–8
- [44] KERBOSCH, JAGM; SCHELL, H. J.: Network planning by the extended metra potential method (EMPM). In: *TH Eindhoven. ORS, Vakgr. operationele research : rapport* (1975), Nr. Vol. KS-1.1
- [45] KIRITSIS, Dimitris; PORCHET, Michel: A generic Petri net model for dynamic process planning and sequence optimization. In: *Advances in Engineering Software* 25 (1996), Nr. 1, S. 61–71. [http://dx.doi.org/10.1016/0965-9978\(95\)00086-0](http://dx.doi.org/10.1016/0965-9978(95)00086-0). – DOI 10.1016/0965–9978(95)00086–0. – ISSN 09659978
- [46] KLETTI, Jürgen: *Manufacturing Execution System-MES*. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–49743–1
- [47] KRISCHKE, André; RÖPCKE, Helge: *Graphen und Netzwerktheorie: Grundlagen - Methoden - Anwendungen*. München : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser-Verlag, 2015 (Quantitative Methoden). – ISBN 978–3–446–43229–1
- [48] KRUG, Wilfried; ROSE, Oliver: Optimierung. In: MÄRZ, Lothar (Hrsg.); KRUG, Wilfried (Hrsg.); ROSE, Oliver (Hrsg.); WEIGERT, Gerald (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978–3–642–14535–3, S. 21–28
- [49] KRUMKE, Sven O.; NOLTEMEIER, Hartmut: *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen ; mit 9 Tabellen und 90 Aufgaben*. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teub-

- ner, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9592-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9592-9>. – ISBN 978-3-8348-0629-1
- [50] KURBEL, Karl: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie*. Berlin, Boston : De Gruyter, 2016. <http://dx.doi.org/10.1515/9783110441697>. <http://dx.doi.org/10.1515/9783110441697>. – ISBN 9783110441697
- [51] LAREK, Roland; GRENDDEL, Heiko; WAGNER, Jan; RIEDEL, Felix: Concept and implementation of an interactive shopfloor planning system using smart devices. In: MEIRONKE, Heiko (Hrsg.); KROPIWNICKI, Jacek (Hrsg.); SMOLEN, Slawomir (Hrsg.): *23. International Symposium: Research-Education-Technology* Bd. 23. Stralsund, 2017. – ISBN 978-3-9817740-2-3
- [52] LAREK, Roland; GRENDDEL, Heiko; WAGNER, Jan C.; RIEDEL, Felix: Industry 4.0 in manual assembly processes – a concept for real time production steering and decision making. In: ROBERTO TETI, DORIANA M. D’ADDONA (Hrsg.): *12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering* Bd. 79, 2019
- [53] LAREK, Roland; WAGNER, Jan C.; GRENDDEL, Heiko; NÜCHTER, Andreas: The concept of a maximal network plan to enhance automated decision making in production steering. In: *Production Engineering* (2022). <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-022-01142-x>. – DOI 10.1007/s11740-022-01142-x. – ISSN 0944-6524
- [54] LEE, Doo Y.; DICESARE, F.: Scheduling flexible manufacturing systems using Petri nets and heuristic search. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 10 (1994), Nr. 2, S. 123–132. <http://dx.doi.org/10.1109/70.282537>. – DOI 10.1109/70.282537
- [55] LEE, Edward A.: Cyber Physical Systems: Design challenges. In: *11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008*. Piscataway, NJ : Conference Publishing Services, 2008. – ISBN 978-0-7695-3132-8
- [56] MALCOLM, Donald G.; ROSEBOOM, John H.; CLARK, Charles E.; FAZAR, Willard: Application of a technique for research and development program evaluation. In: *Operations research* 7 (1959), Nr. 5, S. 646–669
- [57] MERLIN, Philip M.: The Time-Petri-Net and the Recoverability of Processes. (1974)

