

UNIVERSITÄT PASSAU

Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät

PRIORITÄTSREGELBASIERTE RESSOURCENPLANUNG FÜR
PROJEKTE MIT KOMPLEXER ABLAUFSTRUKTUR

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.)

von

Dipl.-Ing. Achim Jörg Holzer

Tag der letzten Fachprüfung des Rigorosums: 15. Dezember 1999

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. Hans Ziegler

Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr. Peter Kleinschmidt

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	PROJEKTE UND PROJEKTPLANUNG	3
1.1.1	Projekte	3
1.1.2	Projektplanung	5
1.2	BEHANDELTES THEMA UND GANG DER UNTERSUCHUNG.....	10
2	PROBLEMBESCHREIBUNG	13
2.1	PLANUNGSSITUATION: GRUNDSÄTZLICHE BEGRIFFE UND DEFINITIONEN.....	15
2.1.1	Ressourcen	15
2.1.2	Vorgänge.....	18
2.1.3	Ablaufbeziehungen	21
2.1.3.1	Beziehungen zwischen zwei Vorgängen	21
2.1.3.2	Beziehungen der Vorgänge zur Umwelt des Projekts	27
2.1.3.3	Mehrere Ablaufbeziehungen zwischen den gleichen Bezugszeitpunkten.....	31
2.2	MODELLIERUNG VON PROJEKTABLAUFSTRUKTUREN AUF BASIS VON NETZWERKEN.	33
2.3	DAS TERMINPLANUNGSPROBLEM.....	44
2.3.1	Charakterisierung des Terminplanungsproblems.....	44
2.3.2	Terminplanung für gegebene Durchführungsmodi	51
2.3.3	Terminplanung für unbestimmte Durchführungsmodi	55
2.4	DAS RESSOURCENPLANUNGSPROBLEM	59
2.4.1	Charakterisierung des Ressourcenplanungsproblems	59
2.4.2	Komplexität des Ressourcenplanungsproblems.....	61

2.5	OPTIMALITÄTSKRITERIEN	64
2.5.1	Technisch orientierte Zielkriterien.....	66
2.5.2	Ökonomisch orientierte Zielkriterien.....	69
3	LITERATURÜBERSICHT ZUM RESSOURCENPLANUNGSPROBLEM	78
3.1	EXAKTE VERFAHREN	80
3.2	HEURISTISCHE VERFAHREN	82
3.2.1	Unvollständige exakte Verfahren.....	82
3.2.2	Verfahren basierend auf dem Konzept disjunktiver Pfeile	83
3.2.3	Verfahren basierend auf lokalen Suchstrategien.....	83
3.2.4	Prioritätsregelbasierte Verfahren	85
3.2.4.1	Schemata zur Ressourcenplangenerierung	85
3.2.4.2	Prioritätsregeln	92
4	HEURISTISCHE RESSOURCENPLANUNG	98
4.1	GRUNDIDEEN	99
4.2	GRUNDTYPEN DER PRIORITÄTSREGELBASIERTEN HEURISTIKEN	113
4.2.1	Grundtyp I.....	113
4.2.1.1	Verfahren.....	113
4.2.1.2	Regeln für die Verfahren vom Grundtyp I	116
4.2.1.2.1	Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi	116
4.2.1.2.2	Prioritätsregeln.....	117
4.2.2	Grundtyp II.....	118
4.2.2.1	Verfahren.....	118
4.2.2.2	Regeln für die Verfahren vom Grundtyp II	121
4.2.2.2.1	Prioritätsregeln.....	121
4.2.2.2.2	Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi	121

4.2.3	Grundtyp III.....	122
4.2.3.1	Verfahren.....	122
4.2.3.2	Simultanregeln für die Verfahren vom Grundtyp III.....	124
4.3	EINPLANUNGSSCHEMATA ZUR RESSOURCENPLANGENERIERUNG	127
4.3.1	Spezifische Gemeinsamkeiten der Einplanungsschemata	127
4.3.2	Paralleles Einplanungsschema	130
4.3.3	Serielltes Einplanungsschema.....	139
4.3.4	Modifiziertes serielltes Einplanungsschema	145
5	EXPERIMENTELLE ANALYSE.....	152
5.1	TESTINSTANZEN	154
5.2	ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN ANALYSE	163
5.2.1	Verfahrensgrundtypen und Einplanungsschemata	164
5.2.2	Prioritätsregeln.....	169
5.2.3	Regeln zur Bestimmung des Durchführungsmodus.....	173
5.2.4	Simultanregeln	177
5.2.5	Einzelheuristiken.....	179
5.2.6	Laufzeiten.....	182
5.2.7	Zusammenfassung der Analyse.....	183
	LITERATURVERZEICHNIS.....	187
	NOTATIONEN	197

1 Einführung

In nahezu allen mittleren bis großen Unternehmen werden Projekte zur Lösung komplexer, teils interdisziplinärer Probleme durchgeführt¹. Man kann durchaus sagen, daß sich das Projektmanagement mittlerweile als Organisationsform neben der hierarchischen Struktur eines Unternehmens etabliert hat. Häufig wird es dabei zur Lösung von Aufgaben verwendet, welche einen hohen Grad an Neuartigkeit und Komplexität aufweisen, da traditionelle Linienorganisationen eher auf langfristige Zielsetzungen und Aufgaben ausgerichtet sind.

Solche im Rahmen eines Projekts behandelten Probleme können in der Regel nicht intuitiv gelöst werden. Sie bedürfen einer systematischen Planung, um das Risiko von Fehlentscheidungen zu verringern. Das Projektmanagement bietet Methoden und Verfahren zur Organisation, Planung, Überwachung und Steuerung eines solchen Projekts². Die Verwendung von Methoden des Projektmanagements ist heute eine der wesentlichen Voraussetzungen, Effizienz und Innovationsfähigkeit von Unternehmen zu steigern, um sich im internationalen Wettbewerb zu behaupten. Durch den Einsatz von Projektplanungsmethoden können durchschnittlich Einsparungen in Höhe von etwa 15% erzielt werden³. Dem steht ein durchschnittlicher Anteil der Planungskosten an den Projektkosten von circa 0,1% - 4% gegenüber⁴.

Probleme der Ablaufplanung sind daher seit mehreren Jahrzehnten verstärkt auch in der theoretischen Betrachtung im Rahmen des Operations Research häufig behandelte Themen.

¹ Alternativ wird für ein Projekt im folgenden auch der Begriff Vorhaben verwendet.

² Vgl. z.B. Schröder (1970), S. 31 ff., Schmitz/Windhausen (1986), S. 1 ff., Rinza (1994), S. 1 ff., Litke (1995), S. 15 ff.

³ Vgl. Altrogge (1996), S. 6 f.

⁴ Vgl. Altrogge (1996), S. 6 f.

Diese Arbeit betrachtet die Planung eines Vorhabens mit komplexer Ablaufstruktur⁵ für den Fall, daß die Einzelvorgänge⁶ des Projekts in verschiedenen Durchführungsmodi ausgeführt werden können⁷ und die zur Durchführung des Vorhabens benötigten Ressourcen⁸ nur begrenzt zur Verfügung stehen⁹. Zur Lösung des betrachteten Ressourcenplanungsproblems für diese Planungssituation stehen noch keine geeigneten Algorithmen zur Verfügung¹⁰.

In diesem Kapitel werden zunächst die zentralen Begriffe dieser Arbeit, nämlich Projekt und Projektplanung, erläutert. Die charakteristischen Merkmale von Projekten werden diskutiert und die einzelnen Teilschritte der Projektplanung dargelegt. Im zweiten Abschnitt wird das Thema dieser Arbeit beschrieben und der Gang der Untersuchung erläutert.

⁵ Eine Ablaufstruktur wird als komplex bezeichnet, wenn Mindest- und Höchstabstandsbedingungen zu berücksichtigen sind. Weist sie dagegen nur Mindestabstandsbeziehungen auf, so bezeichnet man sie als einfache Ablaufstruktur, vgl. Abschnitt 2.1.3.

⁶ Alternativ werden im folgenden auch die Begriffe Vorgang, Aktion, Aktivität oder Teilprozeß verwendet.

⁷ Dieser Fall wird im folgenden auch als Mehrmodus-Fall bezeichnet. Im Gegensatz dazu stehen Projekte, deren Vorgänge nur jeweils einem Durchführungsmodus aufweisen. Dieser Fall wird als Einmodus-Fall bezeichnet.

⁸ Alternativ werden im folgenden auch die Begriffe Kapazitäten oder Einsatzmittel verwendet.

⁹ Die behandelte Planungssituation wird in Abschnitt 2.1 detailliert dargestellt.

¹⁰ Das Ressourcenplanungsproblem wird in Abschnitt 2.4 dargestellt.

1.1 Projekte und Projektplanung

1.1.1 Projekte

Der Projektbegriff wird in der Literatur häufig als bekannt vorausgesetzt, kurz als einmalige Leistungserstellung deklariert oder einfach in Form von charakteristischen Beispielen erläutert. Eine allgemeingültige Definition hat sich dagegen bisher noch nicht durchgesetzt. Von fast allen Autoren, die näher auf den Projektbegriff eingehen, werden jedoch die folgenden charakteristischen Merkmale zur deduktiven Definition genannt¹¹.

Zunächst hat jedes Vorhaben das Ziel, eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen. Diese muß klar definiert und hinsichtlich ihrer Erfüllung zum Projektende verifizierbar sein. Eine solche Zielstellung stellt beispielsweise die Herstellung eines Sachguts, das Erbringen einer Dienstleistung oder die Erfüllung einer anderen Sachaufgabe dar.

Zur Durchführung des Projekts werden Verbrauchsgüter, Betriebsmittel und Arbeitskräfte eingesetzt. Hierbei müssen jedoch verschiedene Begrenzungen zeitlicher, räumlicher, sachlicher, finanzieller, personeller oder anderer Art berücksichtigt werden. Beispielsweise stehen häufig die zur Durchführung der Vorgänge benötigten Ressourcen nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Auch kann es vorkommen, daß das Vorhaben zu einem bestimmten Termin beendet sein muß.

Ein weiteres Kriterium ist die Einmaligkeit eines Projekts. Diesbezüglich betonen einige Autoren die Einmaligkeit der betreffenden Leistungserstellung als charakteristisches Merkmal¹², während andere die wiederholte Durchführung nicht ausschließen, sondern lediglich einmalige Bedingungen bezüglich des spezifischen Vollzugs verlangen¹³.

¹¹ Vgl. z.B. Rinza (1994), S. 3 ff., Schwarze (1994), S. 19 f., Litke (1995), S. 16 f.

¹² Vgl. z.B. Scheer (1978), S. 5, Spinner (1981), S. 2.

¹³ Vgl. z.B. Gewalt u.a. (1972), S. 10, Wille u.a. (1972), S. 16, Altrogge (1996), S. 1.

Offensichtlich ist wohl die zweite Sichtweise zu bevorzugen, da nicht einzusehen ist, warum die erneute Erstellung einer Leistung, beispielsweise der Bau einer Fabrik oder eines Kraftwerks, unter ganz neuen Bedingungen nicht als Projekt anzusehen und mit Hilfe der im Rahmen des Projektmanagements verwendeten Methoden zu betrachten sein soll.

Bei der Definition des Projektbegriffs wird meist auch eine hohe Komplexität der Vorhaben als kennzeichnendes Merkmal genannt. Der Grad der Komplexität eines betrachteten Projekts kann dabei anhand mehrerer Eigenschaften charakterisiert werden¹⁴. Einen großen Einfluß hat zunächst die Anzahl der zur Zielerfüllung durchzuführenden Einzelvorgänge¹⁵. Ein anderes Merkmal ist die Anzahl der zu beachtenden Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Tätigkeiten. Auch die Neuartigkeit eines Vorhabens, seine Bedeutung für das Unternehmen sowie das Risiko eines Verfehlens des Projektziels stellen Einflußgrößen für die Projektkomplexität dar. Schließlich weist ein Projekt meist auch eine hohe organisatorische Komplexität auf, da in der Regel viele verschiedene Stellen eines oder sogar mehrerer Unternehmen bei der Leistungserstellung koordiniert werden müssen.

Besonders häufig werden Forschungs- und Entwicklungsprojekte, Investitions- oder Organisationsvorhaben durchgeführt, jedoch sind dies nicht die einzigen Anwendungsbereiche. Oft genannte Beispiele sind die Entwicklung neuer Produkte, etwa eines Flugzeugs oder eines pharmazeutischen Produkts, Vorhaben des Anlagenbaus oder des Hoch- und Tiefbaus, Instandhaltungsprojekte, etwa bei Kernkraftwerken, Produkteinführungen, Entwicklung und Installation neuer Informationssysteme, Konzeption und Einführung von Organisationsänderungen oder auch Weltraummissionen.

¹⁴ Vgl. z.B. Schröder (1970), S. 17 ff., Rinza (1994), S. 9 ff.

¹⁵ In der Praxis können je nach Projektgröße und Detaillierungsgrad bis zu mehrere tausend Vorgänge auftreten. Laut einer Studie von Wasielewski beispielsweise wiesen 27 von 53 untersuchten Projekten mehr als 1000 Vorgänge auf, ein betrachtetes Raumfahrtprojekt wurde sogar in 7000 Einzelaktivitäten zerlegt, vgl. Wasielewski (1977).

1.1.2 Projektplanung

Die Projektplanung befaßt sich im Rahmen des Projektmanagements mit der Durchführungsplanung eines Vorhabens unter Berücksichtigung aller seiner charakteristischen Besonderheiten. Schwarze definiert Projektplanung als „die gedankliche Vorwegnahme der Projektrealisierung in einem Projektmodell zum Zwecke einer optimalen Erfüllung der in einem Projekt enthaltenen Aufgabe“¹⁶. Als Ergebnis erhält man einen Projektplan, der als Sollvorgabe für die Durchführung des Vorhabens dient. Zur Kennzeichnung der Optimalität eines Projektplans muß weiterhin ein Zielsystem vorgegeben sein¹⁷.

Prinzipiell besteht der Projektplanungsprozeß aus den Phasen Projektbeschreibung, Projektanalyse, Strukturplanung sowie Vollzugsplanung, welche nacheinander abgearbeitet werden müssen.

Die Projektbeschreibung beinhaltet eine detaillierte Analyse der Aufgabenstellung sowie die Abgrenzung des Projektumfangs. Auch muß der gewünschte Feinheitsgrad der Planung bestimmt und gegebenenfalls das Vorhaben in Teilprojekte unterteilt werden. Weiterhin werden bei der Projektbeschreibung die Organisationsstrukturen sowie die Kompetenzen der Beteiligten festgelegt¹⁸. Häufig finden diese Informationen Niederschlag in der Erstellung eines Pflichtenhefts als Grundlage der weiteren Projektplanung und Projektdurchführung.

¹⁶ Vgl. Schwarze (1978).

¹⁷ Wir betrachten die Projektplanung in dieser Arbeit ausschließlich als Optimierungsplanung, bei der man versucht, denjenigen Projektplan zu erarbeiten, welcher ein vorgegebenes Zielsystem optimal erfüllt. Im Gegensatz dazu steht die Ermittlungsplanung, welche die Ressourcenplanung, Kostenplanung sowie Finanzplanung auf eine reine Zuordnung der benötigten Kapazitätsbedarfe, Kosten, Einnahmen und Ausgaben an die entsprechenden Zeitpunkte auf Grundlage eines gewählten Terminplans reduziert. Zur Optimierungsplanung und Ermittlungsplanung vgl. z.B. Wasielewski (1975), S. 116 ff., Kerzner (1979), S. 367 ff., Ziegler (1986), S. 10 ff.

¹⁸ Vgl. Rinza (1994), S. 138 ff., Litke (1995), S. 69 ff.

Im Anschluß an die Projektbeschreibung erfolgt eine detaillierte Projektanalyse. Diese untersucht das Vorhaben hinsichtlich seiner Struktur, seiner Ablaufbedingungen, dem Bedarf an Zeit, Kapazitäten und Material sowie den zu erwartenden Kosten. Die einzelnen Analysen sollten so synchron wie möglich durchgeführt werden, da sich die Teilbereiche gegenseitig beeinflussen¹⁹.

Zur Analyse der Struktur eines Projekts wird es in einzelne Bestandteile zerlegt und zur übersichtlichen Darstellung in einem Projektstrukturplan abgebildet. Die Aufgliederung erfolgt dabei über mehrere Ebenen, zunächst in große Teilaufgaben und dann immer tiefergreifend, bis der gewünschte Feinheitsgrad erreicht und der gesamte Projektablauf in einzelne definierte Teilaufgaben, sogenannte Vorgänge, unterteilt ist²⁰. Die Detaillierung der Teilaufgaben im Rahmen der Strukturanalyse kann prinzipiell beliebig weit getrieben werden. Mit steigendem Feinheitsgrad erhöht sich hierbei der Aufwand für Planung und Kontrolle, während der Aufwand für Korrekturmaßnahmen und das Risiko von Terminüberschreitungen sinken. Es ist jedoch nicht möglich, einen optimalen Detaillierungsgrad rechnerisch zu bestimmen. Man muß sich vielmehr sukzessive an ihn herantasten²¹.

Die Verknüpfungen zwischen den ermittelten Teilaufgaben, also Reihenfolge- und Abstandsbedingungen, welche etwa aufgrund technologischer, organisatorischer oder rechtlicher Gründe eingehalten werden müssen, werden nun im Rahmen der Ablaufanalyse ermittelt. Mit Hilfe dieser Informationen wird dann ein Ablaufplan erstellt, welcher die zur Projektdurchführung auszuführenden Tätigkeiten sowie deren Verknüpfungen aufzeigt.

Die Zeitanalyse bewertet zunächst die während der Ablaufanalyse ermittelten Beziehungen zeitlich und klärt eventuell zu beachtende Terminvorgaben. Weiterhin bestimmt sie den Zeitbedarf für die Durchführung der einzelnen Vorgänge. Dabei werden sich in der Regel

¹⁹ Vgl. Ziegler (1986), S. 9.

²⁰ Vgl. Rinza (1994), S. 37 ff.

²¹ Vgl. Küpper u.a. (1975), S. 72.

für eine Tätigkeit mehrere verschiedene Durchführungsmöglichkeiten ergeben, etwa aufgrund verschiedener zur Verfügung stehender Technologien. Für jede Möglichkeit der Verrichtung einer Tätigkeit, im folgenden Durchführungsmodus genannt, wird sich dann jeweils ein eigener Zeitbedarf ergeben. Die Bewertungen der Vorgangsdauern und der zeitlichen Verknüpfungen können entweder anhand von Zeitbedarfsaufzeichnungen aus der Vergangenheit oder aufgrund subjektiver Schätzungen festgelegt werden²².

Die Kapazitätsanalyse und die Materialbedarfsanalyse dienen der Ermittlung der bei der Projektdurchführung verwendeten Produktionsfaktoren bezüglich der benötigten Qualität und Quantität. Jeder Tätigkeit kann ein bestimmter Bedarf an Kapazitäten und Materialien zugewiesen werden, welcher wiederum vom gewählten Durchführungsmodus abhängt. Aus diesem Grund sollten Zeitanalyse, Kapazitätsanalyse und Materialbedarfsanalyse simultan durchgeführt werden.

Im Rahmen der Kostenanalyse sind die durch die Durchführung des Projekts verursachten Kosten zu beurteilen. Diese umfassen Kosten, die durch die Vorgänge verursacht werden, beispielsweise durch den Bedarf an Materialien oder die Verwendung von Ressourcen, sowie vorgangsunabhängig anfallende Kosten, beispielsweise Verwaltungskosten.

An die Projektanalyse schließt sich die Strukturplanung an. In dieser Planungsphase werden die ermittelten Daten in einem sogenannten Strukturmodell abgebildet. Dieses soll das Projekt möglichst strukturtreu und zweckmäßig im Hinblick auf die gewählte Planungsaufgabe abbilden, da es als Basis für die anschließende Vollzugsplanung dient. Häufig werden hierzu Strukturmodelle verwendet, welche auf linearen Modellen oder Netzwerken basieren.

Die Vollzugsplanung schließlich stellt den essentiellen Teil der gesamten Projektplanung dar. Ziel ist es, einen Plan zu erarbeiten, auf dessen Grundlage das Projekt durchgeführt

²² Vgl. Küpper u.a. (1975), S. 95.

werden kann. Die Vollzugsplanung umfaßt die Aspekte der Zeitplanung²³, Kapazitätsplanung²⁴, Kostenplanung und Finanzplanung.

Im Rahmen der Terminplanung werden alle wesentlichen Informationen über die zeitlichen Ablaufmöglichkeiten des Projekts ermittelt. Dabei werden Zeitpläne erarbeitet, welche den grundsätzlichen Entscheidungsspielraum für die Einplanung der zu verrichtenden Tätigkeiten aufzeigen. Diese bestimmen frühestmögliche und spätestmögliche Termine für den Beginn oder das Ende eines jeden Vorgangs. Weiterhin werden zeitliche Freiheitsgrade ermittelt, welche bei der Projektdurchführung im Falle auftretender Störungen ausgenutzt werden können. Kapazitätsplanung, Kostenplanung und Finanzplanung ermitteln schließlich Bedarfspläne für Kapazitäten, Personal und Material sowie Kosten- und Finanzpläne.

Aufgrund der Interdependenzen zwischen den einzelnen Planungsbereichen ist grundsätzlich eine Simultanplanung anzustreben. Allerdings stellt sich dieses in der Praxis als äußerst komplexes Problem heraus, so daß in der Regel die Teilbereiche einzeln eingeplant werden. Die Kapazitätsplanung stellt dabei den am häufigsten untersuchten Teilbereich der Vollzugsplanung dar.

Konnte im Verlauf der Vollzugsplanung kein hinsichtlich der zeitlichen und kapazitiven Bedingungen zulässiger Projektablaufplan ermittelt werden, so müssen die Planungsphasen der Projektanalyse, der Strukturplanung und der Vollzugsplanung erneut durchlaufen werden. Bei der Projektanalyse müssen dabei die Rahmenbedingungen erneut untersucht und falls möglich relaxiert werden. Die einzelnen Tätigkeiten können hinsichtlich ihrer Durchführungsmöglichkeiten in weiteren Anpassungskombinationen untersucht werden. Auch können möglicherweise einzelne Mindestabstandsbewertungen verkleinert oder Höchstabstandsbewertungen vergrößert werden. Schließlich kann man versuchen, der

²³ Alternativ wird im folgenden auch der Begriff Terminplanung verwendet.

²⁴ Alternativ werden im folgenden auch die Begriffe Ressourcenplanung oder Einsatzmittelplanung verwendet.

Projektdurchführung zusätzliche Ressourcen zuzuordnen, beispielsweise durch Überstunden oder Sonderschichten.

1.2 Behandeltes Thema und Gang der Untersuchung

Das Thema dieser Arbeit ist die Ressourcenplanung eines Projekts. Aufgabe dieser Planung ist es, für ein betrachtetes Vorhaben einen zulässigen Projektablaufplan zu entwickeln, welcher die vorgegebenen Ablaufbedingungen berücksichtigt und zu keiner Überschreitung der Kapazitätsgrenzen führt. Der Begriff des Projekts sowie die einzelnen Schritte der Projektplanung wurden bereits zuvor dargestellt.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit wird zunächst die zugrundegelegte Planungssituation dargestellt. Es werden Vorhaben betrachtet, deren Vorgänge jeweils in mehreren Modi ausgeführt werden können. Weiterhin weisen die untersuchten Projekte komplexe Ablaufstrukturen auf. Beide Charakteristika sind in der Praxis häufig zu beobachten und daher für die Projektplanung relevant. In der Literatur wird das Problem jedoch in der Regel nur vereinfacht betrachtet, so daß derzeit keine Verfahren bekannt sind, welche die beschriebene Projektplanungssituation bearbeiten können²⁵.

Zudem wird in der Regel angenommen, daß zwischen jeweils zwei Vorgängen eine Ablaufbeziehung²⁶ nur zwischen deren Anfangszeitpunkten oder dem Endzeitpunkt des ersten und dem Anfangszeitpunkt des zweiten Vorgangs auftreten können²⁷. Da jedoch für den betrachteten Mehrmodus-Fall aufgrund der zunächst unbestimmten Vorgangsdauern nicht alle Ablauffolgen gleichwertig auf eine Folge abgebildet werden können, werden in dieser Arbeit explizit alle Ablaufbedingungen berücksichtigt.

Da das Ressourcenplanungsproblem in seiner allgemeinen Ausprägung extrem schwer lösbar ist, wird bei der Suche nach einem Lösungsverfahren im folgenden vereinfachend

²⁵ Vgl. die Übersicht bekannter Lösungsverfahren in Kapitel 3.

²⁶ Alternativ werden für Ablaufbeziehungen auch die Begriffe Anordnungsbeziehung, Abstandsbeziehung oder Reihenfolgebeziehung verwendet.

²⁷ Zur Abbildung aller vier möglichen Kombinationen von Ablaufbeziehungen auf eine einzige für den Einmodus-Fall vgl. Bartusch u.a. (1988).

angenommen, daß lediglich eine erneuerbare Ressource zur Projektdurchführung zur Verfügung steht²⁸.

Nach der Beschreibung der zugrundegelegten Planungssituation wird die im Rahmen der Projektplanung häufig verwendete Modellierung der Ablaufstruktur eines Vorhabens mit Hilfe von Netzwerken dargestellt. In dieser Arbeit wird dabei ein allgemeines Netzplanmodell verwendet, mit dessen Hilfe alle auftretenden Ablaufbeziehungen abgebildet werden können.

Nach der Definition des Terminplanungsproblems und des Ressourcenplanungsproblems wird schließlich noch auf die zur Durchführung der Kapazitätsplanung benötigten Optimalitätskriterien eingegangen. Es werden bekannte technisch und ökonomisch orientierte Zielfunktionen dargestellt.

Das dritte Kapitel dieser Arbeit gibt eine Übersicht über bereits aus der Literatur bekannte Verfahren zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems.

Im vierten Abschnitt werden verschiedene heuristische Verfahren zur Lösung des betrachteten Problems vorgestellt. Alle diese Heuristiken stellen prioritätsregelbasierte Kontraktionsverfahren dar. Exakte Verfahren werden dagegen nicht entwickelt, da diese aufgrund der Komplexität des Problems nicht in der Lage sind, in angemessener Zeit Lösungen für größere Projekte zu generieren²⁹.

Prioritätsregelbasierte Verfahren stellen heute die am häufigsten verwendeten Heuristiken zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems dar. Sie sind meist intuitiv verständlich und aufgrund ihres relativ geringen Rechenaufwands auch in der Lage, für größere Projekte eine Lösung zu generieren. Eine besondere Bedeutung kommt ihnen bezüglich jüngerer Ansätze zur heuristischen Lösung des betrachteten Problems mit Hilfe von Multi-Pass

²⁸ Zur Definition der verschiedenen Ressourcentypen vgl. Abschnitt 2.1.1.

²⁹ Zu exakten und heuristischen Ansätzen vgl. Kapitel 3.

Verfahren sowie Verfahren auf Basis lokaler Suche zu³⁰. Multi-Pass Verfahren beruhen darauf, mit Hilfe einer prioritätsregelbasierten Heuristik mehrere verschiedene Ressourcenpläne durch Variation der Prioritätsregeln beziehungsweise zufälliges Beeinflussen der Prioritätswerte zu generieren, von denen derjenige mit dem besten Zielfunktionswert gewählt wird. Neuere lokale Suchverfahren basieren auf prioritätsregelbasierten Heuristiken, deren Prioritätswerte mit Hilfe geeigneter Methoden, wie beispielsweise Simulated Annealing oder Tabu Search, zufällig verändert werden. Für die Qualität sowohl der Multi-Pass als auch der lokalen Suchverfahren ist die gewählte Basisheuristik von großer Bedeutung. Ein anderer Einsatzbereich für prioritätsregelbasierte Heuristiken ist die Generierung einer Anfangslösung, welche von vielen exakten Verfahren zunächst benötigt wird. Dabei wird eine gute Anfangslösung in der Regel zu einer starken Laufzeitverkürzung der exakten Verfahren im Vergleich zu einer schlechten Startlösung führen.

Für die prioritätsregelbasierten Verfahren werden drei Lösungsgrundtypen entwickelt, welche sich in der Art der Zuweisung des Durchführungsmodus sowie der Einplanungspriorität eines Vorgangs unterscheiden. Jeder dieser drei Typen kann beliebig mit einem der drei vorgestellten Einplanungsschemata kombiniert werden, nämlich den bekannten parallelen und seriellen Schemata sowie einer modifizierten Version des seriellen Schemas. Durch Auswahl einer geeigneten Prioritätsregel sowie einer Regel zur Bestimmung der Durchführungsmodi der Aktivitäten ergibt sich dann eine konkrete Heuristik zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems.

Die entwickelten Verfahren werden im fünften Kapitel dieser Arbeit einer experimentellen Analyse unterzogen. Dabei wird auch der Einfluß verschiedener Optimalitätskriterien auf die Qualität der vorgestellten Heuristiken untersucht. Betrachtet wird zum einen die klassische Minimierung der Projektdauer, zum anderen die Minimierung der gesamten durch die Projektdurchführung verursachten Kosten für zwei vorgegebene Kostensituationen.

³⁰ Vgl. Kolisch (1996a).

2 Problembeschreibung

Für das in dieser Arbeit untersuchte Ressourcenplanungsproblem werden in der Literatur verschiedene Planungsmodelle zugrundegelegt³¹. In der Regel werden dabei hinsichtlich der Planungssituation in seiner allgemeinen Ausprägung bestimmte Parameter eingeschränkt, um die Komplexität des Ressourcenplanungsproblems zu reduzieren. Häufig wird beispielsweise vorausgesetzt, daß das betrachtete Projekt eine einfache Ablaufstruktur aufweist. Vielfach wird auch das Auftreten mehrerer Durchführungsmöglichkeiten eines Vorgangs vernachlässigt oder, wie auch in dieser Arbeit, die Existenz lediglich einer einzigen Ressource mit über die Projektdauer konstanter Ressourcenverfügbarkeit angenommen. Andere Sonderfälle des Ressourcenplanungsproblems werden sogar in der Literatur als eigenständige Probleme untersucht, beispielsweise Job Shop und Flow Shop Scheduling³². Einige Autoren haben sich auch mit der simultanen Planung mehrerer Projekte beschäftigt³³.

Der erste Teil dieses Kapitels charakterisiert nun die in dieser Arbeit zugrundegelegte Planungssituation. Bei der Beschreibung dieser Situation werden nur die für den Sachverhalt relevanten Elemente und deren Eigenschaften sowie die relevanten Beziehungen zwischen den Elementen und deren Eigenschaften berücksichtigt. Diese Darstellung eines bereits aufbereiteten und von allen Nebensächlichkeiten und für die Problemlösung nicht relevanten Aspekten bereinigten Ausschnitts der Wirklichkeit bezeichnet man als empirisches System³⁴. Es wird verbal und symbolisch beschrieben und liegt dem Ressourcenplanungsproblem zugrunde.

³¹ Einen Überblick über verschiedene Planungsmodelle bieten z.B. Domschke/Drexl (1991), Brucker u.a. (1999).

³² Vgl. z.B. Sprecher (1994), S. 10 ff.

³³ Vgl. z.B. Pritsker u.a. (1969), Kurtulus/Davis (1982), Dumond/Mabert (1988), Lawrence/Morton (1993), Speranza/Vercellis (1993), Minciardi u.a. (1994).

³⁴ Vgl. Dinkelbach (1973).

Die Abbildung des empirischen Systems mit Hilfe von Strukturmodellen auf Basis von Netzwerken wird im zweiten Abschnitt dargestellt.

Der dritte Teil dieses Kapitels beschreibt zunächst das Terminplanungsproblem. Die in dieser Arbeit vorgestellten prioritätsregelbasierten Heuristiken zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems setzen bei ihrer Anwendung Ergebnisse aus der Terminplanung voraus. Anschließend wird auf die Behandlung des Problems bei festgelegten und bei unbestimmten Durchführungsmodi eingegangen.

Im vierten Abschnitt wird das eigentliche Ressourcenplanungsproblem definiert und dessen mathematische Komplexität beschrieben.

Bei der Ressourcenplanung als Optimierungsplanung benötigt man zur Evaluierung der Qualität verschiedener Ressourcenpläne standardisierte Kriterien, sogenannte Optimalitätskriterien. Verschiedene technisch und ökonomisch orientierte Zielkriterien werden im fünften Teil dieses Kapitels dargestellt.

2.1 Planungssituation: Grundsätzliche Begriffe und Definitionen

Wurde ein Projekt zuvor noch als großes Vorhaben mit definierter Aufgabenstellung und hoher Komplexität beschrieben, so soll an dieser Stelle die der behandelten Ressourcenplanung zugrundeliegende Projektplanungssituation eingehender charakterisiert werden. Die Grundbegriffe bei dieser Beschreibung sind dabei die Ressourcen, die Vorgänge, die Ablaufbeziehungen sowie das Optimalitätskriterium³⁵. Die ersten drei Begriffe sollen nun näher erläutert werden. Den Optimalitätskriterien ist nach der Charakterisierung des eigentlichen Ressourcenplanungsproblems ein eigener Abschnitt gewidmet³⁶.

Im folgenden gilt die Annahme, daß alle benötigten Daten verfügbar und ganzzahlig sind. Dies stellt keine Beeinträchtigung der Überführbarkeit der Realität in das empirische System dar, da die Einheiten frei gewählt werden können und bei hinreichend klein gewählter Einheit alle Größen, beispielsweise Vorgangsdauer oder Kapazitätsbedarf, als ganzzahlige Größen bewertet werden können.

2.1.1 Ressourcen

Zur Durchführung eines Projekts werden Ressourcen benötigt. Insgesamt stehen $R \in \mathbb{N}_+$ verschiedene Kapazitätstypen zur Verfügung, um das betrachtete Vorhaben durchzuführen³⁷. Jeder Einsatzmitteltyp r , $r=1(1)R$, wird durch seine Fähigkeiten beziehungsweise die von ihm zu verrichtenden Aufgaben charakterisiert. Beispiele für verschiedene Ressourcentypen sind Arbeiter unterschiedlicher Ausbildungsrichtungen,

³⁵ Vgl. Slowinski u.a. (1994), Kolisch (1995), S. 7.

³⁶ Vgl. Abschnitt 2.5.

³⁷ In dieser Arbeit wird die Menge der natürlichen Zahlen mit $N_0 = \{0,1,2,\dots\}$, die Menge der positiven natürlichen Zahlen mit $N_+ = \{1,2,3,\dots\}$ bezeichnet.

etwa Schlosser oder Maurer, und Maschinen verschiedener Funktionen, etwa Drehmaschinen oder Fräsmaschinen.

Jede Kapazitätsart steht während der Durchführung des Projekts in einer bestimmten Quantität zur Verfügung³⁸. Hierbei können zwei verschiedene Belastungsgrenzen charakterisiert werden. Zum einen weist jeder Ressourcentyp $r, r=1(1)R$, eine von der Periode $t=[t-1; t]$ ³⁹ abhängige Belastungsgrenze pro Periode $K_{rPer}(t) \in N_0$ auf, zum anderen kann man für jede Einsatzmittelart eine kumulierte Maximalverfügbarkeit pro Projekt $K_{rPro} \in N_+$ unterscheiden⁴⁰. Wenn beispielsweise zur Durchführung eines Straßenbauprojekts in einer Periode maximal eine gewisse Anzahl an Teermaschinen zur Verfügung steht, so stellt dies eine periodenbezogene Belastungsgrenze der Ressourcenart „Teermaschinen“ dar. Eine während dieses Projekts maximal zur Verfügung stehende Menge Teer dagegen wird als projektabhängige Belastungsgrenze des Verbrauchsguts „Teer“ verstanden.

Abhängig von den Gegebenheiten bezüglich der Ressourcenverfügbarkeiten können drei Kategorien an Ressourcen unterschieden werden⁴¹. Üblicherweise werden diese als erneuerbare, nicht erneuerbare und doppelt beschränkte Kapazitäten bezeichnet⁴².

³⁸ In dieser Arbeit werden nur die quantitativen Ressourcenmöglichkeiten betrachtet. Es wird davon ausgegangen, daß die zur Durchführung des Projekts benötigten qualitativen Bedingungen durch die Ressourcen erfüllt werden.

³⁹ Unter einer Periode versteht man die gewählte Zeitunterteilung, je nach Detaillierungsgrad können dies Stunden, Schichten, Tage oder auch Wochen sein. Während einer Periode ändern sich weder die Ressourcenverfügbarkeiten noch die Ressourcenbelastungen. Die Zeiteinheit ist dabei für alle auftretenden Zeitgrößen identisch zu wählen.

⁴⁰ Durch die Abbildung der Ressourcenverfügbarkeit als zeitabhängige Funktion kann gleichbedeutend auch die Zeitachse kalenderisiert werden. Dadurch ergibt sich beispielsweise die Möglichkeit, auch arbeitsfreie Tage bei der Ressourcenplanung zu berücksichtigen. Explizit behandelt wurde die Kalenderisierung z.B. von Zhan (1992).

⁴¹ Vgl. z.B. Sprecher (1994), S. 1 f., Kolisch (1995), S. 7 f.

Unter einer erneuerbaren Ressource versteht man dabei eine Kapazitätsart, welche unabhängig von der Projektdauer in jeder Periode t eine bestimmte endlich große, nichtnegative und in mindestens einer Periode positive maximale periodenbezogene Verfügbarkeit $K_{rPer}(t)$ aufweist. Der mögliche Gesamtverbrauch an dieser Ressource während der gesamten Projektdauer ist jedoch unbegrenzt, so daß $K_{rPro} = \infty$ gilt. Die durch einen Ressourcenplan bestimmte Anzahl der in der Periode t zur Durchführung des Projekts benötigten Einheiten k_{rt} an der Ressource r darf die periodenbezogene Verfügbarkeit $K_{rPer}(t)$ in keiner Periode t überschreiten, wenn das Projekt durchführbar sein soll.

Nicht erneuerbare Kapazitäten dagegen sind lediglich in Bezug auf die gesamte Projektdauer beschränkt. Für die Verwendung innerhalb einer Periode ist dagegen keine Obergrenze vorgegeben. Die Verfügbarkeitskennwerte verhalten sich daher umgekehrt zu jenen erneuerbarer Ressourcen, K_{rPro} weist nun einen endlich großen positiven Wert auf, während $K_{rPer}(t) = \infty$ angesetzt werden kann. Sinnvollerweise muß jedoch $K_{rPer}(t) = K_{rPro}$ gelten. Bei der planerischen Betrachtung eines Projekts ist es allerdings irrelevant, ob $K_{rPer}(t) = \infty$ oder $K_{rPer}(t) = K_{rPro}$ angesetzt wird, da ohnehin immer die Einhaltung beider Ressourcenverfügbarkeitsschranken beachtet werden muß. Der Gesamtbedarf an einer nicht erneuerbaren Ressource als Summe des sich aus einem Ressourcenplan ergebenden periodenbezogenen Bedarfs über die gesamte Projektdauer

$\sum_{t=t_p^a+1}^{t_p^e} k_{rt}$ darf also die Verfügbarkeit K_{rPro} nicht überschreiten, wenn der Kapazitätsplan

durchführbar sein soll. Dabei repräsentieren t_p^a den Projektbeginn und t_p^e das Projektende⁴³.

⁴² Eine mögliche Erweiterung der beschriebenen Planungssituation stellt auch die Einführung teilweise erneuerbarer Ressourcen dar. Diese stellen eine Kombination aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen dar. Ihre Verfügbarkeit ist jeweils über eine bestimmte Planungsdauer, welche mehrere Perioden umfaßt, hinweg beschränkt, vgl. Kolisch/Padman (1997).

⁴³ Vgl. Abschnitt 2.1.3.2.

Doppelt beschränkte Einsatzmittel schließlich weisen sowohl periodenbezogen als auch projektbezogen eine beschränkte Verfügbarkeit auf. K_{rPrO} und $K_{rPer}(t)$ nehmen also endlich große Werte an. Sinnvollerweise kann man jedoch nur dann von einer doppelt beschränkten Ressource reden, wenn für mindestens eine Periode t $K_{rPer}(t) < K_{rPrO}$ gilt.

Wir betrachten in dieser Arbeit einschränkend nur noch die Existenz eines erneuerbaren Ressourcentyps. Da somit $R=1$ gilt, wird der Index r im folgenden weggelassen. Weiterhin soll die periodenbezogene Ressourcenverfügbarkeit einen über die gesamte Projektdauer konstanten, periodenunabhängigen Wert $K_{Per} = \text{constant}$ aufweisen. Für den erneuerbaren Ressourcentyp gilt wie beschrieben $K_{PrO} = \infty$, die projektbezogene Verfügbarkeit bleibt daher nachfolgend unberücksichtigt.

2.1.2 Vorgänge

Die zur Erreichung des vorgegebenen Projektziels im Verlauf des Vorhabens durchzuführenden Tätigkeiten werden als Vorgänge bezeichnet. Schwarze definiert Vorgänge als ein „zeiterforderndes Geschehen innerhalb eines Projekts mit definierbarem Anfang und Ende, bei dem im allgemeinen Arbeitskräfte, Nutzungsgüter und / oder Verbrauchsgüter beansprucht werden“⁴⁴.

Ein Projekt besteht aus $I \in \mathbb{N}_+$ Einzelvorgängen. Eine solche Aktivität kann beispielsweise die Verrichtung eines Arbeitsgangs oder ein Transportvorgang sein. Um das Projekt erfolgreich zu beenden, muß jeder Vorgang genau einmal ausgeführt werden⁴⁵. Dabei stehen für die Durchführung jedes Vorgangs i , $i=1(1)I$, jeweils $M_i \in \mathbb{N}_+$

⁴⁴ Vgl. Schwarze (1978).

⁴⁵ Im Gegensatz hierzu ist bei verschiedenen stochastischen Ansätzen zur Projektplanung die Menge aller Vorgänge zwar bekannt, es müssen aber nicht unbedingt alle Vorgänge durchgeführt werden. Auch können Vorgänge eventuell mehrfach ausgeführt werden. Diese Ansätze eignen sich vor allem bei Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, für die die hier betrachteten deterministischen Modelle weniger geeignet sind, vgl. z.B. Küpper u.a. (1975), S. 298 ff., Elmaghraby (1977), S. 321 ff.

Durchführungsmodi zur Verfügung⁴⁶. Jeder Modus m_i , $m_i = 1(1)M_i$, steht dabei für eine andere Art der Ausführung des Vorgangs, wobei der Erfolg einer Aktivität unabhängig vom gewählten Modus ist. In der Praxis ist es oft möglich, Vorgänge in verschiedenen Anpassungskombinationen zu verrichten, beispielsweise durch die Variation von Maschinenintensitäten oder die Verwendung verschiedener Fertigungsmethoden.

Der gewählte Durchführungsmodus $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$ des Vorgangs i legt die einzusetzende Produktionsfaktorkombination fest. Dadurch wiederum werden die positive Vorgangsdauer $D_{im_i} \in \mathbb{N}_+$, also die Zeitspanne, welche zur Durchführung des Vorgangs benötigt wird, und der konstante, positive Ressourcenbedarf $k_{im_i} \in \mathbb{N}_+$ bestimmt⁴⁷. Sowohl die Dauer als auch der Ressourcenbedarf eines Vorgangs sind dabei allein abhängig vom gewählten Durchführungsmodus, nicht jedoch etwa vom Ausführungszeitraum⁴⁸. Wie oben beschrieben wird weiterhin angenommen, daß Dauer und Ressourcenbedarf des Vorgangs hinreichend genau als einwertige Größe geschätzt werden können und keinen stochastischen Schwankungen unterliegen. Der Planung werden also deterministische Vorgangsgrößen zugrundegelegt⁴⁹.

⁴⁶ Eine mögliche Erweiterung des beschriebenen Modells berücksichtigt Abhängigkeiten der Durchführungsmodi mehrerer Vorgänge. Alle zu verrichtenden Aktivitäten sind dabei in disjunkte Mengen aufgeteilt, wobei alle Vorgänge einer Menge im gleichen Modus ausgeführt werden müssen, vgl. Salewski u.a. (1997).

⁴⁷ Betrachtet man mehrere Ressourcen, so ist entsprechend mit jedem Durchführungsmodus ein bestimmter konstanter, nichtnegativer Bedarf $k_{im_i,r}$ an jeder Ressource r , $r=1(1)R$, verbunden. Dabei ist der Ressourcenbedarf eines Vorgangs in jedem seiner Durchführungsmodi für mindestens einen Kapazitätstyp positiv.

⁴⁸ Eine mögliche Erweiterung dieses Modells stellt die explizite Erfassung von Rüstzeiten dar. Sollten bei einem Projekt mehrere Vorgänge den gleichen Rüstprozeß aufweisen, so muß bei aufeinanderfolgender Einplanung solcher Aktivitäten nur einmal gerüstet werden. Dadurch ist die gesamte Vorgangsdauer auch abhängig von der Einplanungsreihenfolge mehrerer Vorgänge, vgl. Kolisch (1995), S. 31 ff.

⁴⁹ Im Gegensatz hierzu werden in den zuvor erwähnten stochastischen Ansätzen zur Projektplanung teilweise stochastische Vorgangsdauern berücksichtigt, vgl. z.B. Elmaghraby (1977), S. 228 ff.

Die Forderung eines konstanten Ressourcenbedarfs der Vorgänge während ihrer Ausführung stellt keine Einschränkung dar, da Tätigkeiten mit schwankendem Ressourcenbedarf im Rahmen der Strukturanalyse in der Weise in Teilvorgänge zerlegt werden können, daß die Einsatzmittelanforderungen nicht variieren. Diese Teilvorgänge sind dann je nach Lage der Umstände mit geeigneten Abstandsbedingungen zu verknüpfen⁵⁰.

Ist für jeden Durchführungsmodus m_i , $m_i = 1(1)M_i$, eines Vorgangs $i \in \{1, \dots, I\}$ der Ressourcenbedarf k_{im_i} größer als die periodenbezogene Ressourcenverfügbarkeit K_{Per} , so ist das Projekt nicht durchführbar⁵¹.

Sobald ein Vorgang begonnen wurde, darf er nicht mehr unterbrochen werden, sondern muß bis zu seinem Ende verrichtet werden⁵². Auch dies stellt keine weitere Einschränkung dar, da Aktivitäten, welche an bestimmten Stellen des Durchführungsprozesses unterbrechbar sind, in der Strukturanalyse wiederum in mehrere Teilvorgänge zu

⁵⁰ In der Regel wird man zwischen dem Endzeitpunkt des ersten und dem Anfangszeitpunkt des zweiten Teilvorgangs eine zeitliche Mindestabstandsbedingung und eine zeitliche Höchstabstandsbedingung, jeweils der Dauer null, einfügen. Zu den zeitlichen Beziehungen vgl. Abschnitt 2.1.3.

⁵¹ Für Projekte mit nicht erneuerbaren Ressourcentypen muß weiterhin der Gesamtressourcenverbrauch $(D_{im_i} \cdot k_{im_i})$ eines Vorgangs für mindestens einen Durchführungsmodus kleiner oder gleich K_{Pr_o} sein, damit das Projekt durchführbar sein kann. Damit ein Vorhaben mit mehreren Ressourcen lösbar sein kann, muß jeder Vorgang mindestens einen Modus aufweisen, welcher gleichzeitig die Bedingungen für die periodenbezogene als auch die projektbezogenen Ressourcengrenzen erfüllt.

⁵² In der Literatur werden auch Planungsmodelle betrachtet, welche unterbrechbare Vorgänge explizit untersuchen, vgl. z.B. Slowinski (1980), Slowinski (1981), Slowinski (1989), Demeulemeester/Herroelen (1996).

unterteilen und diese Teilvorgänge dann mit entsprechenden Ablaufbedingungen zu verknüpfen sind⁵³.

Verbunden mit jedem Vorgang i , $i=1(1)I$, sind zwei ausgezeichnete Bezugszeitpunkte, nämlich sein Anfangszeitpunkt t_i^a und sein Endzeitpunkt t_i^e ⁵⁴. In Abhängigkeit vom gewählten Durchführungsmodus m_i gilt dabei für jeden Vorgang

$$(1) \quad t_i^a + D_{im_i} = t_i^e, \quad m_i \in \{1, \dots, M_i\}, \quad i = 1(1)I, \quad D_{im_i} \in \mathbb{N}_+.$$

2.1.3 Ablaufbeziehungen

2.1.3.1 Beziehungen zwischen zwei Vorgängen

Aufgrund technologischer, organisatorischer, rechtlicher oder anderer Gründe bestehen oft zwischen einzelnen Vorgängen Ablaufbedingungen, welche bei der Durchführung des Projekts eingehalten werden müssen. Diese zeitlichen Beziehungen bestehen dabei jeweils zwischen zwei Bezugszeitpunkten, die eindeutig definierbar sein müssen. In dieser Arbeit werden nur die Anfangs- und Endzeitpunkte der Vorgänge sowie der Projektbeginn und

⁵³ Je nach Lage der Umstände muß man zwischen dem Endzeitpunkt des zeitlich vorgelagerten Teilvorgangs und dem Startzeitpunkt des zeitlich nachgelagerten Teilvorgangs einen Mindestabstand der Dauer null und einen Höchstabstand einfügen. Zu den zeitlichen Beziehungen vgl. Abschnitt 2.1.3.

⁵⁴ Der Anfangs- bzw. Endzeitpunkt eines Vorgangs wird durch die Zeitspanne zwischen dem Nullpunkt der modellinternen Zeitskala, welcher in der Regel auf den Projektbeginn gesetzt wird, und dem Zeitpunkt des Beginns bzw. Abschlusses des Vorgangs festgelegt.

das Projektende als Bezugszeitpunkte berücksichtigt^{55,56}. Einige Autoren haben daneben sogenannte Meilensteine definiert, welche markante, bei der Planung explizit zu berücksichtigende Ereignisse darstellen⁵⁷. Ein Ereignis markiert dabei einen bestimmten Zustand innerhalb des Projekts, beispielsweise den Abschluß eines Teilprojekts. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden jedoch keine Meilensteine berücksichtigt.

Am häufigsten tritt in der Realität eine zeitliche Mindestabstandsbeziehung zwischen zwei Vorgängen auf⁵⁸. Dabei können alle vier möglichen Kombinationen zwischen den Bezugszeitpunkten auftreten.

Besteht zwischen zwei Vorgängen i und j eine zeitliche Beziehung dergestalt, daß Vorgang j frühestens eine bestimmte Zeitspanne nach Abschluß des Vorgangs i begonnen werden darf, so ist zwischen den Bezugszeitpunkten t_i^e und t_j^a ein nichtnegativer Mindestabstand mit der Bewertung c_{ij}^{ea} einzuhalten. Diese Bedingung läßt sich formulieren zu

$$(2) \quad t_j^a - t_i^e \geq c_{ij}^{ea} \quad , \quad \forall (i, j) \in R^{ea} \quad , \quad c_{ij}^{ea} \in N_0 \quad ,$$

wobei R^{ea} die Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, darstellt, für die zwischen dem Endzeitpunkt des Vorgangs i und dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs j eine Mindestabstandsbeziehung besteht.

⁵⁵ *Handelt es sich bei einem Bezugszeitpunkt nicht um den Anfangs- oder Endzeitpunkt eines Vorgangs oder des Projekts, so muß die zugehörige Abstandsbeziehung überführt werden in eine Ablaufbedingung basierend auf dem Bezugszeitpunkt, welcher die zeitliche Lage des primären Bezugszeitpunkts festlegt. Handelt es sich dagegen bei einem Bezugszeitpunkt um den Beginn oder den Abschluß eines Teilvorgangs, so ist es auch möglich, den Vorgang in zwei Aktivitäten zu unterteilen und diese beiden mit geeigneten Abstandsbeziehungen zu verbinden, vgl. Ziegler (1986), S. 25 f.*

⁵⁶ *Zur Beschreibung der Ablaufbeziehungen sowie deren formaler Darstellung vgl. Ziegler (1986), S. 20 ff.*

⁵⁷ *Vgl. z.B. Schwarze (1978).*

Eine zeitliche Beziehung dieser Form wird als Abstandsbeziehung, der Parameter c_{ij}^{ea} als Bewertung der Abstandsbeziehung bezeichnet. In der gleichen Weise können nun auch Mindestabstandsbeziehungen zwischen den Anfangszeitpunkten, Anfangs- und Endzeitpunkt sowie den Endzeitpunkten der beiden Vorgänge formuliert werden:

Vorgang j darf frühestens c_{ij}^{aa} Zeiteinheiten nach Beginn des Vorgangs i beginnen:

$$(3) \quad t_j^a - t_i^a \geq c_{ij}^{aa}, \quad \forall (i, j) \in R^{aa}, \quad c_{ij}^{aa} \in N_0.$$

Die Menge R^{aa} enthält dabei alle Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, bei denen eine Mindestabstandsbedingung zwischen den Anfangszeitpunkten von Vorgang i und Vorgang j einzuhalten ist.

Vorgang j darf frühestens c_{ij}^{ae} Zeiteinheiten nach Beginn des Vorgangs i beendet sein:

$$(4) \quad t_j^e - t_i^a \geq c_{ij}^{ae}, \quad \forall (i, j) \in R^{ae}, \quad c_{ij}^{ae} \in N_0.$$

Alle Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, für die ein Mindestabstand zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j zu berücksichtigen ist, sind in der Menge R^{ae} enthalten.

Vorgang j darf frühestens c_{ij}^{ee} Zeiteinheiten nach Ende des Vorgangs i beendet sein:

$$(5) \quad t_j^e - t_i^e \geq c_{ij}^{ee}, \quad \forall (i, j) \in R^{ee}, \quad c_{ij}^{ee} \in N_0.$$

Die Menge R^{ee} enthält alle Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, für die zwischen den Endzeitpunkten der Vorgänge i und j ein Mindestabstand einzuhalten ist.

⁵⁸ Laut einer empirischen Untersuchung von Heyn sind im Maschinenbau bei 87% aller zeitlichen Beziehungen Mindestabstände zu berücksichtigen, vgl. Heyn (1969), S. 17.

Zwei Bemerkungen seien an dieser Stelle noch angefügt. Zum einen sollte man sich bewußt sein, daß ein zeitlicher Mindestabstand eine eindeutige Reihenfolge zwischen den beiden Bezugszeitpunkten impliziert. Es kann allerdings vorkommen, daß die beiden Vorgänge zeitlich überlappend ausführbar sind, beispielsweise wenn die zeitliche Bewertung c_{ij}^{aa} eines Anfang-Anfang-Mindestabstands kleiner ist als die Vorgangsdauer D_{im_i} von Vorgang i im gewählten Modus m_i .

Zum zweiten können alle Beziehungen, die hier mit Hilfe der „frühestens nach“ Formulierung charakterisiert wurden, auch als „spätestens vor“ Beziehung ausgedrückt werden. Beispielsweise kann die Mindestabstandsbedingung der Form $t_j^a - t_i^a \geq c_{ij}^{aa}$ entweder formuliert werden als „Vorgang j darf frühestens c_{ij}^{aa} Zeiteinheiten nach Beginn des Vorgangs i beginnen“ oder als „Vorgang i muß spätestens c_{ij}^{aa} Zeiteinheiten vor Beginn des Vorgangs j begonnen haben“. Ein Mindestabstand soll also in keiner Weise eine zeitliche Fixierung des einen oder anderen Bezugszeitpunkts ausdrücken, sondern lediglich die zeitliche Lage der beiden Zeitpunkte zueinander beschreiben. Welche der beiden Formulierungen gewählt wird, hängt im Einzelfall von der Kausalität in der Realität ab. Auf die Projektplanung hat dies jedoch keinen Einfluß.

Weiterhin soll festgelegt werden, daß bei im Rahmen der Ressourcenplanung in dieser Arbeit betrachteten Projekten keine geschlossenen Folgen $(i_1, i_2, \dots, i_v, i_1)$ unterschiedlicher Vorgänge auftreten, für die zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgende Vorgänge eine Mindestabstandsbeziehung der Formen (2) - (5) zu berücksichtigen ist. Diese Voraussetzung liegt in der Funktionsweise der zur prioritätsregelbasierten Ressourcenplanung verwendeten Einplanungsschemata begründet. Bei diesen kann ein Vorgang j erst nach der Einplanung aller anderen Aktivitäten i , für die ein Mindestabstand der Form $t_j^\beta - t_i^\alpha \geq c_{ij}^{\alpha\beta}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, einzuhalten ist, erfolgen⁵⁹. Beim Auftreten einer solchen Vorgangsfolge könnte dann die Einplanung mit keiner der Aktivitäten begonnen und somit auch kein zulässiger Ablaufplan ermittelt werden.

⁵⁹ Die Funktionsweise der Einplanungsschemata wird in Abschnitt 4.3 beschrieben.

Bei Vorliegen einer zeitlichen Mindestabstandsbeziehung zwischen zwei Vorgängen kann es grundsätzlich vorkommen, daß der Zeitabstand zwischen den beiden Vorgängen beliebig groß wird. Häufig treten jedoch in der Realität Umstände auf, welche die Einhaltung einer Höchstzeitspanne zwischen den beiden betreffenden Bezugszeitpunkten fordern⁶⁰. Analog zu den zeitlichen Mindestabständen können nun vier mögliche Fälle an Höchstabstandsbedingungen formuliert werden:

Vorgang j muß spätestens $c_{ij}^{\overline{ea}}$ Zeiteinheiten nach Ende des Vorgangs i begonnen haben:

$$(6) \quad t_j^a - t_i^e \leq c_{ij}^{\overline{ea}}, \quad \forall (i, j) \in R^{\overline{ea}}, \quad c_{ij}^{\overline{ea}} \in N_+.$$

Die Menge $R^{\overline{ea}}$ enthält dabei alle Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, für die zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang j ein Höchstabstand einzuhalten ist.

Vorgang j muß spätestens $c_{ij}^{\overline{aa}}$ Zeiteinheiten nach Beginn des Vorgangs i begonnen haben:

$$(7) \quad t_j^a - t_i^a \leq c_{ij}^{\overline{aa}}, \quad \forall (i, j) \in R^{\overline{aa}}, \quad c_{ij}^{\overline{aa}} \in N_+.$$

Alle Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, für die ein solcher Höchstabstand zwischen den Anfangszeitpunkten der Vorgänge i und j einzuhalten ist, sind in der Menge $R^{\overline{aa}}$ zusammengefaßt.

Vorgang j muß spätestens $c_{ij}^{\overline{ae}}$ Zeiteinheiten nach Beginn des Vorgangs i beendet sein:

$$(8) \quad t_j^e - t_i^a \leq c_{ij}^{\overline{ae}}, \quad \forall (i, j) \in R^{\overline{ae}}, \quad c_{ij}^{\overline{ae}} \in N_+.$$

⁶⁰ Laut einer empirischen Untersuchung von Heyn sind im Maschinenbau bei 41% aller zeitlichen Beziehungen Höchstabstände zu berücksichtigen, vgl. Heyn (1969), S. 17.

Die Menge $\overline{R^{ae}}$ enthält alle Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, für die ein Höchstabstand zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j einzuhalten ist.

Vorgang j muß spätestens c_{ij}^{ee} Zeiteinheiten nach Ende des Vorgangs i beendet sein:

$$(9) \quad t_j^e - t_i^e \leq c_{ij}^{ee}, \quad \forall (i, j) \in \overline{R^{ee}}, \quad c_{ij}^{ee} \in \mathbb{N}_+.$$

Alle Vorgangspaare $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$, $i \neq j$, für die ein solcher Höchstabstand zwischen den Endzeitpunkten der Vorgänge i und j zu berücksichtigen ist, sind in der Menge $\overline{R^{ee}}$ enthalten.

Auch hier seien zwei kurze Anmerkungen angefügt. Im Gegensatz zu den Mindestabständen implizieren Höchstabstände keine zeitliche Reihenfolge weder der Vorgänge noch der Bezugszeitpunkte. So ist die zeitliche Beziehung „Vorgang j muß spätestens 10 Zeiteinheiten nach Ende des Vorgangs i begonnen haben“ erfüllt, wenn entweder

Vorgang j 10 Zeiteinheiten nach Ende des Vorgangs i beginnt, Vorgang j also nach Vorgang i bearbeitet wird,

Vorgang j und Vorgang i zeitgleich begonnen und durchgeführt werden, oder

Vorgang j 10 Zeiteinheiten vor Beginn von Vorgang i beendet ist, Vorgang j also vor Vorgang i durchgeführt wird.

Zweitens kann man analog zu den zeitlichen Mindestabständen alle „spätestens nach“ Beziehungen alternativ auch als „frühestens vor“ Beziehungen formulieren.

Neben den soeben beschriebenen zeitlichen Mindestabständen und Höchstabständen werden in dieser Arbeit keine weiteren zeitlichen Beziehungen zwischen zwei oder mehreren Vorgängen berücksichtigt⁶¹.

2.1.3.2 Beziehungen der Vorgänge zur Umwelt des Projekts

Neben den Verknüpfungen zwischen zwei Vorgängen durch Mindestabstände oder Höchstabstände sind auch Beziehungen zwischen den Vorgängen und der Umwelt des Projekts zu berücksichtigen. Dazu werden zwei ausgezeichnete Zeitpunkte definiert, nämlich der Projektbeginn t_p^a und das Projektende t_p^e . Es wird festgelegt, daß der Projektbeginn auf einer modellinternen Zeitskala den Zeitpunkt

$$(10) \quad t_p^a = 0$$

darstellt⁶².

Analog zu den zeitlichen Beziehungen zwischen Bezugszeitpunkten zweier Vorgänge treten auch Beziehungen zwischen dem Projektbeginn und den Vorgängen, zwischen dem

⁶¹ Ziegler behandelt zusätzlich alternative Reihenfolgebedingungen, sogenannte disjunktive Beziehungen sowie Bündelbedingungen. Alternative Reihenfolgebeziehungen zwischen mehreren Vorgängen treten in drei Varianten auf. Im ersten Fall dürfen mehrere Vorgänge in beliebiger Reihenfolge, jedoch niemals zwei von ihnen gleichzeitig durchgeführt werden. Bei der zweiten Variante steht ein Vorgang in disjunktiver Beziehung zu einer Anzahl anderer Vorgänge, welche jedoch untereinander nicht disjunktiv verknüpft sind. Schließlich können noch disjunktive Beziehungen der Form auftreten, daß ein Vorgang entweder vor oder nach der Ausführung einer Anzahl anderer Aktivitäten eingeplant werden kann, jedoch nie zwischen zweien dieser Vorgänge. Bündelbedingungen schließlich sagen aus, daß ein Vorgang frühestens dann begonnen werden kann, wenn ein beliebiger Vorgang einer bestimmten Vorgangsmenge abgeschlossen wurde, welche wiederum untereinander keine vorgegebene Reihenfolge aufweisen. Zu disjunktiven Beziehungen und Bündelbedingungen vgl. Ziegler (1986), S. 41 ff.

⁶² Generell können auch andere Festlegungen erfolgen, beispielsweise, daß das Projekt nicht vor dem Nullpunkt der modellinternen Zeitskala begonnen werden kann. Dies würde durch die Beziehung $t_p^a \geq 0$ abgebildet werden.

Projektende und den Vorgängen sowie zwischen Projektbeginn und Projektende auf⁶³. Zunächst werden durch den Projektbeginn die frühestmöglichen Einplanungsmöglichkeiten der Anfangszeitpunkte aller Vorgänge begrenzt, da kein Vorgang vor dem Projektbeginn begonnen werden darf. Diese Beziehung kann für alle Vorgänge mit der Ungleichung

$$(11) \quad t_i^a \geq t_p^a, \quad i=1(1)I,$$

beschrieben werden. Analog kann das Projekt nicht beendet werden, bevor alle Vorgänge ausgeführt worden sind. Daher gilt für alle Vorgänge die Ungleichung

$$(12) \quad t_p^e \geq t_i^e, \quad i=1(1)I.$$

Zusätzlich zu diesen selbstverständlichen Ablaufbedingungen können aber auch Mindest- oder Höchstabstände zwischen dem Projektbeginn und Anfangs- oder Endzeitpunkten einzelner Vorgänge bestehen. Analog zur Darstellung der Mindest- und Höchstabstände zwischen zwei Vorgängen können die Abstandsbeziehungen zwischen dem Projektbeginn und bestimmten Vorgängen durch die Ungleichungen

$$(13) \quad t_i^a - t_p^a \geq c_{Pi}^{aa}, \quad \forall i \in R_{PA}^{aa}, c_{Pi}^{aa} \in N_+,$$

$$(14) \quad t_i^e - t_p^e \geq c_{Pi}^{ae}, \quad \forall i \in R_{PA}^{ae}, c_{Pi}^{ae} \in N_+,$$

$$(15) \quad t_i^a - t_p^a \leq \overline{c_{Pi}^{aa}}, \quad \forall i \in \overline{R_{PA}^{aa}}, \overline{c_{Pi}^{aa}} \in N_+ \text{ und}$$

⁶³ Zusätzlich können für jeden Bezugszeitpunkt zu berücksichtigende kalenderabhängige Terminuntergrenzen und Terminobergrenzen bestimmt werden. Diese stellen Mindestabstände bzw. Höchstabstände zwischen dem Nullpunkt der modellinternen Zeitskala und dem entsprechenden Bezugszeitpunkt dar. Da bei der in dieser Arbeit zugrundegelegten Planungssituation der Projektbeginn auf den Nullpunkt fixiert ist, können diese Terminuntergrenzen und Terminobergrenzen jedoch gleichwertig auch durch Mindestabstände bzw. Höchstabstände zwischen dem Projektbeginn und dem betreffenden Bezugszeitpunkt abgebildet werden. Zu Terminuntergrenzen und Terminobergrenzen vgl. Ziegler (1986), S. 101 ff.

$$(16) \quad t_i^e - t_p^a \leq \overline{c_{pi}^{ae}}, \quad \forall i \in \overline{R_{PA}^{ae}}, \quad \overline{c_{pi}^{ae}} \in \mathbb{N}_+$$

dargestellt werden. Entsprechend dazu können Mindest- und Höchstabstandsbeziehungen zwischen bestimmten Vorgängen und dem Projektende folgendermaßen dargestellt werden:

$$(17) \quad t_p^e - t_i^a \geq \overline{c_{ip}^{ae}}, \quad \forall i \in \overline{R_{PE}^{ae}}, \quad \overline{c_{ip}^{ae}} \in \mathbb{N}_+.$$

$$(18) \quad t_p^e - t_i^e \geq \overline{c_{ip}^{ee}}, \quad \forall i \in \overline{R_{PE}^{ee}}, \quad \overline{c_{ip}^{ee}} \in \mathbb{N}_+.$$

$$(19) \quad t_p^e - t_i^a \leq \overline{c_{ip}^{ae}}, \quad \forall i \in \overline{R_{PE}^{ae}}, \quad \overline{c_{ip}^{ae}} \in \mathbb{N}_+.$$

$$(20) \quad t_p^e - t_i^e \leq \overline{c_{ip}^{ee}}, \quad \forall i \in \overline{R_{PE}^{ee}}, \quad \overline{c_{ip}^{ee}} \in \mathbb{N}_+.$$

Analog zu den Mengen R^{ea} , ..., R^{ee} beinhalten die Mengen $\overline{R_{PA}^{aa}}$, $\overline{R_{PA}^{ae}}$, $\overline{R_{PA}^{aa}}$, $\overline{R_{PA}^{ae}}$, $\overline{R_{PE}^{ae}}$, $\overline{R_{PE}^{ee}}$, $\overline{R_{PE}^{ae}}$, $\overline{R_{PE}^{ee}}$ diejenigen Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, für die Abstandsbeziehungen der Arten (13) - (20) einzuhalten sind. Dabei enthält die Menge

$\overline{R_{PA}^{aa}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Mindestabstand zwischen dem Projektbeginn und dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs i einzuhalten ist.

$\overline{R_{PA}^{ae}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Mindestabstand zwischen dem Projektbeginn und dem Endzeitpunkt des Vorgangs i einzuhalten ist.

$\overline{R_{PA}^{aa}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Höchstabstand zwischen dem Projektbeginn und dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs i einzuhalten ist.

$\overline{R_{PA}^{ae}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Höchstabstand zwischen dem Projektbeginn und dem Endzeitpunkt des Vorgangs i einzuhalten ist.

$\overline{R_{PE}^{ae}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Mindestabstand zwischen dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs i und dem Projektende einzuhalten ist.

$\overline{R_{PE}^{ee}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Mindestabstand zwischen dem Endzeitpunkt des Vorgangs i und dem Projektende einzuhalten ist.

$\overline{R_{PE}^{ae}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Höchstabstand zwischen dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs i und dem Projektende einzuhalten ist.

$\overline{R_{PE}^{ee}}$ alle Vorgänge $i \in \{1, \dots, I\}$, bei denen ein Höchstabstand zwischen dem Endzeitpunkt des Vorgangs i und dem Projektende einzuhalten ist.

Neben den soeben dargestellten Beziehungen zwischen dem Bezugszeitpunkt eines Vorgangs und dem Projektbeginn oder dem Projektende kann auch eine Höchstabstandsbedingung zwischen Projektbeginn und Projektende, also eine einzuhaltende Projekthöchstdauer abgebildet werden. Diese wird durch die Ungleichung

$$(21) \quad t_P^e - t_P^a \leq \overline{c_{PP}^{ae}}, \quad \overline{c_{PP}^{ae}} \in \mathbb{N}_+, \quad \text{falls eine solche Projekthöchstdauer vorgegeben ist,}$$

wiedergegeben.

In dieser Arbeit soll gelten, daß alle Bewertungen $\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$, $u, v \in \{P, 1, \dots, I\}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, $u \neq v$, von Höchstabstandsbedingungen der Form $t_v^\beta - t_u^\alpha \leq \overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$, die zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β einzuhalten sind, positiv sind. Sollte einmal ein Höchstabstand mit der Bewertung $\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}} = 0$ zu berücksichtigen sein, so kann diese Beziehung gleichbedeutend durch einen entgegengesetzten Mindestabstand der Form $t_u^\alpha - t_v^\beta \geq \overline{c_{vu}^{\beta\alpha}}$ mit der Bewertung $\overline{c_{vu}^{\beta\alpha}} = 0$ abgebildet werden. Diese Voraussetzung stellt wiederum die Funktionsfähigkeit der bei der prioritätsregelbasierten Ressourcenplanung verwendeten Einplanungsschemata sicher.

2.1.3.3 Mehrere Ablaufbeziehungen zwischen den gleichen Bezugszeitpunkten

In der Realität kann es vorkommen, daß zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β , $u, v \in \{P, 1, \dots, I\}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, $u \neq v$, gleichzeitig mehrere zeitliche Beziehungen der oben erläuterten Typen auftreten. Beispielsweise kann es vorkommen, daß ein Vorgang j aus technischen Gründen frühestens 5 Zeiteinheiten nach Abschluß eines anderen Vorgangs i beginnen kann und gleichzeitig aus rechtlichen Gründen frühestens 10 Zeiteinheiten nach Abschluß jenes Vorgangs i beginnen darf.

In dieser Arbeit sollen jedoch im folgenden nur noch jeweils eine Mindest- und eine Höchstabstandsbeziehung zwischen zwei Bezugszeitpunkten gestattet sein⁶⁴. Dabei wird immer die dominierende zeitliche Beziehung beibehalten. Dadurch wird die spätere Betrachtung im Rahmen der Ressourcenplanung erleichtert und von für die Ressourcenplanung irrelevanten Aspekten befreit.

Sollten $n \geq 2$ Mindestabstandsbeziehungen zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β , $u, v \in \{P, 1, \dots, I\}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, $u \neq v$, existieren mit den Bewertungen $c_{uv}^{\alpha\beta, \mu}$, $\mu = 1(1)n$, so wird im folgenden nur noch die Mindestabstandsbeziehung $t_v^\beta - t_u^\alpha \geq c_{uv}^{\alpha\beta}$ mit

$$c_{uv}^{\alpha\beta} = \max_{\mu=1(1)n} \{c_{uv}^{\alpha\beta, \mu}\} \text{ berücksichtigt.}$$

Sollten $n \geq 2$ Höchstabstandsbeziehungen zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β , $u, v \in \{P, 1, \dots, I\}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, $u \neq v$, existieren mit den Bewertungen $\overline{c_{uv}^{\alpha\beta, \mu}}$, $\mu = 1(1)n$, so wird im folgenden nur noch die Höchstabstandsbeziehung $t_v^\beta - t_u^\alpha \leq \overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ mit

$$\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}} = \min_{\mu=1(1)n} \{\overline{c_{uv}^{\alpha\beta, \mu}}\} \text{ berücksichtigt.}$$

⁶⁴ Ziegler weist ausdrücklich daraufhin, daß dadurch die Strukturtreue zwischen Realität und empirischen System verletzt wird und ein Informationsverlust auftritt, vgl. Ziegler (1986), S. 49.

Weiterhin soll an dieser Stelle vereinbart werden, daß bei gleichzeitigem Vorliegen einer Mindestabstandsbedingung mit der Bewertung $c_{uv}^{\alpha\beta}$, $u, v \in \{P, 1, \dots, I\}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, $u \neq v$, zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β der Form $t_v^\beta - t_u^\alpha \geq c_{uv}^{\alpha\beta}$ und einer gegengerichteten Höchstabstandsbedingung zwischen den Bezugspunkten t_v^β und t_u^α der Form $t_u^\alpha - t_v^\beta \leq \overline{c_{vu}^{\beta\alpha}}$ nur erstere Mindestabstandsbedingung berücksichtigt werden soll, da sie die entgegengerichtete Höchstabstandsbeziehung dominiert. Dies ist klar ersichtlich, da gleichzeitig aus der Mindestabstandsbedingung $t_v^\beta - t_u^\alpha \geq c_{uv}^{\alpha\beta}$ und aus der Höchstabstandsbedingung $t_u^\alpha - t_v^\beta \leq \overline{c_{vu}^{\beta\alpha}}$ oder umgestellt $t_v^\beta - t_u^\alpha \geq -\overline{c_{vu}^{\beta\alpha}}$ einzuhalten sind und sowohl $c_{uv}^{\alpha\beta}$ als auch $\overline{c_{vu}^{\beta\alpha}}$ laut Vereinbarung nichtnegativ sind.

Da nun zwischen zwei Bezugspunkten t_u^α und t_v^β , $u, v \in \{P, 1, \dots, I\}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, $u \neq v$, jeweils höchstens eine Minimal- und eine Maximalabstandsbedingung zu berücksichtigen sind, enthalten die Mengen $R^{ea}, \dots, \overline{R^{ee}}$ jedes Vorgangspaar $(i, j) \in \{1, \dots, I\} \times \{1, \dots, I\}$ und die Mengen $R_{PA}^{aa}, \dots, \overline{R_{PE}^{ee}}$ jeden Vorgang $i \in \{1, \dots, I\}$ jeweils maximal einmal. Aus diesem Grund kann in dieser Arbeit auf die Verwendung von Multimengen verzichtet werden⁶⁵. Allerdings sind diese Mengen nicht disjunkt, da zwischen zwei Bezugszeitpunkten mehrere Abstandsbeziehungen der Arten (2) - (9) beziehungsweise (13) - (20) bestehen können.

Weiterhin sei an dieser Stelle noch angemerkt, daß bei gleichzeitigem Vorhandensein eines zeitlichen Mindestabstands der Art $t_v^\beta - t_u^\alpha \geq c_{uv}^{\alpha\beta}$, $u, v \in \{P, 1, \dots, I\}$, $\alpha, \beta \in \{a, e\}$, $u \neq v$, und eines zeitlichen Höchstabstands der Art $t_v^\beta - t_u^\alpha \leq \overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β die Bedingung $c_{uv}^{\alpha\beta} \leq \overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ gelten muß, damit die Ablaufstruktur logisch konsistent ist.

⁶⁵ Sollen jedoch auch mehrfach auftretende Abstandsbedingungen zwischen den gleichen Bezugszeitpunkten explizit modelliert werden, so müssen Multimengen verwendet werden, vgl. Ziegler (1986), S. 110 ff.

2.2 Modellierung von Projektablaufstrukturen auf Basis von Netzwerken

Zur Abbildung der Ablaufstruktur eines Projekts können verschiedene Arten formaler Modelle verwendet werden. Unter einem Modell versteht man hierbei ein vereinfachtes „Bild eines Ausschnitts der Wirklichkeit, das die gedankliche Durchdringung komplexer Sachverhalte ermöglichen soll“⁶⁶. Es muß dem empirischen System, das es abbildet, strukturgleich oder strukturähnlich sein, damit Rückschlüsse vom Modell auf die Wirklichkeit gezogen werden können⁶⁷. Besonders häufig werden in der Literatur Strukturmodelle auf Basis von linearen Modellen oder Netzwerken formuliert.

Ein lineares Modell stellt ein System simultan zu erfüllender Gleichungen und Ungleichungen dar. Eine gemäß der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Planungssituation vorgegebene Projektablaufstruktur wurde also bereits durch die Beziehungen (1) - (21) als lineares Modell formuliert.

Die zweite häufig verwendete Möglichkeit zur Modellierung von Projektablaufstrukturen stellen Netzwerke dar, welche auf der Graphentheorie basieren⁶⁸. Unter einem Netzwerk versteht man ein Tupel

$$(22) \quad N = (V, E_c),$$

welches aus einer Menge V von Elementen und einer Menge E_c von mit einer ganzzahligen Zahl c'_{ij} bewerteten, geordneten Paaren $((i, j), c'_{ij}) \in (V \times V, Z)$, besteht⁶⁹. Die

⁶⁶ Vgl. Ziegler (1986), S. 20. Zu weiteren Definitionen des Modellbegriffs vgl. z.B. Dinkelbach (1973), Viefhues (1982), S. 66 ff.

⁶⁷ Vgl. Dinkelbach (1973), Bamberg/Coenenberg (1996), S. 12 ff.

⁶⁸ Vgl. z.B. Neumann (1987a), S. 6 ff., Neumann/Morlock (1993), S. 176 ff., Domschke/Drexel (1995), S. 57 ff.

Elemente $i \in V$ werden dabei als Knoten bezeichnet. Die Elemente $(i, j, c'_{ij}) \in E_c$ heißen bewertete Pfeile und beschreiben die Beziehungen zwischen den Knoten i und j . Die Bewertung c'_{ij} eines Pfeils $(i, j, c'_{ij}) \in E_c$ wird als seine Länge bezeichnet und bewertet die Beziehung zwischen den Knoten i und j .

Um eine Projektablaufstruktur mit Hilfe von Netzwerken darzustellen, bedient man sich verschiedener Methoden, die unter dem Begriff Netzplantechnik zusammengefaßt sind⁷⁰. Zunächst kann man sogenannte Vorgangspfeilnetzpläne verwenden. Diese gehen auf die 1956/1957 entwickelte „Critical Path Method“ zurück und werden daher häufig als CPM-Netzpläne bezeichnet. Dabei werden die Vorgänge des Projekts als Pfeil abgebildet, wobei der Pfeilschaft dem Vorgangsanfang und die Spitze dem Vorgangsende entspricht. Ein Knoten kann als ein Ereignis im Projektablauf interpretiert werden. Es tritt ein, wenn alle zu diesem Ereignis führenden Vorgänge abgeschlossen sind. Mindestabstände werden als zusätzlich einzufügende Scheinvorgänge dargestellt. Ein schwerwiegender Nachteil der Vorgangspfeilnetzpläne ist die fehlende Möglichkeit, zeitliche Maximalabstandsbedingungen darzustellen. Sie sind daher nur geeignet für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur, bei denen diese nicht auftreten.

Die zweite grundsätzliche Darstellungsmöglichkeit sind Vorgangsknotennetzpläne. Bei diesen werden die Vorgänge oder die Anfangs- oder Endzeitpunkte der Vorgänge auf den Knoten des Netzwerkes abgebildet, während die bewerteten Pfeile die zeitlichen Ablaufbedingungen wiedergeben. So stellen bei der „Metra Potential Method“ (MPM) die Knoten die Anfangszeitpunkte der Vorgänge und Pfeile die Ablaufbedingungen dar. In der graphischen Darstellung können weitere wesentliche Daten wie Vorgangsdauer oder Ressourcenbedarf in den Knoten abgebildet werden. Die meisten entwickelten Vorgangsknotennetzpläne haben den Nachteil, nur eine Art von Abstandsbeziehungen

⁶⁹ Allgemein kann man auch eine reellzahlige Pfeilbewertung definieren, aufgrund der in Abschnitt 2.1 getroffenen Annahme werden in dieser Arbeit jedoch nur ganze Zahlen zugeordnet. Die Menge der ganzzahligen Zahlen wird dabei mit $Z = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ bezeichnet.

⁷⁰ Vgl. z.B. Wille u.a. (1972), S. 35 ff., Schwarze (1983), S. 35 ff., Neumann (1987b), S. 168 ff., Neumann/Morlock (1993), S. 226 ff., Reichert (1994), S. 3 ff., Schwarze (1994), S. 11 ff.

abzubilden. Die MPM berücksichtigt beispielsweise nur Beziehungen zwischen den Anfangszeitpunkten der Vorgänge. Andere Ablaufbedingungen müssen dementsprechend über die Gleichung $t_i^a + D_{im_i} = t_i^e$ angepaßt werden. Dadurch können bestimmte zeitliche Abstandsbeziehungen nicht strukturtreu wiedergegeben werden. Dies hat insbesondere zur Folge, daß die Konsequenzen von Vorgangsdauerveränderungen nicht unmittelbar, sondern nur mit Hilfe zusätzlicher Informationen ersichtlich sind.

Dieser Arbeit liegt ein allgemeines Netzplanmodell zugrunde⁷¹. Dabei wird jedem Bezugszeitpunkt, also den Anfangs- und Endzeitpunkten der Vorgänge sowie dem Projektbeginn und dem Projektende ein Knoten zugeordnet⁷². Die Menge der Bezugszeitpunkte der Projektablaufstruktur läßt sich also durch die Knotenmenge $V = \{t_p^a, t_1^a, t_1^e, \dots, t_1^a, t_1^e, t_p^e\}$ beschreiben. Die zeitlichen Beziehungen zwischen den Bezugszeitpunkten werden durch die gerichteten, bewerteten Pfeile des Netzwerkes wiedergegeben. Die Richtung sowie die Bewertung der Pfeile hängen dabei von der abgebildeten zeitlichen Ablaufbeziehung ab. Ist zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β , $t_u^\alpha, t_v^\beta \in V$, ein Mindestabstand in Höhe von $c_{uv}^{\alpha\beta}$ Zeiteinheiten einzuhalten, so wird dies durch einen Pfeil vom Knoten t_u^α zum Knoten t_v^β mit der Bewertung $c_{uv}^{\alpha\beta}$ abgebildet, d.h. es gilt $((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta}) \in E_c$. Ist ein Maximalabstand in Höhe von $\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ Zeiteinheiten zwischen den Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β , $t_u^\alpha, t_v^\beta \in V$, einzuhalten, so ist der Pfeil vom Knoten t_v^β zum Knoten t_u^α der Bewertung $-\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ einzufügen. Es gilt $((t_v^\beta, t_u^\alpha), -\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}) \in E_c$.

Die Beziehung $t_i^a + D_{im_i} = t_i^e$ (1) kann äquivalent auch durch die beiden Ungleichungen

⁷¹ Vgl. Ziegler (1986), S. 137 ff.

⁷² Verwendet man ein Modell, bei dem der Projektbeginn nicht entsprechend der Beziehung $t_p^a = 0$ festgelegt wird, so benötigt man zusätzlich einen Knoten, welcher den Nullpunkt auf der modellinternen Zeitskala repräsentiert.

$$(23) \quad t_i^e - t_i^a \geq D_{im_i}$$

und

$$(24) \quad t_i^e - t_i^a \leq D_{im_i}$$

dargestellt werden. Man kann sie daher durch die Kombination eines zeitlichen Mindestabstand und eines zeitlichen Maximalabstands zwischen t_i^a und t_i^e jeweils in Höhe von D_{im_i} abbilden. Daher müssen für jeden Vorgang i , $i=1(1)I$, die entsprechenden bewerteten Pfeile eingefügt werden und es gilt $((t_i^a, t_i^e), D_{im_i}) \in E_c$ sowie $((t_i^e, t_i^a), -D_{im_i}) \in E_c$.

Die vollständige Ablaufstruktur eines Projekts läßt sich nun mit einem Netzwerk $N = (V, E_c)$ abbilden, wobei

$$(25) \quad V = \{t_P^a, t_1^a, t_1^e, \dots, t_I^a, t_I^e, t_P^e\}$$

gilt. Die Menge E_c ergibt sich als Vereinigung der im folgenden dargestellten Mengen (26) - (45). Dabei kommt aufgrund der in Abschnitt 2.1.3 getroffenen Vereinbarungen zwischen zwei Knoten i und j höchstens ein Pfeil $((i, j), c'_{ij})$ vor, so daß wiederum keine Multimengen verwendet werden müssen.

Zeitliche Beziehung zwischen dem Anfangs- und Endzeitpunkt eines Vorgangs:

$$(26) \quad \left\{ \left((t_i^a, t_i^e), D_{im_i} \right), \left((t_i^e, t_i^a), -D_{im_i} \right) \mid i = 1(1)I, m_i \in \{1, \dots, M_i\} \right\}.$$

Mindestabstandsbeziehungen zwischen zwei Vorgängen:

$$(27) \quad \left\{ \left((t_i^e, t_j^a), c_{ij}^{ea} \right) \mid (i, j) \in R^{ea} \right\}.$$

$$(28) \quad \left\{ \left((t_i^a, t_j^a), c_{ij}^{aa} \right) \mid (i, j) \in R^{aa} \right\}.$$

$$(29) \quad \left\{ \left((t_i^a, t_j^e), c_{ij}^{ae} \right) \mid (i, j) \in R^{ae} \right\}.$$

$$(30) \quad \left\{ \left((t_i^e, t_j^e), c_{ij}^{ee} \right) \mid (i, j) \in R^{ee} \right\}.$$

Höchstabstandsbeziehungen zwischen zwei Vorgängen:

$$(31) \quad \left\{ \left((t_j^a, t_i^e), -c_{ij}^{ea} \right) \mid (i, j) \in R^{ea} \right\}.$$

$$(32) \quad \left\{ \left((t_j^a, t_i^a), -c_{ij}^{aa} \right) \mid (i, j) \in R^{aa} \right\}.$$

$$(33) \quad \left\{ \left((t_j^e, t_i^a), -c_{ij}^{ae} \right) \mid (i, j) \in R^{ae} \right\}.$$

$$(34) \quad \left\{ \left((t_j^e, t_i^e), -c_{ij}^{ee} \right) \mid (i, j) \in R^{ee} \right\}.$$

Frühester Beginn aller Vorgänge zum Projektbeginn und späteste Fertigstellung aller Vorgänge zum Projektende:

$$(35) \quad \left\{ \left((t_p^a, t_i^a), 0 \right) \mid i = 1(1)I \right\}.$$

$$(36) \quad \left\{ \left((t_i^e, t_p^e), 0 \right) \mid i = 1(1)I \right\}.$$

Zeitliche Beziehungen der Vorgänge zum Projektbeginn:

$$(37) \quad \left\{ \left((t_p^a, t_i^a), c_{Pi}^{aa} \right) \mid i \in R_{PA}^{aa} \right\}.$$

$$(38) \quad \left\{ \left((t_p^a, t_i^e), c_{Pi}^{ae} \right) \mid i \in R_{PA}^{ae} \right\}.$$

$$(39) \quad \left\{ \left((t_i^a, t_p^a), -c_{Pi}^{aa} \right) \mid i \in R_{PA}^{aa} \right\}.$$

$$(40) \quad \left\{ \left((t_i^e, t_P^a), -c_{Pi}^{\overline{ae}} \right) \mid i \in R_{PA}^{\overline{ae}} \right\}.$$

Zeitliche Beziehungen der Vorgänge zum Projektende:

$$(41) \quad \left\{ \left((t_i^a, t_P^e), c_{iP}^{\overline{ae}} \right) \mid i \in R_{PE}^{\overline{ae}} \right\}.$$

$$(42) \quad \left\{ \left((t_i^e, t_P^e), c_{iP}^{\overline{ee}} \right) \mid i \in R_{PE}^{\overline{ee}} \right\}.$$

$$(43) \quad \left\{ \left((t_P^e, t_i^a), -c_{iP}^{\overline{ae}} \right) \mid i \in R_{PE}^{\overline{ae}} \right\}.$$

$$(44) \quad \left\{ \left((t_P^e, t_i^e), -c_{iP}^{\overline{ee}} \right) \mid i \in R_{PE}^{\overline{ee}} \right\}.$$

Projekthöchstdauer:

$$(45) \quad \left\{ \left((t_P^e, t_P^a), -c_{PP}^{\overline{ae}} \right) \right\} \quad , \text{ falls eine solche Projekthöchstdauer vorgegeben ist.}$$

Für die Wertebereiche der Variablen gilt wiederum: $c_{ij}^{ea}, c_{ij}^{aa}, c_{ij}^{ae}, c_{ij}^{ee} \in N_0$; $D_{im_i}, c_{Pi}^{aa}, c_{Pi}^{\overline{ae}}, c_{iP}^{\overline{ae}}, c_{iP}^{\overline{ee}}, c_{ij}^{\overline{ea}}, c_{ij}^{\overline{aa}}, c_{ij}^{\overline{ae}}, c_{ij}^{\overline{ee}}, c_{Pi}^{\overline{aa}}, c_{Pi}^{\overline{ae}}, c_{iP}^{\overline{ae}}, c_{iP}^{\overline{ee}}, c_{PP}^{\overline{ae}} \in N_+$.

Eine graphische Veranschaulichung von Netzwerken erreicht man, indem die Knoten aus der Knotenmenge V durch geeignete Symbole, etwa Kreise oder, wie in dieser Arbeit, Rechtecke, und die Pfeile durch Verbindungslinien mit Pfeilspitze zwischen den betreffenden Knoten dargestellt werden. Dabei zeigt die Pfeilspitze eines Pfeiles $((i, j), c'_{ij}) \in E_c$ vom Knoten i zum Knoten j . Die Länge eines Pfeiles wird an den Pfeil geschrieben. Zur besseren Übersichtlichkeit werden Pfeile zwischen den Knoten t_i^a und t_i^e eines Vorgangs $i, i=1(1)I$, welche die Beziehung $t_i^a + D_{im_i} = t_i^e$ durch die beiden zeitlichen Ablaufbedingungen $t_i^e - t_i^a \geq D_{im_i}$ und $t_i^e - t_i^a \leq D_{im_i}$ abbilden, in dieser Arbeit durch fettere Strichstärke markiert. Die graphische Darstellung dient jedoch im wesentlichen nur

als Hilfsmittel zur Veranschaulichung der Ablaufstruktur eines Projekts, während die formale Beschreibung eines Netzwerks als Basis für ein späteres Planungsmodell verwendet wird.

Obwohl Kenntnisse über Grundzüge der Graphentheorie als bekannt vorausgesetzt werden, sollen kurz einige für diese Arbeit relevante Begriffe charakterisiert werden. Sind zwei Knoten i und j , $i, j \in V$, eines Netzwerks durch einen Pfeil $((i, j), c'_{ij}) \in E_c$ miteinander verbunden, so heißt Knoten i Vorgänger des Knoten j und Knoten j Nachfolger des Knoten i ⁷³. Die Menge aller Vorgänger von Knoten j wird dabei mit $P(j) := \{i \in V \mid ((i, j), c'_{ij}) \in E_c\}$, die Menge aller Nachfolger von Knoten i mit $S(i) := \{j \in V \mid ((i, j), c'_{ij}) \in E_c\}$ bezeichnet. Ein Knoten j heißt vom Knoten i aus erreichbar, falls eine Folge von Pfeilen $((i, k_1), c'_{ik_1}), ((k_1, k_2), c'_{k_1k_2}), \dots, ((k_{v-2}, j), c'_{k_{v-2}j}) \in E_c$ existiert mit $i, k_1, k_2, \dots, k_{v-2}, j \in V$. Die Menge $\bar{S}(i)$ der von Knoten i aus erreichbaren Knoten j nennt man dabei Nachfolger von Knoten i im weiteren Sinne, die Menge $\bar{P}(j)$ aller Knoten i , von denen aus Knoten j erreichbar ist, nennt man Vorgänger von Knoten j im weiteren Sinne. Vereinbarungsgemäß soll auch jeder Knoten i mit sich selbst verbunden und von sich selbst aus erreichbar sein.

Eine offene Pfeilfolge $((i, k_1), c'_{ik_1}), ((k_1, k_2), c'_{k_1k_2}), \dots, ((k_{v-2}, j), c'_{k_{v-2}j}) \in E_c$ zwischen v unterschiedlichen Knoten $i, k_1, k_2, \dots, k_{v-2}, j \in V$ wird als Weg von i nach j und die Summe der Pfeilbewertungen $c'_{ik_1} + c'_{k_1k_2} + \dots + c'_{k_{v-2}j}$ als Länge dieses Wegs bezeichnet. Eine geschlossene Pfeilfolge $((i, k_1), c'_{ik_1}), ((k_1, k_2), c'_{k_1k_2}), \dots, ((k_{v-1}, i), c'_{k_{v-1}i}) \in E_c$ zwischen v unterschiedlichen Knoten $i, k_1, k_2, \dots, k_{v-1} \in V$ heißt Zyklus und die Summe der Pfeilbewertungen $c'_{ik_1} + c'_{k_1k_2} + \dots + c'_{k_{v-1}i}$ Länge dieses Zyklus. Zwischen zwei Knoten können auch mehrere Wege existieren.

⁷³ Vorgänger und Nachfolger werden gelegentlich auch als unmittelbare oder direkte Vorgänger und Nachfolger bezeichnet, um zu verdeutlichen, daß Knoten i und Knoten j , $i, j \in V$ direkt durch einen Pfeil $((i, j), c_{ij}) \in E_c$ verbunden sind.

Von besonderer Bedeutung ist dabei in der Graphentheorie der längste Weg zwischen zwei Knoten i und j . Dessen Länge, die im folgenden mit L_{ij} bezeichnet werden soll, ergibt sich als Maximum der Weglängen von i nach j ⁷⁴. Da jeder Knoten vereinbarungsgemäß von sich selbst aus erreichbar ist, soll $L_{ii} \geq 0$ gelten. Gilt jedoch $L_{ii} > 0$, so bedeutet dies, daß i ein Knoten eines Zyklus positiver Länge ist. Die durch einen solchen Zyklus abgebildeten Abstandsbedingungen können nie eingehalten werden, da sie eine Einplanung des Bezugszeitpunkts i nach sich selbst fordern. Die durch ein Netzwerk N abgebildete Projektablaufstruktur, für die $L_{ii} > 0$ für mindestens ein $i \in V$ gilt, ist daher inkonsistent.

Zur Bestimmung der Werte L_{ij} für ein vorgegebenes Netzwerk $N = (V, E_c)$ ohne Zyklen positiver Länge stehen effiziente Verfahren zur Verfügung⁷⁵. Einen der leistungsfähigsten und trotzdem relativ einfachen Algorithmen stellt der sogenannte Tripelalgorithmus von Floyd und Warshall mit einem Rechenaufwand von $O(|V|^3)$ dar⁷⁶. Dieser ermittelt die Längen längster Wege zwischen allen Knotenpaaren aus der Menge V . Er ist insbesondere auch für Netzwerke mit negativ bewerteten Pfeilen und Zyklen geeignet. Algorithmus 1 stellt den Tripelalgorithmus dar.

⁷⁴ Betrachten wir zwei konkrete Bezugszeitpunkte, so bezeichnen wir im folgenden die Länge eines längsten Wegs von t_u^α nach t_v^β vereinfacht mit $L_{uv}^{\alpha\beta}$.

⁷⁵ Verschiedene Verfahren zur Berechnung der Längen längster Wege in Netzwerken finden sich z.B. in Eiselt (1977), S. 162 ff., Kelton/Law (1978), Deo/Pang (1984), Ahuja u.a. (1989), S. 249 ff., Evans/Minieka (1992), S. 82 ff., Neumann/Morlock (1993), S. 203 ff. Häufig wird in der Literatur auch die Ermittlung von Längen kürzester Wege innerhalb eines Netzwerks behandelt, die Berechnung der Längen längster Wege erfolgt jedoch analog.

⁷⁶ Vgl. z.B. Walther/Nägler (1987), S. 62 ff., Evans/Minieka (1992), S. 93 ff., Neumann/Morlock (1993), S. 219 ff. In der angegebenen Literatur werden auch Optimierungen des Verfahrens von Floyd und Warshall dargestellt.

Algorithmus 1: Tripelalgorithmus zur Bestimmung der längsten Wege zwischen allen Knotenpaaren der Menge V

Schritt 1: **Initialisierung:**

- Numeriere die Knoten in V mit h_1, \dots, h_n , $n = |V|$. Bestimme die Matrix

$$\tilde{L}^{(0)} = (\tilde{L}_{ij}^{(0)}), i, j = 1, \dots, n, \text{ mit } \tilde{L}_{ii}^{(0)} = 0, \forall i = 1, \dots, n, \tilde{L}_{ij}^{(0)} = -\infty^{77}, \forall h_i, h_j \in V$$

mit $((h_i, h_j), c'_{h_i h_j}) \notin E_c, \tilde{L}_{ij}^{(0)} = c'_{h_i h_j}, \forall h_i, h_j \in V \text{ mit } ((h_i, h_j), c'_{h_i h_j}) \in E_c.$

Schritt 2: **Hauptschritt:**

- Bestimme der Reihe nach für jedes $v = 1, \dots, n$ die Matrix

$$\tilde{L}^{(v)} = (\tilde{L}_{ij}^{(v)}), i, j = 1, \dots, n. \text{ Bestimme die Elemente } \tilde{L}_{ij}^{(v)} \text{ aus den Elementen der}$$

Matrix $\tilde{L}^{(v-1)}$ mit Hilfe der Beziehung $\tilde{L}_{ij}^{(v)} = \max\{\tilde{L}_{ij}^{(v-1)}, \tilde{L}_{iv}^{(v-1)} + \tilde{L}_{vj}^{(v-1)}\}.$

Schritt 3: **Bestimmung der Längen der längsten Wege:**

- Bestimme die Länge eines längsten Wegs $L_{h_i h_j} = \tilde{L}_{ij}^{(n)}$ für alle $i, j = 1, \dots, n$.

Wird für die Länge L_{ij} eines längsten Wegs vom Knoten i zum Knoten j der Wert $L_{ij} = -\infty$ ermittelt, so kann daraus geschlossen werden, daß j nicht von i aus erreichbar ist. Andererseits sagt ein Wert $L_{ij} > -\infty$ aus, daß Knoten j ein Nachfolger von Knoten i im weiteren Sinne ist. Wie bereits zuvor erwähnt, weist ein $L_{ii} > 0$ auf die Existenz eines Zyklus positiver Länge hin. Der Tripelalgorithmus kann daher bereits beim Auftreten eines Elements $\tilde{L}_{ii}^{(v)} > 0$ abgebrochen werden, da das betrachtete Netzwerk inkonsistent ist.

Einen Untergraphen $Z_1 = (V'_1, E'_{c_1})$ eines Netzwerks $N = (V, E_c)$ mit $V'_1 \subseteq V$ bezeichnet man als starke Zusammenhangskomponente, wenn für jeden Knoten $i \in V'_1$

$$(46) \quad V'_1 = \bar{P}(i) \cap \bar{S}(i)$$

⁷⁷ Für das Rechnen mit ∞ sollen die Regeln $a + \infty = \infty$ und $a - \infty = -\infty$ für $-\infty < a < \infty$ gelten.

gilt. Die Pfeilmenge $E'_{c1} \subseteq E_c$ eines solchen Untergraphen enthält alle Pfeile $((i, j), c'_{ij}) \in E_c$ mit $i, j \in V'_1$ und läßt sich formal darstellen als

$$(47) \quad E'_{c1} = \{((i, j), c'_{ij}) \in E_c \mid i, j \in V'_1\}.$$

Wir bezeichnen im folgenden eine starke Zusammenhangskomponente als Zyklenstruktur, wenn $|V'_1| \geq 3$ gilt⁷⁸. Eine solche Zyklenstruktur beinhaltet immer einen oder mehrere Zyklen. Aufgrund der Bedingung (46) kann ein Knoten niemals Element der Knotenmengen zweier verschiedener Zyklenstrukturen Z_1 und Z_m sein. Die Knotenmengen V'_1 aller Zyklenstrukturen eines Netzwerks N bilden daher disjunkte Mengen und es gilt

$$(48) \quad V'_1 \cap V'_m = \emptyset, \quad 1 \neq m.$$

Die Anzahl der Zyklenstrukturen eines Netzwerks N soll im folgenden mit L bezeichnet werden.

Mit Hilfe von Abbildung 1 sollen die vorgestellten Begriffe verdeutlicht werden. Knoten 2 weist im Beispielnetzwerk N nur einen Nachfolger auf, nämlich Knoten 4. Dagegen sind alle Knoten Nachfolger von Knoten 2 im weiteren Sinne. Knoten 3 ist beispielsweise durch den Weg $((2,4), c'_{24}), ((4,1), c'_{41}), ((1,3), c'_{13})$ von Knoten 2 erreichbar und daher dessen Nachfolger im weiteren Sinne. Vorgänger von Knoten 2 im weiteren Sinne sind die Knoten 1, 3, 4 und vereinbarungsgemäß auch 2. Knoten 1 stellt den einzigen unmittelbaren Vorgänger von Knoten 2 dar.

Das Beispielnetzwerk N weist $L=2$ Zyklenstrukturen auf. Die erste Zyklenstruktur $Z_1 = (V'_1, E'_{c1})$ mit $V'_1 = \{1,2,3,4\}$ und $E'_{c1} = \{((1,2), c'_{12}), ((1,3), c'_{13}), ((2,4), c'_{24}), ((3,4), c'_{34}),$

⁷⁸ In der Regel bezeichnet man eine starke Zusammenhangskomponente bereits ab 2 Knoten als Zyklenstruktur. Für die in dieser Arbeit zugrundegelegte Ablaufstruktur entspricht jedoch eine Zyklenstruktur mit 2 Knoten aufgrund der Pfeile aus Beziehung (26) immer einem Vorgang. Für die folgende planerische Betrachtung ist es jedoch nicht zweckmäßig, diesen als Zyklenstruktur zu bezeichnen.

$\{(4,1),c'_{41}\}$ beinhaltet zwei Zyklen, welche zum einen durch die Pfeile $((1,2),c'_{12})$, $((2,4),c'_{24})$ und $((4,1),c'_{41})$, zum anderen durch die Pfeile $((1,3),c'_{13})$, $((3,4),c'_{34})$ und $((4,1),c'_{41})$ gebildet werden. Die zweite Zyklenstruktur $Z_2 = (V'_2, E'_{c_2})$ mit $V'_2 = \{5,6,7\}$ und $E'_{c_2} = \{((5,6),c'_{56}), ((6,7),c'_{67}), ((7,5),c'_{75})\}$ beinhaltet den durch die Pfeile $((5,6),c'_{56})$, $((6,7),c'_{67})$ und $((7,5),c'_{75})$ gebildeten Zyklus.

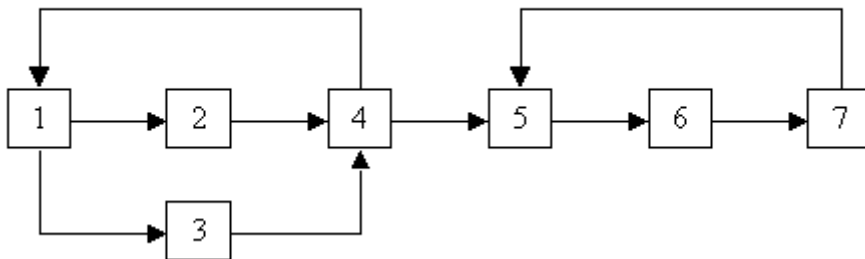


Abbildung 1: Netzwerkstruktur N mit 2 Zyklenstrukturen⁷⁹

Zur Ermittlung der disjunkten Knotenmengen aller starken Zusammenhangskomponenten eines vorgegebenen Netzwerks $N = (V, E_c)$ steht ein effizienter Algorithmus mit einem Rechenaufwand der Ordnung $O(|E_c|)$ zur Verfügung⁸⁰. Da seine Darstellung jedoch relativ umfangreich ist, wird darauf an dieser Stelle verzichtet. Führt man eine Berechnung der Längen aller längsten Wege durch, so können Zyklenstrukturen auch anhand der berechneten Ergebnisse einfach ermittelt werden. Dabei bilden immer die Knoten $i, j \in V$ die Knotenmenge V'_1 einer Zyklenstruktur Z_1 , die gegenseitig erreichbar sind und für die daher $L_{ij} > -\infty$ und $L_{ji} > -\infty$ gelten. Die Pfeilmenge einer Zyklenstruktur kann dann mit Hilfe der Beziehung (47) ermittelt werden.

⁷⁹ Die Pfeilbewertungen der Netzwerkstruktur in Abbildung 1 wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht angegeben.

⁸⁰ Vgl. Even (1979), S. 64 ff.

2.3 Das Terminplanungsproblem

2.3.1 Charakterisierung des Terminplanungsproblems

Die Terminplanung beschäftigt sich mit der Ermittlung von Informationen über den zeitlichen Ablauf eines Projekts mit einer vorgegebenen Ablaufstruktur. Häufig werden bei der Anwendung von Algorithmen zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems explizit die im Rahmen der Zeitplanung erzielten Ergebnisse verwendet. Auch diese Arbeit setzt bei den vorgestellten Algorithmen zur Kapazitätsplanung Ergebnisse aus der Terminplanung voraus. Diese soll daher zunächst beschrieben werden. Prinzipiell entwickelt man bei der Zeitplanung zunächst charakteristische Zeitpläne. Anschließend werden diese Zeitpläne hinsichtlich der Flexibilität des Projektablaufs untersucht.