- [58] MILL, Frank; SPRAGGETT, Stuart: Artificial intelligence for production planning. In: *Computer-Aided Engineering Journal* 1 (1984), Nr. 7, S. 210–213. – ISSN 0263–9327
- [59] MONOSTORI, L.; KÁDÁR, B.; BAUERNHANSL, T.; KONDOH, S.; KUMARA, S.; REINHART, G.; SAUER, O.; SCHUH, G.; SIHN, W.; UEDA, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016), Nr. 2, S. 621–641. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>. – DOI 10.1016/j.cirp.2016.06.005. – ISSN 00078506
- [60] NEBEL, Markus; WILD, Sebastian: *Entwurf und Analyse von Algorithmen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-21155-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-21155-4>. – ISBN 978–3–658–21154–7
- [61] NEUMANN, Klaus; SCHWINDT, Christoph: Activity-on-node networks with minimal and maximal time lags and their application to make-to-order production. In: *Operations-Research-Spektrum* 19 (1997), Nr. 3, S. 205–217. – ISSN 0171–6468
- [62] NEWZOO INTERNATIONAL B.V.; WARMAN, Peter (Hrsg.): *Global mobile market report 2019*. www.newzoo.com/global-mobile-market-report.
- [63] PATRON, Christian: *Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2004
- [64] PETRI, C. A.: *Kommunikation mit Automaten*. Darmstadt, Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1962. <https://books.google.de/books?id=BIGuGwAACAAJ>
- [65] PONTRANDOLFO, Pierpaolo: Project duration in stochastic networks by the PERT-path technique. In: *International Journal of Project Management* 18 (2000), Nr. 3, S. 215–222. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00015-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00015-0). – DOI 10.1016/S0263–7863(99)00015–0. – ISSN 02637863
- [66] PRITSKER, A. Alan B.: GERT-Graphical evaluation and review technique. (1966)
- [67] RAJKUMAR, Ragunathan; LEE, Insup; SHA, Lui; STANKOVIC, John: Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution. Version: 2010. <http://dx.doi.org/10.1145/1837274.1837461>. In: SAPATNEKAR, Sachin S. (Hrsg.): *Proceedings of the 47th*

- Design Automation Conference*. New York, NY : ACM and IEEE, 2010. – DOI 10.1145/1837274.1837461. – ISBN 978-1-4503-0002-5, S. 731-736
- [68] RAMCHANDANI, Chander: *Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 1973
- [69] REFA-VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION: *REFA Kompakt-Grundausbildung 2.0: Das Basis-Know-how in Industrial Engineering*. REFA, 2018 <https://books.google.de/books?id=0qW7xQEACAAJ>
- [70] REISIG, Wolfgang: *Petrinetze: Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9708-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9708-4>. – ISBN 978-3-8348-1290-2
- [71] RITTGEN, Peter: *Prozeßtheorie der Ablaufplanung: Algebraische Modellierung von Prozessen, Ressourcenrestriktionen und Zeit*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1998 (Teubner-Reihe Wirtschaftsinformatik). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-97618-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-97618-5>. – ISBN 9783322976185
- [72] ROCHOW, Philip; BURGGRAEF, Peter; REUTER, Christina; PRINZHORN, Henrik; WAGNER, Johannes; SCHMITZ, Torben: Identification of alternative assembly sequences for large-scale products. In: NARAYANAN, Sriram (Hrsg.): *Production and Operations Management Society-POMS 26th Annual Conference.*, 2015. – ISBN 0-692-40828-2
- [73] ROMERO, David; BERNUS, Peter; NORAN, Ovidiu; STAHRÉ, Johan; FAST-BERGLUND, Åsa: The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems. Version: 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7_80. In: NÄÄS, Irenilza (Hrsg.); VENDRAMETTO, Oduvaldo (Hrsg.); MENDES REIS, João (Hrsg.); GONÇALVES, Rodrigo F. (Hrsg.); SILVA, Márcia T. (Hrsg.); CIEMINSKI, Gregor von (Hrsg.); KIRITSIS, Dimitris (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World* Bd. 488. Cham : Springer International Publishing, 2016. – DOI 10.1007/978-3-319-51133-7_80. – ISBN 978-3-319-51132-0, S. 677-686
- [74] ROSELL, Jan: Assembly and task planning using Petri nets: a survey. In: *Proceedings of*