Unter einem Zeitplan $x = \left((t_p^a)_x, (t_1^a)_x, (t_1^e)_x, \dots, (t_I^a)_x, (t_I^e)_x, (t_p^e)_x \right)$, $x \in N_0^{(2 \cdot I + 2)}$, versteht man dabei im folgenden die Zuordnung eines spezifischen Termins $(t_u^\alpha)_x$ für jeden verwendeten Bezugspunkt $t_u^\alpha \in V$, also die Anfangs- und Endzeitpunkte der Vorgänge i , $i=1(1)I$, sowie den Projektbeginn t_p^a und das Projektende t_p^e . Damit ein Projekt gemäß einem bestimmten Zeitplan x durchgeführt werden kann, muß entsprechend Beziehung (1) für jeden Vorgang i , $i=1(1)I$ mindestens ein Modus $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$ existieren, für den $(t_i^a)_x + D_{im_i} = (t_i^e)_x$ gilt. Außerdem müssen alle durch die Projektablaufstruktur vorgegebenen Ablaufbedingungen der Formen (2) - (21) erfüllt sein. Ein solcher Zeitplan wird als zulässiger Zeitplan bezeichnet. Die Menge ZP umfaßt alle zulässigen Zeitpläne und kann formal beschrieben werden als

$$(49) \quad ZP = \left\{ x \in N_0^{(2 \cdot I + 2)} \mid x \text{ erfüllt (1) - (21)} \right\}.$$

Der frühestmögliche Anfangszeitpunkt einer Aktivität $i \in \{1, \dots, I\}$ ist der kleinstmögliche Einplanungszeitpunkt des Bezugszeitpunkt t_i^a , zu dem der Vorgang aufgrund der zeitlichen Ablaufbedingungen einer vorgegebenen Projektablaufstruktur beginnen kann. Dieser wird bezeichnet mit f_i^a und kann formal bestimmt werden durch

$$(50) \quad f_i^a = \min_{x \in ZP} \left\{ \left(t_i^a \right)_x \right\}.$$

Dabei ist zunächst weder der Durchführungsmodus des betrachteten noch der eines anderen Vorgangs bereits bestimmt. Die Bestimmung des Werts f_i^a erfolgt also für alle möglichen Kombinationen $\bar{m} = ((m_1)_{\bar{m}}, \dots, (m_I)_{\bar{m}})$, $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$, der Durchführungsmodi aller Vorgänge. Entsprechend kann auch für jeden Vorgang $i \in \{1, \dots, I\}$ ein frühestmöglicher Endzeitpunkt f_i^e bestimmt werden durch

$$(51) \quad f_i^e = \min_{x \in ZP} \left\{ \left(t_i^e \right)_x \right\}.$$

Analog zu den Vorgängen können auch frühestmögliche Einplanungszeitpunkte für den Projektbeginn f_p^a sowie das Projektende f_p^e bestimmt werden. Der Projektbeginn einer gemäß Abschnitt 2.1 vorgegebenen Projektablaufstruktur liegt ohnehin entsprechend Beziehung (10) bei $t_p^a = 0$, also gilt auch für den frühestmöglichen Projektstart⁸¹

$$(52) \quad f_p^a = 0.$$

Das frühestmögliche Projektende läßt sich dagegen zu

$$(53) \quad f_p^e = \min_{x \in ZP} \left\{ \left(t_p^e \right)_x \right\}$$

bestimmen. Existiert mindestens ein zulässiger Zeitplan x , so existieren f_p^a und f_p^e sowie die f_i^a und f_i^e für alle Vorgänge i , $i=1(1)I$, da alle Bezugszeitpunkte durch die Bedingungen (10) und (11) nach unten beschränkt sind.

Ist eine Kombination von Durchführungsmodi $\bar{m} = ((m_1)_{\bar{m}}, \dots, (m_I)_{\bar{m}})$, $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$, und damit von Vorgangsdauern fest vorgegeben und beschreibt $ZP_{\bar{m}}$ die Menge aller für diese Durchführungsmodi-Kombination zulässigen Zeitpläne, so läßt sich unter der Annahme

$$(54) \quad ZP_{\bar{m}} \neq \emptyset$$

nachweisen, daß ein Zeitplan $x_{F, \bar{m}} = \left((t_P^a)_{x_{F, \bar{m}}}, (t_I^a)_{x_{F, \bar{m}}}, (t_I^e)_{x_{F, \bar{m}}}, \dots, (t_I^a)_{x_{F, \bar{m}}}, (t_I^e)_{x_{F, \bar{m}}}, (t_P^e)_{x_{F, \bar{m}}} \right)$ existiert, für den der Einplanungszeitpunkt jedes einzelnen Bezugszeitpunkts seinem bezüglich der betrachteten Durchführungsmodi-Kombination minimalen Einplanungszeitpunkt entspricht⁸², das heißt es gelten

$$(55) \quad (t_i^a)_{x_{F, \bar{m}}} = (f_i^a)_{\bar{m}}, \quad i = 1(1)I,$$

$$(56) \quad (t_i^e)_{x_{F, \bar{m}}} = (f_i^e)_{\bar{m}}, \quad i = 1(1)I,$$

$$(57) \quad (t_P^a)_{x_{F, \bar{m}}} = (f_P^a)_{\bar{m}} = 0 \quad \text{und}$$

$$(58) \quad (t_P^e)_{x_{F, \bar{m}}} = (f_P^e)_{\bar{m}}.$$

⁸¹ Für Projektablaufstrukturen, bei denen der Projektbeginn nicht auf den zeitlichen Nullpunkt fixiert ist, kann sich dagegen durchaus ein frühestmöglicher Einplanungstermin für den Projektstart ergeben, welcher größer als null ist, beispielsweise, wenn der zu berücksichtigende Maximalabstand zwischen dem Projektbeginn und einem Bezugszeitpunkt kleiner ist als der kalenderabhängige frühestmögliche Termin dieses Bezugszeitpunkts.

⁸² Vgl. Ziegler (1986), S. 233 ff.

Dieser Zeitplan $x_{F,m}$ wird im folgenden frühestmöglicher Zeitplan genannt. $(f_i^a)_m, (f_i^e)_m, i=1(1)I, (f_P^a)_m$ sowie $(f_P^e)_m$ bezeichnen den frühestmöglichen Einplanungstermin des entsprechenden Bezugszeitpunkts für die fest vorgegebene Durchführungsmodi-Kombination \bar{m} .

Dagegen muß ein allgemeiner frühestmöglicher Zeitplan der Form $x_F = (f_P^a, f_1^a, f_1^e, \dots, f_I^a, f_I^e, f_P^e)$ bei Berücksichtigung aller möglichen Durchführungsmodi-Kombinationen nicht notwendigerweise zulässig sein. Dies liegt daran, daß die mit der Minimierung einer Zeitplankomponente verbundenen Durchführungsmodi-Kombinationen nicht notwendigerweise mit der Minimierung einer anderen Zeitkomponente verbunden sind. Das folgende Beispiel 1 soll dies illustrieren:

Beispiel 1:

Betrachtet werde ein Projekt, bei dem lediglich $I=1$ Vorgang zur Ausführung kommen soll. Der Index i wird daher in diesem Beispiel weggelassen. Dieser Vorgang kann in $M=2$ Durchführungsmodi ausgeführt werden. Dabei beträgt die Vorgangsdauer für $m=1$ $D_1 = 5$ und für $m=2$ $D_2 = 10$. Folgende Abstandsbedingungen seien bei der Ermittlung eines Zeitplans zu berücksichtigen:

- (a) $t_P^e - t_P^a \leq 25$ (b) $t^a - t_P^a \geq 1$ (c) $t^e - t_P^a \geq 10$
 (d) $t_P^e - t^a \geq 19$ (e) $t_P^e - t^e \geq 10$

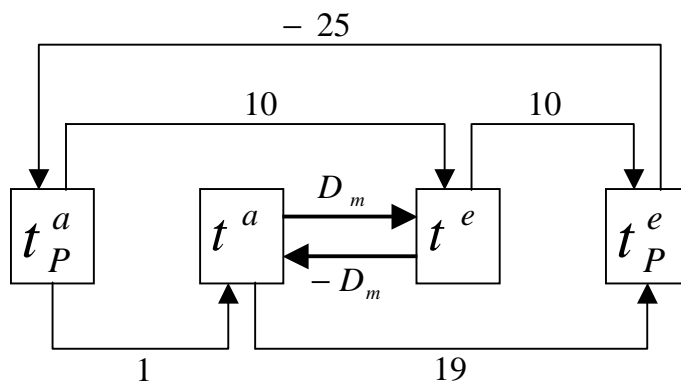


Abbildung 2: Netzwerkstruktur für Beispiel 1

Wählt man den Modus $m=1$, so ergibt sich folgender frühestmöglicher Zeitplan $x_{F,1}$:

$$x_{F,1} = \left(\left(t_P^a \right)_{x_{F,1}}, \left(t^a \right)_{x_{F,1}}, \left(t^e \right)_{x_{F,1}}, \left(t_P^e \right)_{x_{F,1}} \right) = \left(\left(f_P^a \right)_1, \left(f^a \right)_1, \left(f^e \right)_1, \left(f_P^e \right)_1 \right) = (0,5,10,24).$$

Dagegen ergibt sich bei der Wahl von $m=2$ der frühestmögliche Zeitplan $x_{F,2}$:

$$x_{F,2} = \left(\left(t_P^a \right)_{x_{F,2}}, \left(t^a \right)_{x_{F,2}}, \left(t^e \right)_{x_{F,2}}, \left(t_P^e \right)_{x_{F,2}} \right) = \left(\left(f_P^a \right)_2, \left(f^a \right)_2, \left(f^e \right)_2, \left(f_P^e \right)_2 \right) = (0,1,11,21).$$

Es zeigt sich, daß sich durch eine komponentenweise Minimierung der unzulässige Zeitplan $x_F = \left(\left(t_P^a \right)_{x_F}, \left(t^a \right)_{x_F}, \left(t^e \right)_{x_F}, \left(t_P^e \right)_{x_F} \right) = \left(f_P^a, f^a, f^e, f_P^e \right) = (0,1,10,21)$ ergibt. Zwar werden die Ablaufbedingungen (a) - (e) auch durch diesen Zeitplan erfüllt, jedoch existiert kein Durchführungsmodus m , für den die Bedingung (1) $t^a + D_m = t^e$ mit $m \in \{1,2\}$ erfüllt wird.

Analog zur Ermittlung frühester Einplanungszeitpunkte können nun auch spätestmögliche Zeitpunkte untersucht werden. Dabei stellt sich jedoch zunächst das Problem, daß bei einer vorliegenden Projektablaufstruktur die Einplanungsmöglichkeiten der Bezugszeitpunkte nicht notwendigerweise zeitlich nach oben beschränkt sein müssen. Aus diesem Grund muß für den Fall, daß keine maximale Projektdauer $\overline{c_{pp}^{ae}}$ vorgegeben ist, im Anschluß an die Ermittlung frühestmöglicher Zeitpläne ein spätestmögliches Projektende bestimmt werden⁸³. Dieses wird im folgenden mit s_p^e bezeichnet und muß in jedem Fall so gewählt werden, daß

$$(59) \quad s_p^e \geq f_p^e$$

⁸³ Für den Fall, daß der Projektstart nicht auf den zeitlichen Nullpunkt fixiert ist, wird zur Bestimmung des spätestmöglichen Projektendes anstelle einer maximalen Projektdauer ein spätestmögliches Projektfertigstellungstermin verwendet.

gilt. In der Regel legt man dabei $s_p^e = f_p^e$ fest, so daß s_p^e zusammenfassend formuliert werden kann durch

$$(60) \quad s_p^e = \begin{cases} \overline{c_{PP}^{ae}}, & \text{falls vorgegeben} \\ f_p^e, & \text{sonst} \end{cases}.$$

Als Teilmenge der Menge ZP kann nun die Menge \overline{ZP} aller zulässigen Zeitpläne x definiert werden, welche die Bedingung

$$(61) \quad (t_p^e)_x \leq s_p^e$$

erfüllen. Diese Zeitpläne $x \in \overline{ZP}$ sind wiederum nicht auf eine bestimmte Durchführungsmodi-Kombination beschränkt. Existiert mindestens ein $x \in \overline{ZP}$, so kann nun für jeden Vorgang $i, i=1(1)I$, ein spätestmöglicher Einplanungszeitpunkt für seinen Anfangszeitpunkt bestimmt werden. Dieser wird mit s_i^a bezeichnet und kann formuliert werden als

$$(62) \quad s_i^a = \max_{x \in \overline{ZP}} \left\{ (t_i^a)_x \right\}.$$

Dementsprechend wird der spätestmögliche Endzeitpunkt s_i^e eines Vorgangs $i, i=1(1)I$, dargestellt durch

$$(63) \quad s_i^e = \max_{x \in \overline{ZP}} \left\{ (t_i^e)_x \right\}.$$

Der spätestmögliche Einplanungszeitpunkt des Projektbeginns s_p^a ergibt sich wiederum aufgrund der Bedingung (10) zu

$$(64) \quad s_p^a = 0.$$

Analog zur Bestimmung frühestmöglicher Einplanungszeitpunkte läßt sich nun ein zulässiger spätestmöglicher Zeitplan $x_{S,m}$, für den

$$(65) \quad \left(t_i^a\right)_{x_{S,\bar{m}}} = \left(s_i^a\right)_{\bar{m}}, i = 1(1)I,$$

$$(66) \quad \left(t_i^e\right)_{x_{S,\bar{m}}} = \left(s_i^e\right)_{\bar{m}}, i = 1(1)I,$$

$$(67) \quad \left(t_P^a\right)_{x_{S,\bar{m}}} = \left(s_P^a\right)_{\bar{m}} \text{ und}$$

$$(68) \quad \left(t_P^e\right)_{x_{S,\bar{m}}} = \left(s_P^e\right)_{\bar{m}} = 0$$

gelten, nur für eine vorgegebene Durchführungsmodi-Kombination \bar{m} sicher ermitteln. Wiederum muß jedoch nicht notwendigerweise ein zulässiger allgemeiner spätestmöglicher Zeitplan der Form $x_S = \left(s_P^a, s_1^a, s_1^e, \dots, s_1^a, s_1^e, s_P^e\right)$ existieren. Beispiel 1 verdeutlicht dies. Bei der Wahl des Modus $m=1$ ergibt sich der spätestmögliche Zeitplan

$$x_{S,1} = \left(\left(t_P^a\right)_{x_{S,1}}, \left(t^a\right)_{x_{S,1}}, \left(t^e\right)_{x_{S,1}}, \left(t_P^e\right)_{x_{S,1}}\right) = \left(\left(s_P^a\right)_1, \left(s^a\right)_1, \left(s^e\right)_1, \left(s_P^e\right)_1\right) = (0,6,11,25).$$

Dagegen erhält man bei der Wahl von $m=2$ den spätestmöglichen Zeitplan

$$x_{S,2} = \left(\left(t_P^a\right)_{x_{S,2}}, \left(t^a\right)_{x_{S,2}}, \left(t^e\right)_{x_{S,2}}, \left(t_P^e\right)_{x_{S,2}}\right) = \left(\left(s_P^a\right)_2, \left(s^a\right)_2, \left(s^e\right)_2, \left(s_P^e\right)_2\right) = (0,5,15,25).$$

Auch hier ergibt die komponentenweise Maximierung einen unzulässigen Zeitplan, nämlich $x_S = \left(\left(t_P^a\right)_{x_S}, \left(t^a\right)_{x_S}, \left(t^e\right)_{x_S}, \left(t_P^e\right)_{x_S}\right) = \left(s_P^a, s^a, s^e, s_P^e\right) = (0,6,15,25)$. Wie bei den frühestmöglichen Zeitplänen liegt der Grund nicht in der Verletzung einer der Ablaufbedingungen (a) - (e), sondern darin, daß für keinen Modus m die Bedingung (1) erfüllt wird.

An die Ermittlung charakteristischer Zeitpläne schließt sich im Rahmen der Terminplanung meist eine Untersuchung der zeitlichen Flexibilität der Bezugspunkte in der betrachteten

Projektablaufstruktur an⁸⁴. Diese umfaßt die Ermittlung zeitlicher Verschiebungsspielräume einzelner Bezugszeitpunkte sowie der Auswirkungen eventueller Überschreitungen dieser Spielräume. Dabei werden die zeitlichen Freiheitsgrade unter verschiedenen Voraussetzungen diskutiert. In einem Fall betrachtet man beispielsweise die Spielräume eines Bezugszeitpunkts eines Vorgangs, um die er hinsichtlich bestimmter vorgegebener Zeitpläne verschoben werden kann, ohne daß sich daraus Einflüsse auf Bezugszeitpunkte anderer Vorgänge oder den Projektbeginn beziehungsweise das Projektende ergeben. In einem anderen Fall diskutiert man die Veränderungsmöglichkeiten der zeitlichen Lage eines Bezugszeitpunkts, die zwar Folgewirkungen auf die Einplanungsmöglichkeiten anderer Bezugszeitpunkte haben, nicht jedoch die Lage des Projektfertigstellungszeitpunkts beziehungsweise die Projektdauer beeinflussen. Auf die Untersuchung dieser zeitlichen Freiheitsgrade wird im folgenden nicht weiter eingegangen, da deren Ergebnisse für die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zur Kapazitätsplanung nicht benötigt werden.

2.3.2 Terminplanung für gegebene Durchführungsmodi

Bei der in dieser Arbeit behandelten prioritätsregelbasierten Ressourcenplanung basieren viele Regeln zur Bestimmung der Einplanungsprioritäten einzelner Vorgänge auf Ergebnissen der Zeitplanung. Daher soll an dieser Stelle auf die Ermittlung der gesuchten Werte näher eingegangen werden.

Es sei zunächst eine Planungssituation betrachtet, bei der eine Durchführungsmodi-Kombination \bar{m} fest vorgegeben ist. In diesem Fall ist die Vorgangsdauer jedes einzelnen Vorgangs $i, i=1(1)I$, eindeutig bestimmt. Dadurch vereinfacht sich die Suche nach den frühestmöglichen und spätestmöglichen Einplanungszeitpunkten f_u^α und s_u^α für alle $t_u^\alpha \in V$ auf die Ermittlung der frühestmöglichen und spätestmöglichen

⁸⁴ Zur Beschreibung und Ermittlung dieser zeitlichen Freiheitsgrade vgl. z.B. Neumann (1987b), S. 182 ff., Ziegler (1986), S. 462 ff., Altrogge (1996), 67 ff.

Einplanungszeitpunkte $(f_u^\alpha)_{\bar{m}}$ und $(s_u^\alpha)_{\bar{m}}$ für die betrachtete Durchführungsmodi-Kombination \bar{m} ⁸⁵.

Die gesuchten charakteristischen Zeitpläne sind auf signifikante Weise verbunden mit den längsten Wegen im Netzwerk N, welches die Projektablaufstruktur abbildet⁸⁶. Dabei ist zu beachten, daß aufgrund der vorgegeben Durchführungsmodi-Kombination die Beziehung $t_i^a + D_{i(m_i)_{\bar{m}}} = t_i^e$ und damit die Längen der Pfeile zwischen den Anfangsknoten und Endknoten aller Vorgänge festgelegt sind. Aus diesem Grund gelten $((t_i^a, t_i^e), D_{i(m_i)_{\bar{m}}}) \in E_c$ sowie $((t_i^e, t_i^a), -D_{i(m_i)_{\bar{m}}}) \in E_c$ für $i=1(1)I$.

Wie bereits oben erwähnt, können die gesuchten Zeitpunkte nur dann ermittelt werden, wenn mindestens ein zulässiger Zeitplan x existiert. Dies ist für die betrachtete Situation mit festgelegten Durchführungsmodi genau dann gegeben, wenn das zugehörige Netzwerk N keine Zyklen positiver Länge aufweist und damit

$$(69) \quad L_{uu}^{\alpha\alpha} = 0 \quad , \quad \forall t_u^\alpha \in V ,$$

gilt⁸⁷. Anderenfalls ist die Projektablaufstruktur inkonsistent und es kann kein zulässiger Zeitplan existieren. Für die weiteren Ausführungen dieses Abschnitts sei angenommen, daß keine Zyklen positiver Länge auftreten.

Für eine durch die Gleichungen (25) - (45) als Netzwerk modellierte Projektablaufstruktur läßt sich zeigen, daß der frühestmögliche Einplanungszeitpunkt eines Bezugszeitpunkts der

⁸⁵ Da die Durchführungsmodi-Kombination \bar{m} in diesem Abschnitt als fest vorgegeben angenommen wird und es nicht um einen Vergleich zweier Kombinationen geht, werden im folgenden der Index \bar{m} weggelassen und damit die Werte f_u^α bzw. s_u^α gleichbedeutend zu $(f_u^\alpha)_{\bar{m}}$ bzw. $(s_u^\alpha)_{\bar{m}}$ verwendet.

⁸⁶ Vgl. z.B. Neumann (1987b), S. 223 ff., Neumann/Morlock (1993), S. 234 ff.

⁸⁷ Vgl. z.B. Neumann (1975), S. 240 f.

Länge eines längsten Wegs vom Projektbeginn zum betrachteten Knoten entspricht⁸⁸. Es gilt also

$$(70) \quad f_i^\alpha = L_{Pi}^{\alpha a}, i = 1(1)I, \alpha \in \{a, e\}.$$

Der spätestmögliche Einplanungszeitpunkt eines Bezugszeitpunkts errechnet sich dagegen aus der Differenz zwischen spätestmöglichem Projektende und der Länge eines längsten Wegs von diesem Knoten zum Projektende. Formal gilt also

$$(71) \quad s_i^\alpha = s_P^e - L_{iP}^{\alpha e}, i = 1(1)I, \alpha \in \{a, e\}.$$

Für die spätestmögliche Einplanung des Projektendes gilt wiederum

$$(60) \quad s_P^e = \begin{cases} \overline{c_{PP}^{ae}}, & \text{falls vorgegeben} \\ f_P^e, & \text{sonst} \end{cases}$$

wobei sich dessen frühestmögliche Einplanungszeit analog zu (70) errechnen läßt zu

$$(72) \quad f_P^e = L_{PP}^{ae}.$$

Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zur heuristischen Ressourcenplanung werden auch Knotenmengen eingeplant, welche nicht mit der Knotenmenge V übereinstimmen⁸⁹. Insbesondere enthalten diese nicht notwendigerweise die Bezugszeitpunkte Projektstart und Projektende. Kein Knoten der betrachteten Menge kann daher a priori als Startknoten oder Endknoten bestimmt werden, so daß die angegebenen Beziehungen leicht modifiziert werden müssen.

⁸⁸ Vgl. z.B. Neumann (1987b), S. 224.

⁸⁹ Dabei handelt es sich um die Einplanung aller Zyklenstrukturen sowie des kontrahierten Netzwerks nach Einplanung dieser Zyklenstrukturen, vgl. Abschnitt 4.1.

Wir bezeichnen die Menge aller einzuplanenden Knoten mit M_K und nehmen weiterhin an, daß entsprechend den Beziehungen (10) und (11) für die gesamte Projektablaufstruktur keiner der Knoten vor dem Zeitpunkt $t=0$ eingeplant werden darf. Dann ergibt sich der frühestmögliche Einplanungszeitpunkt $f_u'^\alpha$ eines Knotens t_u^α bezogen auf diese Einplanungsmenge M_K als das Maximum der längsten Wege von allen Knoten dieser Menge zum betrachteten Knoten und damit gilt⁹⁰

$$(73) \quad f_u'^\alpha = \max_{t_v^\beta \in M_K} \{L_{vu}^{\beta\alpha}\}, t_u^\alpha \in M_K.$$

Diese Beziehung kann anschaulich einfach nachvollzogen werden. Wir betrachten die Einplanungsmenge M_K als die Knotenmenge eines Teilprojekts und erweitern dieses formal zu einem Netzwerk entsprechend den Beziehungen (25) - (45). Enthält die Menge M_K den Projektbeginn t_P^a oder das Projektende t_P^e bereits, so werden diese umbenannt in den Teilprojektbeginn t_{TP}^a beziehungsweise das Teilprojektende t_{TP}^e , anderenfalls werden sie zur Einplanungsmenge hinzugefügt. Die Pfeilmenge des neuen Teilprojekts enthält alle Pfeile $((i, j), c'_{ij}) \in E_c$ mit $i, j \in M_K$. Zusätzlich werden Pfeile der Formen $\{(t_{TP}^a, t_i^a), 0\} \mid t_i^a \in M_K\}$ (35) und $\{(t_i^e, t_{TP}^e), 0\} \mid t_i^e \in M_K\}$ (36) eingefügt, sofern sie nicht bereits vorhanden sind.

Die gesuchten Werte $f_u'^\alpha$, $t_u^\alpha \in M_K$, entsprechen nun nach Beziehung (70) der Länge eines längsten Wegs vom Teilprojektbeginn zum betrachteten Knoten t_u^α und somit gilt $f_u'^\alpha = L_{TPu}^{a\alpha}$. War der Projektbeginn t_P^a ursprünglich nicht Element der Einplanungsmenge, so gilt wegen $c_{TPv}^{a\beta} = 0$ für alle nachträglich eingefügten Pfeile $((t_{TP}^a, t_v^\beta), c_{TPv}^{a\beta})$ die

⁹⁰ Im Gegensatz zu den allgemeinen Größen f_u^α und s_u^α beziehen sich die gestrichenen Größen $f_u'^\alpha$ und $s_u'^\alpha$ nur auf die Einplanungsmöglichkeiten eines Knotens $t_u^\alpha \in M_K$ bezüglich der betrachteten Einplanungsmenge M_K .

Beziehung $L_{TP_u}^{\alpha} = \max_{t_v^{\beta} \in M_K} \{c_{TP_v}^{a\beta} + L_{vu}^{\beta\alpha}\} = \max_{t_v^{\beta} \in M_K} \{L_{vu}^{\beta\alpha}\}$. Enthielt die Menge M_K dagegen bereits ursprünglich den Projektbeginn, so gilt ebenfalls $L_{TP_u}^{\alpha} = \max_{t_v^{\beta} \in M_K} \{L_{vu}^{\beta\alpha}\}$, da $L_{TP_u}^{\alpha} = L_{vu}^{\beta\alpha}$ für $t_v^{\beta} = t_p^a$ und $L_{TP_u}^{\alpha} \geq L_{vu}^{\beta\alpha}$ für alle $t_v^{\beta} \in M_K$ gelten. Damit ist die Beziehung $f_u^{\alpha} = \max_{t_v^{\beta} \in M_K} \{L_{vu}^{\beta\alpha}\}$ nachgewiesen.

Da auch das Projektende nicht unbedingt ein Element der Menge M_K sein muß, berechnet man zunächst analog anstelle des frühestmöglichen Projektfertigstellungstermins f_p^e die minimale zeitliche Ausdehnung der betrachteten Knotenmenge M_K . Diese wird hier als MA'_K bezeichnet und errechnet sich zu

$$(74) \quad MA'_K = \max_{t_u^{\alpha}, t_v^{\beta} \in M_K} \{L_{uv}^{\alpha\beta}\}.$$

Entsprechend Beziehung (60) verwenden wir nun zur Bestimmung der spätestmöglichen Einplanungszeitpunkte anstelle des unbekanntem Werts s_p^e die minimale zeitliche Ausdehnung der Knotenmenge MA'_K . Der spätestmögliche Einplanungszeitpunkt s_u^{α} eines Bezugszeitpunkts $t_u^{\alpha} \in M_K$ bezogen auf die Einplanungsmenge kann nun bestimmt werden zu

$$(75) \quad s_u^{\alpha} = MA'_K - \max_{t_v^{\beta} \in M_K} \{L_{uv}^{\alpha\beta}\}, \quad t_u^{\alpha} \in M_K.$$

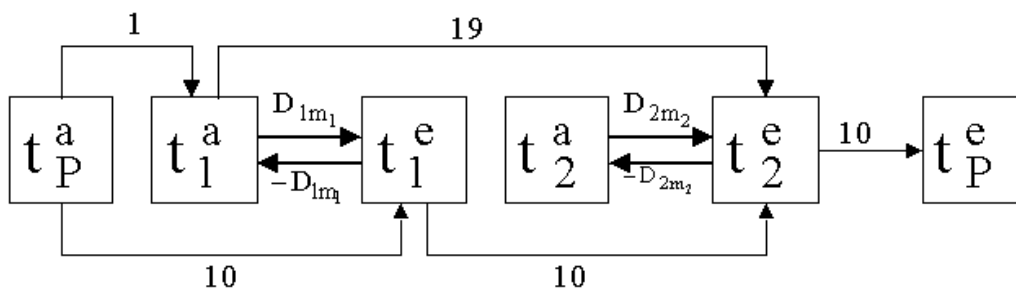
2.3.3 Terminplanung für unbestimmte Durchführungsmodi

Im Rahmen dieser Arbeit werden auch prioritätsregelbasierte Heuristiken vorgestellt, welche die Prioritätswerte eines Vorgangs bereits vor der Festlegung seines Durchführungsmodus benötigen. Das vorgestellte Terminplanungsproblem ist jedoch für unbestimmte Vorgangsdauern nicht trivial zu lösen. Das folgende Beispiel 2 zeigt, daß sich beispielsweise für den Startknoten des Vorgangs 2 für jede Durchführungsmodi-Kombination ein anderer Wert für seine frühestmögliche Einplanungszeit ergibt.

Beispiel 2:

Gegeben sei ein Projekt mit zwei Vorgängen und jeweils zwei Durchführungsmodi. Die Vorgangsdauern betragen jeweils im ersten Modus $D_{11} = D_{21} = 5$ und im zweiten Modus $D_{12} = D_{22} = 10$. Weiterhin seien folgende Ablaufbeziehungen zu berücksichtigen:

- (a) $t_1^a - t_p^a \geq 1$ (b) $t_1^e - t_p^a \geq 10$ (c) $t_2^e - t_1^a \geq 19$
 (d) $t_2^e - t_1^e \geq 10$ (e) $t_p^e - t_2^e \geq 10$

**Abbildung 3: Netzwerkstruktur für Beispiel 2**

Durchführungsmodus	$m_1 = 1$	$m_1 = 2$
$m_2 = 1$	$f_2^a = 19$	$f_2^a = 16$
$m_2 = 2$	$f_2^a = 14$	$f_2^a = 11$

Tabelle 1: Früheste Einplanungszeit für t_2^a in Abhängigkeit von der Durchführungsmodi-Kombination

Prinzipiell müsste man das Terminplanungsproblem für jede einzelne Durchführungsmodi-Kombination exakt lösen, um die richtigen Ergebnisse zu ermitteln⁹¹. Diese Möglichkeit

⁹¹ Dies gilt sowohl für Projekte mit komplexer als auch für solche mit einfacher Ablaufstruktur.

wird man jedoch sehr schnell verwerfen, da der dadurch verursachte Rechenaufwand mit

$$O\left(\prod_{i=1}^I M_i\right) \text{ ansteigt.}$$

Um dieses Problem zu lösen, wird in der Literatur meist angenommen, daß nur eine Art von Abstandsbeziehungen auftritt, beispielsweise nur zwischen den Anfangszeitpunkten zweier Vorgänge. In diesem Fall ist es zur Ermittlung der gesuchten charakteristischen Termine ausreichend, die Zeitplanung nur für die Durchführungsmodi-Kombination durchzuführen, bei der jedem Vorgang derjenige Modus mit der kürzesten Vorgangsdauer zugewiesen wird⁹². Dies führt jedoch bei der in dieser Arbeit zugrundegelegten Planungssituation nicht unbedingt zu einer richtigen oder wenigstens tendenziell guten Lösung. Im Beispiel 2 etwa wird für diejenige Modi-Kombination der kleinste Wert für f_2^a erzielt, bei der beide Vorgänge die längste Vorgangsdauer aufweisen.

Wie zuvor beschrieben können die gesuchten charakteristischen Termine entsprechend den Beziehungen (70) - (75) in Abhängigkeit von den Längen bestimmter längster Wege ausgedrückt werden, wenn die Vorgangsdauern für alle Vorgänge festgelegt sind. Da die Durchführungsmodi entsprechend der Annahme zu Beginn der Planung noch nicht festgelegt wurden, sind die Bewertungen der Pfeile $\left((t_i^a, t_i^e), D_{im_i}\right)$ und $\left((t_i^e, t_i^a), -D_{im_i}\right)$, welche die Beziehung $t_i^a + D_{im_i} = t_i^e$ (1) abbilden, jedoch noch für keinen Vorgang definiert. Diese beiden Pfeile vom Anfangsknoten zum Endknoten eines Vorgangs und umgekehrt erhalten nun die jeweils kleinste aller für die verschiedenen Durchführungsmodi möglichen Bewertungen. Die Pfeilmenge des auf diese Weise modifizierten Netzwerks enthält also die Pfeile $\left(\left(t_i^a, t_i^e\right), \min_{m_i=1(1)M_i} \{D_{im_i}\}\right)$ und $\left(\left(t_i^e, t_i^a\right), -\max_{m_i=1(1)M_i} \{D_{im_i}\}\right)$.

Da diese Pfeile jeweils die kleinste aller ihrer für die verschiedenen Durchführungsmodi möglichen Bewertungen aufweisen, kann kein Weg, welcher über einen der beiden Pfeile eines Vorgangs führt, für irgendeine beliebige Durchführungsmodi-Kombination jemals

⁹² Vgl. z.B. Domschke/Drexel (1991), Boctor (1993).

eine größere Länge aufweisen. Aus diesem Grund stellen die für dieses modifizierte Netzwerk ermittelten längsten Wege Untergrenzen dar für die Länge der längsten Wege über alle möglichen Durchführungsmodi-Kombinationen.

Mit Hilfe des Algorithmus 1 können nun wiederum die Längen aller längsten Wege und daraus näherungsweise die gesuchten Werte mit Hilfe der Beziehungen (70) - (75) bestimmt werden. Die ermittelten Werte für die frühestmöglichen Einplanungszeitpunkte stellen dabei Untergrenzen dar. Für obiges Beispiel 2 ergäbe sich als Untergrenze für die frühestmögliche Einplanung von t_2^a ein Wert von 10.

Da jedoch auch für den frühestmöglichen Projektbeginn f_p^e beziehungsweise die minimale zeitliche Ausdehnung der Knotenmenge MA'_K lediglich Untergrenzen berechnet werden können, stellen die entsprechend den Beziehungen (71) beziehungsweise (75) ermittelten Werte für die spätestmöglichen Einplanungszeitpunkte hingegen keine Obergrenzen dar, sondern allgemeine Näherungslösungen.

2.4 Das Ressourcenplanungsproblem

2.4.1 Charakterisierung des Ressourcenplanungsproblems

Ein im Rahmen der Terminplanung ermittelter zulässiger Ablaufplan $x \in ZP$ stellt, wie zuvor beschrieben, die Einhaltung aller zeitlichen Abstandsbedingungen einer betrachteten Projektablaufstruktur sicher. Trotzdem kann es vorkommen, daß ein solcher Zeitplan in der Praxis nicht durchführbar ist, weil nicht über die gesamte Projektdauer ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen. Aufgrund der einzuhaltenden zeitlichen Minimalabstände und Maximalabstände kann man jedoch zum Ausgleichen auftretender Ressourcenengpässe einzelne Vorgänge nicht beliebig zeitlich verschieben. Die Ressourcenplanung soll daher für ein Projekt, welches auf der zugrundegelegten Planungssituation basiert, einen Ablaufplan entwickeln, der die Durchführung des Vorhabens auf eine zulässige Weise sicherstellt. Anders als bei der Terminplanung müssen also bei der Kapazitätsplanung zusätzlich zu den zeitlichen Ablaufbedingungen auch die kapazitiven Beschränkungen beachtet werden. Da solche Ressourcenpläne nicht auf triviale Weise aus einem im Rahmen der Terminplanung ermittelten zulässigen Zeitplan gewonnen werden können, muß eine eigenständige Ressourcenplanung durchgeführt werden.

Der im Rahmen der Kapazitätsplanung zu entwickelnde Ressourcenplan $y = \left((t_P^a)_y, (t_I^a)_y, (t_I^e)_y, (m_I)_y, \dots, (t_I^a)_y, (t_I^e)_y, (m_I)_y, (t_P^e)_y \right)$, $y \in N_0^{(3 \cdot I + 2)}$, muß jedem Vorgang i , $i=1(1)I$, einen Startzeitpunkt t_i^a und einen Endzeitpunkt t_i^e und zusätzlich genau einen Durchführungsmodus $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$ zuweisen⁹³. Die Kapazitätsplanung weist also die Ressourcen den einzelnen Vorgängen zeitlich zu, so daß diese in einem gewählten Modus verrichtet werden können. Damit ein Projekt gemäß einem vorgegebenen Ressourcenplan y durchgeführt werden kann, muß dieser neben den Projektablaufbedingungen (1) - (21) auch die Bedingung, daß keine Ressourcenschranken überschritten werden, erfüllen. Diese

⁹³ Im folgenden soll der Index y anzeigen, daß der Wert der indizierten Größe durch einen bestimmten Ressourcenplan y impliziert wird.

können für den allgemeinen Fall der Existenz mehrerer erneuerbarer, nicht erneuerbarer oder doppelt beschränkter Ressourcen folgendermaßen formuliert werden:

$$(76) \quad (k_{rt})_y \leq K_{rPer}(t) \quad , r=1(1)R, t = 1(1)(t_P^e)_y$$

$$(77) \quad \sum_{t=1}^{(t_P^e)_y} (k_{rt})_y \leq K_{rPro} \quad , r=1(1)R$$

Dabei bezeichnet $(k_{rt})_y$ den durch den Ressourcenplan y implizierten Einsatzmittelbedarf an der Kapazität r , $r=1(1)R$, in der Periode t , der sich aus der Summe der Kapazitätsbedarfe aller sich in dieser Periode in Ausführung befindlichen Vorgänge ergibt. Dieser stellt sich formal dar als

$$(78) \quad (k_{rt})_y = \sum_{\substack{i \text{ mit } (t_i^a)_y < t \\ \text{und } (t_i^e)_y \geq t}} (k_{i(m_i)_y,r}) \quad , i=1(1)I.$$

Die Beziehung (76) stellt die Einhaltung der periodenbezogenen Ressourcenverfügbarkeitsschranken über die gesamte Projektdauer und (77) die Einhaltung der projektbezogenen Ressourcenverfügbarkeitsgrenzen sicher. Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall der Existenz lediglich einer erneuerbaren Ressource mit konstanter periodenbezogener Verfügbarkeit reduzieren sich diese Bedingungen zu

$$(79) \quad (k_t)_y \leq K_{Per} \quad , t = 1(1)(t_P^e)_y,$$

mit

$$(80) \quad (k_t)_y = \sum_{\substack{i \text{ mit } (t_i^a)_y < t \\ \text{und } (t_i^e)_y \geq t}} (k_{i(m_i)_y}) \quad , i=1(1)I.$$

Sollen alle Ressourcenpläne, welche die Durchführung eines im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Projekts auf eine zulässige Weise erlauben, in der Menge RP zusammengefaßt werden, so kann diese formuliert werden als

$$(81) \quad \text{RP} = \left\{ y \in \mathbb{N}_0^{(3 \cdot I + 2)} \mid y \text{ erfüllt (1) - (21), (79)} \right\}.$$

Da die Menge RP für ein gegebenes Projekt meist mehrere zulässige Ressourcenpläne enthält, bemüht man sich bei der Kapazitätsplanung als Optimierungsplanung um einen Ressourcenplan, welcher ein vorgegebenes Zielsystem bestmöglich erfüllt⁹⁴. Unter der Voraussetzung eines vorgegebenen, die Optimalität definierenden Kriteriums kann nun das Ressourcenplanungsproblem wie folgt formal beschrieben werden:

$$(82) \quad \text{Minimiere / Maximiere Zielfunktion (y)}$$

u.d.N.:

$$(83) \quad y \in \text{RP}$$

2.4.2 Komplexität des Ressourcenplanungsproblems

Zur Charakterisierung des Schwierigkeitsgrads eines betrachteten Problems verwendet man häufig den Begriff der Komplexität. Darunter versteht man den maximal benötigten Rechenaufwand des zur Lösung bestgeeigneten Verfahrens, also die maximale Anzahl elementarer Rechenschritte, die zur Lösung des Problems nötig sind. Ist diese Zahl in Abhängigkeit von der Problemgröße polynomial nach oben beschränkt, so spricht man von effizienten Algorithmen.

⁹⁴ Zum Thema der Optimalitätskriterien vgl. Abschnitt 2.5.

Das behandelte Ressourcenplanungsproblem gehört jedoch zur Klasse der NP-schweren Probleme⁹⁵. Von diesen Problemen wird allgemein angenommen, daß der Rechenaufwand des zum Auffinden einer optimalen Lösung bestgeeigneten Verfahrens in Abhängigkeit von der Problemgröße, hier der Anzahl der Vorgänge, nicht polynomial beschränkt ist. Allerdings konnte diese Annahme bisher nicht bewiesen werden. Bei der betrachteten Planungssituation ist aufgrund des Auftretens maximaler Zeitabstände sogar bereits die Beantwortung der Frage nach der Existenz einer zulässigen Lösung ein NP-vollständiges Problem⁹⁶. Daher kann man vor der Durchführung der eigentlichen Ressourcenplanung nicht mit einem effizienten Algorithmus überprüfen, ob die Generierung einer zulässigen Lösung überhaupt möglich ist. Nur in den seltenen Fällen, in denen etwa aufgrund der Bestimmung der zu berücksichtigenden zeitlichen Minimal- und Maximalabstände während der Strukturanalyse eine inkonsistente Ablaufstruktur ermittelt wurde oder die zur Verfügung stehenden Ressourcen den Mindestbedarf unterschreiten, kann die Existenz einer zulässigen Lösung vor Durchführung der Ressourcenplanung mit geringem Rechenaufwand ausgeschlossen werden. Anschaulich kann die Komplexität des Problems damit erklärt werden, daß Kapazitätsspitzen, welche sich durch die Einplanung der Vorgänge zum aufgrund der Ablaufbedingungen frühestmöglichen Zeitpunkt ergeben und die Ressourcenschranken überschreiten, wegen der zeitlichen Höchstabstände nicht durch ein beliebiges Entzerren und damit Verschieben der Vorgänge abgebaut werden können.

Selbst bei Projekten, während deren Durchführung keine Höchstabstandsbedingungen zu berücksichtigen sind, stellt sich das Problem des Nachweises der Existenz einer zulässigen Lösung bei Berücksichtigung nicht erneuerbarer und doppelt beschränkter Ressourcen als NP-vollständig heraus⁹⁷. Dies liegt an der Komplexität des Problems, eine Kombination von Durchführungsmodi für die I Vorgänge zu finden, für die die projektbezogene Ressourcenverfügbarkeit keiner einzigen Ressource überschritten wird.

⁹⁵ Vgl. Garey/Johnson (1979), S. 17 ff.

⁹⁶ Vgl. Zhan (1991), S. 16 f.

⁹⁷ Vgl. z. B. Kolisch (1995), S. 26 f.

Nur für den Fall, daß weder zeitliche Höchstabstandsbedingungen noch projektbezogene Ressourcenverfügbarkeitsgrenzen berücksichtigt werden müssen, ist das Auffinden einer zulässigen Lösung relativ trivial⁹⁸. Die Suche nach einem optimalen Ressourcenplan bleibt jedoch auch für dieses Problem NP-schwer.

⁹⁸ Vgl. z.B. Kolisch (1995), S. 75 ff.

2.5 Optimalitätskriterien

Das Sachziel eines Projekts, nämlich die Erfüllung der Projektaufgabe, wird im Rahmen der Projektbeschreibung festgelegt. Da jedoch in der Regel für die Durchführung eines Vorhabens verschiedene zulässige Ressourcenpläne existieren, benötigt man zur Bestimmung ihrer Qualität und schließlich auch zur Auswahl eines Plans ein formales Kriterium^{99,100}. Dieses Formalziel der Ressourcenplanung sollte dabei so gewählt werden, daß es zur Realisierung der Oberziele der Unternehmung beiträgt¹⁰¹.

In der Regel stellt dabei für einen nach dem erwerbswirtschaftlichen Prinzip geführten Betrieb die langfristige Gewinnmaximierung das oberste zu verfolgende Ziel dar¹⁰². Da diese Arbeit jedoch keine langfristigen Probleme wie beispielsweise Fragen der Unternehmensstrategie oder der langfristigen Produktionsprogrammplanung untersucht, kann gleichbedeutend zur langfristigen auch die kurzfristige Gewinnmaximierung betrachtet werden¹⁰³.

⁹⁹ Übersichten im Rahmen der Ressourcenplanung behandelte Optimalitätskriterien finden sich z.B. in Davis (1966), Davis (1973), Patterson u.a. (1989), Slowinski (1989), Domschke/Drexel (1991), Icmeli u.a. (1993), Elmaghraby (1995), Kolisch (1995), S. 13 f., Özdamar/Ulusoy (1995), Kolisch/Padman (1997), Nudtasomboon/Randhawa (1997).

¹⁰⁰ Diese Arbeit betrachtet jeweils nur ein einzelnes Optimalitätskriterium. Einige Autoren betonen jedoch, daß in der Praxis immer mehrere Ziele berücksichtigt werden müssen und stellen Ansätze für diesen Fall dar, vgl. z.B. Slowinski (1981), Viefhues (1982), S. 194 ff., Slowinski (1989), Slowinski u.a. (1994), Özdamar/Ulusoy (1995), Nudtasomboon/Randhawa (1997).

¹⁰¹ In der Regel liegt der Unternehmensführung ein System gleichzeitig zu verfolgender Ziele vor. Zu verschiedenen Zielsetzungen und zum Zielsystem einer Unternehmung vgl. z.B. Viefhues (1982), S. 178 ff., Hörschgen (1992), S. I/18 ff. u. II/465 ff., Bamberg/Coenenberg (1996), S. 25 ff., Wöhe (1996), S. 124 ff.

¹⁰² Vgl. z.B. Gutenberg (1979), S. 464 ff., Heinen (1980), S. 106, Wöhe (1996), S. 124.

¹⁰³ Vgl. Kramer (1994), S. 43 ff.

Es wäre daher auch bei der Ressourcenplanung sinnvoll, ökonomische Ziele zu verfolgen, beispielsweise durch die Wahl desjenigen Kapazitätsplans, welcher zum Erzielen des größtmöglichen Projektgewinns führt. In dieser Arbeit wird im folgenden angenommen, daß die Erlöse, welche durch die im Rahmen der Projektdurchführung erbrachte Dienstleistung beziehungsweise das erstellte Produkt erzielt werden, eine feste Größe darstellen und bei Fertigstellung des Projekts anfallen. Teilzahlungen bei Erreichen gewisser Zwischenziele treten also nicht auf. Unter dieser Voraussetzung läßt sich die Maximierung des erzielten Projektgewinns gleichbedeutend unter dem Aspekt der Kostenminimierung bearbeiten.

Die überwiegende Mehrzahl der Veröffentlichungen zum Kapazitätsplanungsproblem betrachtet jedoch technische Zielkriterien. In der Regel beziehen sich diese auf Zeitgrößen des betrachteten Ressourcenplans oder auf den Verlauf der Kapazitätsauslastung, welcher durch diesen Plan impliziert wird.

Sollten die konkreten Umstände der Projektdurchführung ein technisches Zielkriterium erfordern, beispielsweise wenn für den Kunden der frühestmögliche Abschluß des Projekts unabhängig von den damit verbundenen Kosten oberste Priorität hat, so ist dieses ohnehin gerechtfertigt. In der Regel sind die technisch orientierten Optimalitätskriterien jedoch in Abhängigkeit von der gegebenen Projektplanungssituation ökonomisch motiviert. Allerdings beziehen sie sich meist nur auf eine oder wenige Kostenkomponenten, so daß wohl keine technisch orientierte Zielsetzung der Kostenminimierung als dem obersten ökonomisch orientierten Ziel in allen Belangen Rechnung trägt. Aus diesem Grund stehen technisch orientierte Zielgrößen nur begrenzt in der erwünschten Mittel-Zweck-Beziehung zum Oberziel der langfristigen Gewinnmaximierung des Unternehmens.

Die Gründe dafür, daß in der Praxis technische Zielgrößen bei der Ressourcenplanung am häufigsten verwendet werden, liegen wohl darin, daß zum einen die hinter den Zeitgrößen stehenden Kostengrößen oft nicht oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand ermittelbar sind und sich zum anderen die Komplexität des betrachteten Problems durch

die Berücksichtigung von ökonomischen Komponenten oft erheblich erhöht¹⁰⁴. Ein weiterer Grund für den häufigen Einsatz dieser Zielsetzungen könnte darin liegen, daß der zuständige Planer häufig die Kostenauswirkungen seiner Planung schwer abschätzen kann, wohl aber die zeitlichen Auswirkungen sieht¹⁰⁵.

In diesem Abschnitt werden nun verschiedene in der Literatur betrachtete technisch und ökonomisch orientierte Zielkriterien dargestellt.

2.5.1 Technisch orientierte Zielkriterien

In der Literatur zum Ressourcenplanungsproblem wird mit Abstand am häufigsten die Minimierung der gesamten Projektdauer als technisch orientiertes Zielkriterium bearbeitet¹⁰⁶. Formal kann dieses Ziel dargestellt werden als

$$(84) \quad \text{Minimiere } ZT_{1a}(y) = \left(t_P^e\right)_y - \left(t_P^a\right)_y, y \in RP.$$

Unter der üblichen Festsetzung des Projektbeginns auf $t_P^a = 0$ bedeutet dieses Kriterium das Erstreben des frühestmöglichen Projektfertigstellungstermin und stellt sich somit dar als

$$(85) \quad \text{Minimiere } ZT_{1b}(y) = \left(t_P^e\right)_y, y \in RP.$$

Begründet wird dieses Kriterium meist mit folgenden Argumenten: Zunächst kommt der Hauptteil der Einnahmen in der Regel zum Ende des Projekts. Daher verringert eine kurze Projektdauer die Kosten durch gebundenes Kapital. Außerdem verringert sich gleichzeitig

¹⁰⁴ Vgl. Zäpfel (1982), S. 248, Kramer (1994), S. 55, Schwarze (1994), S. 185 ff.

¹⁰⁵ Vgl. Paulik (1984), S. 88 f.

¹⁰⁶ Zur Minimierung der Projektdauer als Zielkriterium vgl. z.B. Zhan (1991), S. 11 ff., Brinkmann (1992), S. 18 ff., Demeulemeester (1992), S. 1 ff., Sprecher (1994), S. 8 ff., Kolisch (1995), S. 14 ff.

das Risiko einer Terminüberschreitung mit eventuell zugehörigen Konventionalstrafen und dem Vertrauensverlust beim Kunden, wenn man versucht, das Vorhaben frühestmöglich abzuschließen. Ein weiteres Argument für dieses Zielkriterium ist, daß mit steigendem Planungshorizont die Qualität der Vorhersagen sinkt, und aus diesem Grund mit der angestrebten möglichst kurzen Projektdauer ein verkürzter Planungshorizont und damit eine erhöhte Planungssicherheit einhergehen. Schließlich hält man sich durch den frühestmöglichen Abschluß eines Projekts Kapazitäten für die Zukunft frei und kann daher früher neue Aufträge bearbeiten.

Ein weiteres häufig verwendetes technisch orientiertes Zielkriterium der Ressourcenplanung ist die Nivellierung des Ressourcenbedarfs, bei der man versucht, einen Ressourcenplan mit über die Projektdauer möglichst gleichmäßiger Belastung der Ressourcen zu erarbeiten¹⁰⁷. In der Regel wird dabei eine vorgegebene Projekthöchstdauer angenommen. Formal wird dieses Zielkriterium meistens dargestellt als

$$(86) \quad \text{Minimiere } ZT_2(y) = \sum_{t=1}^{(t_P^e)_y} \sum_{r=1}^R \left((k_{rt})_y \right)^2, \quad y \in RP^{108}.$$

Sinnvoll erscheint dieses Zielkriterium beispielsweise bei sehr teuren Investitionsgütern oder spezialisiertem Personal, die man über den gesamten Projektzeitraum möglichst gut beschäftigen möchte, um zum einen Unterdeckung, bei der eventuell weitere Ressourcen teuer beschafft werden müßten und zum anderen Überdeckung, bei der Ressourcen stillstehen, zu vermeiden. Außerdem vermeidet man durch dieses Kriterium hohe Anpassungskosten, welche vom Grad der Beschäftigungsänderung zwischen den aufeinanderfolgenden Planungsintervallen abhängen, beispielsweise Transportkosten.

¹⁰⁷ Zur Nivellierung des Ressourcenbedarfs vgl. z.B. Carruthers/Battersby (1966), Küpper u.a. (1975), S. 200 ff., Woodworth/Willie (1975), Dar-El/Tur (1978), Brinkmann (1992), S. 18 ff., Bandelloni u.a. (1994), Brinkmann/Neumann (1994), Nudtasomboon/Randhawa (1997).

¹⁰⁸ Tendenziell minimiert diese Zielfunktion die Kapazitätsbelastungsspitzen, da dieses Kriterium jedoch für Projekte im Einmodus-Fall mit vorgegebener Projekthöchstdauer entwickelt wurde, wird damit gleichbedeutend eine Ressourcennivellierung erreicht.

Ein weiteres technisches Zielkriterium stellt die Minimierung der Anzahl verspäteter Vorgänge dar¹⁰⁹. Dies setzt allerdings voraus, daß für einzelne oder auch alle Vorgänge Sollfertigstellungstermine vorgegeben sind, die im folgenden mit $\tilde{T}_i^e, i \in \{1, \dots, I\}$, bezeichnet werden. Dieses Ziel kann formuliert werden als

$$(87) \quad \text{Minimiere } ZT_3(y) = \sum_{i=1}^I (x_i)_y, y \in \text{RP}$$

$$\text{mit } (x_i)_y = \begin{cases} 1, & \text{falls } (t_i^e)_y > \tilde{T}_i^e, \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}.$$

Alternativ stellt auch die durchschnittliche gewichtete Verspätung der Vorgänge ein solches technisch orientiertes Zielkriterium dar, wobei man hier zusätzlich zu den Sollfertigstellungsterminen für jeden Vorgang einen Gewichtungsfaktor w_i benötigt¹¹⁰. Dieses Ziel kann dann dargestellt werden als

$$(88) \quad \text{Minimiere } ZT_4(y) = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I (w_i \cdot \max\{0, (t_i^e)_y - \tilde{T}_i^e\}), y \in \text{RP}.$$

Von den technisch orientierten Zielkriterien wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur noch die Projektdauerminimierung betrachtet. In Kapitel 4 werden Verfahren zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems für die zugrundegelegte Planungssituation dargestellt. Deren Leistungsfähigkeit bezüglich des Zielkriterium Projektdauerminimierung wird in Kapitel 5 experimentell untersucht.

¹⁰⁹ Vgl. z.B. Slowinski (1989), Domschke/Drexel (1991).

¹¹⁰ Vgl. z.B. Slowinski (1989), Domschke/Drexel (1991).

2.5.2 Ökonomisch orientierte Zielkriterien

Wie gerade gezeigt, wird die Verwendung technisch orientierter Zielkriterien, beispielsweise der Projektdauerminimierung oder der Ressourcennivellierung, häufig durch ökonomisch orientierte Begründungen gerechtfertigt. Der Grund für die Anwendung dieser Zielkriterien liegt wie zuvor erwähnt häufig darin, daß ökonomische Größen, insbesondere Kosten, im Gegensatz zu technischen nur mit hohem Aufwand zu ermitteln sind. Trotzdem haben sich einige Autoren im Rahmen der Ressourcenplanung auch mit ökonomisch orientierten Zielkriterien beschäftigt.

Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, kann ein Vorgang häufig in mehreren Anpassungskombinationen ausgeführt werden. Bei den einfachsten ökonomischen Betrachtungen einer Projektplanungssituation wird angenommen, daß jeder Aktivität in Abhängigkeit von ihrem Durchführungsmodus bestimmte Kosten zugeordnet werden können. Es werden nur entscheidungsrelevante Kosten berücksichtigt, welche von der Wahl eines Ressourcenplans und damit der Zuordnung eines bestimmten Durchführungsmodus abhängen. Kosten, welche für jede Art der Durchführung eines Vorgangs in gleicher Höhe auftreten, werden dagegen nicht einbezogen¹¹¹. Die einer Tätigkeit zugeordneten Kosten sollen im Modus mit der längsten Vorgangsdauer minimal sein, während sie für die anderen Durchführungsmodi mit sinkender Vorgangsdauer ansteigen. Begründet wird dies beispielsweise dadurch, daß sich bei kürzeren Vorgangszeiten Mehrkosten ergeben aufgrund von steigendem Materialverbrauch oder Energieverbrauch, erhöhtem Ausschuß beziehungsweise Nacharbeitsbedarf, dem Übergang zu weniger effizienten Potentialfaktoren und Verfahren, dem Bedarf an Überstunden oder der notwendigen Vergabe von Fremdaufträgen¹¹². Für den Verlauf dieser Vorgangskosten in Abhängigkeit von der Vorgangsdauer können sich lineare oder progressive Funktionen

¹¹¹ Dies ist zulässig, da in dieser Arbeit wie beschrieben lediglich die Planung, nicht jedoch etwa die Frage nach der Durchführung eines Projekts behandelt wird.

¹¹² Vgl. Küpper u.a. (1975), S. 196.

ergeben. Daneben können auch Kostensprünge auftreten, beispielsweise beim Auftreten eines Verfahrenswechsels¹¹³.

Für diese einfache Betrachtungsweise ergibt sich eine erste ökonomisch orientierte Zielfunktion durch die Forderung nach der Minimierung der zugeordneten Vorgangskosten für alle Aktivitäten eines Projekts¹¹⁴. Üblicherweise wird dabei eine einzuhaltende Projekthöchstdauer vorgegeben, da andernfalls die optimale Lösung trivial durch die Einplanung aller Vorgänge im Modus mit den geringsten zugeordneten Kosten zu generieren wäre. Bezeichnet man die einer Aktivität i im Modus m_i zugeordneten Vorgangskosten mit C_{im_i} , so ergibt sich die Forderung nach der Minimierung der Summe aller Vorgangskosten formal durch

$$(89) \quad \text{Minimiere } Z\ddot{O}_1(y) = \sum_{i=1}^I C_{i(m_i)_y}, \quad y \in RP.$$

Eine Erweiterung dieser Betrachtungsweise stellt die Berücksichtigung von Kosten dar, welche aufgrund der Durchführung des Projekts anfallen, dabei jedoch in ihrer Höhe unabhängig von der Ausführung einzelner Vorgänge sind. Die betrachteten Kosten können beispielsweise für über die gesamte Projektdauer in Anspruch genommene Fremddienstleistungen, etwa externe, projektspezifische Beratung oder juristische Betreuung, für die Benutzung benötigter Räume, Bauwägen oder projektgebundener Spezialmaschinen oder bei eventuellen Vertragsstrafen bei Überschreitung des vereinbarten Projektfertigstellungstermins anfallen. Kosten, welche zwar aufgrund der

¹¹³ Die Frage, inwieweit sich in der Praxis alle Kostenfunktionen tatsächlich in Zahlen ausdrücken lassen und welcher Genauigkeitsgrad dabei erreicht werden kann, sei an dieser Stelle nicht weiter erörtert. Im folgenden wird angenommen, daß die Höhe der betrachteten Kosten beziehungsweise die im folgenden vorgestellten Kostenfunktionen als Plangrößen bei sicheren Erwartungen vorgegeben sind. Zu Plangrößen bei sicheren Erwartungen vgl. Bamberg/Coenenberg (1996), S. 39 ff.

¹¹⁴ Vgl. z.B. Küpper u.a. (1975), S. 200 ff., Talbot (1982), Neumann (1987b), S. 231 ff., Deckro/Hebert (1989), Deckro/Hebert (1990), Drexel (1991), Demeulemeester u.a. (1996). Für diese Ansätze wird teilweise auch angenommen, daß die Vorgangsdauer stetig variiert werden kann.

Projektdurchführung anfallen, aber nicht vom gewählten Kapazitätsplan abhängen, beispielsweise einmalige Gebühren oder Versicherungskosten, sind entscheidungsirrelevant und werden wiederum nicht berücksichtigt. Die entscheidungsrelevanten Kosten werden als projektdauerabhängige Kosten C_P bezeichnet, da sie nur abhängig von der Dauer des gesamten Projekts sind. Bei entsprechend der Beziehung (10) auf $t_P^a = 0$ festgelegtem Projektbeginn lassen sie sich in Abhängigkeit vom Projektendzeitpunkt t_P^e formal darstellen als

$$(90) \quad C_P = f\left(t_P^e\right).$$

Die projektdauerabhängigen Kosten steigen linear oder auch nichtlinear mit der Projektdauer an. Insbesondere wenn Konventionalstrafen berücksichtigt werden, kann diese Kostenfunktion auch Sprünge aufweisen.

Als zweites hier vorgestelltes ökonomisch orientiertes Optimalitätskriterium kann nun versucht werden, die Summe aus den Vorgangskosten und den projektdauerabhängigen Kosten zu minimieren¹¹⁵. Ausgehend von der Einplanung aller Aktivitäten in den Durchführungsmodi mit den längsten Vorgangsdauern versucht man dabei, einzelne Tätigkeiten zu Lasten steigender Vorgangskosten so zu verkürzen, daß die projektdauerabhängigen Kosten in stärkerem Maße abnehmen, als die Vorgangskosten zunehmen. Häufig wird dabei die Kostensteigerung der Vorgangskosten einer Aktivität aufgrund ihrer Durchführung in einem Ausführungsmodus mit kürzerer Dauer als Beschleunigungskosten bezeichnet¹¹⁶. Das beschriebene Zielkriterium läßt sich formulieren zu

$$(91) \quad \text{Minimiere } Z\ddot{O}_2(y) = C_P\left(\left(t_P^e\right)_y\right) + \sum_{i=1}^I C_{i(m_i)_y}, \quad y \in RP.$$

¹¹⁵ Vgl. z.B. Carruthers/Battersby (1966), Küpper u.a. (1975), S. 200 ff., Viefhues (1982), S. 235 ff., Altrogge (1996), S. 225 ff.

¹¹⁶ Vgl. Knolmayer/Rückle (1976).

Diese kostenorientierte Sichtweise kann erweitert werden durch eine differenziertere Betrachtung der oben beschriebenen Vorgangskosten C_{im_i} . Dazu werden diese in zwei Kostengruppen aufgeteilt, nämlich die Ressourcenbereitstellungskosten und die verbleibenden direkten Vorgangskosten.

Diese Unterteilung wird dadurch gerechtfertigt, daß ein Teil der Vorgangskosten nicht durch die Durchführung der einzelnen Aktivitäten bestimmt wird, sondern durch den Einsatz beziehungsweise die Verfügbarkeit der Kapazitäten. Diese Kosten werden vom Beschäftigungsverlauf der Ressourcen determiniert, welcher wiederum erst durch den gewählten Ablaufplan, also die Einplanung aller Vorgänge festgelegt wird. Sie werden im folgenden auch als ressourcenbedingte oder beschäftigungsabhängige Kosten bezeichnet und können weiter unterteilt werden in Belastungskosten und Anpassungskosten. Weiterhin werden nur entscheidungsrelevante Kosten betrachtet, nicht jedoch Kosten, die unabhängig vom Beschäftigungsverlauf der Potentialfaktoren anfallen.

Die Belastungskosten C_{Rrt}^B eines Ressourcentyps r in einer bestimmten Periode t sind abhängig vom absoluten Niveau der Beschäftigung k_{rt} dieser Kapazitätsart, welches sich aufgrund der Einplanung der Vorgänge gemäß einem betrachteten Ressourcenplan ergibt. Formal gilt¹¹⁷

$$(92) \quad C_{Rrt}^B = f(k_{rt}).$$

Den Belastungskosten einer Ressource werden alle entscheidungsrelevanten Kosten zugerechnet, welche durch deren Bereitstellung und Verwendung in Abhängigkeit von der sich aus der Planung ergebenden Belastung, jedoch unabhängig von den konkret in dieser Periode ausgeführten Vorgängen, anfallen. Dies können beispielsweise Mietkosten für fremdbeschaffte Potentialfaktoren, Energiekosten, Lohnkosten für Leiharbeiter oder auch Überstundenzuschläge sein. In Abhängigkeit von der konkreten Situation der

¹¹⁷ Die Kostenfunktionen werden im folgenden für den allgemeinen Fall mehrerer Ressourcen formuliert, für den in dieser Arbeit untersuchten Fall mit nur einer Kapazitätsart kann der Index r wiederum weggelassen werden.

Projektdurchführung ist der Verlauf dieser Kostenfunktion in der Regel mit steigender Ressourcenbelastung monoton steigend. Dabei kann dieser Anstieg linear, progressiv oder degressiv erfolgen. In Ausnahmefällen ist auch ein von der Ressourcenbelastung unabhängiger, konstanter Kostenverlauf denkbar, wenn beispielsweise Kosten für fremdbeschaffte Maschinen unabhängig von deren tatsächlichen Verwendung in jeder Periode in konstanter Höhe anfallen. Für die einzelnen Tätigkeiten wird weiterhin in der Regel angenommen, daß ihr Ressourcenbedarf pro Zeiteinheit $k_{im,r}$ an einer Ressource r für Modi mit steigender Vorgangsdauer abnimmt¹¹⁸.

Neben den Belastungskosten werden weitere Kosten verursacht durch einen über den Projektverlauf schwankenden Ressourcenbedarf. Diese sogenannten Anpassungskosten C_{Rrt}^A eines Ressourcentyps r , welche zum Zeitpunkt t anfallen, sind dabei abhängig von der Belastungsänderung zwischen der Periode t und der Periode $(t+1)$. Formal können sie dargestellt werden als

$$(93) \quad C_{Rrt}^A = f(k_{r(t+1)} - k_{rt}).$$

Unter dieser Kostengruppe subsumieren sich beispielsweise Aufbaukosten, Abbaukosten oder Transportkosten für die betrachteten Ressourcen. Auch diese Kostenfunktion kann abhängig von der vorliegenden Situation lineare oder nichtlineare Verläufe annehmen, beispielsweise werden Transportkosten mit steigenden Belastungsschwankungen nicht in dem Maße zunehmen wie Aufbaukosten.

Die explizite Behandlung der beschäftigungsabhängigen Kosten erlaubt nun auch die Berücksichtigung nichtlinear steigender Belastungskosten oder auftretender Anpassungskosten. Dies ist bei der ersten Betrachtungsweise nicht möglich, bei der die ressourcenbedingten Kosten den Vorgangskosten C_{im_i} beispielsweise über die Verwendung von Maschinenstundensätzen zugerechnet werden.

¹¹⁸ Vgl. Küpper u.a. (1975), S. 197.

Die gesamten Ressourcenbereitstellungskosten C_R ergeben sich nun als Summe der Belastungskosten und der Anpassungskosten über alle Ressourcen $r=1(1)R$ und Perioden $t = 0(1)t_p^e$ hinweg. Formal gilt

$$(94) \quad C_R = \sum_{r=1}^R \sum_{t=0}^{t_p^e} (C_{Rrt}^B + C_{Rrt}^A).$$

Den direkten Vorgangskosten C_{Vim_i} eines Vorgangs i im Durchführungsmodus m_i wird nun nur noch derjenige Teil der Vorgangskosten zugeordnet, welche nicht zu den ressourcenbedingten Kosten gezählt werden können. Ressourcenbereitstellungskosten und direkte Vorgangskosten stellen also disjunkte Kostengruppen dar. Beispiele für direkte Vorgangskosten sind Kosten für Material oder Fremddienstleistungen, welche zur Durchführung des Vorgangs benötigt werden und deren Höhe abhängig vom gewählten Durchführungsmodus ist. Formal lassen sich die direkten Vorgangskosten C_{Vim_i} einer Aktivität als Funktion des gewählten Durchführungsmodus darstellen. Diese Kosten sollen wiederum mit sinkender Vorgangsdauer charakteristisch ansteigen. Ihre Höhe soll weiterhin unabhängig vom Einplanungszeitraum des Vorgangs sein. Somit gilt

$$(95) \quad C_{Vim_i} = f(m_i), m_i \in \{1, \dots, M_i\}.$$

Die gesamten direkten Vorgangskosten C_V eines Projekts in Abhängigkeit von einem bestimmten Kapazitätsplan y ergeben sich aus der Summe der direkten Vorgangskosten aller Vorgänge des Projekts in den ihnen zugewiesenen Durchführungsmodi und somit gilt

$$(96) \quad C_V = \sum_{i=1}^I C_{Vi(m_i)_y}.$$

Basierend auf dieser Kostenbetrachtung kann das Zielkriterium der Kostenminimierung als Minimierung der Summe aller entscheidungsrelevanten Kosten, also der Summe aus

projektdauerabhängigen Kosten, Ressourcenbereitstellungskosten und direkten Vorgangskosten¹¹⁹, formal dargestellt werden als

$$(97) \quad \text{Minimiere } Z\ddot{O}_3(y) = (C_P)_y + (C_R)_y + (C_V)_y, y \in RP.$$

Bei einem weiteren, aus der Investitionsrechnung stammenden Ansatz, betrachtet man ein durchzuführendes Investitionsvorhaben. Mit gewissen Schlüsselereignissen dieses Projekts, also charakteristischen Zeitpunkten einzelner oder im Extremfall aller Vorgänge, sind Einzahlungen oder Auszahlungen verbunden. Diese Zahlungsflüsse werden auch als Cash Flows bezeichnet. Das bei diesem Ansatz verfolgte Zielkriterium stellt die Maximierung des Kapitalwerts eines Projekts dar, also der Summe der Barwerte aller Zahlungsflüsse¹²⁰. Unter dem Barwert einer Zahlungsgröße versteht man den Wert, der ihr zum Bezugszeitpunkt $t=0$ nach Abzinsung zukommt¹²¹. Man wird also bei diesem Zielkriterium bestrebt sein, mit Auszahlungen verbundene Vorgänge möglichst spät und mit Einzahlungen verbundene Aktivitäten möglichst früh einzuplanen.

In der Regel nimmt man an, daß alle Zahlungsströme eines Vorgangs i zu seinem Endzeitpunkt t_i^e auftreten. Treten sie zu einem anderen Zeitpunkt auf, so werden sie auf den Endzeitpunkt aufgezinnt. Weiterhin wird in der Regel eine vorgegebene Projekthöchstdauer angenommen, um zu verhindern, daß einzelne Vorgänge mit negativen Cash Flows eventuell unendlich spät eingeplant werden. Somit läßt sich die Maximierung des Barwerts eines Projekts nun als Optimalitätskriterium formulieren zu

¹¹⁹ Mason/Moodie (1971) betrachten als Teil der vollständigen Kostenfunktion die Minimierung der Summe aus projektdauerabhängigen Kosten und Anpassungskosten, deren Verlauf jeweils als linear angenommen wird. Küpper u.a. (1975), S. 200 ff., betrachten daneben für den Einmodus-Fall die Minimierung der Summe aus projektdauerabhängigen Kosten und Ressourcenbereitstellungskosten.

¹²⁰ Vgl. z.B. Russell (1970), Doersch/Patterson (1977), Russell (1986), Smith-Daniels/Aquilano (1987), Patterson u.a. (1989), Valadares Tavares (1989), Elmaghraby/Herroelen (1990), Patterson u.a. (1990), Yang u.a. (1992), Icmeli/Erenguc (1996), Smith-Daniels u.a. (1996), Herroelen u.a. (1997), Kolisch (1997), Padman u.a. (1997).

$$(98) \quad \text{Maximiere} \quad Z\ddot{O}_4(y) = \sum_{i=1}^I \left((CF_i)_y \left(\frac{1}{1+z} \right)^{(t_i^e)_y} \right), \quad y \in \text{RP}.$$

z stellt den Zinsfuß dar und bezieht sich jeweils auf eine Periode¹²². Der Gesamtwert aller Zahlungsströme CF_i eines Vorgangs i ist eine Funktion des gewählten Durchführungsmodus $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$, so daß

$$(99) \quad CF_i = f(m_i)$$

gilt. Eine Erweiterung dieses Ansatzes berücksichtigt auch Abhängigkeiten des Werts der Zahlungsgrößen vom Einplanungszeitraum, beispielsweise wenn bei Verspätungen einzelner Vorgänge Terminüberschreitungskosten auftreten¹²³. In diesem Fall stellt CF_i auch eine Funktion von t_i^e dar und es gilt nun

$$(100) \quad CF_i = f(m_i, t_i^e).$$

Der letzte Ansatz, welcher hier vorgestellt werden soll, hat das Ziel, die Summe aller Kosten für die Ressourcenverfügbarkeit zu minimieren¹²⁴. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, daß Kapazitäten in der maximalen Höhe des Ressourcenbedarfs, welcher durch

¹²¹ Vgl. Schulte (1984), S. 23 ff., Altrogge (1991), S. 67 f., Blohm/Lüder (1991), S. 58 ff.

¹²² Für die Wahl des geeigneten Zinssatzes existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze. Die Bandbreite beinhaltet beispielsweise den Sollzins, den Habenzins, den langfristigen Kapitalmarktzinssatz, landesübliche oder branchenübliche Zinssätze oder auch Zinssätze, welche sich an der Grenzrendite, der Durchschnittsrendite, der Branchenrendite, der Reinvestitionsrendite oder einer völlig subjektiven Mindestrendite orientieren. In der Praxis wird der geeignete Zinssatz ebenfalls von der Höhe des gebundenen Kapitals, der Kapitalbindungsdauer sowie der Lage des Kapitalbindungszeitraums im Planungszeitraum abhängen, vgl. z.B. Schulte (1984), S. 72 ff., Büchter (1990), S. 28 ff., Blohm/Lüder (1991), S. 90 ff., Perridon/Steiner (1993), S. 84 ff., Kramer (1994), S. 58 ff., Vallée (1995), S. 85 f.

¹²³ Vgl. z.B. Elmaghraby/Herroelen (1990), Etgar u.a. (1996).

¹²⁴ Vgl. z.B. Möhring (1984), Demeulemeester (1995).

einen Ressourcenplan impliziert wird, für diese gesamte Projektdauer beschafft werden müssen. Dies geschieht unter der Annahme, daß die Projekthöchstdauer begrenzt ist und die Kosten CRV_r für die Verfügbarkeit einer Ressource r eine mit der Verfügbarkeit monoton steigende Funktion der Form

$$(101) \quad CRV_r = f \left(\max_{t=0(1)t_p^c} \{k_{rt}\} \right)$$

darstellen. Die Zielfunktion kann somit dargestellt werden als

$$(102) \quad \text{Minimiere } Z\ddot{O}_5(y) = \sum_{r=1}^R (CRV_r)_y, \quad y \in RP.$$

Zusätzlich zum technisch orientierten Zielkriterium Projektdauerminimierung wird im folgenden noch das ökonomisch orientierte Ziel $Z\ddot{O}_3$ der Gesamtkostenminimierung betrachtet. In Kapitel 5 dieser Arbeit werden die entwickelten Verfahren auf ihre Leistungsfähigkeit hinsichtlich dieses Zielkriteriums für zwei vorgegebene Kostensituationen untersucht.

3 Literaturübersicht zum Ressourcenplanungsproblem

Seit mehr als 30 Jahren wird das in Kapitel 2 beschriebene Ressourcenplanungsproblem in verschiedensten Ausprägungen in der Literatur behandelt. Die wichtigsten Ansätze zur Lösung dieses Problems sollen in diesem Abschnitt charakterisiert werden¹²⁵.

Prinzipiell können die Lösungsansätze in zwei Kategorien unterteilt werden, die sich grundsätzlich in ihrem Anspruch unterscheiden. Die erste Gruppe stellen die sogenannten exakten Verfahren dar^{126,127}. Für ein lösbares Problem finden diese aufgrund ihrer Konzeption mit Sicherheit eine bezüglich des gewählten Zielkriteriums optimale Lösung. Aufgrund der Zugehörigkeit des Ressourcenplanungsproblems zur Klasse der NP-schweren Probleme weisen die optimalen Verfahren jedoch die Charakteristik eines mit der Problemgröße extrem steigenden Rechenaufwands auf. Dies bedeutet, daß exakte Verfahren nur Projekte mit größenordnungsmäßig etwa 50 Vorgängen in vertretbarer Rechenzeit lösen können¹²⁸. Aus diesem Grund sind diese Verfahren eher von wissenschaftlichem Interesse. Für Projekte praktischer Größenordnungen sind sie nicht verwendbar, da diese wie zuvor erwähnt bis zu mehrere tausend Vorgänge aufweisen können.

¹²⁵ *Umfassende Überblicke finden sich z.B. in Davis (1966), Herroelen (1972), Davis (1973), Davis/Patterson (1975), Domschke/Drexl (1991), Kolisch (1995), S. 61 ff., Özdamar/Ulusoy (1995), Kolisch/Padman (1997), Brucker u.a. (1999).*

¹²⁶ *Alternativ werden die exakten auch optimale Verfahren genannt.*

¹²⁷ *Zusätzlich zu den bereits genannten Stellen finden sich Überblicke ausschließlich zu exakten Verfahren z.B. in Patterson (1984), Demeulemeester (1992), S. 26 ff., Herroelen u.a. (1996).*

¹²⁸ *Vgl. z.B. Talbot/Patterson (1978).*

Den exakten Verfahren stehen sogenannte heuristische Verfahren gegenüber¹²⁹. Diese Heuristiken versuchen mit relativ geringem Rechenaufwand möglichst gute, zumindest aber zulässige Lösungen für das betrachtete Problem zu finden. Sie werden auch als suboptimale Verfahren bezeichnet, da sie das Auffinden einer optimalen Lösung nicht garantieren können¹³⁰. Außerdem kann mit Hilfe von Heuristiken nicht der Zielfunktionswert einer bezüglich eines gewählten Kriteriums optimalen Lösung ermittelt werden. Es können lediglich mit Hilfe geeigneter Verfahren Untergrenzen beziehungsweise Obergrenzen für diesen Wert bestimmt werden.

In diesem Kapitel werden zunächst im ersten Teil die verschiedenen Ansätze exakter Verfahren grob erläutert. Im zweiten Abschnitt wird anschließend näher auf mögliche heuristische Verfahren und insbesondere auf die in dieser Arbeit verwendeten prioritätsregelbasierten Ansätze eingegangen.

¹²⁹ Zusätzlich zu den bereits genannten Stellen finden sich Überblicke ausschließlich zu heuristischen Verfahren z.B. in Alvarez-Valdes/Tamarit (1989), Kolisch/Hartmann (1998).

¹³⁰ Vgl. Herroelen/Demeulemeester (1996).

3.1 Exakte Verfahren

Die ersten Verfahren zur Bestimmung einer optimalen Lösung des Ressourcenplanungsproblems basieren auf Methoden der linearen oder dynamischen Programmierung¹³¹. Aufgrund der mit der Problemgröße extrem ansteigenden Anzahl an Variablen und Nebenbedingungen haben sich diese Verfahren jedoch als nicht sehr brauchbar herausgestellt¹³².

Die überwiegende Mehrzahl der verwendeten exakten Verfahren basieren auf der impliziten Enumeration mit Hilfe von Branch and Bound Methoden¹³³. Die einzelnen Knoten des Enumerationsbaums stellen dabei Teilressourcenpläne, die Endknoten vollständige Ressourcenpläne dar. In der Regel versucht man durch eine Tiefensuche zunächst eine möglichst gute Lösung zu finden. Anschließend wird im Verlauf des Enumerationsprozesses der Baum nach besseren Lösungen durchsucht. Dabei können jedoch alle Zweige, welche mit Sicherheit zu einer unzulässigen Lösung führen oder zu Lösungen, welche selbst im günstigsten Fall einen schlechteren Zielfunktionswert als die bisher beste gefundene Lösung aufweisen, vernachlässigt werden. Dadurch verringert sich

¹³¹ Vgl. z.B. Carruthers/Battersby (1966), Pritsker u.a. (1969), Patterson/Huber (1974), Patterson/Roth (1976), Doersch/Patterson (1977).

¹³² Vgl. Davis (1973).

¹³³ Vgl. z.B. für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur im Einmodus-Fall Hastings (1972), Stinson u.a. (1978), Christofides u.a. (1987), Demeulemeester (1992), S. 38 ff., Demeulemeester/Herroelen (1992), Yang u.a. (1992), Demeulemeester u.a. (1994), Icmeli/Erenguc (1996), Simpson/Patterson (1996), Demeulemeester/Herroelen (1997ab), Brucker u.a. (1998), Nazareth u.a. (1999), für solche Projekte unter der Annahme unterbrechbarer Vorgänge Demeulemeester/Herroelen (1996), für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur im Mehrmodus-Fall Talbot (1982), Patterson u.a. (1989), Patterson u.a. (1990), Speranza/Vercellis (1993), Sprecher (1994), S. 34 ff., Sprecher u.a. (1997), Sprecher/Drexel (1998), für solche Projekte unter der Annahme unterbrechbarer Vorgänge Nudtasomboon/Randhawa (1997), für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur im Mehrmodus-Fall Reyck/Herroelen (1998).

der erforderliche Rechenaufwand im Vergleich zu den oben erwähnten Methoden der linearen oder dynamischen Optimierung erheblich.

Ein weiterer Ansatz zur optimalen Lösung des Ressourcenplanungsproblems basiert auf dem Konzept disjunktiver Pfeile¹³⁴. Der Grundgedanke dieser Verfahren ist folgender¹³⁵: Zwei oder mehr aufgrund der Ablaufstruktur theoretisch gleichzeitig einplanbare Vorgänge, welche jedoch zusammen die Kapazitätsgrenzen mindestens einer Ressource überschreiten würden, bilden zusammen eine sogenannte verbotene Menge. Dabei reicht es aus, sich auf minimale verbotene Menge zu beschränken. Dies sind verbotene Mengen ohne verbotene Teilmengen. Fügt man disjunktive Ablaufbedingungen mit der Bewertung null zwischen jeweils zwei Vorgänge dieser Mengen ein, so werden diese entzerrt, das heißt die Einplanung der Vorgänge kann nun aufgrund der neuen Ablaufbedingungen nicht mehr zu einer Überlastung der Kapazitäten führen¹³⁶. Daher reicht es für die Lösung des Ressourcenplanungsproblems im folgenden aus, den optimalen Zeitplan zu finden, welcher unter Berücksichtigung der neu hinzugefügten Ablaufbedingungen zulässig ist. Die Einhaltung der Ressourcenschranken wird dabei wie beschrieben automatisch sichergestellt. Zum Auffinden einer optimalen Lösung werden die verschiedenen Möglichkeiten der Entzerrung der verbotenen Mengen enumeriert, beispielsweise wiederum durch Branch and Bound Verfahren. Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, daß die auf dem Konzept disjunktiver Pfeile basierenden Verfahren nur für Projekte verwendbar sind, deren Vorgänge jeweils nur einen Durchführungsmodus aufweisen. Dies liegt daran, daß zur Bestimmung aller verbotenen Mengen der Ressourcenbedarf jedes Vorgangs bekannt sein muß.

¹³⁴ Vgl. Balas (1971).

¹³⁵ Vgl. z.B. für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur Bell/Park (1990), für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur Bartusch (1983), S. 63 ff., Radermacher (1984), Radermacher (1985), Bartusch u.a. (1988).

¹³⁶ Eine disjunktive Ablaufbeziehung der Bewertung null zwischen zwei Vorgängen besagt, daß entweder der erste Vorgang frühestens nach Abschluß des zweiten oder umgekehrt ausgeführt werden kann. Diese beiden Vorgänge dürfen also nicht gleichzeitig ausgeführt werden, vgl. Fußnote 61.

3.2 Heuristische Verfahren

Wie bereits zuvor erwähnt, sind exakte Verfahren aufgrund des extremen Rechenaufwands nicht zur Planung von Projekten praxisrelevanter Größenordnungen geeignet. Zu diesem Zweck benötigt man leistungsfähige Heuristiken, welche mit angemessenem Rechenaufwand und Speicherbedarf möglichst gute Ressourcenpläne generieren können. In der Literatur findet sich dazu eine Vielzahl verschiedener Verfahren, deren Methodologien sich in mehrere Kategorien unterteilen lassen, nämlich in unvollständige exakte Verfahren, Verfahren basierend auf dem Konzept disjunktiver Pfeile, Verfahren basierend auf lokalen Suchstrategien und prioritätsregelbasierte Heuristiken. Daneben existiert ein heuristischer Ansatz auf Basis ganzzahliger Programmierung¹³⁷. Die einzelnen Ansätze sollen nun vorgestellt werden, insbesondere die prioritätsregelbasierten, da diese auch in der vorliegenden Arbeit verwendet werden.

3.2.1 Unvollständige exakte Verfahren

Aufgrund der Arbeitsweise von Branch and Bound Verfahren erhält man häufig schon sehr schnell eine relativ gute Lösung für das betrachtete Problem, welche dann im weiteren Verlauf der Enumeration aller Lösungsmöglichkeiten trotz hohen Rechenaufwands kaum noch verbessert werden kann. Bricht man nun die vollständige Berechnung aller Lösungsmöglichkeiten vorzeitig ab, so stellt die bis dahin beste gefundene Lösung oft schon eine sehr gute dar. Einige Autoren verwenden daher als Heuristik ihren exakten Algorithmus, dessen Berechnung nach einer bestimmten Rechenzeit abgebrochen wird¹³⁸. Andere führen lediglich eine Berechnung von der Wurzel bis zu einem Blatt des

¹³⁷ Vgl. *Oguz/Bala (1994)*.

¹³⁸ Vgl. z.B. für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur im Mehrmodus-Fall *Talbot (1982)*, *Patterson u.a. (1989)*, *Slowinski u.a. (1994)*, *Sprecher (1994)*, S. 51 ff.

Enumerationsbaums durch, wobei die Auswahl der Zweige nach bestimmten Regeln zum Auffinden einer möglichst guten Lösung führen soll¹³⁹.

3.2.2 Verfahren basierend auf dem Konzept disjunktiver Pfeile

Die Idee, verbotene Mengen von Vorgängen zu betrachten, die infolge Kapazitätsmangels nicht gleichzeitig ausgeführt werden können, wurde auch für die Konzeption einiger Heuristiken aufgegriffen¹⁴⁰. Bei diesen heuristischen Ansätzen werden nicht alle Möglichkeiten der Entzerrung der verbotenen Mengen berechnet, sondern für jede Menge aufgrund einer Auswahlregel eine Entscheidung getroffen. Die besten Ergebnisse bei Heuristiken, die auf diesem Konzept beruhen, wurden dabei mit folgendem Verfahren erzielt¹⁴¹: Zunächst werden die verbotenen Mengen entsprechend ihrer Mächtigkeit aufsteigend geordnet. Anschließend wird die erste Menge durch Einfügen desjenigen Pfeils aufgelöst, der zu der geringsten Zunahme des längsten Wegs vom Projektbeginn bis zum Projektende führt. Falls durch die Entzerrung dieser Menge andere Mengen transitiv ebenfalls entzerrt werden, so werden diese entfernt und anschließend mit der nächsten verbotenen Menge wie oben weiter verfahren, bis schließlich keine verbotenen Mengen mehr vorhanden sind.

3.2.3 Verfahren basierend auf lokalen Suchstrategien

Lokale Suchstrategien sind bisher im Bereich des Operations Research relativ erfolgreich angewendet worden¹⁴². Prinzipiell basiert die lokale Suche auf dem Gedanken, einen

¹³⁹ Vgl. z.B. für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur im Einmodus-Fall Alvarez-Valdes/Tamarit (1989), für solche Projekte im Mehrmodus-Fall Patterson u.a. (1990), für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur im Einmodus-Fall Brinkmann (1992), S. 28 ff., Brinkmann/Neumann (1994).

¹⁴⁰ Vgl. z.B. für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur Alvarez-Valdes/Tamarit (1989), Bell/Han (1991), für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur Bartusch (1983), S. 112 ff.

¹⁴¹ Vgl. Alvarez-Valdes/Tamarit (1989).

¹⁴² Eine Darstellung lokaler Suchmethoden findet sich z.B. in Pirlot (1996).

Lösungsraum nach einer möglichst guten Lösung zu durchsuchen, indem man die Nachbarlösungen einer Ausgangslösung betrachtet und deren beste Lösung als neue Ausgangslösung übernimmt. Dies wird solange wiederholt, bis sich keine bessere Lösung mehr finden läßt.

Bekannte Verfahren lokaler Suchstrategien sind beispielsweise Simulated Annealing¹⁴³, Tabu Search¹⁴⁴ oder genetische Algorithmen¹⁴⁵. Bei Simulated Annealing generiert man zufällig eine Nachbarlösung der bisherigen Ausgangslösung und übernimmt diese, falls sie besser als die bisherige Lösung ist. Auch schlechtere Nachbarlösungen werden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit übernommen, welche üblicherweise mit zunehmender Rechendauer abnimmt. Dadurch soll vermieden werden, daß das Verfahren beim Erreichen einer lokal optimalen Lösung abbricht. Bei Tabu Search wird die gesamte Nachbarschaft einer Ausgangslösung durchsucht und die beste Lösung übernommen, solange sie nicht tabu ist. Tabu sind dabei alle bisherigen Ausgangslösungen. Dadurch soll wiederum ein Kreieren zwischen zwei möglicherweise nur lokal guten Lösungen vermieden werden. Genetische Algorithmen basieren prinzipiell auf der Generierung ganzer Mengen von Lösungen, sogenannten Populationen, wobei durch Selektion, Kreuzen und Mutation guter Lösungen neue erzeugt werden.

Das Hauptproblem bei der Übertragung lokaler Suchstrategien auf das Ressourcenplanungsproblem ist die Generierung zulässiger Nachbarlösungen einer Ausgangslösung, da schon dies wie oben beschrieben ein NP-schweres Problem ist. Häufig wird dieses Problem gelöst, indem eine Lösung in Form von Prioritätswerten für die einzelnen Vorgänge vorgegeben wird. Der eigentliche Ressourcenplan muß dann durch ein vorgegebenes prioritätsregelbasiertes Verfahren auf Basis dieser Prioritätswerte erarbeitet werden. Verglichen beispielsweise mit der Anzahl prioritätsregelbasierter Lösungsansätze für das Ressourcenplanungsproblem sind bisher relativ wenige Verfahren bekannt, welche

¹⁴³ Vgl. z.B. Kirkpatrick u.a. (1983), Laarhoven/Aarts (1987), Eglese (1990).

¹⁴⁴ Vgl. z.B. Werra/Hertz (1989), Glover (1990).

¹⁴⁵ Vgl. z.B. Kolen/Pesch (1994).

das Problem mit Hilfe lokaler Suchstrategien zu lösen versuchen, jedoch gewinnt dieses Gebiet in letzter Zeit in der Literatur deutlich an Interesse¹⁴⁶.

3.2.4 Prioritätsregelbasierte Verfahren

Mit Abstand am häufigsten werden in der Literatur prioritätsregelbasierte Ansätze zur heuristischen Lösung des Ressourcenplanungsproblems behandelt. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist diese Methode intuitiv und leicht verständlich, zum zweiten ist der Programmierungsaufwand relativ gering und zum dritten liefern solche prioritätsregelbasierten Heuristiken die bisher besten bekannten Ergebnisse für das betrachtete Ressourcenplanungsproblem¹⁴⁷. Aus diesem Grund und da auch in dieser Arbeit solche Verfahren vorgestellt werden, soll an dieser Stelle näher auf prioritätsregelbasierte Heuristiken eingegangen werden.

Generell benötigt man zur Generierung einer Lösung für das Ressourcenplanungsproblem mit Hilfe eines prioritätsregelbasierten Verfahrens zwei Komponenten, nämlich ein Schema zur Generierung von Ressourcenplänen sowie die Prioritätsregel selbst.

3.2.4.1 Schemata zur Ressourcenplangenerierung

Die überwiegende Mehrzahl der Beiträge zur prioritätsregelbasierten Ressourcenplanung hat sich mit Projekten mit einfacher Ablaufstruktur, deren Vorgänge lediglich einen Durchführungsmodus aufweisen, beschäftigt¹⁴⁸. Für dieses Problem können zwei verschiedene Einplanungsschemata unterschieden werden, das serielle und das parallele

¹⁴⁶ Vgl. z.B. für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur im Einmodus-Fall Sampson/Weiss (1993), Leon/Balakrishnan (1995), Lee/Kim (1996), Cho/Kim (1997), Naphade u.a. (1997), für solche Projekte im Mehrmodus-Fall Slowinski u.a. (1994), Kolisch/Drexel (1997), für solche Projekte im Mehrmodus-Fall ohne nicht erneuerbare Ressourcen Mori/Tseng (1997), Reyck u.a. (1998).

¹⁴⁷ Vgl. Kolisch (1996b).

¹⁴⁸ Vgl. z.B. Kurtulus/Davis (1982), Russell (1986), Kolisch (1995), S. 61 ff., Padman u.a. (1997).

Schema¹⁴⁹. Diese sollen nun kurz beschrieben werden. Für Projekte im Mehrmodus-Fall oder für solche mit komplexer Ablaufstruktur müssen die Einplanungsschemata modifiziert werden. Existierende Ansätze für diesen Fall werden im Anschluß kurz dargestellt.

Da die beiden Einplanungsschemata für den Einmodus-Fall entwickelt wurden, wird in der Literatur zumeist modellhaft angenommen, daß zwischen zwei Vorgängen höchstens eine Mindestabstandsbedingung zwischen den Anfangszeitpunkten dieser Aktivitäten einzuhalten ist. Alle anderen Reihenfolgebedingungen werden durch die bekannte Beziehung $t_i^e = t_i^a + D_i$ angepaßt. Für die Modellierung einer solchen Projektablaufstruktur werden meistens Vorgangsknotennetze verwendet, bei denen ein Knoten den Anfangszeitpunkt eines Vorgangs abbildet¹⁵⁰. Für diese Netzwerke bezeichnet man dann einen Vorgang i als Vorgänger von Vorgang j , wenn zwischen den Anfangszeitpunkten dieser Aktivitäten eine Mindestabstandsbeziehung einzuhalten ist. Projektanfang und Projektende werden jeweils als fiktive Vorgänge mit dem Wert null für Vorgangsdauer und Ressourcenbedarf in das Netzwerk integriert.

Sowohl das serielle als auch das parallele Einplanungsschema basieren darauf, einen zulässigen Ressourcenplan durch stufenweise Erweiterung eines zulässigen Teilplans zu erzeugen. Bei Verwendung des seriellen Schemas besteht die Einplanung dabei aus $(I+2)$ einzelnen Schritten. Mit jedem Einplanungsschritt sind dabei drei disjunktive Mengen verbunden. Dies ist zunächst die Menge aller bereits eingeplanten Vorgänge, für die Anfangszeitpunkt und Endzeitpunkt im bestehenden Teilplan bereits festgelegt sind. Die zweite Menge ist die Entscheidungsmenge, welche alle einplanbaren Vorgänge enthält. Ein Vorgang ist dann einplanbar, wenn alle seine Vorgänger-Aktivitäten bereits eingeplant wurden. Die dritte Menge schließlich enthält alle anderen Aktivitäten, welche noch nicht eingeplant werden können. Zu Beginn des Einplanungsschritts wird nun ein Vorgang aus

¹⁴⁹ Vgl. z.B. *Gewald u.a. (1972), S. 81 ff., Kolisch (1996b)*.

¹⁵⁰ Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 2.2. Da die dargestellten Einplanungsschemata für Projekte entwickelt wurden, deren Vorgänge nur einen Durchführungsmodus aufweisen und daher mit der Festlegung des Anfangszeitpunkts einer Aktivität auch deren Endzeitpunkt bestimmt ist, spricht man gleichbedeutend davon, daß ein Knoten eines solchen Netzwerks einen Vorgang abbildet.

der Entscheidungsmenge mit Hilfe einer Prioritätsregel ausgewählt und frühestmöglich derart eingeplant, daß alle Mindestabstandsbedingungen zu den Vorgängern eingehalten sowie keine Kapazitätsschranken überschritten werden. Anschließend wird die gewählte Aktivität aus der Entscheidungsmenge in die Menge aller bereits eingeplanten Vorgänge überführt. Tätigkeiten, welche nun wiederum durch die Einplanung des betrachteten Vorgangs einplanbar werden, müssen schließlich aus der Menge der noch nicht einplanbaren Aktivitäten in die Entscheidungsmenge überführt werden. Nach (I+2) solchen Einplanungsschritten ist dann das serielle Verfahren beendet und es liegt ein zulässiger Ressourcenplan vor.

Im Gegensatz zum vorgangsorientierten seriellen Einplanungsschema steht das zeitorientierte parallele Schema¹⁵¹. Dieses plant bei jedem Einplanungsschritt jeweils eine Menge von Vorgängen ein. Verbunden mit jedem Schritt sind diesmal ein bestimmter Zeitpunkt, beim ersten Planungsschritt der Zeitpunkt null, sowie vier disjunktive Mengen. Die aus dem seriellen Verfahren bekannte Menge aller bereits eingeplanten Vorgänge wird unterteilt in die Menge aller zum Einplanungszeitpunkt bereits abgeschlossenen Vorgänge, der sogenannten passiven Menge und in die aktive Menge, welche alle sich zu diesem Zeitpunkt in Ausführung befindlichen Vorgänge enthält. Die Termine der Vorgänge aus der aktiven und der passiven Menge formen also zusammen den aktuellen Teilressourcenplan. Im Gegensatz zum seriellen Verfahren enthält die Entscheidungsmenge allerdings nun lediglich diejenigen Aktivitäten, deren Beginn unter Berücksichtigung aller Ablaufbedingungen zu diesem Termin einplanbar wäre und deren Ressourcenbedarf die wegen der gleichzeitigen Durchführung aller Vorgänge aus der aktiven Menge nur noch reduziert zur Verfügung stehenden Kapazitäten nicht übersteigt. Die vierte Menge enthält wiederum alle anderen, noch nicht einplanbaren Vorgänge. Mit Hilfe einer Prioritätsregel wird nun wieder eine Aktivität aus der Entscheidungsmenge ausgewählt und der Starttermin auf den Einplanungszeitpunkt festgelegt. Dieser Vorgang wird nun aus der Entscheidungsmenge entfernt und in die aktive Menge überführt.

¹⁵¹ Kolisch weist darauf hin, daß zwei leicht unterschiedliche Verfahren als parallele Schemata bezeichnet werden, der Algorithmus von Kelley und der von Brooks. Da sich diese beiden jedoch sehr ähneln und in der überwiegenden Mehrzahl der Veröffentlichungen der letztere verwendet wird, soll an dieser Stelle nur dieser Brooks Algorithmus vorgestellt werden, vgl. Kolisch (1995), S. 68 ff.

Anschließend muß die Entscheidungsmenge aktualisiert werden. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis die Entscheidungsmenge leer ist, weil alle Vorgänge entweder durch Einplanung oder aufgrund der Kapazitätsbegrenzungen aus der Menge entfernt wurden. Anschließend wird der nächste Einplanungszeitpunkt bestimmt. Dies ist der nächstgrößere Termin, bei dem sich wieder Vorgänge in der Entscheidungsmenge befinden. Dieser Zeitpunkt ergibt sich entweder als der früheste Endzeitpunkt aller Vorgänge aus der aktiven Menge, da zu diesem Termin wieder neue Ressourcen freigegeben werden oder als frühester Zeitpunkt, zu dem eine Tätigkeit aufgrund der Einhaltung der Mindestabstandsbedingungen einplanbar wird. Sobald sich alle Vorgänge in der passiven Menge befinden, ist das parallele Verfahren beendet und ein zulässiger Ressourcenplan ermittelt.

Es kann nachgewiesen werden, daß die Menge aller durch das serielle Einplanungsschema erzeugten Ressourcenpläne stets eine bezüglich eines regulären Optimalitätskriteriums¹⁵² optimale Lösung enthält, während dies für das parallele Schema nicht gewährleistet ist¹⁵³. Lange Zeit wurden trotzdem bei den prioritätsregelbasierten Verfahren parallele Einplanungsschemata bevorzugt, da sie häufig zu besseren Ergebnissen führten als die seriellen¹⁵⁴. Neuere Untersuchungen kommen jedoch zu dem Ergebnis, daß die Güte der mit den Einplanungsschemata erzielten Lösungen abhängig von der Problemstruktur ist und daher auch dessen Wahl davon abhängen sollte¹⁵⁵.

Sowohl serielles als auch paralleles Einplanungsschema in der soeben beschriebenen Form sind jedoch nicht in der Lage, einen Ressourcenplan für ein Projekt mit komplexer Ablaufstruktur oder mit mehreren Durchführungsmodi pro Vorgang zu ermitteln.

¹⁵² Unter einer regulären Zielfunktion versteht man eine solche, die bei der früheren Ausführung nur eines einzigen Vorgangs und Beibehaltung der Ausführungszeiträume aller anderen Vorgänge zu keinem schlechteren Zielfunktionswert führt, vgl. Bartusch (1983), S. 12 f., Sprecher u.a. (1995).

¹⁵³ Vgl. Sprecher u.a. (1995).

¹⁵⁴ Vgl. z.B. Alvarez-Valdes/Tamarit (1989).

¹⁵⁵ Vgl. z.B. Patterson (1976), Franck/Neumann (1996), Kolisch (1996b), Kolisch/Drexel (1996).

Insbesondere benötigt man für Projekte im Mehrmodus-Fall eine Erweiterung, welche jeder Aktivität einen Durchführungsmodus zuweist. Für Vorhaben mit komplexer Ablaufstruktur müssen die Schemata dergestalt modifiziert werden, daß die Einhaltung der Höchstabstandsbedingungen sichergestellt wird. Für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur als auch für solche mit mehreren Modi pro Vorgang stehen verschiedene Lösungsansätze zur Verfügung, welche im folgenden vorgestellt werden. Zur Einplanung von Projekten mit der Kombination einer komplexen Ablaufstruktur mit dem Mehrmodus-Fall sind bisher noch keine Verfahren bekannt.

Eine Möglichkeit, im Mehrmodus-Fall einen zulässigen Ressourcenplan für ein Projekt mit einfacher Ablaufstruktur zu ermitteln, besteht darin, zunächst eine bezüglich der Einhaltung aller projektbezogenen Ressourcenverfügbarkeiten zulässige Kombination von Durchführungsmodi zu erarbeiten und anschließend das nun auf den Einmodus-Fall vereinfachte Ressourcenplanungsproblem mit einem der beiden oben beschriebenen Einplanungsschemata zu lösen¹⁵⁶. Andere Verfahren ermitteln einen Kapazitätsplan mit Hilfe des parallelen Einplanungsschemas¹⁵⁷. Die von einigen Prioritätsregeln verwendeten Daten aus der Zeitplanung werden dabei unter der Annahme ermittelt, daß lediglich Mindestabstandsbeziehungen der Formen (2) und (3) auftreten. Für diesen Fall führt die Ausführung aller Vorgänge im Modus mit der kürzesten Vorgangsdauer zu der Ermittlung frühestmöglicher Zeitpläne. Die Entscheidungsmenge im oben beschriebenen parallelen Einplanungsschema enthält bei diesem Verfahren alle Vorgänge, welche in wenigstens einem Modus bezüglich der Abstandsbedingungen und Kapazitätsrestriktionen einplanbar sind. Der Einplanungsschritt wird dann dahingehend erweitert, daß nach der Bestimmung des nächsten einzuplanenden Vorgangs dessen Durchführungsmodus mit Hilfe einer geeigneten Regel gewählt wird. Ein weiteres prioritätsregelbasiertes Verfahren für Projekte dieser Art basiert ebenfalls auf einem parallelen Einplanungsschema¹⁵⁸. Es ermittelt für den betrachteten Planungszeitpunkt alle Kombinationen von Vorgängen und

¹⁵⁶ Vgl. Kolisch (1995), S. 138 ff., Kolisch/Drexl (1997).

¹⁵⁷ Vgl. z.B. Boctor (1993), Slowinski u.a. (1994), Özdamar/Ulusoy (1994).

¹⁵⁸ Vgl. Boctor (1996).

Durchführungsmodi, welche maximal gleichzeitig unter Berücksichtigung der noch nicht vergebenen Kapazitäten einplanbar wären. Eine Prioritätsregel wählt dann die Kombination zur Einplanung, welche zu der geringsten Verlängerung der Projektdauer führt. Das letzte hier vorgestellte Verfahren plant die Vorgänge mit Hilfe eines seriellen Schemas ein¹⁵⁹. Der Durchführungsmodus wird dabei unter Verwendung eines Gewichtungsfaktors zufällig aus der Menge aller Modi gewählt. Interessant an diesem Verfahren ist, daß es Kapazitätsrestriktionen nicht berücksichtigt und den erarbeiteten Zeitplan erst am Ende auf seine Zulässigkeit untersucht. Das Verfahren erzeugt auf diese Weise eine große Anzahl an Lösungen und wählt am Ende die beste aus.

Für die Lösung von Projekten mit komplexer Ablaufstruktur im Einmodus-Fall steht ein anderer prioritätsregelbasierter Ansatz zur Verfügung¹⁶⁰. Bei diesem wird zunächst versucht, für jede Zyklenstruktur einen zulässigen Teilressourcenplan zu ermitteln, da sich für ein solches Projekt nachweisen läßt, daß aus der Existenz eines zulässigen Teilplans für jede einzelne Zyklenstruktur die Existenz eines zulässigen Gesamtressourcenplans folgt¹⁶¹. Die Zyklenstrukturen werden dabei jeweils einzeln auf einer eigenen Hilfszeitskala eingeplant. Dabei soll gelten, daß kein Bezugszeitpunkt vor und mindestens ein Bezugszeitpunkt zum Zeitpunkt null eingeplant wird. Das Verfahren berücksichtigt bei der Planung der einzelnen Zyklenstrukturen zunächst nur die Mindestabstandsbedingungen, führt jedoch bei der Einplanung jedes Vorgangs j einen Zwischenschritt ein, der die Einhaltung einer eventuell auftretenden Höchstabstandsbedingung zu einem bereits eingeplanten Vorgang i der Form $t_j^a - t_i^a \leq \overline{c_{ij}^{aa}}$ überprüft. Wird eine Maximalabstandsbedingung verletzt, so wird die Planungssituation zurückgesetzt auf den Status direkt vor der Einplanung des Vorgangs i , das bedeutet alle nach i eingeplanten Vorgänge sowie i selbst werden zunächst wieder ausgeplant. Anschließend wird die Planung weitergeführt, allerdings darf der Vorgang i nun frühestens eine Zeiteinheit später

¹⁵⁹ Vgl. Drexel/Gruenewald (1993).