- the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 218 (2004), Nr. 8, S. 987–994. – ISSN 0954–4054
- [75] RUDOLF, Henning: *Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie*. München, Technische Universität München, Dissertation
- [76] RUNKLER, Thomas A.: *Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010 (Computational intelligence). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9353-6>. – ISBN 978–3–8348–0858–5
- [77] RUNZHEIMER, Bodo; BARKOVIC, Drazen: Netzplantechnik (NPT) als Wichtiges Instrument des Projektmanagements Grundlagen. In: *Interdisciplinary Management Research* 5 (2009), S. 265–318. – ISSN 1847–0408
- [78] RUNZHEIMER, Bodo; CLEFF, Thomas; SCHÄFER, Wolfgang: *Operations Research 1: Lineare Planungsrechnung und Netzplantechnik*. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-82917-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-82917-7>. – ISBN 978–3–409–30718–5
- [79] RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter: *Artificial intelligence: A modern approach*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2003 (Prentice Hall series in artificial intelligence). – ISBN 978–0137903955
- [80] SCHEUER, Dennis: *Akzeptanz von Künstlicher Intelligenz: Grundlagen intelligenter KI-Assistenten und deren vertrauensvolle Nutzung*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2020 (Research). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-29526-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-29526-4>. – ISBN 978–3–658–29525–7
- [81] SCHOLZ-REITER, Bernd; BEER, Christoph de; FREITAG, Michael; HAMANN, Tilo; REKERSBRINK, Henning; TERVO, Jan T.: Dynamik logistischer Systeme. Version:2008. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-75642-2_6. In: NYHUIS, Peter (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008. – DOI 10.1007/978-3-540-75642-2_6. – ISBN 978–3–540–75641–5, S. 109–138
- [82] SCHONENBERG, Helen; MANS, Ronny; RUSSELL, Nick; MULYAR, Nataliya; VAN DER AALST, Wil: Process flexibility: A survey of contemporary approaches. In: *Advances in enterprise engineering I*. Springer, 2008, S. 16–30

- [83] SCHUH, Günther; STICH, Volker: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25423-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25423-9>. – ISBN 978-3-642-25422-2
- [84] SCHUMACHER, Jochen: Effizientes Störungsmanagement in der Produktion. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009), Nr. 3, S. 206–209. <http://dx.doi.org/10.3139/104.110037>. – DOI 10.3139/104.110037. – ISSN 0947-0085
- [85] SCHWARZE, Jochen: Ein verallgemeinertes deterministisches Netzplanmodell. In: *Zeitschrift für Operations Research* 22 (1978), Nr. 1, 173–194. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01917659>. – DOI 10.1007/BF01917659. – ISSN 1432-5217
- [86] SCHWARZE, Jochen: *Projektmanagement mit Netzplantechnik*. 9., überarb. Aufl. Herne : Verl. Neue Wirtschafts-Briefe, 2006 (NWB-Studienbücher Wirtschaftswissenschaften). – ISBN 9783482560699
- [87] SILVA, Manuel: Introducing petri nets. In: PECK, Simon (Hrsg.); DiCESARE, F. (Hrsg.); HARHALAKIS, G. (Hrsg.); PROTH, J. M. (Hrsg.); SILVA, M. (Hrsg.); VERNADAT, F. B. (Hrsg.); DiCESARE, Frank (Hrsg.): *Practice of Petri Nets in Manufacturing // Practice of petri nets in manufacturing*. London : Springer and Chapman & Hall, 1994 // 1993. – ISBN 0412412306, S. 1–62
- [88] SILVER, Edward A.: An overview of heuristic solution methods. In: *Journal of the operational research society* 55 (2004), Nr. 9, S. 936–956. <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601758>. – DOI 10.1057/palgrave.jors.2601758. – ISSN 0160-5682
- [89] SPACE EXPLORATION TECHNOLOGIES CORP.; SPACE EXPLORATION TECHNOLOGIES CORP. (Hrsg.): *Reusability: The Key to Making Human Life Multi-Planetary*. <https://www.spacex.com/news/2013/03/31/reusability-key-making-human-life-multi-planetary>. Version:2015
- [90] SPANGENBERGER, Ute: *SpaceX-Astronauten kehren zurück*. Website. <https://www.tagesschau.de/crew-dragon-iss-103.html>. Version:02.08.2020
- [91] SPINRAD, Jeremy P.: *Fields Institute Monographs*. Bd. v.19: *Efficient Graph Representations*. Providence : American Mathematical Society, 2003 <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=4832499>. – ISBN 0821828150