¹⁶⁰ Vgl. Zhan (1991), S. 28 ff., Neumann/Zhan (1994), Zhan (1994), Franck (1995).

¹⁶¹ Vgl. z.B. Zhan (1991), S. 18 f.

als zuvor eingeplant werden. Wenn für jede Zyklenstruktur ein zulässiger Teilressourcenplan gefunden wird, dann können die eingeplanten Zyklenstrukturen als neue Vorgänge betrachtet und für das verbleibende Projekt mit Hilfe des Grundschemas ein zulässiger Ressourcenplan erarbeitet werden.

Wie soeben dargestellt, versucht man, durch die einmalige Durchführung eines der oben beschriebenen Einplanungsschemata eine zulässige Lösung für das betrachtete Ressourcenplanungsproblem zu erhalten. Dabei ist die Qualität dieser Lösung abhängig vom gewählten Verfahren und der verwendeten Prioritätsregel. Einige Autoren haben daher vorgeschlagen, durch die mehrfache Durchführung einer solchen Heuristik mehrere Lösungen zu generieren, von denen dann die beste gewählt wird. Dabei stehen zwei verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Bei der ersten verwendet man ein Einplanungsschema und führt die Planung mehrmals mit verschiedenen Prioritätsregeln durch¹⁶², bei der zweiten wird die Einplanung mit einem Schema und einer Regel mehrmals durchgeführt, wobei die Prioritätswerte durch einen Zufallsfaktor beeinflusst werden¹⁶³.

¹⁶² Vgl. z.B. für Projekte mit einfacher Ablaufstruktur im Einmodus-Fall Ulusoy/Özdamar (1989), Boctor (1990), Li/Willis (1992).

¹⁶³ Vgl. z.B. Cooper (1976), Drexel/Gruenewald (1993), Slowinski u.a. (1994), Kolisch (1995), S. 96 ff.

3.2.4.2 Prioritätsregeln

Wie bei der Beschreibung der Schemata zur Generierung zulässiger Ressourcenpläne gezeigt wurde, ist die zweite wesentliche Komponente der prioritätsregelbasierten Verfahren die Prioritätsregel an sich. Sie stellt eine Funktion dar, welche jedem Vorgang i einen Wert $v(i)$ zuordnet, auf dessen Basis dann bei der Einplanung gemäß den oben beschriebenen Schemata ein Vorgang aus der Entscheidungsmenge zur Einplanung ausgewählt wird.

In der Literatur findet sich eine hohe Zahl verschiedener mehr oder weniger komplexer Prioritätsregeln¹⁶⁴. Diese Regeln sollen hier nicht alle wiedergegeben, sondern lediglich grob kategorisiert werden. Abhängig von den zum Errechnen des Prioritätswerts eines Vorgangs benötigten Angaben kann man unterscheiden, ob die Regeln auf Daten aus der Zeitplanung, Netzwerkdaten oder Vorgangs- und Ressourcendaten basieren¹⁶⁵. Weiterhin werden Prioritätsregeln, deren Werte für die Vorgänge sich im Verlauf der Einplanung nicht ändern, als statische Regeln und im gegenteiligen Fall als dynamische Regeln bezeichnet¹⁶⁶. Daneben kann man Prioritätsregeln, die sich aus einer Kombination verschiedener Einzelregeln ergeben, als zusammengesetzte Prioritätsregel bezeichnen.

Im folgenden werden wichtige Prioritätsregeln vorgestellt, von denen einige auch in dieser Arbeit untersucht werden. Sie werden traditionell mit englischen Namen bezeichnet und meist mit drei bis fünfbuchstabigen Abkürzungen versehen.

Für Regeln, welche sich auf die Netzwerkstruktur eines Projekts beziehen, ist zu beachten, daß diese nicht für Netzwerke entwickelt wurden, wie sie in dieser Arbeit verwendet

¹⁶⁴ Übersichten über Prioritätsregeln finden sich z.B. in Davis/Patterson (1975), Cooper (1976), Alvarez-Valdes/Tamarit (1989), Kolisch (1996a).

¹⁶⁵ Vgl. Alvarez-Valdes/Tamarit (1989).

¹⁶⁶ Vgl. Kolisch (1995), S. 85.

werden¹⁶⁷, sondern für Vorgangsknotennetze, bei denen die Knoten einen Vorgang beziehungsweise dessen Anfangszeitpunkt abbilden. Für das in dieser Arbeit verwendete allgemeine Netzplanmodell sind diese Regeln daher geeignet anzupassen. Berechnet man beispielsweise die Priorität eines Vorgangs i aufgrund der Regel Most Total Successors (MTS), so muß bei Zugrundeliegen des allgemeinen Netzplanmodells die Anzahl der Aktivitäten j ermittelt werden, deren Knoten t_j^a und t_j^e Nachfolger im weiteren Sinne der Knoten t_i^a und t_i^e sind. Weiterhin ist zu beachten, daß die beschriebenen Regeln für Projekte mit nur einem Durchführungsmodus pro Vorgang entwickelt wurden. Für den Mehrmodus-Fall sind diese daher, soweit möglich, entsprechend anzupassen.

Auf der Netzplanstruktur basierende Prioritätsregeln¹⁶⁸:

- **MIS:** Most Immediate Successors: Diese Regel weist demjenigen Vorgang die höchste Priorität zu, welcher die höchste Anzahl an direkten Nachfolgevorgängen aufweist.

$$v(i) = \left| \left\{ j \mid \left((t_i^\alpha, t_j^\beta), c_{ij}^{\alpha\beta} \right) \in E_c, j \in \{1, \dots, I\}, j \neq i, \alpha, \beta \in \{a, e\} \right\} \right|, \text{extremum} = \max^{169}.$$

- **MTS:** Most Total Successors: Analog zu MIS weist diese Regel dem Vorgang die höchste Priorität zu, welcher die höchste Anzahl an Nachfolgeaktivitäten im weiteren Sinne aufweist.

$$v(i) = \left| \left\{ j \mid L_{ij}^{\alpha\beta} > -\infty, j \in \{1, \dots, I\}, j \neq i, \alpha, \beta \in \{a, e\} \right\} \right|, \text{extremum} = \max.$$

¹⁶⁷ Vgl. Abschnitt 2.2.

¹⁶⁸ Die vorgestellten Regeln sind im folgenden für eine durch die Beziehungen (25) - (45) abgebildete Netzwerkstruktur angegeben.

¹⁶⁹ Die Bewertung eines Pfeils zwischen zwei konkreten Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β , $t_u^\alpha, t_v^\beta \in V$, wird im folgenden allgemein mit $c_{uv}^{\alpha\beta}$ bezeichnet. Bildet der Pfeil eine Mindestabstandsbeziehung der Form

$t_v^\beta - t_u^\alpha \geq c_{uv}^{\alpha\beta}$ ab, so gilt $c_{uv}^{\alpha\beta} = c_{uv}^{\alpha\beta}$, bildet er eine Höchstabstandsbeziehung der Form $t_u^\alpha - t_v^\beta \leq \overline{c_{vu}^{\beta\alpha}}$

ab, so gilt $c_{uv}^{\alpha\beta} = -\overline{c_{vu}^{\beta\alpha}}$.

- **LNRJ:** Least Non Related Jobs: Diese Regel priorisiert denjenigen Vorgang, welcher die höchste Anzahl an verwandten Vorgängen aufweist. Unter verwandten Vorgängen versteht man hierbei die Summe aus Vorgängeraktivitäten und Nachfolgervorgängen im weiteren Sinne.

$$v(i) = \left| \left\{ j \mid L_{ij}^{\alpha\beta} > -\infty \vee L_{ji}^{\beta\alpha} > -\infty, j \in \{1, \dots, I\}, j \neq i, \alpha, \beta \in \{a, e\} \right\} \right|, \text{extremum} = \max .$$

- **LPF:** Longest Path Following: Diese Regel weist dem Vorgang die höchste Priorität zu, welcher die höchste Anzahl von Knoten auf einem längsten Weg zum Projektende aufweist. Diese Zahl soll hier als Level bezeichnet werden.

$$v(i) = \text{Level}(i), \text{extremum} = \max .$$

Auf der Terminplanung basierende Prioritätsregeln¹⁷⁰:

- **LST:** Latest Start Time: Wird diese Regel verwendet, so wählt man zur Einplanung denjenigen Vorgang aus der Entscheidungsmenge, welcher den kleinsten spätesten Anfangszeitpunkt aufweist.

$$v(i) = s_i^a, \text{extremum} = \min .$$

- **LFT:** Latest Finish Time: Analog zur LST - Regel hat hier der Vorgang mit dem kleinsten spätesten Endzeitpunkt die höchste Priorität.

$$v(i) = s_i^e, \text{extremum} = \min .$$

¹⁷⁰ Die vorgestellten Prioritätsregeln wurden für Projekte im Einmodus-Fall entwickelt, daher lassen sich die gesuchten Werte mit relativ geringem Rechenaufwand ermitteln, vgl. die Ausführungen in Abschnitt 2.3.

- **MSLK**: Minimum Slack: Diese Regel weist demjenigen Vorgang die höchste Priorität zu, welcher die kleinste anfangszeitpunktbezogene Gesamtpufferzeit aufweist. Dabei kann man zwischen einer statischen und einer dynamischen Variante unterscheiden. Die statische Variante vergleicht die früheste und die spätestmögliche Anfangszeit, die sich aus der Terminplanung ergeben und kann somit formuliert werden als

$$v(i) = s_i^a - f_i^a, \text{ extremum} = \min.$$

Die dynamische Variante verwendet dagegen anstelle des frühestmöglichen Anfangszeitpunkt aus der Terminplanung die im folgenden mit \tilde{f}_i^a bezeichnete aktualisierte frühestmögliche Anfangszeit, welche sich aus der zeitlichen Lage der bereits eingeplanten Vorgänger des betrachteten Vorgangs sowie den noch zur Verfügung stehenden Ressourcen ergibt.

$$v(i) = s_i^a - \tilde{f}_i^a, \text{ extremum} = \min.$$

Offensichtlich liefert die dynamische MSLK - Regel dabei unter Verwendung des parallelen Einplanungsschemas immer die gleichen Werte wie die LST - Regel, da hier $\tilde{f}_i^a = t$ gilt, wenn t den aktuellen Einplanungszeitpunkt repräsentiert.

- **RSM**: Resource Scheduling Method: Diese Regel vergleicht die Einplanung jeweils zweier Vorgänge i und j aus der Entscheidungsmenge paarweise bezüglich deren Auswirkung auf das frühestmögliche Projektende. Die Entscheidungsmenge enthält dabei die Anfangs- und Endzeitpunkte aller einplanbaren Vorgänge und soll mit M_E bezeichnet werden. Unter der impliziten Annahme, daß der nicht zur Einplanung ausgewählte Vorgang frühestens im Anschluß an den gewählten ausgeführt werden kann, bevorzugt diese Regel diejenige Aktivität, deren Einplanung zu einer geringeren Überschreitung des spätestmöglichen Anfangszeitpunkts der anderen und damit zu einer geringeren Projektverlängerung führt. Befinden sich mehr als zwei Vorgänge in der Entscheidungsmenge, so werden alle Aktivitäten paarweise verglichen. Da die RSM - Regel ursprünglich für das parallele Einplanungsschema entwickelt wurde, muß sie zur analogen Verwendung im seriellen Schema entsprechend angepaßt werden. Formal läßt sie sich damit darstellen als

$$v(i) = \max\left\{0, \tilde{f}_i^a + D_i - s_j^a \mid t_j^e \in M_E, j \neq i\right\}, \text{ extremum} = \min.$$

Auf Dauern und Ressourcenbedarf basierende Prioritätsregeln¹⁷¹:

- **SPT**: Shortest Processing Time: Bei dieser Regel wird der Vorgang mit der kleinsten Vorgangsdauer bevorzugt eingeplant.

$$v(i) = D_i, \text{ extremum} = \min.$$

- **LPT**: Longest Processing Time: Diese Regel stellt das Gegenstück zur SPT - Regel dar. Sie priorisiert den Vorgang mit der längsten Vorgangsdauer.

$$v(i) = D_i, \text{ extremum} = \max.$$

- **GRD**: Greatest Resource Demand: Der Vorgang mit dem größten Produkt aus Dauer und Ressourcenbedarf weist die höchste Priorität auf.

$$v(i) = \left(D_i \cdot \sum_{r=1}^R k_{ir} \right), \text{ extremum} = \max.$$

- **GRPW**: Greatest Rank Positional Weight: Als Erweiterung der LPT - Regel weist diese Regel demjenigen Vorgang die höchste Priorität zu, welcher die größte Summe der Vorgangsdauern aller direkten Nachfolgeraktivitäten sowie des betrachteten Vorgangs selbst aufweist.

$$v(i) = D_i + \sum_{j \text{ mit } ((t_i^\alpha, t_j^\beta), c_{ij}^{\alpha\beta}) \in E_c, j \neq i} (D_j), \text{ extremum} = \max.$$

Als Vergleichsregel zur Bestimmung der Qualität einer Prioritätsregel verwendet man die Regel

- **RAND**: Random: Diese weist jedem Vorgang einen Zufallswert als Priorität zu.

¹⁷¹ Da die vorgestellten Regeln für Projekte im Einmodus-Fall entwickelt wurden, wird hier der Index m_i weggelassen.

Offensichtlich kann man Prioritätsregeln vernachlässigen, welche durchschnittlich zu schlechteren Ergebnissen als die RAND - Regel führen. Andererseits können Regeln, welche weitaus bessere Ergebnisse liefern, als gute Prioritätsregeln angesehen werden.

4 Heuristische Ressourcenplanung

Zur Lösung des zuvor beschriebenen Ressourcenplanungsproblems für die betrachtete Planungssituation werden in diesem Kapitel verschiedene prioritätsregelbasierte heuristische Verfahren vorgestellt. Exakte Algorithmen werden hingegen nicht entwickelt.

Der erste Abschnitt dieses Kapitels charakterisiert die Grundideen, die den in dieser Arbeit vorgestellten Heuristiken zugrunde liegen. Alle Verfahren gehören zur Kategorie der Kontraktionsverfahren. Diese unterteilen die Ressourcenplanung in zwei Schritte, bei denen zunächst eine zulässige Teillösung für jede einzelne Zyklenstruktur gesucht wird. Anschließend betrachtet man diese als neue, kontrahierte Vorgänge und löst das verbleibende Problem.

Im zweiten Teil werden drei verschiedene Verfahrensgrundtypen zur Generierung einer Lösung für das Ressourcenplanungsproblem entwickelt. Jeder von ihnen ist wiederum beliebig mit einem von drei vorgestellten Einplanungsschemata kombinierbar. Diese werden im dritten Abschnitt vorgestellt. Es handelt sich dabei um die bereits in Abschnitt 3.2.4.1 vorgestellten parallelen und seriellen Schemata sowie eine modifizierte Version des seriellen Einplanungsschemas.

Die vorgestellten Verfahren basieren auf der Modellierung einer Projektablaufstruktur mit Hilfe der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Netzwerke. Daher werden im folgenden der Einfachheit halber häufig die äquivalenten Begriffe gleichbedeutend verwendet, beispielsweise Knoten anstelle von Bezugszeitpunkt oder Pfeil anstelle von Abstandsbeziehung.

4.1 Grundideen

Die Ablaufstruktur von Projekten kann zum Auftreten von Zyklenstrukturen innerhalb des zugehörigen Netzwerks führen. Diesen kommt bei der Ressourcenplanung eine besondere Bedeutung zu, da die Ablaufbedingungen, welche durch die Pfeile innerhalb einer Zyklenstruktur repräsentiert werden, die zeitliche Lage der Bezugszeitpunkte zueinander in besonders hohem Maße einschränken. Existiert beispielsweise innerhalb einer Zyklenstruktur ein Zyklus positiver Länge, so kann keine zulässige Lösung generiert werden, da die durch ihn abgebildeten Bedingungen die Einplanung eines Bezugszeitpunkts nach sich selber fordern.

Doch selbst für Zyklenstrukturen ohne Zyklen positiver Länge ist das Ressourcenplanungsproblem nicht unbedingt lösbar. Dies liegt daran, daß aufgrund der Abstandsbeziehungen zwischen jedem Knotenpaar einer Zyklenstruktur ein Höchstabstand einzuhalten ist. Unter Umständen läßt sich keine zulässige Lösung generieren, welche sowohl die Ablaufbedingungen als auch die Ressourcenbeschränkungen erfüllt.

Treten dagegen keine Zyklenstrukturen innerhalb eines Netzwerks auf, so läßt sich nachweislich immer eine zulässige Lösung für das Ressourcenplanungsproblem generieren, solange für jeden Vorgang ein Durchführungsmodus existiert, in welchem sein Ressourcenbedarf die Verfügbarkeit nicht überschreitet¹⁷². Beispielsweise erhält man einen zulässigen Kapazitätsplan, indem man alle Aktivitäten in einem kapazitiv zulässigen Modus nacheinander in der Weise einplant, daß sich zu jedem Zeitpunkt höchstens ein Vorgang in Verrichtung befindet. Es muß dann lediglich darauf geachtet werden, daß bei der Einplanung eines Vorgangs die zu den bereits eingeplanten Vorgängeraktivitäten einzuhaltenden Mindestabstände berücksichtigt werden. Aus dieser Erkenntnis läßt sich weiterhin schlußfolgern, daß das Ressourcenplanungsproblem für ein gegebenes Projekt genau dann lösbar ist, wenn für jede Zyklenstruktur eine zulässige Teillösung generiert

¹⁷² Vgl. z.B. *Gewald u.a. (1972), S. 33, Kolisch (1995), S. 75 ff.*

werden kann und für jeden Vorgang mindestens ein Modus existiert, in welchem die Ressourcenschranken eingehalten werden¹⁷³.

Basierend auf dieser Erkenntnis wurden sogenannte Kontraktionsverfahren entwickelt, welche zunächst versuchen, eine zulässige Lösung für jede einzelne Zyklenstruktur zu generieren¹⁷⁴. Anschließend werden diese auf die soeben eingeplante Weise wie einzelne Vorgänge behandelt, sofern für jede Zyklenstruktur eine zulässige Lösung ermittelt werden konnte. Die relative zeitliche Lage aller Bezugszeitpunkte einer Zyklenstruktur wird anschließend nicht mehr verändert und es wird ein Ressourcenplan für das verbleibende Netzwerk generiert. Wenn für eine oder mehrere Zyklenstrukturen kein zulässiger Teilressourcenplan gefunden werden kann, so bricht das Verfahren ergebnislos ab.

Kontraktionsverfahren haben sich bisher als den direkten Verfahren sowohl bezüglich der Lösungsqualität als auch des Rechenaufwands überlegen gezeigt¹⁷⁵. Daher werden auch in dieser Arbeit nur Kontraktionsverfahren vorgestellt. Deren grundsätzliches Schema sieht folgendermaßen aus:

Algorithmus 2: Kontraktionsverfahren zur Ressourcenplanung

Schritt 1: Überprüfung der Ressourcenschranken:

- Falls der Ressourcenbedarf eines Vorgangs in allen seinen Durchführungsmodi die Ressourcenverfügbarkeit übersteigt:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 2: Ressourcenplanung für alle Zyklenstrukturen:

- Generiere zulässigen Teilressourcenplan für jede Zyklenstruktur.

¹⁷³ Vgl. Zhan (1991), S. 18 f., Brinkmann (1992), S. 58.

¹⁷⁴ Zur Entwicklung dieser Kontraktionsverfahren für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur im Einmodus-Fall vgl. Zhan (1991), S. 28 ff., Brinkmann (1992), S. 58 ff.

¹⁷⁵ Vgl. z.B. Brinkmann (1992), S. 100 ff.

- Falls nicht für jede Zyklusstruktur eine Lösung gefunden wird:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 3: **Ressourcenplanung für das verbleibende Netzwerk:**

- Kontrahiere das Netzwerk und generiere zulässigen Teilressourcenplan für das zyklusstrukturfreie kontrahierte Netzwerk.

Schritt 4: **Ermittlung eines zulässigen Gesamtressourcenplans:**

- Bestimme aus den ermittelten Teilressourcenplänen für die Zyklusstrukturen und das kontrahierte Netzwerk einen zulässigen Gesamtressourcenplan.

Vereinbarungsgemäß sollen im zweiten Schritt des Algorithmus nur Zyklusstrukturen mit mindestens drei Knoten betrachtet werden. Dies liegt darin begründet, daß aufgrund der Pfeile $\left((t_i^a, t_i^e), D_{im_i} \right)$ und $\left((t_i^e, t_i^a), -D_{im_i} \right)$ bereits jeder Vorgang i einen Zyklus mit zwei Knoten bildet. Einzelne Aktivitäten sollen jedoch nicht als Zyklusstruktur behandelt werden, da deren isolierte Einplanung lediglich einer Zuweisung des Durchführungsmodus entsprechen würde. Sie werden daher erst im dritten Schritt des Algorithmus eingeplant.

Als Ergebnis des zweiten Einplanungsschritts des Algorithmus 2 erhält man für jede Zyklusstruktur $Z_l, l=1(1)L$, einen Teilressourcenplan $y'_l = \left(\left(t_p^a \right)_y \mid t_p^a \in V'_l, \left(t_i^a \right)_y \mid t_i^a \in V'_l, \left(t_i^e \right)_y \mid t_i^e \in V'_l, \left(m_i \right)_y \mid t_i^a, t_i^e \in V'_l, \left(t_p^e \right)_y \mid t_p^e \in V'_l \right)$, welcher jedem Vorgang i mit $t_i^a, t_i^e \in V'_l$ ¹⁷⁶, dessen Bezugszeitpunkte also Elemente der Knotenmenge der Zyklusstruktur sind, einen Startzeitpunkt $\left(t_i^a \right)_y$ und einen Endzeitpunkt $\left(t_i^e \right)_y$ auf einer vorläufigen Hilfszeitskala

¹⁷⁶ Aufgrund der zuvor beschriebenen Zyklusbeziehung zwischen den beiden Bezugszeitpunkten eines Vorgangs ist mit dem Anfangszeitpunkt eines Vorgangs immer auch dessen Endzeitpunkt Element einer Zyklusstruktur.

sowie einen festen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ zuweist¹⁷⁷. Außerdem wird den Bezugszeitpunkten t_p^a beziehungsweise t_p^e ein vorläufiger Einplanungszeitpunkt $(t_p^\alpha)_y$ auf der Hilfszeitskala zugeordnet, sofern diese Elemente der Zyklenstruktur sind.

Für die weitere Planung wird gefordert, daß alle Bezugszeitpunkte einer Zyklenstruktur Z_1 auf der Hilfszeitskala zwischen dem Zeitpunkt null und dem Zeitpunkt, welcher dann der Dauer der Zyklenstruktur entspricht, eingeplant werden. Formal sollen also die Beziehungen

$$(103) \quad (t_u^\alpha)_y \geq 0 \quad , \forall t_u^\alpha \in V_1'$$

und

$$(104) \quad \min_{t_u^\alpha \in V_1'} \{(t_u^\alpha)_y\} = 0$$

gelten. Der zeitliche Abstand zwischen dem ersten und dem letzten eingeplanten Knoten einer Zyklenstruktur Z_1 , welcher im folgenden als deren Dauer D_{Z_1} bezeichnet wird, kann nun unter den gegebenen Voraussetzungen dargestellt werden als

$$(105) \quad D_{Z_1} = \max_{t_u^\alpha \in V_1'} \{(t_u^\alpha)_y\}.$$

Damit ein Teilressourcenplan zulässig ist, muß er zunächst alle Ablaufbeziehungen zwischen zwei Knoten der Zyklenstruktur erfüllen. Die Bedingung

¹⁷⁷ Die gestrichenen Zeitgrößen $(t_u^\alpha)_y$ geben dabei vorläufige Einplanungszeitpunkte der betroffenen Bezugszeitpunkte t_u^α an, welche nicht unbedingt mit dem endgültigen Einplanungswert $(t_u^\alpha)_y$ eines ermittelten Ressourcenplans $y = \left((t_p^a)_y, (t_I^a)_y, (t_I^e)_y, (m_I)_y, \dots, (t_I^a)_y, (t_I^e)_y, (m_I)_y, (t_p^e)_y \right)$ übereinstimmen müssen.

$$(106) \quad \left(t_u^{\alpha}\right)_y + c_{uv}^{\alpha\beta} \leq \left(t_v^{\beta}\right)_y, \quad \forall \left(\left(t_u^{\alpha}, t_v^{\beta}\right), c_{uv}^{\alpha\beta}\right) \in E'_{cl}$$

drückt dies aus. Zusätzlich müssen die Ressourcenbeschränkungen in jeder Periode eingehalten werden. Formal ergibt sich diese Bedingung zu

$$(107) \quad \sum_{\substack{i \text{ mit } t_i^a, t_i^e \in V'_1; \\ \left(t_i^a\right)_y < t'; \left(t_i^e\right)_y \geq t'}} \left(k_{i(m_i)_y}\right) \leq K_{Per} \quad , \quad t' = 1(1)D_{Z_1} .$$

Aufgabe des betrachteten Planungsschritts ist es also, einen zulässigen Teilressourcenplan y'_1 für jede Zyklenstruktur Z_1 , $l = 1(1)L$, zu finden, welcher die Bedingungen (103) - (107) erfüllt.

Könnte für jede Zyklenstruktur eine zulässige Teillösung generiert werden, so soll deren Einplanung im dritten Schritt des Algorithmus 2 nicht mehr verändert werden. Die relative Lage aller Bezugszeitpunkte innerhalb einer Zyklenstruktur bleibt also für die weitere Planung unverändert. Man kontrahiert nun jede Zyklenstruktur Z_1 modellhaft zu einem neuen Vorgang mit dem Anfangszeitpunkt $t_{Z_1}^a$, dem Endzeitpunkt $t_{Z_1}^e$, der Dauer D_{Z_1} und einem über seine Vorgangsdauer veränderlichen Ressourcenbedarf. Das Netzwerk N wird kontrahiert, indem dieser neue Vorgang respektive sein Anfangszeitpunkt und sein Endzeitpunkt in das Netzwerk eingefügt und im Gegenzug alle Bezugszeitpunkte der Zyklenstruktur aus dem Netzwerk entfernt werden. Zusätzlich müssen alle betroffenen Ablaufbeziehungen angepaßt werden.

Die neue Knotenmenge des kontrahierten Netzwerks $N' = (V', E'_c)$ kann zunächst dargestellt werden als

$$(108) \quad V' = \left(V \setminus \left(\bigcup_{l=1}^L V'_l \right) \right) \cup \left(\bigcup_{l=1}^L \{ t_{Z_l}^a, t_{Z_l}^e \} \right).$$

Zur Anpassung der Pfeilmenge des kontrahierten Netzwerks werden wie bei echten Vorgängen die Pfeile $\left(\left(t_{Z_1}^a, t_{Z_1}^e\right), D_{Z_1}\right)$ und $\left(\left(t_{Z_1}^e, t_{Z_1}^a\right), -D_{Z_1}\right)$ eingefügt, welche die

Beziehung $t_{Z_1}^a + D_{Z_1} = t_{Z_1}^e$ abbilden. Die Menge dieser dem Netzwerk einzufügenden Pfeile, die mit E_c^{1+} bezeichnet werden soll, kann formal dargestellt werden durch

$$(109) \quad E_c^{1+} = \bigcup_{l=1}^L \left\{ \left((t_{Z_1}^a, t_{Z_1}^e), D_{Z_1} \right), \left((t_{Z_1}^e, t_{Z_1}^a), -D_{Z_1} \right) \right\}.$$

Anschließend entfernt man alle Pfeile zwischen jeweils zwei Knoten einer Zyklenstruktur, da die durch sie ausgedrückten Abstandsbedingungen bereits durch deren Einplanung erfüllt wurden. Die Menge E_c^{1-} dieser zu entfernenden Pfeile wird dargestellt durch

$$(110) \quad E_c^{1-} = \bigcup_{l=1}^L \left\{ \left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_c \mid t_u^\alpha, t_v^\beta \in V_l' \right\}.$$

Zuletzt müssen noch alle Ablaufbeziehungen zwischen jeweils zwei Knoten angepaßt werden, von denen mindestens einer Teil einer Zyklenstruktur ist, da die betroffenen Knoten nicht mehr Elemente der Knotenmenge des kontrahierten Netzwerks sind. Aufgrund der Festlegung der relativen zeitlichen Lage aller Knoten einer Zyklenstruktur zueinander kann man jedoch ohne großen Aufwand und ohne Informationsverlust alle Pfeile so modifizieren, daß sie sich an Stelle des betreffenden Knoten beliebig entweder auf den Anfangsknoten oder den Endknoten der jeweiligen Zyklenstruktur beziehen. Dabei müssen auch die Bewertungen der Pfeile entsprechend verändert werden.

In dieser Arbeit wird festgelegt, daß alle Pfeile, welche von einem Knoten t_u^α einer Zyklenstruktur Z_1 ausgehen, dahingehend modifiziert werden, daß sie im folgenden vom Startknoten $t_{Z_1}^a$ der Zyklenstruktur ausgehen. Die Bewertung dieses Pfeiles muß entsprechend um den Einplanungswert $(t_u^\alpha)_y$ aus der Ressourcenplanung der Zyklenstruktur erhöht werden. Pfeile, welche in einem Knoten t_v^β einer Zyklenstruktur Z_m enden, sollen dagegen überführt werden in Pfeile, welche in deren Endknoten $t_{Z_m}^e$ enden. Die Bewertung eines solchen Pfeils muß daher um den Wert $(D_{Z_m} - (t_v^\beta)_y)$ erhöht werden. Ein Pfeil zwischen zwei Knoten t_u^α und t_v^β zweier verschiedener Zyklenstrukturen wird

analog in einen Pfeil vom Startknoten $t_{Z_1}^a$ der ersten Zyklenstruktur Z_1 zum Endknoten $t_{Z_m}^e$ der zweiten Zyklenstruktur Z_m überführt, die Bewertung des Pfeils muß hier um den Wert $\left((t_u^{\alpha})_y + D_{Z_m} - (t_v^{\beta})_y \right)$ erhöht werden. Formal wird zunächst die Menge E_c^{2-} aller Pfeile zwischen zwei Bezugszeitpunkten, von denen mindestens einer Element einer Zyklenstruktur ist, aus der Pfeilmenge entfernt und anschließend die Menge E_c^{2+} aller modifizierten Pfeile der Pfeilmenge zugefügt. Die Menge E_c^{2-} kann zu

$$(111) \quad E_c^{2-} = \left(\bigcup_{l=1}^L \left\{ \left((t_u^{\alpha}, t_v^{\beta}), c_{uv}^{\alpha\beta} \right), \left((t_v^{\beta}, t_u^{\alpha}), c_{vu}^{\beta\alpha} \right) \in E_c \mid t_u^{\alpha} \in V_l', t_v^{\beta} \in V \setminus V_l' \right\} \right)$$

und die Menge E_c^{2+} zu

$$(112) \quad E_c^{2+} = \left(\bigcup_{l=1}^L \left\{ \left((t_{Z_1}^a, t_v^{\beta}), c_{uv}^{\alpha\beta} + (t_u^{\alpha})_y \right) \mid \left((t_u^{\alpha}, t_v^{\beta}), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_c, t_u^{\alpha} \in V_l', t_v^{\beta} \in V' \right\} \right) \cup \\ \left(\bigcup_{l=1}^L \left\{ \left((t_u^{\alpha}, t_{Z_1}^e), c_{uv}^{\alpha\beta} + D_{Z_1} - (t_v^{\beta})_y \right) \mid \left((t_u^{\alpha}, t_v^{\beta}), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_c, t_u^{\alpha} \in V', t_v^{\beta} \in V_l' \right\} \right) \cup \\ \left(\bigcup_{l=1}^L \bigcup_{m=1}^L \left\{ \left((t_{Z_1}^a, t_{Z_m}^e), c_{uv}^{\alpha\beta} + (t_u^{\alpha})_y + D_{Z_m} - (t_v^{\beta})_y \right) \mid \left((t_u^{\alpha}, t_v^{\beta}), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_c, \right. \right. \\ \left. \left. t_u^{\alpha} \in V_l', t_v^{\beta} \in V_m', l \neq m \right\} \right)$$

bestimmt werden. Die modifizierte Pfeilmenge E_c' des kontrahierten Netzwerks $N' = (V', E_c')$ ergibt sich insgesamt zu

$$(113) \quad E_c' = \left(E_c \setminus (E_c^{1-} \cup E_c^{2-}) \right) \cup \left(E_c^{1+} \cup E_c^{2+} \right).$$

Sollten durch die beschriebene Veränderung der Pfeilmenge mehrere Pfeile zwischen den gleichen Knoten auftreten, so gelten analog die Aussagen aus Abschnitt 2.1.3.3. Es wird wiederum nur die dominante Ablaufbeziehung berücksichtigt.

Für das kontrahierte Netzwerk N' wird nun im dritten Planungsschritt des Algorithmus 2 ein Teilressourcenplan $y' = \left((t'_p{}^a)_y \mid t_p^a \in V', (t'_i{}^a)_y \mid t_i^a \in V', (t'_i{}^e)_y \mid t_i^e \in V', (m_i)_y \mid t_i^a, t_i^e \in V', (t'_p{}^e)_y \mid t_p^e \in V', (t'_{Z_1}{}^a)_y \mid l=1(1)L, (t'_{Z_1}{}^e)_y \mid l=1(1)L \right)$ ermittelt, welcher jedem Vorgang i mit $t_i^a, t_i^e \in V'$ einen Startzeitpunkt $(t'_i{}^a)_y$, einen Endzeitpunkt $(t'_i{}^e)_y$ sowie einen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ und jeder kontrahierten Zyklenstruktur $Z_l, l=1(1)L$ einen Startzeitpunkt $(t'_{Z_l}{}^a)_y$ und einen Endzeitpunkt $(t'_{Z_l}{}^e)_y$ zuweist. Außerdem wird den Bezugszeitpunkten t_p^a beziehungsweise t_p^e ein Einplanungszeitpunkt $(t'_p{}^\alpha)_y$ zugeordnet, sofern diese Elemente des kontrahierten Netzwerks sind. Analog zu den Bedingungen (103) und (104) sollen nun die Bedingungen

$$(114) \quad (t'_u{}^\alpha)_y \geq 0, \forall t_u^\alpha \in V'$$

und

$$(115) \quad \min_{t_u^\alpha \in V'} \{(t'_u{}^\alpha)_y\} = 0$$

gelten. Dadurch wird das Einhalten der Bedingung (10) $t_p^a = 0$ auch für den Fall sichergestellt, daß der Projektbeginn t_p^a nicht Element der Knotenmenge V' des kontrahierten Netzwerks N' ist.

Die Einhaltung aller innerhalb des kontrahierten Netzwerks auftretenden Ablaufbedingungen wird durch die Bedingung

$$(116) \quad (t'_u{}^\alpha)_y + c_{uv}{}^{\alpha\beta} \leq (t'_v{}^\beta)_y, \forall ((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}{}^{\alpha\beta}) \in E_c'$$

und die Einhaltung der Ressourcenschranken in jeder Periode durch die Bedingung

$$(117) \quad \left(\sum_{\substack{i \text{ mit } t_i^a, t_i^e \in V'; \\ (t_i^a)_y < t'; (t_i^e)_y \geq t'}} \left(k_{i(m_i)_y} \right) \right) + \sum_{l=1}^L \left(\sum_{\substack{i \text{ mit } t_i^a, t_i^e \in V'_l; \\ (t_{Z_l}^a)_y + (t_i^a)_y < t'; (t_{Z_l}^a)_y + (t_i^e)_y \geq t'}} \left(k_{i(m_i)_y} \right) \right) \leq K_{\text{Per}},$$

$$t' = 1(1) \left(\max_{t_u^\alpha \in V'} \left\{ (t_u^\alpha)_y \right\} \right)$$

ausgedrückt. Aus diesem Teilressourcenplan y' sowie den einzelnen Teillösungen y'_l für die Zyklenstrukturen Z_l , $l=1(1)L$, läßt sich nun ein endgültiger Gesamtressourcenplan $y = \left((t_P^a)_y, (t_I^a)_y, (t_I^e)_y, (m_I)_y, \dots, (t_I^a)_y, (t_I^e)_y, (m_I)_y, (t_P^e)_y \right)$ bestimmen, welcher durch die verwendete Heuristik generiert wurde. Die endgültigen Einplanungswerte für Knoten aus Zyklenstrukturen ergeben sich dabei durch Addition des Planungswerts des Zyklenstrukturstartknotens und desjenigen des betreffenden Knotens aus der Ressourcenplanung der Zyklenstruktur. Für Knoten, welche nicht Element einer Zyklenstruktur sind, sind die Werte aus der Einplanung des kontrahierten Netzwerks bereits die endgültigen Einplanungswerte. Die Durchführungsmodi der einzelnen Vorgänge müssen ebenfalls nicht weiter angepaßt werden. Es gilt die Beziehung

$$(118) \quad (t_u^\alpha)_y = \begin{cases} (t_{Z_l}^a)_y + (t_u^\alpha)_y, & \forall t_u^\alpha \in V'_l, l=1(1)L \\ (t_u^\alpha)_y, & \forall t_u^\alpha \in V \setminus \left(\bigcup_{l=1}^L V'_l \right) \end{cases}.$$

Die prinzipielle Vorgehensweise der Kontraktionsverfahren soll anhand eines einfachen Beispiels verdeutlicht werden.

Beispiel 3:

Gegeben sei ein Projekt mit $I=3$ Vorgängen. Jeder Vorgang weist zwei Durchführungsmodi auf. Die Vorgangsdauern sowie Ressourcenbedarfe sind in Tabelle 1 angegeben. Zur Durchführung des Projekts steht eine erneuerbare Ressource mit $K_{\text{Per}} = 10$ zur Verfügung. Die einzuhaltenden Ablaufbedingungen sind in Abbildung 4 dargestellt.

	D_{i1}	k_{i1}	D_{i2}	k_{i2}
Vorgang i=1	3	5	5	2
Vorgang i=2	2	6	4	3
Vorgang i=3	3	5	4	3

Tabelle 2: Vorgangsdauern und Ressourcenbedarfe für Beispiel 3

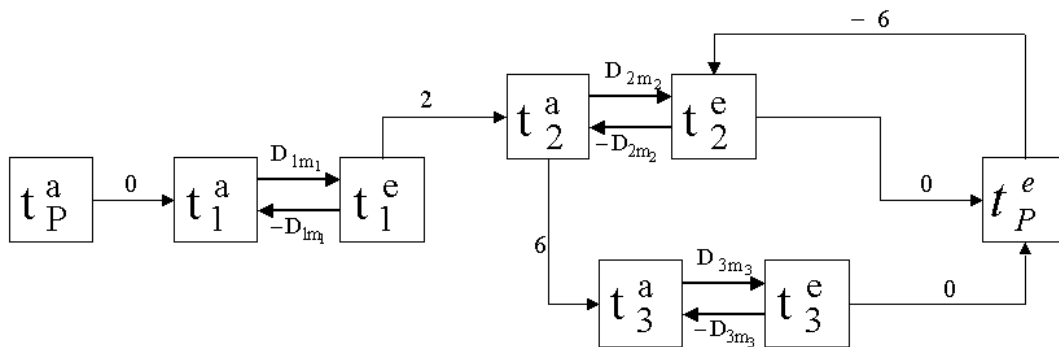


Abbildung 4: Netzwerkstruktur für das in Beispiel 3 gegebene Projekt¹⁷⁸

Im ersten Schritt des Algorithmus 2 wird die prinzipielle Durchführbarkeit der Vorgänge überprüft. Da für jeden Vorgang mindestens ein Modus existiert, für den der Ressourcenbedarf nicht größer als deren Verfügbarkeit ist, kann man mit dem zweiten Schritt fortfahren. In diesem wird eine Teillösung für die einzige Zyklenstruktur $Z_1 = (V'_1, E'_{c1})$ mit $V'_1 = \{t_2^a, t_2^e, t_3^a, t_3^e, t_P^e\}$ gesucht. Als zulässige Teillösung soll beispielsweise $y'_1 = ((t_2^a)_y, (t_2^e)_y, (m_2)_y, (t_3^a)_y, (t_3^e)_y, (m_3)_y, (t_P^e)_y) = (0, 4, 2, 6, 9, 1, 9)$ ermittelt werden. Diese Teillösung berücksichtigt alle Ablaufbeziehungen innerhalb der Zyklenstruktur sowie die beschränkte Ressourcenverfügbarkeit. Es ergibt sich der in

¹⁷⁸ Die Pfeile $((t_P^a, t_2^a), 0)$, $((t_P^a, t_3^a), 0)$ und $((t_1^e, t_P^e), 0)$ sind in der Abbildung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht angegeben, da die Einhaltung der durch sie ausgedrückten Abstandsbedingungen bereits durch die anderen Reihenfolgebeziehungen sichergestellt wird.

Abbildung 5 dargestellte Ressourcenbedarf auf der Hilfszeitskala über die Dauer $D_{Z_1} = 9$ der Zyklenstruktur Z_1 .

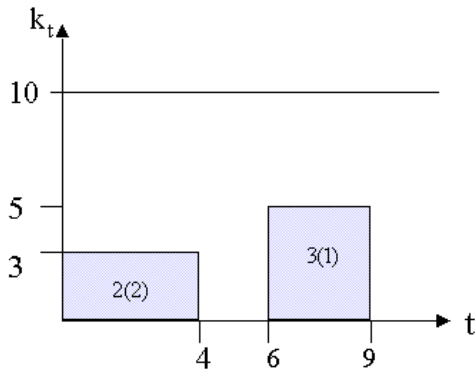


Abbildung 5: Ressourcenbedarf der eingeplanten Zyklenstruktur¹⁷⁹

Im dritten Schritt des Algorithmus wird nun eine zulässige Teillösung ermittelt für das kontrahierte Netzwerk $N' = (V', E'_c)$ mit $V' = \{t_P^a, t_1^a, t_1^e, t_{Z_1}^a, t_{Z_1}^e\}$, dessen Struktur in Abbildung 6 abgebildet ist. Eine zulässige Teillösung wäre beispielsweise

$$y' = \left((t_P^a)_y, (t_1^a)_y, (t_1^e)_y, (m_1)_y, (t_{Z_1}^a)_y, (t_{Z_1}^e)_y \right) = (0, 0, 3, 1, 5, 14)$$

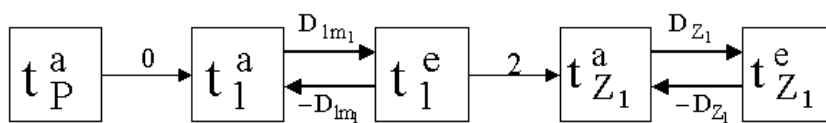


Abbildung 6: Netzwerkstruktur des kontrahierten Netzwerks in Beispiel 3

In Schritt 4 des Algorithmus wird nun mit Hilfe der Beziehung (118) aus den ermittelten Teillösungen y'_1 und y' ein zulässiger Gesamtressourcenplan bestimmt. Dieser lautet für

¹⁷⁹ Die Werte in den grau hinterlegten Kästchen bezeichnen dabei die für die Ressourcenbelastung verantwortlichen Vorgänge und die Werte in Klammern deren Durchführungsmodus.

das dargestellte Beispiel $y = \left((t_p^a)_y, (t_1^a)_y, (t_1^e)_y, (m_1)_y, (t_2^a)_y, (t_2^e)_y, (m_2)_y, (t_3^a)_y, (t_3^e)_y, (m_3)_y, (t_p^e)_y \right) = (0,0,3,1,5,9,2,11,14,1,14)$.

Damit ist das Verfahren abgeschlossen und es wurde ein zulässiger Kapazitätsplan ermittelt.

Zur Generierung der Teillösungen y'_l , $l=1(1)L$, und y' in den Schritten 2 und 3 des Algorithmus 2 verwendet man im bekannten Einmodus-Fall eines der vorhandenen Einplanungsschemata in Verbindung mit einer geeigneten Prioritätsregel¹⁸⁰. Für den in dieser Arbeit betrachteten Mehrmodus-Fall wird zusätzlich eine dritte Komponente benötigt, welche den Durchführungsmodus jedes einzelnen Vorgangs festlegt.

Bezüglich dieser beiden Auswahlkomponenten für die Priorisierung der Vorgänge und die Bestimmung der Durchführungsmodi kommen nun mehrere Möglichkeiten in Betracht. Es werden im folgenden drei unterschiedliche Lösungsgrundtypen vorgestellt, welche sich hauptsächlich in der Reihenfolge der Bestimmung des Durchführungsmodus eines Vorgangs und seiner Auswahl zur Einplanung unterscheiden.

Beim Lösungsgrundtyp I bestimmt man vor Beginn der zeitlichen Einplanung aufgrund bereits vorliegender Informationen, wie beispielsweise Vorgangsdauer oder

¹⁸⁰ Vgl. Abschnitt 3.2.4.

Ressourcenbedarf, für jeden Vorgang einen Modus zur Durchführung¹⁸¹. Dadurch vereinfacht sich das verbleibende Problem auf den Einmodus-Fall. Dies hat auch den Vorteil, daß die für das Errechnen der Prioritätswerte von vielen Regeln benötigten Ergebnisse der Zeitplanung exakt bestimmt werden können.

Bei der Ressourcenplanung vom Typ II wird die Reihenfolge umgedreht. Hier wird der Durchführungsmodus eines Vorgangs erst dann bestimmt, wenn er bereits zur Einplanung ausgewählt wurde¹⁸². Der Vorteil dieser Verfahren ist, daß der Modus einer Aktivität nun besser in Abhängigkeit von der konkreten Einplanungssituation bestimmt werden kann.

¹⁸¹ Ein dem Grundtyp I ähnlicher Ansatz wurde bereits in der Literatur für eine Projektplanungssituation mit einfacher Ablaufstruktur, mindestens zwei nicht erneuerbaren und weiteren erneuerbaren Ressourcen diskutiert, vgl. Kolisch(1995), Kolisch/Drexel (1997). Für diese Planungssituation ist die Frage der Existenz einer bezüglich der Einhaltung der Kapazitätsschranken aller nicht erneuerbaren Ressourcen zulässigen Durchführungsmodi-Kombination NP-vollständig. Der Ansatz sucht daher zunächst eine zulässige Modi-Kombination mit Hilfe einer Prioritätsregel, welche sich am relativen Ressourcenverbrauch der Vorgänge an den nicht erneuerbaren Ressourcenverfügbarkeiten orientiert. Wird eine zulässige Lösung für dieses Modus-Zuweisungsproblem ermittelt, so wird anschließend mit Hilfe eines lokalen Suchverfahrens versucht, bessere zulässige Lösungen zu finden. Schließlich wird das Kapazitätsplanungsproblem für den verbleibenden Einmodus-Fall mit Hilfe eines Einplanungsschemas gelöst. Für die soeben beschriebene Planungssituation ist die Bestimmung einer bezüglich der nicht erneuerbaren Ressourcenverfügbarkeiten zulässigen Durchführungsmodi-Kombination von essentieller Bedeutung. Damit unterscheidet sie sich deutlich von der in Abschnitt 2.1 zugrundegelegten Situation, bei der keine nicht erneuerbaren Kapazitäten auftreten. Für Planungssituationen, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, wird es dagegen nötig sein, Durchführungsmodi-Kombinationen zu ermitteln, welche die Einhaltung der Ablaufbedingungen der komplexen Projektablaufstruktur ermöglichen.

¹⁸² Vgl. Boctor (1993), Slowinski u.a. (1994). Dieser Verfahrensgrundtyp II wurde für eine Projektplanungssituation mit einfacher Ablaufstruktur und mehreren nicht erneuerbaren Ressourcen entwickelt. Um das Terminplanungsproblem lösen zu können, wird angenommen, daß nur Ablaufbeziehungen der Form $t_j^a - t_i^e \geq c_{ij}^{ea}$ (2) auftreten. Für diesen Fall können die gesuchten Werte exakt ermittelt werden, wenn man für jeden Vorgang den Durchführungsmodus mit der kleinsten Dauer wählt. Die Aktivitäten werden bei diesem Ansatz mit Hilfe eines parallelen Schemas eingeplant. Bezüglich der Projektdauerminimierung als Zielkriterium werden die besten Ergebnisse erzielt, wenn dem jeweils einzuplanenden Vorgang derjenige kapazitiv zulässige Modus mit der kürzesten Vorgangsdauer zugewiesen wird.

Allerdings kann die Zeitplanung bei diesem Verfahrensgrundtyp für die in dieser Arbeit zugrundegelegte Planungssituation nicht mit vertretbarem Aufwand exakt durchgeführt werden¹⁸³.

Schließlich wählt man bei den Ressourcenplanungsverfahren des in dieser Arbeit entwickelten Lösungsgrundtyps III einen Vorgang und einen Durchführungsmodus simultan aus allen möglichen Vorgangs-Modus-Kombinationen aus.

Alle drei Grundtypen sind beliebig mit einem der drei in dieser Arbeit beschriebenen Einplanungsschemata kombinierbar. Neben den beiden bekannten Schemata, nämlich dem parallelen und dem seriellen Schema, wird im folgenden noch eine modifizierte Version des seriellen Schemas entwickelt, welche nicht komplette Vorgänge, sondern einzelne Bezugszeitpunkte einplant¹⁸⁴. Eine Kombination aus Lösungsgrundtyp und Einplanungsschema sowie einer für diese Kombination geeigneten Prioritätsregel und einer Regel zur Modusbestimmung stellt dann ein konkretes Lösungsverfahren dar.

¹⁸³ Vgl. Abschnitt 2.3.3.

¹⁸⁴ Vgl. Abschnitt 4.3.

4.2 Grundtypen der prioritätsregelbasierten Heuristiken

Die drei in dieser Arbeit beschriebenen Verfahrensgrundtypen zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems wurden zuvor bereits kurz skizziert. Alle drei Typen stellen dabei Kontraktionsverfahren gemäß Algorithmus 2 dar. Da sich die unterschiedliche Reihenfolge der Bestimmung von Durchführungsmodus und Einplanungspriorität der einzuplanenden Vorgänge jedoch auch auf andere Schritte des Algorithmus auswirkt, wird nun jeder Grundtyp einzeln dargestellt.

4.2.1 Grundtyp I

4.2.1.1 Verfahren

Die einfachste Möglichkeit, eine Lösung y für das betrachtete Ressourcenplanungsproblem im Mehrmodus-Fall zu generieren, stellt der erste hier vorgestellte Verfahrensgrundtyp dar. Bei den Verfahren dieses Typ I wird jedem Vorgang i , $i=1(1)I$, vor Beginn der zeitlichen Einplanung ein Durchführungsmodus $(m_i)_y$ zugewiesen. Diese Zuweisung geschieht dabei mit Hilfe von Regeln, welche auf bereits vor der Einplanung vorhandenen Informationen basieren¹⁸⁵. Die Durchführungsmodi der Vorgänge sind damit für den weiteren Verlauf der Planung festgelegt und werden nicht mehr verändert. Dadurch reduziert sich das verbleibende Ressourcenplanungsproblem auf den bekannten Einmodus-Fall. Die einzelnen Planungsschritte der Verfahren vom Grundtyp I sind in Algorithmus 3 dargestellt.

¹⁸⁵ Geeignete und in dieser Arbeit untersuchte Regeln werden in Abschnitt 4.2.1.2.1 dargestellt.

Algorithmus 3: Verfahrensgrundtyp I zur Ressourcenplanung**Schritt 1: Bestimmung des Durchführungsmodus und Abbruch bei
Überschreitung des Ressourcenschranken:**

- Bestimme $(m_i)_y$, $i=1(1)L$.
- Falls $k_{i(m_i)_y} > K_{\text{Per}}$ für mindestens ein $i \in \{1, \dots, L\}$:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 2: Zeitplanung für alle Zyklenstrukturen, Abbruch bei positiven Zyklen:

- Führe für jede Zyklenstruktur Z_l , $l=1(1)L$, eine Zeitplanung durch.
- Falls $L_{\text{uu}}^{\alpha\alpha} > 0$ für mindestens ein $t_u^\alpha \in V_l'$, $l \in \{1, \dots, L\}$:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 3: Ressourcenplanung für alle Zyklenstrukturen:

- Bestimme für jede Zyklenstruktur Z_l , $l=1(1)L$, einen bezüglich der Bedingungen (103) - (107) zulässigen Teilressourcenplan y_l' , welcher jedem Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in V_l'$ einen vorläufigen Einplanungszeitpunkt $(t_u^{\alpha'})_y$ zuweist.
- Falls für mindestens eine Zyklenstruktur keine zulässige Lösung gefunden werden kann:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

**Schritt 4: Kontraktion des Netzwerks, Zeitplanung für das kontrahierte
Netzwerk:**

- Kontrahiere das Netzwerk. Führe für das kontrahierte Netzwerk N' eine Zeitplanung durch.

Schritt 5: Ressourcenplanung für das kontrahierte Netzwerk:

- Bestimme für das kontrahierte Netzwerk N' einen bezüglich der Bedingungen (114) - (117) zulässigen Teilressourcenplan y' , welcher jedem Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in V'$ einen vorläufigen Einplanungszeitpunkt $(t_u^{\alpha'})_y$ zuweist.

Schritt 6: **Bestimmung des Gesamtressourcenplans:**

- Bestimme den ermittelten Gesamtressourcenplan y mit Hilfe der Beziehung (118).

Vor Ermittlung der Teilressourcenpläne für die Zyklenstrukturen in Schritt 3 werden zunächst im zweiten Schritt die von einigen Prioritätsregeln benötigten Werte aus der Terminplanung mit Hilfe der Beziehungen (73) - (75) bestimmt¹⁸⁶. Diese können aufgrund der bereits festgelegten Vorgangsdauern wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben exakt berechnet werden. Die zur Bestimmung sowohl dieser Werte als auch zunächst der Zyklenstrukturen selbst benötigten Längen der längsten Wege innerhalb des Netzwerks N werden mit Hilfe des Algorithmus 1 ermittelt. Existiert innerhalb des Netzwerks ein Zyklus positiver Länge, so bricht das Verfahren aufgrund der Bedingung (69) ergebnislos ab.

Die gesuchten Teilressourcenpläne y'_1 werden durch eines von drei zur Verfügung stehenden Einplanungsschemata erarbeitet¹⁸⁷. Wird für mindestens eine Zyklenstruktur kein Plan gefunden, welcher die Zulässigkeitsbedingungen (103) - (107) erfüllt, so bricht das Verfahren wiederum ab.

Andernfalls wird das Netzwerk wie in Abschnitt 4.1 beschrieben kontrahiert und für das kontrahierte Netzwerk ein zulässiger Teilressourcenplan ermittelt. Die für die Einplanung benötigten Werte aus der Terminplanung werden wiederum mit Hilfe der Beziehungen (73) - (75) ermittelt. Die dafür benötigten längsten Wege beziehen sich nun auf das kontrahierte Netzwerk N' und müssen zunächst mit Hilfe des Algorithmus 1 ermittelt werden.

¹⁸⁶ Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Kontraktionsverfahren wird bei jedem Teilschritt eine Knotenmenge eingeplant, die in der Regel nicht mit der Knotenmenge V des gesamten Netzwerks N übereinstimmt. Aus diesem Grund ist zu beachten, daß bei Prioritätsregeln, welche auf Ergebnissen der Terminplanung basieren, anstelle der Werte f_u^α bzw. s_u^α die Werte $f_u'^\alpha$ bzw. $s_u'^\alpha$ verwendet werden müssen.

¹⁸⁷ Die Einplanungsschemata werden in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

Anschließend wird der gesuchte Teilressourcenplan y' mit Hilfe eines Einplanungsschemas ermittelt und der endgültige Ressourcenplan y durch die Beziehung (118) bestimmt.

4.2.1.2 Regeln für die Verfahren vom Grundtyp I

4.2.1.2.1 Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi

Zur Bestimmung der Durchführungsmodi der Vorgänge im ersten Schritt des Algorithmus 3 benötigt man festgelegte Regeln. Diese können nur auf Informationen basieren, welche bereits vor Einplanungsbeginn bekannt sind. Beispiele stellen die Vorgangsdauern, die Ressourcenbedarfe oder die Vorgangskosten dar, welche jeweils modusabhängig sind. Eine geeignete Regel weist jedem Modus m_i eines betrachteten Vorgangs i einen Wert $v(m_i)$ zu, auf dessen Basis dann der bestmögliche Modus ausgewählt werden kann. In dieser Arbeit werden die folgenden Regeln vorgestellt und untersucht. Um sie besser von den Prioritätsregeln unterscheiden zu können, werden diese mit deutschen Namen bezeichnet.

- **KVD:** Kleinste Vorgangsdauer¹⁸⁸: Es wird der kapazitiv zulässige Modus gewählt, welcher mit der kürzesten Vorgangsdauer verbunden ist.

$$v(m_i) = D_{im_i}, \text{ extremum} = \min.$$
- **KRB:** Kleinster Ressourcenbedarf: Diese Regel wählt denjenigen Modus aus, bei dem die geringste Anzahl an Ressourceneinheiten benötigt werden.

$$v(m_i) = k_{im_i}, \text{ extremum} = \min.$$
- **KRV:** Kleinster Ressourcenverbrauch: Im Gegensatz zur KRB - Regel wählt diese Regel den kapazitiv zulässigen Modus aus, welcher das geringste Produkt aus Ressourcenbedarf und Vorgangsdauer aufweist.

$$v(m_i) = D_{im_i} \cdot k_{im_i}, \text{ extremum} = \min.$$

¹⁸⁸ Zur KVD - Regel vgl. Boctor (1993).

- **KDV:** Kleinste direkte Vorgangskosten: Derjenige kapazitiv zulässige Modus, der zu den geringsten direkten Vorgangskosten führt, wird gewählt.

$$v(m_i) = C_{Vim_i}, \text{ extremum} = \min.$$

- **KVK:** Kleinste vorgangsbedingte Kosten: Bei dieser Regel wird der kapazitiv zulässige Modus gewählt, welcher zu der geringsten Summe von direkten Vorgangskosten und Ressourcenbereitstellungskosten führt. Die Anpassungskosten werden dabei nicht berücksichtigt, da diese vorrangig von der Einplanung anderer Vorgänge abhängen. Die Belastungskosten können ebenfalls nicht exakt berechnet werden. Aus diesem Grund behilft man sich mit einer Näherung, bei der angenommen wird, daß nur der betrachtete Vorgang im gewählten Modus ausgeführt wird.

$$v(m_i) = C_{Vim_i} + \left(D_{im_i} \cdot C_{Rt}^B(k_{im_i}) \right), \text{ extremum} = \min.$$

- **ZUFALL:** Zum Vergleich der Regeln wird bei einer Regel der Modus zufällig bestimmt.

Wie bei allen untersuchten Regeln dieser Arbeit wird zwischen mehreren Durchführungsmodi mit der gleichen Bewertung $v(m_i)$ zufällig ausgewählt.

4.2.1.2.2 Prioritätsregeln

Die wichtigsten Prioritätsregeln wurden bereits weiter oben vorgestellt¹⁸⁹. Da das Ressourcenplanungsproblem durch die frühzeitige Bestimmung der Durchführungsmodi faktisch im Einmodus-Fall behandelt wird, können prinzipiell alle diese Regeln verwendet werden. In dieser Arbeit werden jedoch aus dieser Auswahl nur diejenigen Regeln untersucht, welche sich bei früheren Untersuchungen für den Einmodus-Fall als besonders effektiv erwiesen haben¹⁹⁰. Dies sind die Regeln LST, LFT, RSM, MSLK, LPF, MTS sowie GRPW. Zum Vergleich wird zusätzlich die RAND - Regel betrachtet. Dabei ist zu

¹⁸⁹ Vgl. Abschnitt 3.2.4.2.

¹⁹⁰ Vgl. z.B. Davis/Patterson (1975), Alvarez-Valdes/Tamarit (1989), Boctor (1990), Kolisch (1995), S. 101 ff.

beachten, daß alle diese Regeln in der Lage sind, sowohl Vorgänge als auch kontrahierte Zyklenstrukturen zu bewerten. Sie sind also alle sowohl für die Einplanung der einzelnen Zyklenstrukturen als auch des kontrahierten Netzwerks geeignet.

4.2.2 Grundtyp II

4.2.2.1 Verfahren

Bei den Verfahren vom Grundtyp I kann man, wie oben beschrieben, im Planungsverlauf den Durchführungsmodus eines Vorgangs aktuellen Bedürfnissen nicht anpassen. Die Idee, daß die kurzfristige Festlegung des Modus eines Vorgangs aufgrund der Möglichkeit, nun besser auf die konkrete Einplanungssituation eingehen zu können, zu besseren Ergebnissen führen könnte, bildet die Grundlage der Verfahren vom Grundtyp II. Da dann jedoch die Ablaufbeziehungen zwischen den Startzeitpunkten und Endzeitpunkten der Vorgänge bis zur Einplanung nicht bekannt sind, müssen die bestehenden Ansätze, insbesondere im Bereich der Zeitplanung, modifiziert werden. Die grundsätzlichen Abläufe der Verfahren vom Grundtyp II werden nun im Algorithmus 4 beschrieben.

Algorithmus 4: Verfahrensgrundtyp II zur Ressourcenplanung

Schritt 1: **Überprüfung der Ressourcenschranken:**

- Falls $k_{im_i} > K_{Per}$ für alle Durchführungsmodi $m_i = 1(1)M_i$ mindestens eines Vorgangs $i \in \{1, \dots, I\}$:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 2: **Näherungsweise Zeitplanung für alle Zyklenstrukturen, Abbruch bei positiven Zyklen:**

- Führe für jede Zyklenstruktur Z_l , $l=1(1)L$, eine näherungsweise Zeitplanung für das auf die im Abschnitt 2.3.3 beschriebene Weise veränderte Netzwerk durch.
- Falls $L_{uu}^{\alpha\alpha} > 0$ für mindestens ein $t_u^\alpha \in V'_l$, $l \in \{1, \dots, L\}$:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 3: **Ressourcenplanung für alle Zyklenstrukturen:**

- Bestimme für jede Zyklenstruktur $Z_l, l=1(1)L$, einen bezüglich der Bedingungen (103) - (107) zulässigen Teilressourcenplan y'_l , welcher jedem Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in V'_l$ einen vorläufigen Einplanungszeitpunkt $(t'_u{}^\alpha)_y$ und jedem Vorgang i mit $t_i^a, t_i^e \in V'_l$ einen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ zuweist. Bestimme den Modus $(m_i)_y$ direkt nach der Auswahl des Vorgangs i zur Einplanung und vor der Festlegung der Einplanungszeitpunkte $(t'_i{}^a)_y$ und $(t'_i{}^e)_y$.
- Falls für mindestens eine Zyklenstruktur keine zulässige Lösung gefunden werden kann:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 4: **Kontraktion des Netzwerks, näherungsweise Zeitplanung für das kontrahierte Netzwerk:**

- Kontrahiere das Netzwerk. Führe eine näherungsweise Zeitplanung für das auf die in Abschnitt 2.3.3 beschriebene Weise modifizierte kontrahierte Netzwerk N' durch.

Schritt 5: **Ressourcenplanung für das kontrahierte Netzwerk:**

- Bestimme für das kontrahierte Netzwerk N' einen bezüglich der Bedingungen (114) - (117) zulässigen Teilressourcenplan y' , welcher jedem Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in V'$ einen vorläufigen Einplanungszeitpunkt $(t'_u{}^\alpha)_y$ und jedem Vorgang i mit $t_i^a, t_i^e \in V'$ einen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ zuweist. Bestimme wiederum den Modus $(m_i)_y$ direkt nach der Auswahl des Vorgangs i zur Einplanung und vor der Festlegung der Einplanungszeitpunkte $(t'_i{}^a)_y$ und $(t'_i{}^e)_y$.

Schritt 6: **Bestimmung des Gesamtressourcenplans:**

- Bestimme den ermittelten Gesamtressourcenplan y mit Hilfe der Beziehung (118).

Da die Durchführungsmodi den Vorgängen erst im Verlauf der Ressourcenplanung zugewiesen werden, wird im ersten Schritt dieses Algorithmus lediglich überprüft, ob für jede Aktivität zumindest ein kapazitiv zulässiger Durchführungsmodus existiert.

Die für die Einplanung der Vorgänge und der Zyklenstrukturen von einigen Prioritätsregeln benötigten Werte aus der Terminplanung können in Schritt 2 und Schritt 4 aufgrund der noch nicht bestimmten Vorgangsdauern nur näherungsweise ermittelt werden. Die in den Beziehungen (73) - (75) benötigten Längen der längsten Wege werden dabei für ein modifiziertes Netzwerk ermittelt, bei dem den Pfeilen zwischen den Bezugszeitpunkten eines Vorgangs ihre jeweils über alle Durchführungsmodi minimal mögliche Bewertung zugewiesen wird¹⁹¹.

Die Ressourcenplanung der einzelnen Zyklenstrukturen geschieht wiederum durch eines der drei Einplanungsschemata. Die Entscheidungsmenge enthält dabei alle Vorgänge, welche beim betrachteten Planungsschritt in mindestens einem Modus einplanbar sind. Aus dieser Menge wird zunächst ein Vorgang mit Hilfe einer Prioritätsregel ausgewählt. Erst anschließend wird dessen Durchführungsmodus bestimmt. Modi, für welche die Aktivität ursprünglich nicht einplanbar gewesen wäre, dürfen dabei jedoch nicht gewählt werden. Schließlich werden für den betrachteten Vorgang im gewählten Modus die Einplanungszeitpunkte $(t_i^a)_y$ und $(t_i^e)_y$ festgelegt. Die Kapazitätsplanung des kontrahierten Netzwerks verläuft analog, dabei werden jedoch die kontrahierten Zyklenstrukturen wie Aktivitäten mit nur einem Durchführungsmodus und über ihre Dauer veränderlichem Ressourcenbedarf behandelt.

¹⁹¹ Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 2.3.3.

4.2.2.2 Regeln für die Verfahren vom Grundtyp II

4.2.2.2.1 Prioritätsregeln

Als Prioritätsregeln werden in dieser Arbeit für die Verfahren des Grundtyps II die gleichen Regeln wie für die Verfahren vom Typ I untersucht, also die Regeln LST, LFT, RSM, MSLK, LPF, MTS, GRPW sowie RAND. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die benötigten Werte aus der Terminplanung nur näherungsweise auf die in Abschnitt 2.3.3 beschriebene Art ermittelt werden. Sofern die Prioritätsregeln auch auf noch unbestimmten Vorgangsdauern basieren, beispielsweise bei der RSM – Regel, so wird jeweils die kürzestmögliche Dauer des Vorgangs gewählt.

4.2.2.2.2 Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi

Zur Bestimmung der Durchführungsmodi können nun wiederum prinzipiell die gleichen Regeln wie bei den Verfahren des Grundtyps I verwendet werden, also die KVD, KRD, KRV, KDV, KVK sowie die ZUFALL – Regel. Zusätzlich werden für die Verfahren des Grundtyps II noch die folgenden beiden Regeln untersucht:

- **KAZ:** Kleinste Anfangszeit: Es wird der Modus gewählt, welcher zur frühestmöglichen Einplanung des Startzeitpunkts des gewählten Vorgangs führt. Diese Regel ist allerdings nur für serielle Einplanungsschemata sinnvoll, da bei parallelen Schemata der Vorgang immer zum Planungszeitpunkt eingeplant wird und die Regel dann der ZUFALL - Regel entspricht. Bezeichnen wir mit $(\tilde{t}_i^{ra})_{m_i}$ den Zeitpunkt, zu dem der Starttermin des Vorgangs i bei Verwendung des Modus m_i festgelegt werden würde, so ergibt sich

$$v(m_i) = (\tilde{t}_i^{ra})_{m_i}, \text{ extremum} = \min .$$

- **KEZ:** Kleinste Endzeit: Diese Regel ist das Pendant zur KAZ - Regel, diesmal bezogen auf den Endzeitpunkt. Es wird der Modus gewählt, welcher zur frühestmöglichen Einplanung des Endzeitpunkt führt. Wiederum ist diese Regel nur für serielle Verfahren sinnvoll. Für parallele Verfahren entspricht sie der KVD - Regel. Bezeichnen wir analog den fiktiven Einplanungszeitpunkt für den Endzeitpunkt eines Vorgangs mit $(\tilde{t}_i^{re})_{m_i}$, so gilt

$$v(m_i) = (\tilde{t}_i^{re})_{m_i}, \text{ extremum} = \min.$$

4.2.3 Grundtyp III

4.2.3.1 Verfahren

Als Fortführung der Idee, die zu der Entwicklung der Verfahren des Grundtyps I zum Typ II führte, wird ein dritter Lösungstyp vorgestellt, welcher den einzuplanenden Vorgang und seinen Durchführungsmodus simultan aus einer Menge aller möglichen Vorgangs-Modus-Kombinationen bestimmt. Algorithmus 5 stellt den grundsätzlichen Ablauf dieser Verfahren dar.

Algorithmus 5: Verfahrensgrundtyp III zur Ressourcenplanung

Schritt 1: **Überprüfung der Ressourcenschranken:**

- Falls $k_{im_i} > K_{per}$ für alle Durchführungsmodi $m_i = 1(1)M_i$ mindestens eines Vorgangs $i \in \{1, \dots, I\}$:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 2: **Näherungsweise Zeitplanung für alle Zyklenstrukturen, Abbruch bei positiven Zyklen:**

- Führe für jede Zyklenstruktur $Z_l, l=1(1)L$, eine näherungsweise Zeitplanung für das auf die im Abschnitt 2.3.3 beschriebene Weise veränderte Netzwerk durch.
- Falls $L_{uu}^{\alpha\alpha} > 0$ für mindestens ein $t_u^\alpha \in V_l', l \in \{1, \dots, L\}$:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 3: **Ressourcenplanung für alle Zyklenstrukturen:**

- Bestimme für jede Zyklenstruktur $Z_l, l=1(1)L$, einen bezüglich der Bedingungen (103) - (107) zulässigen Teilressourcenplan y'_l , welcher jedem Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in V'_l$ einen vorläufigen Einplanungszeitpunkt $(t_u^\alpha)_{y'_l}$ und jedem Vorgang i mit $t_i^a, t_i^e \in V'_l$ einen Durchführungsmodus $(m_i)_{y'_l}$ zuweist. Wähle den als nächstes einzuplanenden Vorgang i simultan mit seinem Modus $(m_i)_{y'_l}$ aus allen einplanbaren Vorgangs-Durchführungsmodus-Kombinationen $(i, m_i)_{y'_l}$ aus.
- Falls für mindestens eine Zyklenstruktur keine zulässige Lösung gefunden werden kann:
 - Breche das Verfahren ergebnislos ab.

Schritt 4: **Kontraktion des Netzwerks, näherungsweise Zeitplanung für das kontrahierte Netzwerk:**

- Kontrahiere das Netzwerk. Führe eine näherungsweise Zeitplanung für das auf die in Abschnitt 2.3.3 beschriebene Weise modifizierte kontrahierte Netzwerk N' durch.

Schritt 5: **Ressourcenplanung für das kontrahierte Netzwerk:**

- Bestimme für das kontrahierte Netzwerk N' einen bezüglich der Bedingungen (114) - (117) zulässigen Teilressourcenplan y' , welcher jedem Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in V'$ einen vorläufigen Einplanungszeitpunkt $(t_u^\alpha)_{y'}$ und jedem Vorgang i mit $t_i^a, t_i^e \in V'$ einen Durchführungsmodus $(m_i)_{y'}$ zuweist. Wähle eine Zyklenstruktur Z_l oder einen Vorgang i simultan mit seinem Modus $(m_i)_{y'}$ aus allen möglichen Vorgangs-Durchführungsmodus-Kombinationen $(i, m_i)_{y'}$ zur Einplanung aus.

Schritt 6: **Bestimmung des Gesamtressourcenplans:**

- Bestimme den ermittelten Gesamtressourcenplan y mit Hilfe der Beziehung (118).

Der vorgestellte Algorithmus unterscheidet sich vom Algorithmus 4 für Verfahren des Grundtyps II nur hinsichtlich der Ressourcenplanung der Zyklenstrukturen in Schritt 3 und des kontrahierten Netzwerks in Schritt 5. Bei jedem Schritt des verwendeten Einplanungsschemas wird zunächst eine Menge von bezüglich der kapazitiven und zeitlichen Bedingungen einplanbaren Vorgangs-Modus-Kombinationen entwickelt. Dabei können auch mehrere Kombinationen eines Vorgangs mit verschiedenen Modi einplanbar sein¹⁹². Bei der Planung des kontrahierten Netzwerks enthält diese Menge zusätzlich einplanbare kontrahierte Zyklenstrukturen. Diese können jedoch nur auf eine einzige Weise, nämlich die bereits festgelegte, eingeplant werden. Die Auswahl einer Vorgangs-Durchführungsmodus-Kombination beziehungsweise einer kontrahierten Zyklenstruktur zur Einplanung geschieht dann aufgrund einer geeigneten Simultanregel.

4.2.3.2 Simultanregeln für die Verfahren vom Grundtyp III

Regeln zur simultanen Auswahl des als nächstes einzuplanenden Vorgangs sowie seines Durchführungsmodus müssen geeignet sein, sowohl verschiedene Vorgänge beziehungsweise kontrahierte Zyklenstrukturen zu priorisieren als auch zwischen verschiedenen Modi des gleichen Vorgangs zu unterscheiden. Sie weisen also jeder Kombination von Vorgang und Durchführungsmodus einen Wert $v(i, m_i)$ beziehungsweise jeder Zyklenstruktur einen Wert $v(Z_1)$ zur Bestimmung ihrer Priorität zu. In dieser Arbeit werden die folgenden Regeln untersucht. Diese sind dabei englisch oder deutsch bezeichnet, je nachdem, an welcher Prioritätsregel oder Regel zur Bestimmung des Durchführungsmodus sie sich mehr orientieren.

- **KAZ:** Kleinste Anfangszeit: Analog zur Modusauswahl der Verfahren vom Typ II wird bei dieser Regel diesmal die Vorgangs-Modus-Kombination oder die Zyklenstruktur gewählt, die zu der frühestmöglichen Einplanung des Anfangszeitpunkts führt.

$$v(i, m_i) = \left(\tilde{t}_i'^a \right)_{m_i} \text{ bzw. } v(Z_1) = \tilde{t}_{Z_1}'^a, \text{ extremum} = \min.$$

¹⁹² Vgl. auch Abschnitt 4.3.

- **KEZ:** Kleinste Endzeit: Analog zur KAZ - Regel wählt diese Regel die Vorgangs-Modus-Kombination oder die Zyklenstruktur, die zur frühesten Einplanung eines Endzeitpunkts führt.

$$v(i, m_i) = \left(\tilde{t}_i'^e \right)_{m_i} \text{ bzw. } v(Z_1) = \tilde{t}_{Z_1}'^e, \text{ extremum} = \min .$$

- **LFT:** Latest Finish Time: Diese entspricht der bekannten LFT - Regel. Der Wert $\left(s_i'^e \right)_{m_i}$ eines Vorgangs i im betrachteten Modus m_i beziehungsweise der Wert $s_{Z_1}'^e$ einer kontrahierten Zyklenstruktur wird mit Hilfe der Beziehung (75) für ein auf folgende Weise modifiziertes Netzwerk ermittelt: Für alle bereits eingeplanten Vorgänge wird die Länge der Pfeile zwischen Anfangszeitpunkt und Endzeitpunkt entsprechend der Vorgangsdauer im gewählten Modus festgelegt, ebenso für den betrachteten Vorgang mit der Dauer des betrachteten Modus. Für alle anderen

Vorgänge i enthält das Netzwerk die Pfeile $\left(\left(t_i^a, t_i^e \right), \min_{m_i=1(1)M_i} \{ D_{im_i} \} \right)$ und

$\left(\left(t_i^e, t_i^a \right), \max_{m_i=1(1)M_i} \{ D_{im_i} \} \right)$ ¹⁹³. Durch die Anpassung des Netzwerks auf diese Weise

werden unterschiedliche Prioritätswerte für verschiedene Durchführungsmodi ermöglicht. Dies ist Voraussetzung dafür, daß die Verwendung einer Regel sinnvoll ist.

$$v(i, m_i) = \left(s_i'^e \right)_{m_i} \text{ bzw. } v(Z_1) = s_{Z_1}'^e, \text{ extremum} = \min .$$

- **LST:** Analog zur LFT - Regel wird auch die LST - Regel für die Verfahren vom Typ III angewendet.

$$v(i, m_i) = \left(s_i'^a \right)_{m_i} \text{ bzw. } v(Z_1) = s_{Z_1}'^a, \text{ extremum} = \min .$$

¹⁹³ Vgl. Abschnitt 2.3.3.

- **RSM:** Dies ist die bekannte RSM - Regel, allerdings werden hier die Werte auf Basis eines Netzwerks bestimmt, welches auf die gleiche Weise angepaßt wurde wie bei Verwendung der LFT - Regel.

$$v(i, m_i) = \max \left\{ 0, \left(\tilde{f}_i^a \right)_{m_i} + D_{im_i} - s_u'^a \mid t_u^e \in M_E, u \neq i \right\} \text{ bzw.}$$

$$v(Z_1) = \max \left\{ 0, \tilde{f}_{Z_1}^a + D_{Z_1} - s_u'^a \mid t_u^e \in M_E, u \neq Z_1 \right\},$$

$$u \in \{1, \dots, I, Z_1, \dots, Z_L\}, \text{ extremum} = \min .$$

- **MSLK:** Auch bei der MSLK - Regel in der wiederum dynamischen Variante wird das Netzwerk auf die gleiche Weise angepaßt.

$$v(i, m_i) = \left(s_i'^a \right)_{m_i} - \left(\tilde{f}_i^a \right)_{m_i} \text{ bzw. } v(Z_1) = s_{Z_1}'^a - \tilde{f}_{Z_1}^a, \text{ extremum} = \min .$$

- **KRB:** Kleinster Ressourcenbedarf: Es wird der Vorgang oder die Zyklenstruktur gewählt, der den kleinsten Ressourcenbedarf aufweist.

$$v(i, m_i) = k_{im_i} \text{ bzw. } v(Z_1) = \max_{t=1(I)D_{Z_1}} \left\{ \sum_{\substack{i \text{ mit } t_i^a, t_i^e \in V_1'; \\ \left(t_i^a \right)_y < t; \left(t_i^e \right)_y \geq t}} \left(k_{i(m_i)_y} \right) \right\}, \text{ extremum} = \min .$$

- **KRV:** Kleinster Ressourcenverbrauch: Auch diese Regel arbeitet analog zur gleichnamigen Modusbestimmungsregel.

$$v(i, m_i) = D_{im_i} \cdot k_{im_i} \text{ bzw. } v(Z_1) = \sum_{i \text{ mit } t_i^a \in V_1'} D_{i(m_i)_y} \cdot k_{i(m_i)_y}, \text{ extremum} = \min .$$

- **RAND:** Random: Die Auswahl erfolgt zufällig.

4.3 Einplanungsschemata zur Ressourcenplangenerierung

Zur Einplanung der Knoten einer Zyklenstruktur Z_1 oder des kontrahierten Netzwerks N' und somit zur Generierung eines Teilressourcenplans y'_1 beziehungsweise y' benötigt man ein geeignetes Schema. Die beiden aus der Literatur bekannten Einplanungsschemata, nämlich das parallele und das serielle, wurden bereits in Abschnitt 3.2.4.1 prinzipiell vorgestellt. Eine neue, modifizierte Version des seriellen Schemas unterscheidet sich durch die Einplanung einzelner Bezugszeitpunkte und nicht gesamter Vorgänge vom traditionellen seriellen Schema. In diesem Abschnitt wird nach einigen grundsätzlichen Vorbemerkungen zu den Einplanungsschemata näher auf diese eingegangen und für jedes ein Algorithmus angegeben.

4.3.1 Spezifische Gemeinsamkeiten der Einplanungsschemata

Bei den vorgestellten Kontraktionsverfahren wird in jedem Teilschritt eine Menge von Knoten M_K betrachtet, welche in der Regel nicht mit der Knotenmenge V des Netzwerks N übereinstimmt. Bei der Einplanung einer Zyklenstruktur Z_1 gilt dabei zunächst $M_K = V'_1$, bei der des kontrahierten Netzwerks $M_K = V'$. Die Menge M_K soll auch als Menge aller noch einzuplanenden Knoten bezeichnet werden, da bei den im folgenden dargestellten Einplanungsschemata bereits eingeplante Knoten aus der Menge entfernt werden. Sobald sich kein Knoten mehr in M_K befindet, ist die Einplanung abgeschlossen und es wurde ein zulässiger Teilressourcenplan ermittelt. Die jeweils zu berücksichtigenden Ablaufbeziehungen werden durch die Menge E_{cK} abgebildet. Für Zyklenstrukturen gilt $E_{cK} = E'_{c1}$ und für das kontrahierte Netzwerk $E_{cK} = E'_c$. Weitere für die Darstellung der Schemata benötigte Mengen sind die Entscheidungsmenge M_E , die Menge M_P aller bereits eingeplanten Bezugszeitpunkte und die Menge M_V der für die Verletzung von Höchstabstandsbeziehungen verantwortlichen Bezugszeitpunkte. Zusätzlich benötigt man bei den seriellen Verfahren die Menge M_A aller auszuplanenden Knoten.

Die im folgenden angegebenen Algorithmen werden simultan für die Einplanung einzelner Zyklenstrukturen und für die Einplanung des kontrahierten Netzwerks dargestellt, da sie prinzipiell identisch sind. Sie unterscheiden sich lediglich dahingehend, daß bei der Einplanung der einzelnen Zyklenstrukturen noch keine bereits kontrahierten Zyklenstrukturen in den Auswahlritten und Einplanungsschritten berücksichtigt werden müssen.

Alle Einplanungsschemata berücksichtigen zunächst nur Ablaufbeziehungen mit nichtnegativer Bewertung, da nur diese, wie oben beschrieben, eine eindeutige Reihenfolge zwischen den betreffenden Bezugszeitpunkten implizieren¹⁹⁴. Zur Vereinfachung wird der Begriff des Wartegrads p_u^α eines Bezugszeitpunkts $t_u^\alpha \in M_K$ eingeführt¹⁹⁵. Dieser beschreibt die Anzahl der Pfeile mit nichtnegativer Bewertung, welche von noch nicht eingeplanten Bezugszeitpunkten zu t_u^α führen. Ein Wartegrad größer als null sagt also aus, daß der Bezugszeitpunkt noch nicht eingeplant werden kann, da sein frühestmöglicher Einplanungszeitpunkt noch von der Einplanung anderer Knoten abhängt. Diese frühestmögliche Einplanungsmöglichkeit \hat{f}_u^α eines Bezugszeitpunkts t_u^α ergibt sich aufgrund der zu berücksichtigenden Ablaufbedingungen zu

$$t_v^\beta \in M_P \left(\min_{(t_v^\beta, t_u^\alpha) \in E_{cK}} \{c_{vu}^{\beta\alpha}\} \right) \left\{ f_u^{\beta\alpha}, (t_v^\beta)_y + c_{vu}^{\beta\alpha} \right\}.$$

Sie wird bei den vorgestellten Schemata nach jedem Einplanungsschritt aktualisiert.

Die Entscheidungsmenge M_E enthält bei jedem Planungsschritt nur diejenigen Vorgänge beziehungsweise Bezugszeitpunkte, welche die Wartegradsbedingungen erfüllen. Dadurch wird die Einhaltung aller zeitlichen Mindestabstandsbedingungen implizit sichergestellt. Da sich die Generierung dieser Menge für die verschiedenen Einplanungsschemata stark unterscheidet, wird erst bei der Beschreibung der einzelnen Schemata näher darauf eingegangen. Aus dieser Entscheidungsmenge wird dann entsprechend einem der drei

¹⁹⁴ Vgl. Abschnitt 2.1.3.

¹⁹⁵ Zhan verwendet hierfür den Begriff Passivität. In dieser Arbeit soll jedoch zur Vermeidung von Verwechslungen mit der passiven Menge der Begriff Wartegrad verwendet werden, vgl. Zhan (1991), S. 49.

vorgestellten Verfahrensgrundtypen ein Vorgang und dessen Durchführungsmodus zur Einplanung ausgewählt.

Diese Art der Einplanung stellt wie beschrieben zunächst nur die Einhaltung aller Mindestabstandsbeziehungen sicher. Daher kann es vorkommen, daß einzelne Bezugszeitpunkte zeitlich soweit auseinander eingeplant werden, daß ein eventuell zwischen diesen einzuhaltender Höchstabstand überschritten wird. Dies bedeutet jedoch nicht notwendigerweise, daß für die betrachtete Knotenmenge keine Lösung generiert werden kann. Allerdings führt die gewählte Einplanung zu einem ungültigen Ergebnis. Man benötigt daher einen zusätzlichen Schritt, welcher nach jeder Einplanung deren Zulässigkeit hinsichtlich einzuhaltender Höchstabstandsbedingungen überprüft.

Falls Höchstabstandsbeziehungen verletzt werden, so macht man die dafür verantwortlichen Planungsschritte wieder rückgängig. Das genaue Vorgehen hängt vom betrachteten Einplanungsschema ab und wird bei deren Darstellung näher beschrieben. Damit die ausgeplanten Knoten jedoch nicht sofort wieder auf die selbe Weise eingeplant werden, erhöht man für jeden Bezugszeitpunkt t_u^α , der für die Verletzung einer Abstandsbeziehung der Form $t_v^\beta - t_u^\alpha \leq c_{uv}^{\alpha\beta}$ verantwortlich ist, einen Strafwert st_u^α um eine Zeiteinheit. Bei der nächsten Einplanung dieses Bezugszeitpunkt wird sein Strafwert auf die frühestmögliche Planungszeit \hat{f}_u^α aufgeschlagen, so daß t_u^α dann frühestens zum Zeitpunkt $(\hat{f}_u^\alpha + st_u^\alpha)$ eingeplant werden darf. Zum Abschluß des Rückplanungsschritts aktualisiert man die für die weitere Planung benötigten Werte wie Wartegrad und frühestmögliche Einplanungszeit und führt die Planung fort.

Zusätzlich wird ein geeignetes Abbruchkriterium benötigt, damit das verwendete Einplanungsschema für eine Zyklenstruktur, für die tatsächlich keine Lösung generiert werden kann, nicht in einer Endlosschleife endet. Hierzu bestimmt man die maximal mögliche zeitliche Ausdehnung der Zyklenstruktur Z_1 unter Berücksichtigung aller ihrer Abstandsbeziehungen. Diese wird mit MZA_1 bezeichnet und ergibt sich zu

$$(119) \quad MZA_1 = - \min_{t_u^\alpha, t_v^\beta \in V_1} \{L_{uv}^{\alpha\beta}\}.$$

Diese Beziehung läßt sich einfach nachvollziehen. Betrachtet man zwei konkrete Knoten t_u^α und t_v^β einer Zyklusstruktur Z_1 , so sind diese laut Definition gegenseitig erreichbar. Aufgrund der einzuhaltenden Ablaufbeziehungen gelten $t_u^\alpha - t_v^\beta \leq -L_{uv}^{\alpha\beta}$ sowie $t_v^\beta - t_u^\alpha \leq -L_{vu}^{\beta\alpha}$. Zwischen diesen beiden Knoten kann also maximal ein zeitlicher Abstand in Höhe von $\max\{-L_{uv}^{\alpha\beta}, -L_{vu}^{\beta\alpha}\}$ auftreten. Der maximal zwischen zwei beliebigen Knoten t_u^α und t_v^β auftretende Abstand, welcher hier auch als maximale zeitliche Ausdehnung der Zyklusstruktur MZA_1 bezeichnet wurde, ergibt sich daher als Maximum des Negativen aller längsten Wege innerhalb der betrachteten Zyklusstruktur. Somit gilt
$$MZA_1 = \max_{t_u^\alpha, t_v^\beta \in V_1'} \{-L_{uv}^{\alpha\beta}\} = - \min_{t_u^\alpha, t_v^\beta \in V_1'} \{L_{uv}^{\alpha\beta}\}.$$

Falls die Zeitstrafe st_u^α eines Bezugszeitpunkts $t_u^\alpha \in M_K$ einen Wert größer als MZA_1 erreicht, wird die Einplanung abgebrochen. Für diesen Fall wird nicht mehr erwartet, daß das Verfahren einen zulässigen Teilressourcenplan für die betrachtete Zyklusstruktur generieren kann.

4.3.2 Paralleles Einplanungsschema

Bei der Darstellung der grundsätzlichen Vorgehensweise des parallelen Schemas in Abschnitt 3.2.4.1 wurde bereits darauf hingewiesen, daß es in seiner Grundform zur Generierung von Teilressourcenplänen für die in dieser Arbeit zugrundegelegte Planungssituation nicht geeignet ist.

Um Projekte im Mehrmodus-Fall bearbeiten zu können, wird zunächst die Entscheidungsmenge M_E dahingehend erweitert, daß sie nicht nur einplanbare Vorgänge, sondern auch deren zulässige Durchführungsmodi abbildet. Betrachtet man einen Vorgang i mit $t_i^a, t_i^e \in M_K$ in einem bestimmten Durchführungsmodus m_i , so muß diese Vorgangs-Modus-Kombination mehrere Bedingungen erfüllen, damit sie zum Planungszeitpunkt einplanbar ist. Zunächst muß der Wartegrad des Startknotens null und der des Endknotens eins betragen. Der Wartegrad eins des Endknotens ergibt sich dabei aufgrund des Pfeils $\left(\left(t_i^a, t_i^e\right), D_{im_i}\right)$. Die Unterschreitung der frühestmöglichen Einplanungszeitpunkte durch die

Einplanung des Vorgangs wird durch die Bedingungen $\hat{f}_i^a + st_i^a \leq t_0$ sowie $\hat{f}_i^e + st_i^e \leq t_0 + D_{im_i}$ verhindert. Zusätzlich müssen dem Vorgang ab dem Planungszeitpunkt über seine gesamte Vorgangsdauer ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen. Die Menge aller zum Planungszeitpunkt t_0 einplanbaren Vorgangs-Modus-Kombinationen ergibt sich zusammenfassend zu

$$(120) \quad \left\{ (i, m_i) \mid t_i^a, t_i^e \in M_K; m_i \in \{1, \dots, M_i\}; \hat{f}_i^a + st_i^a \leq t_0; \hat{f}_i^e + st_i^e \leq t_0 + D_{im_i}; \right. \\ \left. p_i^a = 0; p_i^e = 1; \right. \\ \left. \sum_{\substack{j \text{ mit } t_j^a, t_j^e \in M_P; \\ (t_j^a)_y < t; (t_j^e)_y \geq t}} \left(k_{j(m_j)_y} \right) + \sum_{\substack{l \text{ mit } t_{Z_l}^a, t_{Z_l}^e \in M_P; \\ (t_{Z_l}^a)_y < t; (t_{Z_l}^e)_y \geq t}} \left(\sum_{\substack{h \text{ mit } t_h^a, t_h^e \in V'_1; \\ (t_h^a)_y + (t_{Z_l}^a)_y < t; (t_j^e)_y + (t_{Z_l}^e)_y \geq t}} \left(k_{h(m_h)_y} \right) \right) + \right. \\ \left. \left(k_{im_i} \right) \leq K_{Per}, t = t_0 + 1(1)t_0 + D_{im_i} \right\}.$$

Bei der Einplanung des kontrahierten Netzwerks werden kontrahierte Zyklenstrukturen im folgenden wie Vorgänge mit nur einem Durchführungsmodus betrachtet. Daher gelten für sie analog die gleichen Bedingungen. Die Menge der zum Planungszeitpunkt t_0 einplanbaren Zyklenstrukturen läßt sich als

$$(121) \quad \left\{ Z_l \mid t_{Z_l}^a, t_{Z_l}^e \in M_K; \hat{f}_{Z_l}^a + st_{Z_l}^a \leq t_0; \hat{f}_{Z_l}^e + st_{Z_l}^e \leq t_0 + D_{Z_l}; p_{Z_l}^a = 0; p_{Z_l}^e = 1; \right. \\ \left. \sum_{\substack{j \text{ mit } t_j^a, t_j^e \in M_P; \\ (t_j^a)_y < t; (t_j^e)_y \geq t}} \left(k_{j(m_j)_y} \right) + \sum_{\substack{n \text{ mit } t_{Z_n}^a, t_{Z_n}^e \in M_P; \\ (t_{Z_n}^a)_y < t; (t_{Z_n}^e)_y \geq t}} \left(\sum_{\substack{h \text{ mit } t_h^a, t_h^e \in V'_1; \\ (t_h^a)_y + (t_{Z_n}^a)_y < t; (t_j^e)_y + (t_{Z_n}^e)_y \geq t}} \left(k_{h(m_h)_y} \right) \right) + \right. \\ \left. \sum_{\substack{g \text{ mit } t_g^a, t_g^e \in V'_1; \\ (t_g^a)_y + t_0 < t; (t_g^e)_y + t_0 \geq t}} \left(k_{g(m_g)_y} \right) \leq K_{Per}, t = t_0 + 1(1)t_0 + D_{Z_l} \right\}.$$

darstellen. Dabei ist die Menge (121) bei der Einplanung einer Zyklenstruktur selbstverständlich leer, da die Menge M_K in diesem Fall definitionsgemäß keine bereits kontrahierten Zyklenstrukturen enthält.

Damit einer der Bezugszeitpunkte t_p^a oder t_p^e einplanbar ist, muß die Wartegradsbedingung $p_p^\alpha = 0$ sowie die Bedingung $\hat{f}_p^\alpha + st_p^\alpha \leq t_0$ gelten. Kapazitätsschranken müssen dagegen nicht berücksichtigt werden, da diese Bezugszeitpunkte nicht mit einem Ressourcenbedarf verknüpft sind. Zum Planungszeitpunkt t_0 ist also die Menge

$$(122) \quad \left\{ t_p^\alpha \mid t_p^\alpha \in M_K ; \hat{f}_p^\alpha + st_p^\alpha \leq t_0 ; p_p^\alpha = 0 \right\}$$

einplanbar. Die Entscheidungsmenge M_E ergibt sich schließlich als Vereinigungsmenge der Mengen (120) - (122).

Aus der Entscheidungsmenge wird nun in jedem Planungsschritt ein geeignetes Element zur Einplanung ausgewählt. Enthält M_E den Projektbeginn t_p^a oder das Projektende t_p^e , so wird dieser Bezugszeitpunkt direkt bestimmt, da die Entscheidungsmenge aufgrund der Wartegradsbedingungen keine anderen Knoten enthalten kann. Andernfalls wird bei Einplanung einer Zyklenstruktur ein Vorgang i und sein Durchführungsmodus $(m_i)_y$ gewählt. Bei Einplanung des kontrahierten Netzwerks kann entweder eine Aktivität und ihr Modus oder gleichberechtigt eine Zyklenstruktur Z_1 bestimmt werden. Die Auswahl geschieht dabei auf Basis des gewählten Verfahrensgrundtyps mit Hilfe einer geeigneten Prioritätsregel.

Wie bereits zuvor erwähnt, wird die Auswahl des als nächstes einzuplanenden Elements simultan für die Einplanung einer Zyklenstruktur und die Einplanung des kontrahierten Netzwerks im nachfolgenden Algorithmus 6 dargestellt. Da die Einplanungsmenge bei der Betrachtung einer Zyklenstruktur keine bereits kontrahierten Zyklenstrukturen enthalten kann, ist für diesen Fall selbstverständlich auch deren Auswahl zur Einplanung ausgeschlossen.

Algorithmus 6: Auswahl des einzuplanenden Elements entsprechend dem gewählten Planungsgrundtyp

Schritt 1: **Auswahl des Projektbeginns oder des Projektendes:**

- Falls $t_p^\alpha \in M_E$:
 - Wähle t_p^α zur Einplanung aus und gehe zu Schritt 3.

Schritt 2: **Auswahl eines Vorgangs in einem Modus bzw. einer Zyklenstruktur entsprechend dem gewählten Verfahrensgrundtyp:**

- Falls ein Verfahren vom **Grundtyp I** verwendet wird:
 - Wähle mit Hilfe einer geeigneten Prioritätsregel einen Vorgang i im bereits festgelegten Durchführungsmodus $(m_i)_y$ mit $(i, (m_i)_y) \in M_E$ bzw. eine kontrahierte Zyklenstruktur $Z_1 \in M_E$ zur Einplanung aus.
- Ansonsten falls ein Verfahren vom **Grundtyp II** verwendet wird:
 - Wähle mit Hilfe einer geeigneten Prioritätsregel einen Vorgang i mit $(i, m_i) \in M_E$ für mindestens ein $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$ bzw. eine kontrahierte Zyklenstruktur $Z_1 \in M_E$ zur Einplanung aus. Wurde ein Vorgang i gewählt, so bestimme mit Hilfe einer weiteren geeigneten Regel seinen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ mit $(i, (m_i)_y) \in M_E$.
- Ansonsten falls ein Verfahren vom **Grundtyp III** verwendet wird:
 - Wähle mit Hilfe einer geeigneten Prioritätsregel aus der Entscheidungsmenge eine Vorgangs-Modus-Kombination $(i, (m_i)_y) \in M_E$ oder eine kontrahierte Zyklenstruktur $Z_1 \in M_E$ zur Einplanung aus.

Schritt 3: **Terminierung:**

- Terminiere, ein Element wurde zur Einplanung ausgewählt.

Das bestimmte Element wird nun im anschließenden Schritt eingeplant. Bei Auswahl des Projektbeginns oder des Projektendes t_p^α wird $(t_p^\alpha)_y = t_0$ gesetzt. Wurde dagegen der Vorgang i im Modus $(m_i)_y$ zur Einplanung bestimmt, so wird dessen Anfangszeitpunkt zu $(t_i^a)_y = t_0$ und sein Endzeitpunkt zu $(t_i^e)_y = t_0 + D_{im}$ eingeplant. Analog wird bei der Einplanung einer ausgewählten Zyklusstruktur Z_1 deren Anfangszeitpunkt zu $(t_{Z_1}^a)_y = t_0$ und ihr Endzeitpunkt zu $(t_{Z_1}^e)_y = t_0 + D_{Z_n}$ bestimmt.

Damit die Einplanungsschemata auch zulässige Ressourcenpläne für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur generieren können, wird zur Überprüfung der Höchstabstandsbedingungen wie bereits zuvor beschrieben ein zusätzlicher Rückplanungsschritt eingeführt¹⁹⁶. Dieser ist in Schritt 6 des nachstehenden Algorithmus dargestellt. Es wird zunächst untersucht, ob die soeben erfolgte Einplanung eines oder zweier Bezugszeitpunkte zu einem Überschreiten eines Maximalabstands führt. Ist dies der Fall, so müssen alle dafür verantwortlichen Planungsschritte rückgängig gemacht werden. Dafür setzt man beim parallelen Verfahren den Planungszeitpunkt zurück auf den Anfangszeitpunkt einer für diese Höchstabstandsüberschreitung verantwortlichen Aktivität oder kontrahierten Zyklusstruktur beziehungsweise auf den Einplanungszeitpunkt eines

¹⁹⁶ Zum parallelen Einplanungsschema für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur im Einmodus-Fall und dem zugehörigen Rückplanungsschritt vgl. Zhan (1991), S. 47 ff. Dort wird jedoch jede kontrahierte Zyklusstruktur Z_1 wie ein Vorgang mit über seine Vorgangsdauer D_{Z_1} konstanten Ressourcenbedarf

$$k_{Z_1} = \max_{t=I(1)D_{Z_1}} \left\{ \sum_{\substack{i \text{ mit } t_i^a, t_i^e \in V'_1; \\ (t_i^a)_y < t; (t_i^e)_y \geq t}} (k_{i(m_i)_y}) \right\} \text{ behandelt.}$$

verantwortlichen Bezugszeitpunkts t_p^a ¹⁹⁷. Werden mehrere Maximalabstandsbeziehungen verletzt, so wählt man den kleinsten dieser Einplanungswerte aus.

Eine Aktivität i wird als verantwortlich für die Höchstabstandsüberschreitung bezeichnet, wenn einer ihrer Bezugszeitpunkte t_i^α mit einem der soeben eingeplanten Bezugszeitpunkte t_v^β in einer Höchstabstandsbeziehung der Form $t_v^\beta - t_i^\alpha \leq \overline{c_{iv}^{\alpha\beta}}$ steht, für deren Einplanungswerte jedoch $(t_v^\beta)_y - (t_i^\alpha)_y > \overline{c_{iv}^{\alpha\beta}}$ gilt¹⁹⁸. Besteht die verletzte Abstandsbedingung zwischen einem der eingeplanten Bezugszeitpunkte und dem Endzeitpunkt eines Vorgangs i , so wird der Planungszeitpunkt gleichwohl auf den Anfangszeitpunkt $(t_i^{ra})_y$ gesetzt, da der Endzeitpunkt nicht isoliert ausgeplant werden kann.

Alle Vorgänge, welche nicht bereits vor dem Planungszeitpunkt beginnen, werden wieder ausgeplant. Anschließend paßt man den Wartegrad sowie die früheste Einplanungszeit der Knoten in M_K dem neuen Planungsstand an und führt die Planung fort.

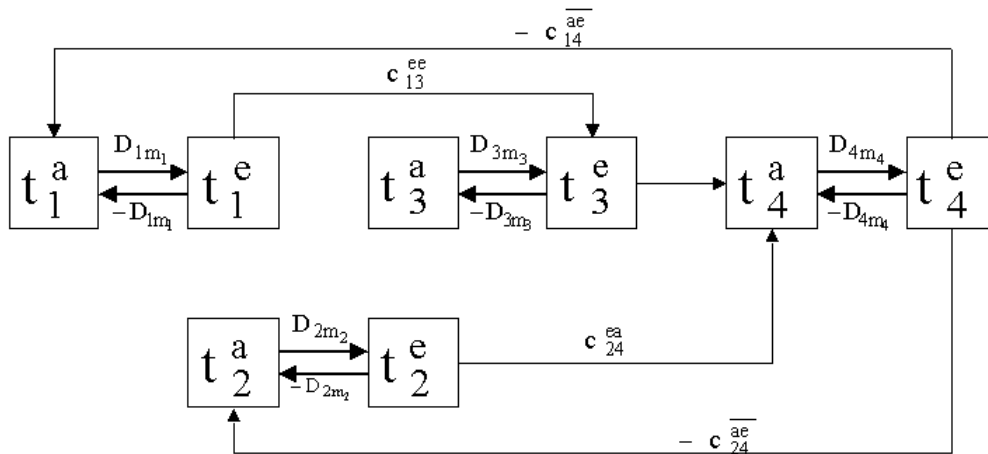
Zur Verdeutlichung sei die Zyklenstruktur in Beispiel 4 mit der in Abbildung 7 dargestellten Ablaufstruktur betrachtet. Führt beispielsweise die Einplanung des Vorgangs $i=4$ zu einer Verletzung der Höchstabstandsbeziehung $t_4^e - t_1^a \leq \overline{c_{14}^{ae}}$, so werden im anschließenden Rückplanungsschritt die Vorgänge 1, 3 und 4 ausgeplant. Wurde Aktivität $i=2$ bereits eingeplant mit $(t_2^{ra})_y \geq (t_1^a)_y$, so wird auch diese wieder ausgeplant.

¹⁹⁷ Das Projektende t_p^e kann dagegen nie für die Verletzung einer Höchstabstandsbeziehung verantwortlich sein, da die zugrundegelegte Projektablaufstruktur keine Höchstabstandsbeziehungen der Form

$$t_u^\alpha - t_p^e \leq \overline{c_{pu}^{\alpha e}}$$

aufweist.

¹⁹⁸ Alle Ausführungen über den Rückplanungsschritt werden hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für einen Vorgang beschrieben. Sie gelten jedoch analog bei der Einplanung des kontrahierten Netzwerks auch für Zyklenstrukturen und wo passend, auch für den Projektstart oder das Projektende.

Beispiel 4:**Abbildung 7: Netzwerkstruktur für Beispiel 4**

Die einzelnen Schritte des parallelen Einplanungsschemas sind nachfolgend in Algorithmus 7 dargestellt.

Algorithmus 7: Paralleles Einplanungsschema**Schritt 1: Initialisierung:**

- Falls eine Zyklenstruktur Z_1 eingeplant werden soll:
 - Setze $M_K = V_1'$ und $E_{cK} = E_{cl}'$;
- Ansonsten falls das kontrahierten Netzwerks N' eingeplant werden soll:
 - Setze $M_K = V'$ und $E_{cK} = E_c'$.
- Setze $M_E = \emptyset$, $M_P = \emptyset$, $M_V = \emptyset$. Setze $t_0 = 0$.
- Setze $\hat{f}_u^\alpha = f_u'^\alpha$, $st_u^\alpha = 0$ und $p_u^\alpha = |t_v^\beta, t_v^\beta \in M_K$ mit

$$\left((t_v^\beta, t_u^\alpha), c_{vu}^{\beta\alpha} \right) \in E_{cK} \wedge c_{vu}^{\beta\alpha} \geq 0 \mid \text{für alle } t_u^\alpha \in M_K.$$

Schritt 2: Bestimmung der Entscheidungsmenge:

- Bestimme die Entscheidungsmenge M_E als Vereinigungsmenge der Mengen (120) - (122).

Schritt 3: Fortschreiben des Planungszeitpunkts:

- Falls $M_E = \emptyset$:
 - Setze $t_0 = t_0 + 1$ und gehe zu Schritt 2.