- [92] STEGBAUER, Christian (Hrsg.); HÄUSSLING, Roger (Hrsg.): *Netzwerkforschung*. Bd. 4: *Handbuch Netzwerkforschung*. 1. Auflage. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010 <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=751725>. – ISBN 978-3-531-15808-2
- [93] STEGER, Angelika: *Diskrete Strukturen: Band 1: Kombinatorik, Graphentheorie, Algebra*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-46664-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-46664-2>. – ISBN 978-3-540-46660-4
- [94] SYSKA, Andreas: *Produktionsmanagement*. Wiesbaden : Gabler, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-9091-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-9091-4>. – ISBN 978-3-8349-0235-1
- [95] THIEDE, Sebastian; JURASCHEK, Max; HERRMANN, Christoph: Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories. In: KRISTIAN MARTINSEN (Hrsg.): *6th CIRP Conference on Learning Factories* Bd. 54, 2016
- [96] THULASIRAMAN, Krishnaiyan: Basic Graph Algorithms. In: THULASIRAMAN, Krishnaiyan (Hrsg.); ARUMUGAM, Subramanian (Hrsg.); BRANDSTÄDT, Andreas (Hrsg.); NISHIZEKI, Takao (Hrsg.): *Handbook of graph theory, combinatorial optimization, and algorithms*. Boca Raton and London and New York : CRC Press a Chapman & Hall book, 2016 (Chapman & Hall/CRC computer & information science series). – ISBN 978-1-4200-1107-4, S. 21-57
- [97] TURAU, Volker; WEYER, Christoph: *Algorithmische Graphentheorie*. 4. Berlin, Boston : De Gruyter, 2015 (De Gruyter Studium). <http://dx.doi.org/10.1515/9783110417326>. <http://dx.doi.org/10.1515/9783110417326>. – ISBN 978-3-11-041732-6
- [98] VDI-FACHBEREICH INFORMATIONSTECHNIK; VDI-GESELLSCHAFT PRODUKT- UND PROZESSGESTALTUNG (Hrsg.): *VDI 5600 Blatt 1. Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems-MES)*
- [99] VOSSEN, Gottfried; WITT, Kurt-Ulrich: *Grundkurs Theoretische Informatik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2202-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2202-4>. – ISBN 978-3-8348-1770-9

- [100] WAGNER, Jan C.; LAREK, Roland; NÜCHTER, Andreas: Der Maximalnetzplan als Neuinterpretation der Netzplantechnik. In: CLEVE, Jürgen (Hrsg.); ALDE, Erhard (Hrsg.); WISSOTZKI, Matthias (Hrsg.): *Proceedings 11. Wismarer Wirtschaftsinformatiktage* Bd. 11, 2018. – ISBN 978–3–942100–58–8
- [101] WAGNER, Jan C.; WIMBERG, Gesa; LAREK, Roland; OPPERMAN, Sven; GREDEL, Heiko: Towards an intelligent disruption management system based on the maximal network plan - development of a prioritisation algorithm for disruptions in production processes. In: *Procedia CIRP* 112 (2022), 471-476. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.089>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.089>. – ISSN 2212–8271. – 15th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 14-16 July 2021
- [102] WANG, Lihui; KESHAVARZMANESH, Shadi; FENG, Hsi-Yung; BUCHAL, Ralph O.: Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 41 (2009), Nr. 1-2, S. 132–144. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-008-1458-9>. – DOI 10.1007/s00170-008-1458-9. – ISSN 1433–3015
- [103] WESTKÄMPER, Engelbert: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-30764-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-30764-8>. – ISBN 3–540–26039–0
- [104] WESTKÄMPER, Engelbert: Definition und Entwicklung der digitalen Produktion. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.); SPATH, Dieter (Hrsg.); CONSTANTINESCU, Carmen (Hrsg.); LENTES, Joachim (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978–3–642–20258–2, S. 47–49
- [105] WITT, Peter: Netzplanmodelle im Innovationsmanagement. In: „*Das ist gar kein Modell!*“. Springer, 2010, S. 311–332
- [106] WÜRTH INDUSTRIE SERVICE GMBH & CO.KG: *iBin®: Der erste intelligente Kanban Behälter*. https://www.wuerth-industrie.com/web/de/wuerthindustrie/cteile_management/kanban/kanban_steuerung/ibin_intelligenterbehaelter/ibin.php.
Version: 2020