Schritt 4: Auswahl des einzuplanenden Elements:

- Wähle mit Hilfe des Algorithmus 6 aus der Entscheidungsmenge einen Bezugszeitpunkt t_p^α , einen Vorgang i und seinen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ bzw. eine Zyklenstruktur Z_1 zur Einplanung aus.

Schritt 5: Einplanung und Aktualisierung des Wartegrads und des frühesten Einplanungszeitpunkts:

- Falls der Bezugszeitpunkt t_p^α zur Einplanung gewählt wurde:
 - Setze $(t_p^{\prime\alpha})_y = t_0$.
- Ansonsten falls der Vorgang i im Modus $(m_i)_y$ gewählt wurde:
 - Setze $(t_i^{\prime a})_y = t_0$ und $(t_i^{\prime e})_y = t_0 + D_{im}$.
- Ansonsten falls die Zyklenstruktur Z_1 gewählt wurde:
 - Setze $(t_{Z_1}^{\prime a})_y = t_0$ und $(t_{Z_1}^{\prime e})_y = t_0 + D_{Z_1}$.
- Entferne die soeben eingeplanten Bezugszeitpunkte t_p^α , t_i^a und t_i^e bzw. $t_{Z_1}^a$ und $t_{Z_1}^e$ aus M_K und überführe sie in M_P .
- Für jeden soeben eingeplanten Bezugszeitpunkt t_u^α :

- Setze $p_v^\beta = p_v^\beta - 1$ für alle $t_v^\beta \in M_K$ mit
 $\left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK} \wedge c_{uv}^{\alpha\beta} \geq 0$ und $\hat{f}_v^\beta = \max \left\{ \hat{f}_v^\beta, (t_u^\alpha)_y + c_{uv}^{\alpha\beta} \right\}$ für
 alle $t_v^\beta \in M_K$ mit $\left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK}$.
- Setze $M_E = \emptyset$.

Schritt 6: **Rückplanung:**

- Bestimme $M_V = \left\{ t_v^\beta \mid t_v^\beta \in M_P \text{ mit } \left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK} \wedge (t_v^\beta)_y < (t_u^\alpha)_y + c_{uv}^{\alpha\beta} \right.$
 für alle soeben eingeplanten Bezugszeitpunkte $t_u^\alpha \left. \right\}$.
- Falls $M_V = \emptyset$:
 - Gehe zu Schritt 7.
- Ansonsten veranlasse folgende Rückplanung:
 - Setze $t_0 = \min_{t_v^\beta \in M_V} \left\{ (t_v^\beta)_y \right\}$. Setze $st_v^\beta = st_v^\beta + 1 \forall t_v^\beta \in M_V$.
 - Falls bei Einplanung einer Zyklenstruktur $st_v^\beta > MZA_1$ für einen
 Knoten $t_v^\beta \in M_V$ gilt:
 - Breche die Planung ergebnislos ab.
 - Ansonsten entferne alle Knoten $t_u^\alpha \in M_P$ mit $(t_u^\alpha)_y \geq t_0$ aus M_P
 und überführe sie in M_K . Passe p_u^α und \hat{f}_u^α für alle $t_u^\alpha \in M_K$ der
 aktuellen Planungssituation an und gehe zu Schritt 2.

Schritt 7: **Terminierung:**

- Falls $M_K = \emptyset$:
 - Terminiere, ein zulässiger Teilressourcenplan wurde ermittelt.
- Ansonsten gehe zu Schritt 2.

Zum parallelen Einplanungsschema seien noch zwei Anmerkungen angefügt. Ist in Schritt 3 des Algorithmus die Entscheidungsmenge M_E leer, so schreitet man zum nächsten

Planungszeitpunkt $t = t_0 + 1$ und ermittelt in Schritt 2 erneut M_E . Berücksichtigt man bei der Einplanung nur Vorgänge mit konstantem Ressourcenbedarf und ist die Verfügbarkeit ebenfalls konstant, so versucht man in der Regel, Planungszeitpunkte zu überspringen, bei denen M_E mit Sicherheit leer bleiben wird. Zu diesem Zweck sucht man den kleinstmöglichen Zeitpunkt $t > t_0$, bei dem entweder ein bereits eingeplanter Vorgang endet und somit Kapazitäten freisetzt oder man für einen noch nicht eingeplanten Vorgang mit dem Wartegrad null des Startknotens und eins des Endknotens für mindestens einen Durchführungsmodus den frühestmöglichen Einplanungszeitpunkt erreicht. Da wir jedoch bei der Einplanung des kontrahierten Netzwerks auch kontrahierte Zyklenstrukturen mit über ihre Dauer veränderlichen Ressourcenbedarf betrachten, ist das Auffinden des nächstmöglichen Planungszeitpunkts nicht mehr so trivial. Aus diesem Grund verwenden wir die beschriebene einfachere Variante. Dies hat jedoch zur Folge, daß man eventuell bei mehreren Planungsschritten in Folge eine leere Menge M_E erhält.

In Schritt 5 des Algorithmus wird die gewählte Aktivität oder kontrahierte Zyklenstruktur beziehungsweise der gewählte Bezugszeitpunkt zum Zeitpunkt t_0 eingeplant. Anschließend wird der Wartegrad sowie die frühestmögliche Einplanungszeit für jeden Knoten in M_K aktualisiert und die Menge M_E wird geleert. In Schritt 2 wird die Entscheidungsmenge dann neu ermittelt. Um Rechenzeit zu sparen, sollte man bei implementierten Algorithmen jedoch eine Anpassung der Menge M_E der völligen Neuberechnung vorziehen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichten wir jedoch hier auf die Darstellung dieser Anpassung.

4.3.3 Serielles Einplanungsschema

Im Gegensatz zum zeitorientierten parallelen Einplanungsschema verfährt das serielle Schema vorgangsorientiert. Es berücksichtigt keinen Planungszeitpunkt, sondern plant den ausgewählten Vorgang, die gewählte kontrahierte Zyklenstruktur oder den gewählten Bezugszeitpunkt frühestmöglich ein. Die Entscheidungsmenge ist für diesen Fall wesentlich einfacher zu bestimmen als für das parallele Schema. Damit ein Vorgang in einem bestimmten Durchführungsmodus einplanbar ist, muß er lediglich die Wartegradsbedingungen erfüllen und darf im betrachteten Modus nicht die

periodenbezogene Ressourcenverfügbarkeit überschreiten. Die Menge der einplanbaren Vorgangs-Modus-Kombinationen kann durch

$$(123) \quad \left\{ (i, m_i) \mid t_i^a, t_i^e \in M_K ; m_i \in \{1, \dots, M_i\} ; p_i^a = 0 ; p_i^e = 1 ; k_{im_i} \leq K_{Per} \right\}$$

beschrieben werden. Für die kontrahierten Zyklenstrukturen, den Projektbeginn und das Projektende genügt allein die Erfüllung der Wartegradsbedingungen, da für die Zyklenstrukturen die Ressourcenbedingungen immer erfüllt sind und die beiden Bezugszeitpunkte t_p^a und t_p^e keinen Ressourcenbedarf aufweisen. Die Mengen

$$(124) \quad \left\{ Z_1 \mid t_{Z_1}^a, t_{Z_1}^e \in M_K ; p_{Z_1}^a = 0 ; p_{Z_1}^e = 1 \right\}$$

und

$$(125) \quad \left\{ t_p^\alpha \mid t_p^\alpha \in M_K ; p_p^\alpha = 0 \right\}$$

sind also ebenfalls Teilmengen der Entscheidungsmenge M_E eines betrachteten Planungsschritts. Die Auswahl eines Elements aus der Entscheidungsmenge erfolgt analog zum parallelen Einplanungsschema mit Hilfe des zuvor beschriebenen Algorithmus 6.

Beim parallelen Einplanungsschema wird die kapazitive Zulässigkeit der Einplanung eines Vorgangs zum Planungszeitpunkt schon bei der Generierung der Entscheidungsmenge M_E geprüft. Beim seriellen Schema muß dagegen nach Auswahl eines einzuplanenden Vorgangs im gewählten Durchführungsmodus der frühestmögliche Zeitraum gefunden werden, für den über die gesamte Vorgangsdauer ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen. Dies wird in Schritt 4 des nachfolgenden Algorithmus, dem Einplanungsschritt, dargestellt. Für einen Vorgang i im gewählten Modus $(m_i)_y$ wird der Einplanungswert $(t_i^a)_y$ für den Anfangszeitpunkt auf den minimalen Zeitpunkt t' gesetzt, für den die Bedingungen

$$(126) \quad t' \geq \hat{f}_i^a,$$

$$(127) \quad t' + D_{i(m_i)_y} \geq \hat{f}_i^e$$

und die Kapazitätsbedingungen

$$(128) \quad \sum_{\substack{j \text{ mit } t_j^a, t_j^e \in M_P; \\ (t_j^a)_y < t; (t_j^e)_y \geq t}} \left(k_{j(m_j)_y} \right) + \sum_{\substack{l \text{ mit } t_{Z_1}^a, t_{Z_1}^e \in M_P; \\ (t_{Z_1}^a)_y < t; (t_{Z_1}^e)_y \geq t}} \left(\sum_{\substack{h \text{ mit } t_h^a, t_h^e \in V_1; \\ (t_h^a)_y + (t_{Z_1}^a)_y < t; (t_j^e)_y + (t_{Z_1}^e)_y \geq t}} \left(k_{h(m_h)_y} \right) \right) + \\ + \left(k_{i(m_i)_y} \right) \leq K_{\text{Per}}, \text{ für alle } t = t' + 1(1)t' + D_{i(m_i)_y}$$

erfüllt sind. Das Vorgangsende wird entsprechend auf den Zeitpunkt $(t_i^e)_y = (t_i^a)_y + D_{i(m_i)_y}$ eingeplant.

Wurde eine kontrahierte Zyklenstruktur Z_1 zur Einplanung ausgewählt, so wird analog der Einplanungswert $(t_{Z_1}^a)_y$ auf den frühestmöglichen Zeitpunkt t' gesetzt, für den die Bedingungen

$$(129) \quad t' \geq \hat{f}_{Z_1}^a,$$

$$(130) \quad t' + D_{Z_1} \geq \hat{f}_{Z_1}^e$$

und

$$(131) \quad \sum_{\substack{j \text{ mit } t_j^a, t_j^e \in M_P; \\ (t_j^a)_y < t; (t_j^e)_y \geq t}} \left(k_{j(m_j)_y} \right) +$$

$$\sum_{\substack{m \text{ mit } t_{Z_m}^a, t_{Z_m}^e \in M_P; \\ (t_{Z_m}^a)_y < t; (t_{Z_m}^e)_y \geq t}} \left(\sum_{\substack{h \text{ mit } t_h^a, t_h^e \in V'_m; \\ (t_h^a)_y + (t_{Z_m}^a)_y < t; (t_j^e)_y + (t_{Z_m}^a)_y \geq t}} \left(k_{h(m_h)_y} \right) \right) +$$

$$\sum_{\substack{g \text{ mit } t_g^a, t_g^e \in V'_1; \\ (t_g^a)_y + (t_{Z_1}^a)_y < t; (t_g^e)_y + (t_{Z_1}^a)_y \geq t}} \left(k_{g(m_g)_y} \right) \leq K_{\text{Per}}, \text{ für alle } t = t' + 1(1)t' + D_{Z_1}$$

erfüllt sind. Der Endknoten der Zyklenstruktur wird wiederum zu $(t_{Z_1}^e)_y = (t_{Z_1}^a)_y + D_{Z_1}$ eingeplant.

Da das serielle Einplanungsschema nicht wie das parallele zeitorientiert verfährt, muß auch der Rückplanungsschritt modifiziert werden. Zunächst wird wieder die Menge M_V aller für eine Höchstabstandsverletzung verantwortlichen Bezugszeitpunkte bestimmt. Anschließend ermittelt man die Menge M_A aller auszuplanenden Knoten. Alle Nachfolger eines verantwortlichen Bezugszeitpunkts, zu denen ein nichtnegativer Pfeil führt, werden zur Menge M_A hinzugefügt, anschließend deren Nachfolger und so fort. Wie schon zuvor beim parallelen Schema werden jedoch immer ganze Vorgänge beziehungsweise Zyklenstrukturen dieser Menge M_A hinzugefügt, da einzelne Bezugszeitpunkte nicht isoliert ausgeplant werden. Betrachtet man wiederum das Beispiel 4, so führt bei einem seriellen Verfahren die Verletzung der Höchstabstandsbeziehung $t_4^e - t_1^a \leq \overline{c_{14}^{ae}}$ durch die Einplanung des Vorgangs $i=4$ dazu, daß im anschließenden Rückplanungsschritt die Vorgänge 1, 3 und 4 wieder ausgeplant werden.

Der gesamte Ablauf des seriellen Schemas wird in Algorithmus 8 dargestellt.

Algorithmus 8: Serielles Einplanungsschema

Schritt 1: **Initialisierung:**

- Falls eine Zyklenstruktur Z_1 eingeplant werden soll:

- Setze $M_K = V'_1$ und $E_{cK} = E'_{cl}$;
- Ansonsten falls das kontrahierten Netzwerks N' eingeplant werden soll:
 - Setze $M_K = V'$ und $E_{cK} = E'_c$.
- Setze $M_E = \emptyset$, $M_P = \emptyset$, $M_V = \emptyset$, $M_A = \emptyset$.
- Setze $\hat{f}_u^\alpha = f_u^{\alpha}$, $st_u^\alpha = 0$ und $p_u^\alpha = |t_v^\beta, t_v^\beta \in M_K$ mit

$$\left((t_v^\beta, t_u^\alpha), c_{vu}^{\beta\alpha} \right) \in E_{cK} \wedge c_{vu}^{\beta\alpha} \geq 0 \mid \text{für alle } t_u^\alpha \in M_K.$$

Schritt 2: **Bestimmung der Entscheidungsmenge:**

- Bestimme die Entscheidungsmenge M_E als Vereinigungsmenge der Mengen (123) - (125).

Schritt 3: **Auswahl des einzuplanenden Elements:**

- Wähle mit Hilfe des Algorithmus 6 aus der Entscheidungsmenge einen Bezugszeitpunkt t_p^α , einen Vorgang i und seinen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ bzw. eine Zyklenstruktur Z_1 zur Einplanung aus.

Schritt 4: **Einplanung und Aktualisierung des Wartegrads und des frühesten Einplanungszeitpunkts:**

- Falls der Bezugszeitpunkt t_p^α zur Einplanung gewählt wurde:
 - Setze $t_p^{\alpha} = \hat{f}_p^\alpha$.
- Ansonsten falls der Vorgang i im Modus $(m_i)_y$ gewählt wurde:
 - Setze $(t_i^{\prime a})_y = \min \{ t' \mid t' \text{ erfüllt (126) - (128) } \}$ und

$$(t_i^{\prime e})_y = (t_i^{\prime a})_y + D_{i(m_i)_y}.$$
- Ansonsten falls die Zyklenstruktur Z_1 gewählt wurde:
 - Setze $(t_{Z_1}^{\prime a})_y = \min \{ t' \mid t' \text{ erfüllt (129) - (131) } \}$ und

$$(t_{Z_1}^{\prime e})_y = (t_{Z_1}^{\prime a})_y + D_{Z_1}.$$

- Entferne die soeben eingeplanten Bezugszeitpunkte t_p^α , t_i^a und t_i^e bzw. $t_{Z_1}^a$ und $t_{Z_1}^e$ aus M_K und überführe sie in M_P .
- Für jeden soeben eingeplanten Bezugszeitpunkt t_u^α :
 - Setze $p_v^\beta = p_v^\beta - 1$ für alle $t_v^\beta \in M_K$ mit

$$\left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK} \wedge c_{uv}^{\alpha\beta} \geq 0 \text{ und } \hat{f}_v^\beta = \max \left\{ \hat{f}_v^\beta, (t_u^\alpha)_y + c_{uv}^{\alpha\beta} \right\}$$
 für alle $t_v^\beta \in M_K$ mit $\left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK}$.
- Setze $M_E = \emptyset$.

Schritt 5: **Rückplanung:**

- Bestimme $M_V = \left\{ t_v^\beta \mid t_v^\beta \in M_P \text{ mit } \left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK} \wedge (t_v^\beta)_y < (t_u^\alpha)_y + c_{uv}^{\alpha\beta} \right.$
für alle soeben eingeplanten Bezugszeitpunkte t_u^α $\left. \right\}$.
- Falls $M_V = \emptyset$:
 - Gehe zu Schritt 6.
- Ansonsten veranlasse folgende Rückplanung:
 - Setze $st_u^\alpha = st_u^\alpha + 1 \forall t_u^\alpha \in M_V$.
 - Falls bei Einplanung einer Zyklenstruktur $st_v^\beta > MZA_1$ für einen Knoten $t_v^\beta \in M_V$ gilt:
 - Breche die Planung ergebnislos ab.
- Ansonsten bestimme die Menge M_A der auszuplanenden Knoten auf folgende Weise:
 1. $M_A = \left\{ t_u^a, t_u^e \mid t_u^\alpha \in M_V \right\}$;
 2. $M_A = M_A \cup \left\{ t_u^a, t_u^e \mid \left((t_v^\beta, t_u^\alpha), c_{vu}^{\beta\alpha} \right) \in E_{cK} ; \right.$
 $c_{vu}^{\beta\alpha} \geq 0 ; t_v^\beta \in M_A ; t_u^\alpha \in M_P \left. \right\} \cup \left\{ t_p^e \mid \left((t_u^\alpha, t_p^e), c_{up}^{\alpha e} \right) \in E_{cK} ; \right.$
 $t_p^e \in M_P ; t_u^\alpha \in M_A \left. \right\}$;

3. Wiederhole (2.) so lange, bis keine neuen Knoten mehr hinzukommen.

- Entferne alle Knoten $t_u^\alpha \in M_A$ aus M_P und überführe sie in M_K . Passe p_u^α und \hat{f}_u^α für alle $t_u^\alpha \in M_K$ der aktuellen Planungssituation an und gehe zu Schritt 2.

Schritt 6: **Terminierung:**

- Falls $M_K = \emptyset$:
 - Terminiere, ein zulässiger Teilressourcenplan wurde ermittelt.
- Ansonsten gehe zu Schritt 2.

4.3.4 Modifiziertes serielles Einplanungsschema

Die neue, modifizierte Version des seriellen Einplanungsschemas unterscheidet sich nun vom traditionellen seriellen Schema dahingehend, daß nicht komplette Vorgänge, sondern einzelne Bezugszeitpunkte eingeplant werden. Die in Schritt 2 des nachstehenden Algorithmus generierte Entscheidungsmenge enthält alle Bezugszeitpunkte, die beim betrachteten Planungsschritt einplanbar sind. Projektstartknoten, Projektendknoten sowie die Anfangsknoten von Vorgängen und kontrahierten Zyklenstrukturen sind einplanbar, wenn sie die Wartegradsbedingungen erfüllen.

Die Entscheidungsmenge M_E enthält also die Mengen

$$(132) \quad \{t_P^\alpha \mid t_P^\alpha \in M_K ; p_P^\alpha = 0\},$$

$$(133) \quad \{t_i^a \mid t_i^a \in M_K ; p_i^a = 0\}$$

und

$$(134) \quad \{t_{Z_1}^a \mid t_{Z_1}^a \in M_K ; p_{Z_1}^a = 0\}.$$

Zusätzlich enthält die Entscheidungsmenge die Endknoten der Vorgänge und kontrahierten Zyklenstrukturen. Mit den Endknoten der Vorgänge sind dabei die kapazitiv zulässigen Durchführungsmodi verbunden. Bei den Endknoten der Zyklenstrukturen ist dies nicht nötig, da für diese nur eine Ausführungsmöglichkeit besteht, welche immer kapazitiv zulässig ist. Die Mengen

$$(135) \quad \left\{ (t_i^e, m_i) \mid t_i^e \in M_K ; m_i \in \{1, \dots, M_i\} ; p_i^e = 0 ; k_{im_i} \leq K_{Per} \right\}$$

und

$$(136) \quad \left\{ t_{Z_1}^e \mid t_{Z_1}^e \in M_K ; p_{Z_1}^e = 0 \right\}$$

sind also ebenfalls Teilmengen der Entscheidungsmenge M_E .

Solange sich Anfangsknoten von Vorgängen oder kontrahierten Zyklenstrukturen in der Entscheidungsmenge befinden, werden diese bevorzugt zu ihrem frühestmöglichen Einplanungszeitpunkt eingeplant. Befinden sich nur noch Endzeitpunkte in dieser Menge, so wählt man einen solchen Endzeitpunkt eines Vorgangs mitsamt Modus oder gleichberechtigt den Endzeitpunkt einer kontrahierten Zyklenstruktur mit Hilfe geeigneter Regeln aus. Algorithmus 9 stellt die Auswahl eines Bezugszeitpunkts für das modifizierte serielle Verfahren dar.

Algorithmus 9: Auswahl des einzuplanenden Bezugszeitpunkts entsprechend dem gewählten Planungsgrundtyp beim modifizierten seriellen Schema

Schritt 1: Auswahl des Projektbeginns oder des Projektendes:

- Falls $t_p^\alpha \in M_E$:
 - Wähle t_p^α zur Einplanung aus und gehe zu Schritt 4.

Schritt 2: Auswahl des Anfangszeitpunkts eines Vorgangs bzw. einer Zyklenstruktur:

- Falls M_E mindestens einen Anfangsknoten $t_u^a \in M_E$ enthält:

- Wähle ein t_u^a beliebig zur Einplanung aus und gehe zu Schritt 4.

Schritt 3: **Auswahl des Endzeitpunkts eines Vorgangs in einem Modus bzw. des Endzeitpunkts einer Zyklenstruktur entsprechend dem gewählten Verfahrensgrundtyp:**

- Falls ein Verfahren vom **Grundtyp I** verwendet wird:
 - Wähle mit Hilfe einer geeigneten Prioritätsregel den Endzeitpunkt eines Vorgangs i im gewählten Durchführungsmodus $(m_i)_y$ mit $(t_i^e, (m_i)_y) \in M_E$ bzw. den Endzeitpunkt einer kontrahierten Zyklenstruktur Z_1 mit $t_{Z_1}^e \in M_E$ zur Einplanung aus.
- Ansonsten falls ein Verfahren vom **Grundtyp II** verwendet wird:
 - Wähle mit Hilfe einer geeigneten Prioritätsregel den Endzeitpunkt eines Vorgangs i mit $(t_i^e, m_i) \in M_E$ für mindestens ein $m_i \in \{1, \dots, M_i\}$ bzw. den Endzeitpunkt einer kontrahierten Zyklenstruktur Z_1 mit $t_{Z_1}^e \in M_E$ zur Einplanung aus. Falls der Endzeitpunkt eines Vorgangs i gewählt wurde, so bestimme mit Hilfe einer weiteren geeigneten Regel dessen Durchführungsmodus $(m_i)_y$ mit $(t_i^e, (m_i)_y) \in M_E$.
- Ansonsten falls ein Verfahren vom **Grundtyp III** verwendet wird:
 - Wähle mit Hilfe einer geeigneten Prioritätsregel aus der Entscheidungsmenge den Endzeitpunkt und den Durchführungsmodus eines Vorgangs $(t_i^e, (m_i)_y) \in M_E$ bzw. den Endzeitpunkt einer kontrahierten Zyklenstruktur Z_1 mit $t_{Z_1}^e \in M_E$ zur Einplanung aus.

Schritt 4: **Terminierung:**

- Terminiere, ein Bezugszeitpunkt wurde zur Einplanung ausgewählt.

Wurde ein Endzeitpunkt eines Vorgangs beziehungsweise, bei der Einplanung des kontrahierten Netzwerks, derjenige einer kontrahierten Zyklenstruktur gewählt, so wird die zugehörige Aktivität beziehungsweise kontrahierte Zyklenstruktur frühestmöglich dergestalt eingeplant, daß alle Abstandsbedingungen und Ressourcenschranken eingehalten werden. Dabei ist es möglich, daß der Anfangszeitpunkt der gewählten Tätigkeit oder Zyklenstruktur wegen der Ressourcenbedingungen zeitlich nach hinten verschoben werden muß. Dadurch kann es vorkommen, daß Mindestabstandsbeziehungen zwischen diesem Anfangszeitpunkt und bereits eingeplanten Knoten nachträglich verletzt werden, obwohl diese bei der ursprünglichen Einplanung beachtet wurden. Der wiederum nach der Einplanung einsetzende Rückplanungsschritt muß also nicht nur alle mit dem Anfangszeitpunkt und dem Endzeitpunkt verknüpften Höchstabstandsbeziehungen, sondern auch die Mindestabstandsbeziehungen überprüfen und bei deren Verletzung wiederum die verantwortlichen Einplanungen zurücknehmen.

Da jedoch bei der Einplanung im modifizierten seriellen Schema die Bezugszeitpunkte isoliert betrachtet werden, geschieht dies auch bei der Ausplanung. Wir betrachten wiederum das Beispiel 4 und nehmen an, daß durch die Einplanung des Bezugszeitpunkts t_4^e die Höchstabstandsbeziehung $t_4^e - t_1^a \leq \overline{c_{14}^{ae}}$ verletzt wird. Im anschließenden Rückplanungsschritt werden dann die Bezugszeitpunkte t_1^a , t_1^e , t_3^e , t_4^a und t_4^e wieder ausgeplant.

Der nachfolgende Algorithmus 10 stellt die einzelnen Schritte des modifizierten seriellen Einplanungsschemas dar.

Algorithmus 10: Modifiziertes serielles Einplanungsschema

Schritt 1: **Initialisierung:**

- Falls eine Zyklenstruktur Z_1 eingeplant werden soll:
 - Setze $M_K = V_1'$ und $E_{cK} = E'_{cl}$;
- Ansonsten falls das kontrahierte Netzwerk N' eingeplant werden soll:
 - Setze $M_K = V'$ und $E_{cK} = E'_c$.

- Setze $M_E = \emptyset$, $M_P = \emptyset$, $M_V = \emptyset$, $M_A = \emptyset$.
- Setze $\hat{f}_u^\alpha = f_u'^\alpha$, $st_u^\alpha = 0$ und $p_u^\alpha = \left| t_v^\beta, t_v^\beta \in M_K \right.$ mit
 $\left((t_v^\beta, t_u^\alpha), c_{vu}^{\beta\alpha} \right) \in E_{cK} \wedge c_{vu}^{\beta\alpha} \geq 0 \left| \right.$ für alle $t_u^\alpha \in M_K$.

Schritt 2: **Bestimmung der Entscheidungsmenge:**

- Bestimme die Entscheidungsmenge M_E als Vereinigungsmenge der Mengen (132) - (136).

Schritt 3: **Auswahl des einzuplanenden Bezugszeitpunkts:**

- Wähle mit Hilfe des Algorithmus 9 aus der Entscheidungsmenge einen Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in M_E$ zur Einplanung aus.

Schritt 4: **Einplanung und Aktualisierung des Wartegrads und des frühesten Einplanungszeitpunkts:**

- Falls der Bezugszeitpunkt t_p^α zur Einplanung gewählt wurde:
 - Setze $t_p'^\alpha = \hat{f}_p^\alpha$.
- Ansonsten falls der Anfangszeitpunkt t_u^a zur Einplanung gewählt wurde:
 - Setze $(t_u'^a)_y = \hat{f}_u^a$.
- Ansonsten falls der Endzeitpunkt t_i^e eines Vorgangs i im Modus $(m_i)_y$ gewählt wurde:
 - Setze $(t_i'^a)_y = \min \{ t' \mid t' \text{ erfüllt } t' \geq (t_i'^a)_y, (127) \text{ und } (128) \}$.
 - Setze $(t_i'^e)_y = (t_i'^a)_y + D_{i(m_i)_y}$.
- Ansonsten falls der Endzeitpunkt $t_{Z_1}^e$ einer Zyklenstruktur Z_1 gewählt wurde:
 - Setze $(t_{Z_1}'^a)_y = \min \{ t' \mid t' \text{ erfüllt } t' \geq (t_{Z_1}'^a)_y, (130) \text{ und } (131) \}$.
 - Setze $(t_{Z_1}'^e)_y = (t_{Z_1}'^a)_y + D_{Z_1}$.

- Entferne den soeben eingeplanten Bezugszeitpunkt t_u^α aus M_K und überführe ihn in M_P .
- Für den soeben eingeplanten Bezugszeitpunkt t_u^α setze $p_v^\beta = p_v^\beta - 1$ für alle $t_v^\beta \in M_K$ mit $\left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK} \wedge c_{uv}^{\alpha\beta} \geq 0$.
- Für jeden Bezugszeitpunkt t_u^α , für den soeben $(t_u^\alpha)_y$ seinen Wert verändert hat:
 - Setze $\hat{f}_v^\beta = \max \left\{ \hat{f}_v^\beta, (t_u^\alpha)_y + c_{uv}^{\alpha\beta} \right\}$ für alle $t_v^\beta \in M_K$ mit $\left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK}$.
- Setze $M_E = \emptyset$.

Schritt 5: **Rückplanung:**

- Bestimme $M_V = \left\{ t_v^\beta \mid t_v^\beta \in M_P \text{ mit } \left((t_u^\alpha, t_v^\beta), c_{uv}^{\alpha\beta} \right) \in E_{cK} \wedge (t_v^\beta)_y < (t_u^\alpha)_y + c_{uv}^{\alpha\beta} \right.$
für alle Bezugszeitpunkte t_u^α , für die soeben bei der Planung der Einplanungswert $(t_u^\alpha)_y$ verändert wurde $\left. \right\}$.
- Falls $M_V = \emptyset$:
 - Gehe zu Schritt 6.
- Ansonsten veranlasse folgende Rückplanung:
 - Setze $st_u^\alpha = st_u^\alpha + 1 \forall t_u^\alpha \in M_V$.
 - Falls bei Einplanung einer Zyklenstruktur $st_v^\beta > MZA_1$ für einen Knoten $t_v^\beta \in M_V$ gilt:
 - Breche die Planung ergebnislos ab.
- Ansonsten bestimme die Menge M_A der auszuplanenden Knoten auf folgende Weise:

1. $M_A = \left\{ t_u^\alpha \mid t_u^\alpha \in M_V \right\};$

$$2. \quad M_A = M_A \cup \left\{ t_u^\alpha \mid \left((t_v^\beta, t_u^\alpha), c_{vu}^{\beta\alpha} \right) \in E_{cK}; c_{vu}^{\beta\alpha} \geq 0; t_v^\beta \in M_A; t_u^\alpha \in M_P \right\};$$

3. Wiederhole (2.) so lange, bis keine neuen Knoten mehr hinzukommen.

- Entferne alle Knoten $t_u^\alpha \in M_A$ aus M_P und überführe sie in M_K . Passe p_u^α und \hat{f}_u^α für alle $t_u^\alpha \in M_K$ der aktuellen Planungssituation an und gehe zu Schritt 2.

Schritt 6: **Terminierung:**

- Falls $M_K = \emptyset$:
 - Terminiere, ein zulässiger Teilressourcenplan wurde ermittelt.
- Ansonsten gehe zu Schritt 2.

5 Experimentelle Analyse

Zur Beurteilung der Qualität eines heuristischen Verfahrens betrachtet man meist mehrere Kriterien. Dies sind beispielsweise sein Laufzeitverhalten, Speicherplatzbedarf, Implementationsaufwand oder Flexibilität¹⁹⁹. Diese Eigenschaften sind jedoch bei den hier untersuchten prioritätsregelbasierten Verfahren von eher untergeordneter Bedeutung, da Laufzeit und Speicherplatzbedarf in der Regel sehr moderat sind und auch die meisten Regeln mit relativ geringem Aufwand zu implementieren sind²⁰⁰. Die herausragende Rolle bei der Beurteilung spielt daher die Qualität der mit dem Verfahren erzeugten Lösungen. Dabei wird zum einen die Eignung der Heuristiken zur Generierung zulässiger Lösungen für ein Projekt untersucht. Zum anderen muß man abschätzen, wie weit der Zielfunktionswert dieser erzeugten Lösungen vom optimalen Ergebnis abweicht.

In dieser Arbeit wird die Qualität gefundener Lösungen mit Hilfe der experimentellen Analyse untersucht²⁰¹. Bei dieser werden die verschiedenen Verfahren auf eine Menge von Testinstanzen angewendet und die erzielten Lösungen mit Hilfe statistischer Methoden analysiert²⁰².

¹⁹⁹ Vgl. Ball/Magazine (1981).

²⁰⁰ Zu Ergebnissen von Untersuchungen für exakte und heuristische Verfahren vgl. z.B. Zhan (1991), S. 84 ff., Brinkmann (1992), S. 81 ff., Demeulemeester (1992), S. 75 ff., Sprecher (1994), S. 91 ff., Kolisch (1995), S. 101 ff.

²⁰¹ Daneben existiert auch die Möglichkeit der Worst-Case-Analyse und der stochastischen Analyse. Allerdings ist die experimentelle Analyse die Analyseform, der am meisten vertraut wird, vgl. Ball/Magazine (1981), Fisher/Rinnooy Kan (1988).

²⁰² Zur Untersuchung wurden die Verfahren in C programmiert und auf einem PC mit Intel Pentium 133MHz Prozessor berechnet.

Die Testprobleme sollten dabei systematisch unter Vorgabe bestimmter Parameter generiert werden²⁰³. Dazu steht ein leistungsfähiger Problemgenerator zur Verfügung, welcher lediglich in einigen Punkten an unsere speziellen Bedürfnisse angepaßt werden mußte²⁰⁴. Dieser Problemgenerator wurde speziell für die Generierung von Projekten mit zeitlichen Maximalabständen entwickelt, da die Generierung der in diesen Vorhaben auftretenden Zyklenstrukturen spezielle Techniken benötigen. Der erste Abschnitt dieses Kapitels beschreibt die in dieser Arbeit bei der Generierung der Testinstanzen verwendeten Parameter. Daneben werden zwei verschiedene Kostensituationen geschildert, welche bei der Auswertung der Heuristiken angenommen werden.

Die vorgestellten Heuristiken werden auf die generierten Testprobleme angewendet. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden dann die ermittelten Ergebnisse für die verschiedenen Heuristiken dargestellt. Dabei werden als Optimalitätskriterien zum einen die Minimierung der Projektdauer, zum anderen die Minimierung der gesamten Projektkosten für die beiden beschriebenen Kostensituationen betrachtet.

²⁰³ *In der Literatur wird eine Vielzahl netzwerkcharakterisierender Parameter beschrieben, vgl. z.B. Patterson (1976), Thesen (1977), Kurtulus/Davis (1982). Bei der Auswahl der betrachteten Parameter sollte man sich daher auf die wichtigsten beschränken.*

²⁰⁴ *Vgl. Schwindt (1995). Andere existierende Problemgeneratoren sind dagegen nicht in der Lage, die für Projekte mit komplexer Ablaufstruktur typischen Zyklenstrukturen zu generieren, vgl. Kolisch u.a. (1995), Demeulemeester u.a. (1993), Agrawal u.a. (1996).*

5.1 Testinstanzen

Zur experimentellen Analyse der vorgestellten Heuristiken benötigen wir, wie bereits erwähnt, repräsentative Testprobleme. Diese werden mit Hilfe des vorhandenen Problemgenerators zufällig erstellt. Dabei kann für eine Reihe von Parametern ein fester Wert oder ein Intervall, aus dem der Parameterwert dann zufällig bestimmt wird, vorgegeben werden. In dieser Arbeit wurden einige Parameter variiert, um die Leistungsfähigkeit der Heuristiken für Projekte mit unterschiedlichen Eigenschaften untersuchen zu können. Andere Parameter bleiben konstant, um den Umfang der Analyse in einem überschaubaren Rahmen zu belassen. Die wichtigsten der für diese Untersuchung gewählten Werte sowie die grobe Vorgehensweise bei der Projektgenerierung werden nun im einzelnen vorgestellt.

Einer der wichtigsten Problemparameter ist die Anzahl der Vorgänge des Projekts. Frühere Untersuchungen haben ergeben, daß die Zahl der Vorgänge kaum Einfluß auf die Lösungsqualität einer Heuristik hat, die Unterschiede zwischen verschiedenen Verfahren mit steigender Vorgangszahl jedoch signifikanter werden²⁰⁵. Aus diesem Grund haben alle in dieser Arbeit erzeugten Testprojekte einheitlich $I=100$ Vorgänge.

Für jeden Vorgang i , $i=1(1)I$, wird für die Anzahl verschiedener möglicher Durchführungsmodi ein Wert zwischen $(M_i)_{\min} = 1$ und $(M_i)_{\max} = 4$ gleichverteilt zufällig bestimmt. Im Anschluß daran wird für jeden Modus m_i gleichverteilt zufällig eine Vorgangsdauer zwischen $(D_{im_i})_{\min} = 3$ und $(D_{im_i})_{\max} = 10$ und ein Ressourcenbedarf zwischen $(k_{im_i})_{\min} = 3$ und $(k_{im_i})_{\max} = 10$ bestimmt, wobei $D_{i1} \leq D_{i2} \leq \dots \leq D_{iM_i}$ und $k_{i1} \geq k_{i2} \geq \dots \geq k_{iM_i}$ gelten soll.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Problemgenerator wird zunächst ein Vorgangsknotennetzwerk mit $I+2$ Knoten generiert, welche die I Vorgänge sowie den

²⁰⁵ Vgl. z.B. Zhan (1991), S. 104.

Projektbeginn und das Projektende abbilden²⁰⁶. Um jedoch Projekte mit einer Ablaufstruktur zu erhalten, wie sie dieser Arbeit zugrundeliegt, wird nach der Netzwerkgenerierung für alle zwischen zwei Aktivitäten bestehenden Ablaufbedingungen zufällig bestimmt, auf welche Bezugszeitpunkte sie sich beziehen.

Die Generierung des Vorgangsknotennetzwerks erfolgt in drei Teilschritten. Im ersten Schritt wird ein zyklenfreies und redundanzfreies Netzwerk durch das Einfügen nichtredundanter Pfeile erzeugt. Einen Pfeil bezeichnen wir dann als redundant, wenn gleichzeitig ein weiterer Weg von seinem Anfangsknoten zu seinem Endknoten existiert, welcher aus mehr als einem Pfeil besteht. Das Netzwerk enthält zunächst alle Pfeile, die die Beziehungen $t_i^a \geq t_p^a$ (11) und $t_p^e \geq t_i^e$ (12) abbilden. Weiterhin werden solange Pfeile zwischen zwei Vorgängen zufällig erzeugt, bis der gewünschten Wert für die Restriktivität erreicht ist²⁰⁷. In dieser Arbeit werden Projekte mit drei verschiedenen Restriktivitätswerten, nämlich 0,2, 0,5 und 0,8, erzeugt.

Die Restriktivität P des zyklensfreien Vorgangsknotennetzwerks ist dabei definiert als

$$(137) \quad P = 1 - \frac{\log \Pi}{\log I!},$$

wobei Π die Anzahl an Permutationen (i_1, i_2, \dots, i_I) der Vorgangsmenge $\{1, 2, \dots, I\}$ darstellt, für die aus $k < l$ folgt, daß Vorgang i_k nicht von Vorgang i_l aus erreichbar ist²⁰⁸. Die Restriktivität stellt also ein Maß für die Netzwerkstruktur dar, dessen Wert immer zwischen 0 bei einer völlig parallelen Netzwerkstruktur und 1 bei einer völlig seriellen Struktur beträgt. Das Einfügen eines nichtredundanten Pfeils erhöht also die Restriktivität

²⁰⁶ Vgl. Schwindt (1995).

²⁰⁷ Der in dieser Arbeit angewendete Problemgenerator verwendet die Restriktivität als Maß für die Netzwerkstruktur anstelle der häufig verwendeten Netzwerkkomplexität, welche sich aus dem Verhältnis von Pfeilen zu Knoten eines Netzwerks ergibt.

²⁰⁸ Vgl. Thesen (1977).

des Netzwerks. Da der Wert Π relativ umständlich zu ermitteln ist, wird zur Bestimmung der Restriktivität der Abschätzer RT verwendet, welcher sich zu

$$(138) \quad RT = \frac{2 \cdot \sum_{i=0}^{I+1} \sum_{j=0}^{I+1} x_{ij} - 6 \cdot (I+1)}{I \cdot (I+1)} .$$

berechnen läßt²⁰⁹. Dabei nimmt die Binärvariable den Wert $x_{ij} = 1$ an, falls Knoten j von Knoten i erreichbar ist, ansonsten gilt $x_{ij} = 0$.

Um realitätgetreuere Projektablaufstrukturen zu erzeugen, werden im zweiten Teilschritt redundante Pfeile zwischen bereits voneinander erreichbaren Vorgängen eingefügt, bis ihre Anzahl zu der nichtredundanter Pfeile in einem Verhältnis von 1:2 steht. Die Restriktivität des Netzwerks wird dadurch nicht verändert. Nach der Erstellung des zyklensfreien Netzwerks und dem Einfügen redundanter Pfeile soll weiterhin jeder Vorgang zwischen 1 und 3 direkte Vorgänger und Nachfolger aufweisen. Alle Pfeile des bisher erzeugten Netzwerks sind vorwärtsgerichtet und bilden Mindestabstandsbedingungen ab.

Im dritten Teilschritt werden durch das Einfügen rückwärtsgerichteter Pfeile in das Netzwerk Zyklenstrukturen generiert. Zunächst werden nur solche Pfeile eingefügt, die zur Erzeugung von Zyklenstrukturen mit maximal 8 Vorgängen führen. Zyklenstrukturen mit weniger als 4 Tätigkeiten werden anschließend durch das Einfügen weiterer rückwärtsgerichteter Pfeile auf mindestens 4 und maximal 8 Aktivitäten erweitert. Auf diese Weise werden gleichverteilt zufällig zwischen 6 und 8 Zyklenstrukturen erzeugt. In Ausnahmefällen kann es bei dieser Vorgehensweise jedoch vorkommen, daß die geforderte Mindestanzahl an Zyklenstrukturen nicht generiert werden kann oder diese teilweise weniger als das Minimum an Tätigkeiten umfassen. Abschließend werden die existierenden Zyklenstrukturen mit weiteren rückwärtsgerichteten Pfeilen verdichtet, bis das Verhältnis rückwärtsgerichteter zu vorwärtsgerichteter Pfeile einen gleichverteilt zufällig bestimmten

²⁰⁹ RT führte bei einer Untersuchung mehrerer Abschätzer zu den kleinsten relativen Abweichungen von der Restriktivität P , vgl. Thesen (1977).

Wert aus dem Intervall $[0,2;0,5]$ erreicht hat. Alle rückwärtsgerichteten Pfeile repräsentieren Maximalabstandsbedingungen. Sie werden später mit negativen zeitlichen Bewertungen versehen.

Die Generierung des Vorgangsknotennetzwerks ist damit abgeschlossen. Um Projekte mit einer in dieser Arbeit zugrundegelegten Ablaufstruktur zu erhalten, wird, wie zuvor erwähnt, für jeden Pfeil zufällig bestimmt, auf welche Bezugszeitpunkte er sich bezieht. Anschließend erfolgt die zeitliche Bewertung aller Ablaufbeziehungen. Jeder Mindestabstand, welcher durch einen vorwärtsgerichteten Pfeil repräsentiert wird, erhält eine gleichverteilt zufällig bestimmte zeitliche Bewertung zwischen 0 und 10.

Zur Bestimmung der Bewertung $\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ einer Höchstabstandsbedingung der Form $t_v^\beta - t_u^\alpha \leq c_{uv}^{\alpha\beta}$ zwischen zwei Bezugszeitpunkten t_u^α und t_v^β wird zunächst die Länge $L_{uv}^{\alpha\beta}$ eines längsten Wegs von t_u^α nach t_v^β ermittelt. Da die Dauer der einzelnen Vorgänge noch nicht feststeht, werden diese längsten Wege wiederum unter der Vorgabe ermittelt, daß der Pfeil vom Anfangsknoten zum Endknoten eines Vorgangs die Bewertung der kürzestmöglichen Vorgangsdauer und entsprechend der Pfeil vom Endknoten zum Anfangsknoten die der längstmöglichen aufweist. $\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ wird nun mit Hilfe der sogenannten Zyklenelastizität, welche im folgenden mit ZE bezeichnet wird, gemäß der Beziehung $\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}} = L_{uv}^{\alpha\beta} (1 + ZE)$ ermittelt. Ein kleiner Wert der Zyklenelastizität verringert also anschaulich die Möglichkeit, eine Zyklenstruktur zeitlich auszudehnen. Der Pfeil im Netzwerk wird entsprechend mit $-\overline{c_{uv}^{\alpha\beta}}$ bewertet. Für die Zyklenelastizität werden bei der Instanzengenerierung wiederum drei verschiedene Werte verwendet, nämlich 0,5, 1,0 und 1,5.

Die auf diese Weise erzeugten Projekte enthalten keine Ablaufbeziehungen zwischen Vorgängen und Projektanfang beziehungsweise Projektende der Formen (13) - (20). Dies beeinflußt die Lösungsqualität der Heuristiken jedoch vermutlich nicht wesentlich, da die Einplanung des Projektstarts beziehungsweise des Projektendes generell wegen des fehlenden Ressourcenbedarfs unproblematisch ist. Auch eine Projekthöchstdauer der Form (21) wird nicht generiert, da dann das gesamte Netzwerk eine einzige Zyklenstruktur

darstellen würde. Dies ist jedoch nicht erwünscht, um die Qualität der vorgestellten Kontraktionsverfahren besser untersuchen zu können. Aufgrund der zuvor beschriebenen Vorgehensweise enthält die Projektablaufstruktur weiterhin zwischen zwei Vorgängen jeweils höchstens eine Mindestabstandsbeziehung und eine Höchstabstandsbeziehung.

Nach der Generierung der Vorgangsdaten sowie der Projektablaufstruktur und der Bewertung der Abstandsbeziehungen muß man schließlich noch die Ressourcenverfügbarkeit der einzigen erneuerbaren Ressource bestimmen. Dazu werden zunächst zwei charakteristische Werte bestimmt. Der erste stellt die für die Durchführung

aller Vorgänge benötigte Mindestverfügbarkeit $(K_{\text{Per}})_{\min} = \max_{i=1(1)I} \left\{ \min_{m_i=1(1)M_i} \{k_{im_i}\} \right\}$ dar,

welche sich aus dem Maximum der Mindestressourcenbedarfe aller Vorgänge ergibt. Der zweite ermittelte Wert stellt die maximal benötigte Ressourcenverfügbarkeit dar. Errechnet wird er auf Basis der Einplanung aller Vorgänge im Modus 1, in dem die Vorgänge bestimmungsgemäß den größten Ressourcenbedarf aufweisen, und zwar entsprechend dem frühestmöglichen Terminplan $x_{F,m}$ für diese Durchführungsmodi-Kombination \bar{m} . Dieser

Wert $(K_{\text{Per}})_{\max} = \max_{t=1(1)t_p^e} \{k_t\}$ ergibt sich dann als der maximal benötigte Ressourcenbedarf

über die gesamte Projektdauer. Die Ressourcenverfügbarkeit K_{Per} wird nun mit Hilfe der sogenannten Ressourcenstärke, welche mit RS bezeichnet wird, über die Beziehung $K_{\text{Per}} = (K_{\text{Per}})_{\min} + RS \left((K_{\text{Per}})_{\max} - (K_{\text{Per}})_{\min} \right)$ ermittelt. Der Wert RS ist also auf das Intervall $[0;1]$ normiert, wobei in dieser Arbeit die Werte 0,2, 0,5 und 0,8 verwendet werden. Tabelle 3 und Tabelle 4 fassen die bei der zufälligen Generierung eines Beispielprojekts verwendeten Werte übersichtlich zusammen.

Parameter	Mindestwert	Höchstwert
Anzahl I der Vorgänge	100	100
Durchführungsmodi M_i eines Vorgangs i	1	4
Dauer D_{im_i} eines Vorgangs i im Modus m_i	3	10
Ressourcenbedarf k_{im_i} eines Vorgangs i im Modus m_i	3	10
Anzahl von Vorgänger- und Nachfolgeraktivitäten	1	3
Anzahl von Zyklenstrukturen	6	8
Anzahl von Vorgängen in einer Zyklenstruktur	4	8
Bewertung $c_{ij}^{\alpha\beta}$ eines Mindestabstand	0	10

Tabelle 3: Wertebereiche für die Netzwerkgenerierung zufällig bestimmter Parameter

Parameter	Untersuchungswert 1	Untersuchungswert 2	Untersuchungswert 3
Restriktivität	0,2	0,5	0,8
Ressourcenstärke	0,2	0,5	0,8
Zyklenelastizität	0,5	1,0	1,5

Tabelle 4: Testwerte für die verwendeten Einflußparameter

Die benötigten Daten eines Projekts werden nun unter Einhaltung bestimmter Wertebereiche für die wichtigsten Parameter zufällig bestimmt. Die Untersuchung der Lösungsqualität der Heuristiken bezüglich des Optimalitätskriteriums Projektdauerminimierung erfordert keine weiteren Informationen. Da jedoch in dieser Arbeit auch die Auswirkungen der Verfahren auf die Kostenminimierung als Zielkriterium untersucht werden sollen, müssen weiterhin geeignete Kostenfunktionen generiert werden.

Die Funktion der projektdauerabhängigen Kosten kann in Abhängigkeit von der Projektdauer fast beliebige Formen annehmen. Allerdings weist sie, wie oben erwähnt, in der Regel einen mit der Projektdauer steigenden Verlauf auf, welcher linear, degressiv oder

progressiv sein kann²¹⁰. In dieser Arbeit sollen sich daher die projektdauerabhängigen Kosten C_p entsprechend der Gleichung $C_p = cp_1 \cdot (t_p^e)^{cp_2}$ verhalten. Für $cp_2=1$ steigen diese Kosten linear mit der Projektdauer. Ein kleinerer Wert führt entsprechend zu einem degressiven und ein größerer zu einem progressiven Verlauf. Die Werte cp_1 und cp_2 werden wiederum gleichverteilt zufällig aus einem vorgegebenen Bereich bestimmt.

Analog zur Bestimmung der projektdauerabhängigen Kosten sollen sich die Belastungskosten und die Anpassungskosten der einzigen erneuerbaren Ressource entsprechend den Gleichungen $C_{Rt}^B = cb_1 \cdot (k_t)^{cb_2}$ beziehungsweise $C_{Rt}^A = ca_1 \cdot (|k_{t+1} - k_t|)^{ca_2}$ verhalten, wobei die Werte cb_1 , cb_2 , ca_1 und ca_2 wiederum gleichverteilt zufällig aus vorgegebenen Intervallen bestimmt werden. Die gesamten Ressourcenbereitstellungskosten ergeben sich dann gemäß (94) zu

$$C_R = \sum_{r=1}^R \sum_{t=0}^{t_p^e} (C_{Rt}^B + C_{Rt}^A).$$

Schließlich wird für jede Vorgangs-Durchführungsmodus-Kombination der Wert der direkten Vorgangskosten C_{Vim_i} gleichverteilt zufällig aus einem bestimmten Intervall bestimmt, wobei für jede Aktivität i die Beziehung $C_{Vi1} \geq C_{Vi2} \geq \dots \geq C_{ViM_i}$ gelten soll²¹¹.

Die Summe der direkten Vorgangskosten für einen betrachteten Ressourcenplan y ergibt

$$\text{sich gemäß (96) zu } C_V = \sum_{i=1}^I C_{Vi(m_i)_y}.$$

Bei der experimentellen Analyse soll die Leistungsfähigkeit der heuristischen Lösungsverfahren hinsichtlich zweier verschiedener Klassen der Kostenfunktionen untersucht werden. Die Intervalle der ersten Klasse sind so gewählt, daß eine große

²¹⁰ Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 2.5.2.

²¹¹ Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 2.5.2.

Betonung auf den direkten Vorgangskosten liegt. Bei der zweiten Kostenklasse stehen dagegen projektdauerabhängige Kosten und Belastungskosten im Vordergrund. Die genauen Intervalle sind in Tabelle 5 angegeben. Die durchschnittlichen Anteile der einzelnen Kostengruppen an den Gesamtkosten, die sich bei der Durchführung des Experiments für die beiden Kostenklassen ergeben haben, sind in Tabelle 6 zusammengefaßt.

Parameter	Mindestwert Klasse 1	Höchstwert Klasse 1	Mindestwert Klasse 2	Höchstwert Klasse 2
cp_1	15	30	30	50
cp_2	0,9	1,2	0,9	1,2
cb_1	4	6	6	9
cb_2	0,8	1,2	0,8	1,2
ca_1	4	5	4	5
ca_2	0,8	1,2	0,8	1,2
C_{Vim_i}	100	600	100	300

Tabelle 5: Wertebereiche der kostendefinierenden Parameter

	Kostenklasse I	Kostenklasse II
Projektdauerabhängige Kosten	20%	29%
Belastungskosten	30%	41%
Anpassungskosten	6%	6%
Direkte Vorgangskosten	44%	24%

Tabelle 6: Durchschnittlicher Anteil der einzelnen Kostengruppen für Projekte der Kostenklassen I und II²¹²

²¹² Die angegebenen Werte ergaben sich bei Durchführung des beschriebenen Experiments als Durchschnitt über alle ermittelten zulässigen Lösungen.