-
- [107] XU, Xun; WANG, Lihui; NEWMAN, Stephen T.: Computer-aided process planning—A critical review of recent developments and future trends. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 24 (2011), Nr. 1, S. 1–31. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2010.518632>. – DOI 10.1080/0951192X.2010.518632
- [108] YUSOF, Yusri; LATIF, Kamran: Survey on computer-aided process planning. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 75 (2014), Nr. 1-4, S. 77–89. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3>. – DOI 10.1007/s00170-014-6073-3. – ISSN 1433-3015
- [109] ZANAKIS, Stelios H.; EVANS, James R.: Heuristic “optimization”: Why, when, and how to use it. In: *Interfaces* 11 (1981), Nr. 5, S. 84–91. – ISSN 0092-2102
- [110] ZIMMERMANN, J.; STARK, C.; RIECK, J.: *Projektplanung: Modelle, Methoden, Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2006 <https://books.google.de/books?id=RfkiBAAAQBAJ>. – ISBN 9783540284833

Die Schriftenreihe

wird vom Lehrstuhl für Informatik XVII: Robotik der Universität Würzburg herausgegeben und präsentiert innovative Forschung aus den Bereichen der Robotik und der Telematik.

Die Kombination fortgeschrittener Informationsverarbeitungsmethoden mit Verfahren der Regelungstechnik eröffnet hier interessante Forschungs- und Anwendungsperspektiven. Es werden dabei folgende interdisziplinäre Aufgabenschwerpunkte bearbeitet:

- **Sensorik:** Integration von Sensoren in robotische Systeme, Kalibrierung, Lokalisierung, Kartierung und Interpretation von Sensordaten in Echtzeit.
- **Robotik und Mechatronik:** Kombination von Informatik, Elektronik, Mechanik, Aktuatorik, Regelungs- und Steuerungstechnik, um Roboter adaptiv und flexibel ihrer Arbeitsumgebung anzupassen.

Anwendungsschwerpunkte sind u.a. mobile Roboter, Tele-Robotik, Raumfahrtsysteme und Medizin-Robotik.

Lehrstuhl Informatik XVII
Robotik
Am Hubland
D-97074 Würzburg

Tel.: +49 (0) 931 - 31 - 88790

andreas.nuechter@uni-wuerzburg.de
<https://www.informatik.uni-wuerzburg.de/robotics>

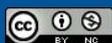
Dieses Dokument wird bereitgestellt durch den Online-Publikationsservice der Universität Würzburg.

Universitätsbibliothek Würzburg
Am Hubland
D-97074 Würzburg

Tel.: +49 (0) 931 - 31 - 85906

opus@bibliothek.uni-wuerzburg.de
<https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de>

ISSN: 2940-6145 (online)
ISSN: 2940-6137 (print)
ISBN: 978-3-945459-43-0 (online)



Zitation dieser Publikation

WAGNER, J. C. (2023). Maximalnetzplan zur reaktiven Steuerung von Produktionsabläufen. Schriftenreihe Forschungsberichte in der Robotik, Band 27. Würzburg: Universität Würzburg.
DOI: 10.25972/OPUS-30545

Dissertation an der Universität Würzburg im Rahmen der Graduate School of Science and Technology