5.2 Ergebnisse der experimentellen Analyse

Die Qualität der vorgestellten heuristischen Verfahren bezüglich der drei Optimalitätskriterien Projektdauerminimierung sowie Gesamtkostenminimierung für die beiden beschriebenen Kostensituationen wurde anhand von Testbeispielen untersucht²¹³. Diese wurden unter Berücksichtigung der in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellten Parameterintervalle mit Hilfe des vorgestellten Netzplangenerators generiert. Für jedes Zielkriterium wurden jeweils 10 Projekte für die 27 möglichen Kombinationen der in Tabelle 4 dargestellten Einflußparameter Restriktivität, Ressourcenstärke und Zyklenelastizität, also 270 Testinstanzen pro Optimalitätskriterium, generiert.

Auf diese insgesamt 810 Projekte wendeten wir jeweils alle vorgestellten prioritätsregelbasierten Verfahren an. Für die drei Verfahrensgrundtypen wurden die in Tabelle 7 angegebenen Prioritätsregeln beziehungsweise Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi untersucht. Kombiniert mit den drei Einplanungsschemata ergeben sich für den Verfahrensgrundtyp I 144, für den Typ II 192 und für den Typ III 27 Einzelheuristiken, insgesamt also 363 verschiedene Lösungsverfahren.

	Prioritätsregeln / Simultanregeln	Regeln zur Bestimmung des Durchführungsmodus
Grundtyp I	RAND, LST, LFT, MSLK, RSM, LPF, MTS, GRPW	ZUFALL, KVD, KRB, KRV, KDV, KVK
Grundtyp II	RAND, LST, LFT, MSLK, RSM, LPF, MTS, GRPW	ZUFALL, KVD, KRB, KRV, KDV, KVK, KAZ, KEZ
Grundtyp III	RAND, LST, LFT, MSLK, RSM, KAZ, KEZ, KRB, KRV	-

Tabelle 7: Untersuchte Regeln

²¹³ Die Gesamtkostenminimierung für die beiden Kostensituationen wird im folgenden kurz als Gesamtkostenminimierung 1 und 2 bezeichnet.

Die Beurteilung der Qualität heuristischer Verfahren erfolgt, wie bereits erwähnt, nach mehreren Kriterien. In dieser Arbeit werden die folgenden Aspekte betrachtet: Die vorgestellten Verfahrensgrundtypen, Einplanungsschemata sowie Regeln werden zunächst hinsichtlich ihrer Fähigkeit untersucht, zulässige Lösungen für die Beispielprojekte generieren zu können. Anschließend betrachtet man die Qualität der erzeugten zulässigen Ressourcenpläne bezogen auf den jeweiligen Zielfunktionswert. Ausgedrückt wird dies zum einen mit der Anzahl von Projekten, für die eine Lösung mit dem besten aller von den Einzelheuristiken erzielten Zielfunktionswerte generiert wurde. Zum anderen betrachtet man die durchschnittliche Abweichung dieses Zielfunktionswerts der generierten zulässigen Lösungen von der jeweils besten generierten Lösung²¹⁴. Betrachten wir zwei Verfahrenstypen, Einplanungsschemata oder Regeln A und B und ist die durchschnittliche Abweichung von A kleiner als die von B, so sagen wir, A führt zu besseren Ergebnissen als B. Diese Beziehung drücken wir durch $A \succ B$ aus. Ergibt schließlich der Wilcoxon-Test bei einem Testniveau von $\alpha = 5\%$ einen signifikanten Unterschied, so drücken wir diese Beziehung durch $A \succ\prec B$ aus²¹⁵. Zuletzt wird noch kurz auf das Laufzeitverhalten der Heuristiken eingegangen.

5.2.1 Verfahrensgrundtypen und Einplanungsschemata

Von den insgesamt 810 generierten Testinstanzen wurden 803 durch mindestens eine Einzelheuristik gelöst. Für 7 Testprojekte konnte dagegen kein zulässiger Kapazitätsplan generiert werden. Bemerkenswert ist dabei, daß die Ressourcenstärke für diese 7 Instanzen immer den minimalen Wert von 0,2 aufweist, während die beiden anderen Parameter Restriktivität und Zyklenelastizität jeweils in allen 3 möglichen Ausprägungen unter den nicht gelösten Projekten auftreten. Dies legt die Vermutung nahe, daß die Ressourcenstärke einen wesentlichen Einfluß auf die Schwierigkeit, eine zulässige Lösung für ein Projekt zu

²¹⁴ In der Regel betrachtet man die durchschnittliche Abweichung der Zielfunktionswerte von dem einer optimalen Lösung, vgl. z.B. Zhan (1991), S. 84 ff., Kolisch (1995), S. 101 ff. Da diese optimalen Werte jedoch nicht bekannt sind, verwenden wir an deren Stelle die besten ermittelten Zielfunktionswerte.

²¹⁵ Vgl. z.B. Golden/Stewart (1985), S. 209 ff., Bronstein/Semendjajew (1989), S. 688 f., Büning/Trenkler (1994), S. 171 ff.

generieren, ausübt. Tabelle 8 zeigt, für wieviele dieser Testinstanzen von mindestens einer Heuristik der Verfahrensgrundtypen und Einplanungsschemata sowie deren Kombinationen ein zulässiger Ressourcenplan erzeugt werden konnte²¹⁶.

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	479	562	561	563
Serielles Schema	771	797	797	797
Modifiziertes serielles Schema	783	802	800	803
Gesamt	783	802	801	803

Tabelle 8: Anzahl zulässig gelöster Projekte von 810 Testinstanzen²¹⁷

Es läßt sich erkennen, daß bei Verwendung des parallelen Einplanungsschemas für deutlich weniger Projekte eine zulässige Lösung gefunden wurde. Abgesehen davon läßt sich jedoch aus Tabelle 8 keine eindeutige Aussage darüber treffen, welcher Verfahrenstyp und welches der seriellen Schemata eher in der Lage ist, zulässige Ressourcenpläne zu generieren. Dies liegt daran, daß diese Tabelle nur berücksichtigt, wieviele der Projekte von mindestens einer Einzelheuristik des betreffenden Typs beziehungsweise Schemas gelöst wurden. Bei Betrachtung des prozentualen Anteils der Einzelheuristiken, welche in der Lage waren, zulässige Lösungen für die Testprobleme zu generieren, ergibt sich ein

²¹⁶ Die vorgestellten Verfahrensgrundtypen sowie Einplanungsschemata werden im folgenden für alle implementierten Kombinationen von Prioritätsregeln und Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi untersucht. Beispielsweise existieren für die Kombination des Verfahrensgrundtyps I und des parallelen Einplanungsschemas für die 8 untersuchten Prioritätsregeln und die 6 untersuchten Modusbestimmungsregeln $6 \cdot 8 = 48$ Einzelheuristiken.

²¹⁷ Die Werte in der Gesamt-Zeile (Gesamt-Spalte) beziehen sich auf alle Einzelheuristiken der speziellen Verfahrensgrundtypen (Einplanungsschemata) und ergeben sich dabei nicht als Summe, Maximalwert oder Durchschnitt der einzelnen Werte für die Kombinationen dieses Grundtyps (Schemas) mit den verschiedenen Schemata (Grundtypen). Beispielsweise wurden 801 der insgesamt 810 Projekte von mindestens einer Einzelheuristik des Grundtyps III gelöst, jedoch nicht alle dieser 801 Testbeispiele von einem einzigen Einplanungsschema in Verbindung mit diesem Typ III.

detaillierteres Bild²¹⁸. Es ist in Tabelle 9 dargestellt. Dort zeigt sich, daß die Verfahren der Typen II und III deutlich häufiger zulässige Ressourcenpläne generieren als die des Typs I. Die seriellen Einplanungsschemata erweisen sich auch in dieser Beziehung dem parallelen als überlegen.

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	46,46%	61,63%	64,72%	55,84%
Seriell Schema	78,93%	85,57%	92,07%	83,42%
Modifiziertes seriell Schema	79,41%	85,41%	91,98%	83,52%
Gesamt	68,27%	77,54%	82,92%	74,26%

Tabelle 9: Durchschnittlicher Anteil der Einzelheuristiken, die eine zulässige Lösung generierten

Betrachtet man die Qualität der erzeugten zulässigen Ressourcenpläne bezüglich der drei verschiedenen Optimalitätskriterien, so kann man zunächst für die Projektdauerminimierung als Ziel aus Tabelle 10 erkennen, daß die Verwendung des zweiten Verfahrensgrundtyps und des seriellen Einplanungsschemas mit Abstand am häufigsten zur Generierung einer besten Lösung führt. Betrachtet man die durchschnittliche Abweichung der Zielfunktionswerte der erzielten zulässigen Lösungen vom besten ermittelten Wert, so ergibt sich das in Tabelle 11 dargestellte Bild. Nach der statistischen Auswertung der durchschnittlichen Abweichung der Zielfunktionswerte ergibt sich für die

²¹⁸ Hier wird wiederum der Durchschnitt über alle Heuristiken des jeweiligen Verfahrensgrundtyps bzw. Einplanungsschemas über alle Projekte verwendet. Beispielsweise wurden die 48 Einzelheuristiken der Kombination des Typs I mit dem parallelen Schema auf die 810 Projekte angewendet. Dabei wurde 18064 mal eine zulässige Lösung generiert. Der durchschnittliche Lösungsanteil ergibt sich dann zu $18064/(48*810)= 46,46\%$.

Verfahrensgrundtypen Typ II >> Typ III > Typ I und für die Einplanungsschemata Seriell >> Seriell Modifiziert >> Parallel.

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	0	0	0	0
Serielles Schema	5	181	19	200
Modifiziertes serielles Schema	1	71	21	91
Gesamt	5	239	38	269

Tabelle 10: Anzahl bester gefundener Lösungen bezüglich Projektdauerminimierung

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	20,98%	16,75%	16,77%	18,13%
Serielles Schema	11,84%	10,27%	11,81%	10,99%
Modifiziertes serielles Schema	13,84%	14,01%	15,79%	14,09%
Gesamt	14,68%	13,38%	14,59%	13,95%

Tabelle 11: Durchschnittliche Abweichung des Zielfunktionswert bezüglich Projektdauerminimierung

Betrachtet man die Gesamtkostenminimierung für die erste, vorgangskostenbetonte Kostenklasse, so ergibt sich das in Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellte Bild. Es zeigt sich, daß für dieses Zielkriterium zwar wiederum mit dem zweiten Verfahrensgrundtyp die meisten besten Lösungen generiert werden, bezüglich der durchschnittlichen Abweichungen gilt jedoch Typ I >> Typ II >> Typ III. Für die Einplanungsschemata ergibt sich ein ähnliches Bild wie zuvor bei der Projektdauerminimierung als Zielkriterium. Wiederum werden mit dem seriellen Schema die meisten besten Lösungen generiert, bezüglich der Abweichungen der Zielfunktionswerte gilt Seriell >> Seriell Modifiziert >> Parallel.

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	0	4	0	4
Serielles Schema	54	118	2	155
Modifiziertes serielles Schema	50	90	0	140
Gesamt	75	211	2	269

**Tabelle 12: Anzahl bester gefundener Lösungen bezüglich
Gesamtkostenminimierung 1**

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	12,14%	11,44%	13,00%	11,81%
Serielles Schema	9,46%	10,72%	12,58%	10,40%
Modifiziertes serielles Schema	9,92%	11,62%	14,73%	11,24%
Gesamt	10,28%	11,24%	13,48%	11,07%

**Tabelle 13: Durchschnittliche Abweichung des Zielfunktionswert bezüglich
Gesamtkostenminimierung 1**

Bei Betrachtung der Gesamtkostenminimierung 2 als Optimalitätskriterium ergibt sich schließlich das in Tabelle 14 und Tabelle 15 gezeigte Bild. Wie schon bei der Gesamtkostenminimierung 1 konnten wiederum mit den Verfahren des Grundtyps II mehr beste Lösungen generiert werden. Die durchschnittliche Abweichung von der besten Lösung ist jedoch bei den Verfahren des Typs I kleiner. Es gilt Typ I \succ Typ II \succ Typ III. Für die Einplanungsschemata ergab sich wiederum Seriell \succ Seriell Modifiziert \succ Parallel.

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	0	6	0	6
Serielles Schema	28	146	10	181
Modifiziertes serielles Schema	29	65	1	95
Gesamt	40	217	11	265

**Tabelle 14: Anzahl bester gefundener Lösungen bezüglich
Gesamtkostenminimierung 2**

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	9,49%	8,59%	9,70%	8,98%
Serielles Schema	6,43%	6,61%	8,40%	6,69%
Modifiziertes serielles Schema	7,19%	7,83%	10,18%	7,79%
Gesamt	7,39%	7,57%	9,39%	7,66%

**Tabelle 15: Durchschnittliche Abweichung des Zielfunktionswert bezüglich
Gesamtkostenminimierung 2**

5.2.2 Prioritätsregeln

Da die einzelnen Prioritätsregeln für verschiedene Verfahrensgrundtypen auf verschiedenen Voraussetzungen beruhen, sollen in diesem Abschnitt nur jeweils die Prioritätsregeln eines Typs verglichen werden. Die Ergebnisse für die Regeln des Grundtyps I sind nun zunächst in Tabelle 16 bis Tabelle 18 zusammengefaßt. Für die Projektdauerminimierung als Optimalitätskriterium gilt $LST \succ MTS \succ LFT \succ RSM \succ LPF \succ MSLK \succ RAND \succ GRPW$, für die Gesamtkostenminimierung 1 $LST \succ MTS \succ LFT \succ LPF \succ RSM \succ MSLK \succ GRPW \succ RAND$ und für die Gesamtkostenminimierung 2 $LST \succ MTS \succ LFT \succ LPF \succ MSLK \succ RSM \succ GRPW \succ RAND$. Es fällt auf, daß sich die Reihenfolge der Prioritätsregeln für die verschiedenen Zielfunktionen kaum verändert.

Allerdings weichen die Regeln in ihrer Leistungsfähigkeit nicht besonders stark voneinander ab.

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
LST	264	2	13,12%
MTS	264	0	13,33%
LFT	264	2	13,45%
RSM	264	0	14,01%
LPF	264	2	14,06%
MSLK	264	2	14,09%
RAND	264	0	17,60%
GRPW	262	0	17,77%

Tabelle 16: Prioritätsregeln für Typ I bzgl. Projektdauerminimierung

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
LST	260	44	9,95%
MTS	261	35	10,00%
LFT	260	37	10,01%
LPF	260	38	10,09%
RSM	260	39	10,16%
MSLK	260	42	10,18%
GRPW	259	30	10,83%
RAND	261	29	10,99%

Tabelle 17: Prioritätsregeln für Typ I bzgl. Gesamtkostenminimierung 1

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
LST	254	23	6,85%
MTS	254	23	6,93%
LFT	254	22	6,96%
LPF	253	22	7,16%
MSLK	255	23	7,19%
RSM	255	21	7,21%
GRPW	254	17	8,37%
RAND	255	16	8,46%

Tabelle 18: Prioritätsregeln für Typ I bzgl. Gesamtkostenminimierung 2

Für die Prioritätsregeln des zweiten Typs ergibt sich bezüglich der Projektdauerminimierung als Zielkriterium $LST \succ MTS \succ LFT \succ RSM \succ LPF \succ MSLK \succ RAND \succ GRPW$, für die Gesamtkostenminimierung 1 $LST \succ MTS \succ LFT \succ LPF \succ RSM \succ MSLK \succ GRPW \succ RAND$ und für die Gesamtkostenminimierung 2 $LST \succ LFT \succ MTS \succ LPF \succ RSM \succ MSLK \succ GRPW \succ RAND$. Wiederum fällt auf, daß die Reihenfolgen für die verschiedenen Zielkriterien kaum voneinander und gleichzeitig auch kaum von denen des Verfahrensgrundtyps I abweichen.

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
LST	268	47	11,65%
MTS	268	46	11,69%
LFT	268	49	11,92%
RSM	268	22	12,58%
LPF	268	36	12,63%
MSLK	268	53	13,02%
RAND	268	22	16,68%
GRPW	267	23	16,87%

Tabelle 19: Prioritätsregeln für Typ II bzgl. Projektdauerminimierung

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
LST	269	85	10,85%
MTS	268	93	10,91%
LFT	268	86	10,94%
LPF	267	89	11,04%
RSM	268	82	11,05%
MSLK	267	95	11,23%
GRPW	267	65	11,87%
RAND	269	68	12,05%

Tabelle 20: Prioritätsregeln für Typ II bzgl. Gesamtkostenminimierung 1

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
LST	265	91	7,00%
LFT	265	83	7,09%
MTS	265	85	7,09%
LPF	263	85	7,29%
RSM	264	80	7,33%
MSLK	264	75	7,46%
GRPW	263	59	8,62%
RAND	264	63	8,65%

Tabelle 21: Prioritätsregeln für Typ II bzgl. Gesamtkostenminimierung 2

5.2.3 Regeln zur Bestimmung des Durchführungsmodus

Auch die Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi werden im folgenden jeweils nur bezogen auf denselben Verfahrensgrundtyp untersucht. Betrachtet man zunächst die in Tabelle 22 bis Tabelle 24 dargestellten Ergebnisse der in den Verfahren des Grundtyps I eingesetzten Regeln, ergibt sich für die Projektdauerminimierung als Ziel $KRV \succ KVD \succ KVK \succ RAND \succ KRB \succ KDV$. Bezüglich der Gesamtkostenminimierung 1 gilt $KVK \succ KDV \succ KRB \succ KRV \succ RAND \succ KVD$, für die Gesamtkostenminimierung 2 $KRV \succ KVK \succ KRB \succ KDV \succ RAND \succ KVD$. Die Qualität der Regeln hängt dabei offensichtlich stark vom gewählten Zielkriterium ab. Außerdem treten insbesondere für die Kostenminimierungsziele zwischen diesen Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi deutlich stärkere Unterschiede auf als zwischen den Prioritätsregeln.

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KRV	194	3	12,55%
KVD	161	0	13,33%
KVK	243	2	14,74%
RAND	214	0	14,94%
KRB	254	0	15,78%
KDV	254	0	15,84%

Tabelle 22: Modusbestimmungsregeln für Typ I bzgl. Projektdauerminimierung

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KVK	241	44	1,62%
KDV	250	24	2,02%
KRB	250	25	2,02%
KRV	206	0	11,31%
RAND	204	0	18,69%
KVD	171	0	33,53%

Tabelle 23: Modusbestimmungsregeln für Typ I bzgl. Gesamtkostenminimierung 1

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KRV	181	8	3,47%
KVK	227	26	3,90%
KRB	245	5	4,79%
KDV	245	5	4,81%
RAND	204	0	12,81%
KVD	152	0	17,72%

Tabelle 24: Modusbestimmungsregeln für Typ I bzgl. Gesamtkostenminimierung 2

Betrachtet man nun die in Tabelle 25 bis Tabelle 27 dargestellten Ergebnisse für die Regeln des Grundtyps II, so ergibt sich bezüglich der Projektdauerminimierung die Reihenfolge KEZ \succ KVD \succ KRV \succ KAZ \succ KVK \succ RAND \succ KRB \succ KDV. Für die Gesamtkostenminimierung 1 gilt KVK \succ KDV \succ KRB \succ KAZ \succ KRV \succ RAND \succ KEZ \succ KVD, für die Gesamtkostenminimierung 2 KVK \succ KRV \succ KRB \succ KDV \succ KAZ \succ RAND \succ KEZ \succ KVD. Betrachtet man nur die Regeln des Grundtyps I, so erhält man für die Verfahren vom Grundtyp II im wesentlichen die gleichen Rangordnungen wie für den Grundtyp I. Es läßt sich beobachten, daß bezüglich der Projektdauerminimierung als Ziel zeitbezogene Regeln besser arbeiten, während für die beiden Gesamtkostenminimierungsziele kostenorientierte Regeln zu besseren Ergebnissen führten. Außerdem ist beachtenswert, daß die neue Regel KEZ für das Ziel Projektdauerminimierung zu der höchsten Anzahl zulässig gelöster Projekte sowie zu der mit Abstand höchsten Anzahl bester gefundener Lösungen führt.

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KEZ	268	196	7,62%
KVD	213	0	11,96%
KRV	220	4	12,48%
KAZ	268	33	12,78%
KVK	226	4	13,91%
RAND	268	4	15,63%
KRB	256	2	16,03%
KDV	255	0	16,48%

Tabelle 25: Modusbestimmungsregeln für Typ II bzgl. Projektdauerminimierung

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KVK	238	159	1,40%
KDV	249	28	2,14%
KRB	254	15	2,80%
KAZ	269	6	9,89%
KRV	229	3	10,85%
RAND	269	0	13,51%
KEZ	267	0	22,54%
KVD	216	0	27,89%

Tabelle 26: Modusbestimmungsregeln für Typ II bzgl. Gesamtkostenminimierung 1

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gefundener Lösungen	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KVK	216	155	1,97%
KRV	210	14	3,68%
KRB	247	26	4,56%
KDV	245	6	5,00%
KAZ	264	12	8,15%
RAND	265	0	10,26%
KEZ	263	4	11,80%
KVD	204	0	14,71%

Tabelle 27: Modusbestimmungsregeln für Typ II bzgl. Gesamtkostenminimierung 2

5.2.4 Simultanregeln

Betrachtet man die Ergebnisse für die Simultanregeln des Verfahrensgrundtyps III, so fällt auf, daß sich die einzelnen Regeln weit stärker unterscheiden als die Prioritätsregeln der Verfahrenstypen I und II. Wie bereits bei den Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi beobachtet, ergeben sich für die verschiedenen Zielkriterien unterschiedliche Reihenfolgen. Bezüglich der Projektdauerminimierung gilt $RSM \succ LFT \succ KEZ \succ LST \succ KAZ \succ KRV \succ RAND \succ MSLK \succ KRB$, für die Gesamtkostenminimierung 1 $KRB \succ KAZ \succ LST \succ KRV \succ RAND \succ MSLK \succ RSM \succ LFT \succ KEZ$, und für die Gesamtkostenminimierung 2 $KRV \succ KRB \succ KAZ \succ LST \succ RSM \succ LFT \succ RAND \succ MSLK \succ KEZ$. Für die Projektdauerminimierung als Zielkriterium führen zeitbezogene Simultanregeln wie RSM, LFT oder KEZ zu guten Lösungen, während bezüglich der Gesamtkostenminimierung die ressourcenbezogenen Regeln KRB beziehungsweise KRV die besten Ergebnisse erzielen. Allerdings werden mit diesen Regeln relativ wenige zulässige Lösungen generiert.

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
RSM	265	27	7,00%
LFT	254	1	9,72%
KEZ	264	9	11,93%
LST	267	0	13,99%
KAZ	268	1	14,25%
KRV	218	0	15,74%
RAND	268	0	19,34%
MSLK	261	0	19,50%
KRB	255	0	20,26%

Tabelle 28: Simultanregeln für Typ III bzgl. Projektdauerminimierung

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KRB	252	1	3,72%
KAZ	267	1	9,41%
LST	264	0	10,31%
KRV	228	0	11,22%
RAND	266	0	12,86%
MSLK	257	0	15,87%
RSM	265	0	17,25%
LFT	256	0	17,80%
KEZ	262	0	21,91%

Tabelle 29: Simultanregeln für Typ III bzgl. Gesamtkostenminimierung 1

Regel	Anzahl gelöster Projekte	Anzahl bester gelöster Projekte	Durchschnittliche Abweichung von der besten gefundenen Lösung
KRV	210	3	4,97%
KRB	243	2	6,03%
KAZ	262	3	8,14%
LST	260	1	8,61%
RSM	261	2	9,81%
LFT	244	0	10,48%
RAND	262	0	10,81%
MSLK	252	0	12,05%
KEZ	260	0	12,43%

Tabelle 30: Simultanregeln für Typ III bzgl. Gesamtkostenminimierung 2

5.2.5 Einzelheuristiken

In Tabelle 31 bis Tabelle 33 sind jeweils die besten 10 Einzelheuristiken bezüglich der drei Optimalitätskriterien abgebildet. Es bestätigen sich weitgehend die erhaltenen Ergebnisse bezüglich Verfahrenstypen, Einplanungsschemata und Regeln. Für die drei betrachteten Zielkriterien erzielt man die besten Ergebnisse mit Heuristiken des Grundtyps II in Verbindung mit dem seriellen sowie mit Abstrichen auch dem modifizierten seriellen Einplanungsschema. Es fällt jedoch auf, daß die bezüglich der Gesamtkostenminimierung besten Verfahren eine deutlich geringe Anzahl zulässig gelöster Projekte aufweisen.

Bezüglich der Projektdauerminimierung erweist sich die KEZ - Regel als beste Regel zur Bestimmung der Durchführungsmodi. Für die Gesamtkostenminimierung ist dies die KVK - Regel. Unabhängig vom betrachteten Ziel führen dagegen immer die bekannten Prioritätsregeln LST und MSLK zu den besten Ergebnissen. Das sehr gute Abschneiden der MSLK - Regel überrascht zunächst, da diese bei der Analyse der Prioritätsregeln für die Verfahren des Grundtyps II von den meisten anderen Regeln dominiert wurde. Der Grund

für dieses Verhalten liegt in der Durchschnittsbetrachtung über alle Regeln zur Modusbestimmung und alle Einplanungsschemata in Abschnitt 5.2.2. Offensichtlich schwanken die mit der MSLK - Regel für verschiedene Schemata und Regeln zur Modusbestimmung erzielten Ergebnisse stärker als die anderer Prioritätsregeln.

Typ	Schema	Priorität	Modus	Abweichung	Lösungen
II	Seriell	MSLK	KEZ	2,89%	249
II	Seriell	LST	KEZ	3,07%	251
II	Seriell	LFT	KEZ	3,38%	251
II	Seriell	MTS	KEZ	3,81%	250
II	Seriell	LPF	KEZ	4,22%	250
II	Ser. mod.	LST	KEZ	4,66%	257
II	Ser. mod.	MTS	KEZ	4,70%	266
III	Seriell	RSM	-	4,95%	257
II	Seriell	RSM	KEZ	5,00%	250
II	Ser. mod.	LFT	KEZ	5,72%	257

Tabelle 31: Beste Einzelheuristiken bzgl. Projektdauerminimierung

Typ	Schema	Priorität	Modus	Abweichung	Lösungen
II	Seriell	LST	KVK	0,34%	230
II	Seriell	MSLK	KVK	0,35%	230
II	Seriell	LFT	KVK	0,42%	230
II	Seriell	LPF	KVK	0,42%	230
II	Seriell	MTS	KVK	0,48%	230
II	Seriell	RSM	KVK	0,62%	230
II	Ser. mod.	MTS	KVK	0,63%	236
II	Ser. mod.	LST	KVK	0,65%	233
I	Seriell	LST	KVK	0,72%	236
II	Ser. mod.	LFT	KVK	0,74%	233

Tabelle 32: Beste Einzelheuristiken bzgl. Gesamtkostenminimierung 1

Typ	Schema	Priorität	Modus	Abweichung	Lösungen
II	Seriell	LST	KVK	0,57%	207
II	Seriell	MSLK	KVK	0,60%	207
II	Seriell	LFT	KVK	0,64%	207
II	Seriell	MTS	KVK	0,67%	207
II	Seriell	LPF	KVK	0,67%	207
II	Seriell	RSM	KVK	0,92%	207
II	Ser. mod.	MTS	KVK	0,93%	209
II	Ser. mod.	LST	KVK	1,05%	207
II	Ser. mod.	LFT	KVK	1,11%	208
II	Ser. mod.	RSM	KVK	1,22%	208

Tabelle 33: Beste Einzelheuristiken bzgl. Gesamtkostenminimierung 2

5.2.6 Laufzeiten

Bei der Untersuchung der beschriebenen heuristischen Verfahren wurden in Abhängigkeit vom gewählten Verfahrensgrundtyp sowie Einplanungsschema die in Tabelle 34 dargestellten durchschnittlichen Berechnungszeiten festgestellt²¹⁹. Es läßt sich erkennen, daß die Verfahren des Grundtyps III allgemein etwas mehr Rechenzeit erfordern als die der Typen I und II. Das gleiche gilt für die Heuristiken, welche auf dem modifizierten seriellen Einplanungsschema beruhen im Vergleich zu jenen mit parallelem oder serielltem Schema.

Bei Betrachtung der in Tabelle 35 dargestellten maximalen gemessenen Laufzeiten erkennt man, daß diese für das modifizierte serielle Schema deutlich höher liegen als für die anderen Schemata. Offenbar führt die flexible Einplanung der einzelnen Bezugszeitpunkte in schwierigen Fällen zu einer hohen Anzahl von Rückplanungsschritten, wie man auch aus Tabelle 37 erkennen kann. Dort wird die maximale Anzahl an Rückplanungsschritten für die einzelnen Verfahrensgrundtypen und Schemata dargestellt. Die durchschnittliche Anzahl an Rückplanungsschritten wird in Tabelle 36 abgebildet.

Ein Einfluß der unterschiedlichen Prioritätsregeln, Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi und Simultanregeln auf die Laufzeiten konnte hingegen nicht erkannt werden.

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	2,01	2,01	2,19	2,02
Serielltes Schema	2,09	2,13	2,44	2,14
Modifiziertes serielltes Schema	2,34	2,58	4,10	2,62
Gesamt	2,16	2,25	2,94	2,28

Tabelle 34: Durchschnittliche Verfahrenslaufzeiten in Sekunden

²¹⁹ Die durchschnittlichen und maximalen Werte für die Laufzeiten und die Anzahl der Rückplanungsschritte wurden nur für diejenigen Einzelheuristiken erfaßt, welche zur Generierung einer zulässigen Lösung führten.

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	2,09	2,15	2,64	2,64
Serielles Schema	12,91	11,86	12,18	12,91
Modifiziertes serielles Schema	22,30	30,64	34,09	34,09
Gesamt	22,30	30,64	34,09	34,09

Tabelle 35: Maximale Verfahrenslaufzeiten in Sekunden

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	0,08	0,33	0,41	0,23
Serielles Schema	0,14	0,67	0,70	0,47
Modifiziertes serielles Schema	6,69	17,48	18,94	13,55
Gesamt	2,54	6,38	7,00	5,06

Tabelle 36: Durchschnittliche Anzahl von Rückplanungsschritten

Verfahrensgrundtyp / Einplanungsschema	Grundtyp I	Grundtyp II	Grundtyp III	Gesamt
Paralleles Schema	8	26	20	26
Serielles Schema	10	23	26	26
Modifiziertes serielles Schema	115	137	135	137
Gesamt	115	137	135	137

Tabelle 37: Maximale Anzahl von Rückplanungsschritten

5.2.7 Zusammenfassung der Analyse

Kapitel 4 stellte verschiedene prioritätsregelbasierte Heuristiken zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems für die in Abschnitt 2.1 beschriebene Planungssituation vor. Zur Analyse der Qualität dieser Verfahren wurden die insgesamt 363 Einzelheuristiken auf

810 zufällig generierte Testinstanzen angewendet. Die erzielten Lösungen für jeweils 270 dieser Projekte wurden bezüglich einem der drei untersuchten Optimalitätskriterien analysiert. Diese waren die Minimierung der Projektdauer sowie die Minimierung der gesamten projektbedingten Kosten für zwei vorgegebene Kostensituationen.

Während die Ergebnisse deutliche Unterschiede bezüglich der Projektdauerminimierung auf der einen Seite und der Gesamtkostenminimierung für die beiden Kostensituationen auf der anderen Seite aufweisen, stimmen sie bezüglich der beiden Kostenminimierungsziele fast überein. Es zeigt sich, daß die Wahl eines Optimalitätskriteriums erkennbare Auswirkungen auf die Qualität der Heuristiken aufweist. Es gibt also kein unabhängig von der gewählten Zielfunktion „bestes“ Verfahren zur Generierung eines Kapazitätsplans.

Der Vergleich der drei zur Lösung des Ressourcenplanungsproblems entwickelten Verfahrensgrundtypen zeigt deutliche Unterschiede auf. So sind die Grundtypen II und III deutlich häufiger in der Lage, zulässige Kapazitätspläne zu generieren als Typ I. Offensichtlich führt die starre Zuordnung der Durchführungsmodi bei diesen Verfahren des Typs I dazu, daß sich für viele Zyklenstrukturen keine zulässigen Teillösungen generieren lassen. Hinsichtlich der Projektdauerminimierung als Optimalitätskriterium werden mit Hilfe des Verfahrensgrundtyps II die mit Abstand besten Ergebnisse erzielt. Dagegen weisen für die beiden Kostenminimierungsziele die mit den Verfahren des Grundtyps I generierten Ressourcenpläne eine geringere durchschnittliche Abweichung von den besten gefundenen Lösungen auf. Insgesamt werden jedoch mit den Einzelheuristiken des Grundtyps II mehr beste Lösungen generiert als mit jenen des Typs I. Offenbar schwankt also die Qualität der mit den Verfahren des Grundtyps II erzeugten Ressourcenpläne hinsichtlich der Gesamtkostenminimierung als Ziel stärker als die Qualität der mit den Verfahren des Typs I erzeugten Lösungen.

Die Verfahren des Grundtyps III führen für alle untersuchten Zielkriterien zu signifikant schlechteren Ergebnissen als jene des jeweils bestgeeigneten Grundtyps. Sie sind daher für einen Einsatz nicht zu empfehlen. Offensichtlich führt die simultane Auswahl des nächsten einzuplanenden Vorgangs mit seinem Durchführungsmodus durch eine einzige Simultanregel zu einem Informationsverlust, welcher die Generierung durchschnittlich schlechterer Lösungen zur Folge hat. Allerdings weisen diese Heuristiken die höchste

relative Lösungswahrscheinlichkeit auf und übertreffen diesbezüglich auch die Verfahren des zweiten Grundtyps.

Ein Vergleich der Ergebnisse, welche unter Verwendung der verschiedenen Einplanungsschemata erzielt wurden, zeigt, daß das parallele Schema sowohl hinsichtlich der Lösungshäufigkeit als auch der Lösungsqualität besonders schlecht abschneidet. Es scheint nicht in der Lage zu sein, alle in dieser Arbeit betrachteten Ablauffolgen angemessen zu berücksichtigen. Betrachtet man beispielsweise zwei Vorgänge i und j , welche durch eine Mindestabstandsbeziehung der Form $t_j^e - t_i^a \geq c_{ij}^{ae}$ verknüpft sind, so wird mit der Einplanung des Vorgangs j frühestens zu dem Planungszeitpunkt begonnen, bei dem der Anfangszeitpunkt t_i^a des Vorgangs i eingeplant wurde. Gilt jedoch $c_{ij}^{ae} < D_{jm_j}$, so könnte Vorgang j auch so eingeplant werden, daß er vor Vorgang i beginnt, ohne daß die Ablaufbeziehungen verletzt würden.

In der Regel führt das serielle Schema zur Generierung der besten Ressourcenpläne. Die Ergebnisse des modifizierten seriellen Einplanungsschemas erreichen dagegen nicht die Qualität jener des konventionellen seriellen Schemas. Auch führen diese Verfahren teilweise zu relativ langen Laufzeiten, da die flexible Einplanung der einzelnen Bezugszeitpunkte in schwierigen Fällen zu einer hohen Anzahl von Rückplanungsschritten führt. Trotz dieser flexiblen Einplanung erreicht man durch die Verwendung dieser Heuristiken jedoch keine deutlich erhöhte Lösungswahrscheinlichkeit gegenüber dem konventionellen seriellen Schema.

Beim Vergleich der einzelnen Prioritätsregeln für die Verfahrensgrundtypen I und II fällt auf, daß ihre Qualität praktisch unabhängig vom betrachteten Zielkriterium ist. Auch verhalten sich die Regeln für die beiden Grundtypen sehr ähnlich. In allen Fällen führt der Einsatz der Regeln LST, LFT und MTS zu den besten Ergebnissen.

Ein ganz anderes Bild zeigt sich dagegen bei der Betrachtung der verschiedenen Regeln zur Bestimmung der Durchführungsmodi. Für sie kann eine starke Abhängigkeit ihrer Leistungsfähigkeit vom betrachteten Zielkriterium beobachtet werden. So führt der Einsatz der kostenorientierten Regel KVK für die Grundtypen I und II zu den besten Ergebnissen bezüglich der Gesamtkostenminimierung für die beiden Kostensituationen als

Zielkriterium. Bei Betrachtung der Projektdauerminimierung als Ziel werden insbesondere beim Einsatz der neuen KEZ - Regel besonders gute Ergebnisse erzielt. Offenbar führt die flexible Auswahl des Durchführungsmodus eines Vorgangs in Abhängigkeit von der konkreten Planungssituation dazu, daß das betrachtete Projekt bei Verwendung dieser Regel besonders kompakt eingeplant wird.

Auch die Qualität der Simultanregeln für die Verfahren des Typs III schwankt deutlich mit dem gewählten Zielkriterium. Bezüglich der Projektdauerminimierung lieferten die zeitbezogenen Regeln RSM, LFT und KEZ die besten Ergebnisse, für die Gesamtkostenminimierung taten dies die Regeln KRB beziehungsweise KRV.

Insgesamt muß man die Verfahren des Grundtyps II in Verbindung mit dem seriellen Einplanungsschema am höchsten bewerten. Durch die flexible Auswahl des Durchführungsmodus wird eine deutlich höhere Lösungshäufigkeit erzielt als bei der starren Zuordnung bei den Verfahren des Grundtyps I. Die Wahl einer der bekannten Prioritätsregeln LST, LFT oder MTS führt allgemein für alle Zielkriterien zu guten Ergebnissen. Dagegen sollte man die Auswahl einer Regel zur Bestimmung der Durchführungsmodi der einzelnen Vorgänge vom betrachteten Zielkriterium abhängig machen. Insbesondere für das Ziel der traditionellen Projektdauerminimierung erzielt man mit der neuen KEZ - Regel die besten Ergebnisse. Die Verwendung dieser Regel führt außerdem dazu, daß man mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit einen zulässigen Ressourcenplan erhält. Strebt man dagegen die Minimierung der durch die Projektdurchführung verursachten Kosten an, so empfiehlt sich die Regel KVK. Diese ist jedoch häufiger als die KEZ - Regel nicht in der Lage, eine zulässige Lösung zu generieren. Bei der Ressourcenplanung eines Projekts mit dem Zielkriterium der Kostenminimierung bietet es sich also an, zunächst mit Hilfe einer diesbezüglich guten Heuristik zu versuchen, einen zulässigen Ablaufplan zu generieren. Gelingt dies nicht, so kann man es mit einem projektdauerorientierten Verfahren probieren, welches mit höherer Wahrscheinlichkeit einen ausführbaren Kapazitätsplan ermittelt.

Literaturverzeichnis

1. Agrawal M.K., Elmaghraby S.E., Herroelen W.S. (1996): DAGEN: A Generator for Project Activity Nets; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 90, S. 376-382.
2. Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J.B. (1989): Network Flows; in: Nemhauser G.L., Rinnooy Kan A.H.G., Todd M.J. (Hrsg.): *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 1: Optimization; Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo; Elsevier; S. 211-369.
3. Altrogge G. (1991): *Investition*; 2. Auflage; München, Wien; Oldenbourg.
4. Altrogge G. (1996): *Netzplantechnik*, 3. Auflage; München, Wien; Oldenbourg.
5. Alvarez-Valdes R., Tamarit J.M. (1989): Heuristic Algorithms for Resource-Constrained Project Scheduling: A Review and an Empirical Analysis; in: Slowinski R., Weglarz J. (Hrsg.): *Advances in Project Scheduling*; Amsterdam; Elsevier; S. 113-134.
6. Balas E. (1971): Project Scheduling with Resource Constraints; in: Beale E.M.L. (Ed.): *Applications of Mathematical Programming Techniques*, S. 187-200; London; English University Press.
7. Ball M., Magazine M. (1981): The Design and Analysis of Heuristics; in: *Networks*, Vol. 11, S. 215-219.
8. Bamberg G., Coenenberg A.G. (1996): *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*; 9. Auflage; München; Vahlen.
9. Bandelloni M., Tucci M., Rinaldi R. (1994): Optimal Resource Leveling Using Non-Serial Dynamic Programming; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 78, S. 162-177.
10. Bartusch M. (1983): *Optimierung von Netzplänen mit Anordnungsbeziehungen bei knappen Betriebsmitteln*; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
11. Bartusch M., Möhring R.H., Radermacher F.J. (1988): Scheduling Project Networks with Resource Constraints and Time Windows; in: *Annals of Operations Research*, Vol. 16, S. 201-240.
12. Bell C.E., Han J. (1991): A New Heuristic Solution Method in Resource-Constrained Project Scheduling; in: *Naval Research Logistics*, Vol. 38, S. 315-331.
13. Bell C.E., Park K. (1990): Solving Resource-Constrained Project Scheduling Problems by A* Search; in: *Naval Research Logistics*, Vol. 37, S. 61-84.
14. Blohm H., Lüder K. (1991): *Investition*; 7. Auflage; München; Vahlen.
15. Boctor F.F. (1990): Some Efficient Multi-Heuristic Procedures For Resource-Constrained Project Scheduling; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 49, S. 3-13.
16. Boctor F.F. (1993): Heuristics for Scheduling Projects with Resource Restrictions and Several Resource-Duration Modes; in: *International Journal of Production Research*, Vol. 31, S. 2547-2558.
17. Boctor F.F. (1996): A New and Efficient Heuristic for Scheduling Projects with Resource Restrictions and Multiple Execution Modes; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 90, S. 349-361.

18. Brinkmann K. (1992): Planung von deterministischen Projekten mit beschränkten Ressourcen und zeitlichen Maximalabständen; Dissertation; Universität Fridericana zu Karlsruhe.
19. Brinkmann K., Neumann K. (1994): Heuristic Procedures for Resource-Constrained Project Scheduling with Minimal and Maximal Time Lags: The Minimum Project-Duration and Resource-Levelling Problems; Universität Karlsruhe, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Report 443.
20. Bronstein I.N., Semendjajew K.A. (1989): Taschenbuch der Mathematik; 24. Auflage; Thun, Frankfurt am Main; Deutsch.
21. Brucker P., Drexl A., Möhring R., Neumann K., Pesch E. (1999): Resource-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models and Methods; in: European Journal of Operational Research, Vol. 112, S. 3-41.
22. Brucker P., Knust S., Schoo A., Thiele O. (1998): A Branch and Bound Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: European Journal of Operational Research, Vol. 107, S. 272-288.
23. Büchter D. (1990): Investitionsentscheidungen unter dem Einfluß ausgewählter Methoden der Erfolgsbemessung; Köln; Müller Botermann.
24. Büning H., Trenkler G. (1994): Nichtparametrische statistische Methoden; Berlin, New York; de Gruyter.
25. Carruthers J.A., Battersby A. (1966): Advances in Critical Path Methods; in: Operational Research Quarterly, Vol. 17, S. 359-380.
26. Cho J.H., Kim Y.D. (1997): A Simulated Annealing Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problems; in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 48, S. 736-744.
27. Christofides N., Alvarez-Valdez R., Tamarit J.M. (1987): Project Scheduling with Resource Constraints: A Branch and Bound Approach; in: European Journal of Operational Research, Vol. 29, S. 262-273.
28. Cooper D.F. (1976): Heuristics for Scheduling Resource-Constrained Projects: An Experimental Investigation; in: Management Science, Vol. 22, S. 1186-1194.
29. Dar-El E.M., Tur Y. (1978): Resource Allocation of a Multi-Resource Project for Variable Resource Availabilities; in: AIIE Transactions, Vol. 10, S. 299-306.
30. Davis E.W. (1966): Resource Allocation in Project Network Models - A Survey; in: The Journal of Industrial Engineering, Vol. 17, S. 177-188.
31. Davis E.W. (1973): Project Scheduling under Resource Constraints- Historical Review and Categorization of Procedures; in: AIIE Transactions, Vol. 5, S. 297-313.
32. Davis E.W., Patterson J.H. (1975): A Comparison of Heuristic and Optimal Solutions in Resource-Constrained Project Scheduling; in: Management Science, Vol. 21, S. 944-955.
33. Deckro R.F., Hebert J.E. (1989): Resource Constrained Project Crashing; in: OMEGA International Journal of Management Science, Vol. 17, S. 69-79.
34. Deckro R.F., Hebert J.E. (1990): A Multiple Objective Programming Framework for Tradeoffs in Project Scheduling; in: Engineering Costs and Production Economics, Vol. 18, S. 255-264.

35. Demeulemeester E. (1992): Optimal Algorithms for Various Classes of Multiple Resource-Constrained Project Scheduling Problems; Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
36. Demeulemeester E. (1995): Minimizing Resource Availability Costs in Time-Limited Project Networks; in *Management Science*, Vol. 41, S. 1590-1598.
37. Demeulemeester E., Dodin B., Herroelen W. (1993): A Random Activity Network Generator; in: *Operations Research*, Vol. 41, S. 972-980.
38. Demeulemeester E., Herroelen W. (1992): A Branch and Bound Procedure for the Multiple Resource Constrained-Project Scheduling Problem; in: *Management Science*, Vol. 38, S. 1803-1818.
39. Demeulemeester E., Herroelen W., Simpson W.P., Baroum S., Patterson J.H., Yang K.-K. (1994): On a Paper by Christofides et. al. for Solving the Multiple-Resource Constrained, Single Project Scheduling Problem; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 76, S. 218-228.
40. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. (1996): An Efficient Optimal Solution Procedure for the Preemptive Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 90; S. 334-348.
41. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. (1997a): A Branch and Bound Procedure for the Generalized Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: *Operations Research*, Vol. 45, S. 201-212.
42. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. (1997b): New Benchmark Results for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: *Management Science*, Vol. 43, S. 1485-1492.
43. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S., Elmaghraby S.E. (1996): Optimal Procedures for the Discrete Time/Cost Trade-Off Problem in Project Networks; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 88, S. 50-68.
44. Deo N., Pang C. (1984): Shortest-Path Algorithms: Taxonomy and Annotation; in: *Networks*, Vol. 14, S. 275-323.
45. Dinkelbach W. (1973): Modell - ein isomorphes Abbild der Wirklichkeit?; in: Grochla E., Szyperski N. (Hrsg.): *Modell- und computergestützte Unternehmensplanung*; Wiesbaden; S. 152-162.
46. Doersch R.H., Patterson J.H. (1977): Scheduling a Project to Maximize its Present Value: A Zero-One Programming Approach; in: *Management Science*, Vol. 23, S. 882-889.
47. Domschke W., Drexl A. (1991): Kapazitätsplanung in Netzwerken; in: *Operations Research Spektrum*, Vol. 13, S. 63-76.
48. Domschke W., Drexl A. (1995): *Einführung in Operations Research*; 3. Auflage; Berlin; Springer.
49. Drexl A. (1991): Scheduling of Project Networks by Job Assignment; in: *Management Science*, Vol. 37, S. 1590-1602.
50. Drexl A., Gruenewald J. (1993): Nonpreemptive Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling; in: *IIE Transactions*, Vol. 25(5), S. 74-81.
51. Dumond J., Mabert V.A. (1988): Evaluating Project Scheduling and Due Date Assignment Procedures: An Experimental Analysis; in: *Management Science*, Vol. 34, S. 101-118.

52. Eglese R.W. (1990): Simulated Annealing: A Tool for Operational Research; in: European Journal of Operational Research, Vol.46, S. 271-281.
53. Eiselt H.A. (1977): Operations Research Handbook: Standard Algorithms and Methods with Examples; Berlin, New York; de Gruyter.
54. Elmaghraby S.E. (1977): Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models; New York; Wiley.
55. Elmaghraby S.E. (1995): Activity Nets: A Guided Tour Through Some Recent Developments; in: European Journal of Operational Research, Vol. 82, S. 383-408.
56. Elmaghraby S.E., Herroelen W.S. (1990): The Scheduling of Activities to Maximize the Net Present Value of Projects; in: European Journal of Operational Research, Vol. 49, S. 35-49.
57. Etgar R., Shtub A., Leblanc L.J. (1996): Scheduling Projects to Maximize Net Present Value - The Case of Time-Dependent, Contingent Cash Flows; in: European Journal of Operational Research, Vol. 96, S. 90-96.
58. Evans J.R., Minieka E. (1992): Optimization Algorithms for Networks and Graphs; 2. bearbeitete und erweiterte Ausgabe; New York; Dekker.
59. Even S. (1979): Graph Algorithms; Potomac, Maryland; Computer Science Press.
60. Fisher M.L., Rinnoy Kann A.H.G. (1988): The Design, Analysis and Implementation of Heuristics; in: Management Science, Vol. 34, S. 263-265.
61. Franck B. (1995): Empirische Untersuchung von Prioritätsregeln für die ressourcenbeschränkte Projektplanung mit zeitlichen Minimal- und Maximalabständen; in: Kleinschmidt P., Bachem A., Derigs U., Fischer D., Leopold-Wildburger U., Möhring R. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 1995: Selected Papers of the Symposium on Operations Research (SOR '95), Passau, September 13-15, 1995; S. 144-149.
62. Franck B., Neumann K. (1996): Priority-Rule Methods for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Minimal and Maximal Time Lags - An Empirical Analysis; in: The Fifth International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS 96), Institute of Computing Science, Poznan, S. 88-91.
63. Garey M.R., Johnson D.S. (1979): Computers and Intractability; New York; Freeman.
64. Gewalt K., Kasper K., Schelle H. (1972): Netzplantechnik, Band 2: Kapazitätsoptimierung; München, Wien; Oldenbourg.
65. Glover F. (1990): Tabu Search: A Tutorial; in: Interfaces, Vol. 20, S. 74-94.
66. Golden B.L., Stewart W.R. (1985): Empirical Analysis of Heuristics; in: Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., Shmoys D.B. (Hrsg.): The Traveling Salesman Problem; New York; Wiley & Sons; S. 207-249.
67. Gutenberg E. (1979): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre; 23. Auflage; Berlin, Heidelberg; Springer.
68. Hastings N.A.J. (1972): On Resource Allocation in Project Networks; in: Operational Research Quarterly, Vol. 23, S. 217-221.
69. Heinen E. (1980): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre; 7. Auflage; Wiesbaden; Gabler.
70. Herroelen W.S. (1972): Resource-Constrained Project Scheduling - The State of the Art; in: Operational Research Quarterly, Vol. 23, S. 261-275.

71. Herroelen W.S., Demeulemeester E., Reyck B. de (1996): Resource-Constrained Project Scheduling - A Survey of Recent Developments; in: Zimmermann U., Derigs U., Gaul W., Möhring R.H., Schuster K.-P. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 1996, Selected Papers of the Symposium on Operations Research (SOR 96), Braunschweig, September 3-6, 1996, S. 197-202.
72. Herroelen W.S., Demeulemeester E.L. (1996): Project Management and Scheduling; in: European Journal of Operational Research, Vol. 90, S. 197-199.
73. Herroelen W.S., Dommelen P. van, Demeulemeester E.L. (1997): Project Network Models with Discounted Cash Flows - A Guided Tour through Recent Developments; in: European Journal of Operational Research, Vol. 100, S. 97-121.
74. Heyn W. (1969): Eine Systematik zur Erstellung und Berechnung von Netzplänen; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
75. Hörschgen H. (1992): Grundbegriffe der Betriebswirtschaftslehre; 3. Auflage; Stuttgart; Schäffer-Poeschel.
76. Icmeli O., Erenguc S.E., Zappe C.J. (1993): Project Scheduling Problems: A Survey; in: International Journal of Operations and Production Management, Vol. 13(11), S. 80-91.
77. Icmeli O., Erenguc S.S. (1996): A Branch and Bound Procedure for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows; in: Management Science, Vol. 42, S. 1395-1408.
78. Kelton W.D., Law A.M. (1978): A Mean-Time Comparison of Algorithms for the All-Pairs Shortest-Path Problem with Arbitrary Arc Lengths; in: Networks, Vol. 8, S. 97-106.
79. Kerzner H. (1979): Project Management - A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling; New York u.a.; Van Nostrand Reinhold Company.
80. Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C.D., Vecchi M.P. (1983): Optimization by Simulated Annealing; in: Science, Vol. 220, S. 671-680.
81. Knolmayer G., Rückle D. (1976): Betriebswirtschaftliche Grundlagen der Projektkostenminimierung in der Netzplantechnik; in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, Vol. 28, S. 431-447.
82. Kolen A., Pesch E. (1994): Genetic Local Search in Combinatorial Optimization; in: Discrete Applied Mathematics, Vol. 48, S. 273-284.
83. Kolisch R. (1995): Project Scheduling Under Resource Constraints; Heidelberg; Physica.
84. Kolisch R. (1996a): Efficient Priority Rules for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: Journal of Operations Management, Vol. 14, S. 179-192.
85. Kolisch R. (1996b): Serial and Parallel Resource-Constrained Project Scheduling Methods Revisited: Theory and Computation; in: European Journal of Operational Research, Vol. 90, S. 320-333.
86. Kolisch R. (1997): Investitionsplanung in Netzwerken; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Vol. 67, S. 1057-1072.
87. Kolisch R., Drexl A. (1996): Adaptive Search for Solving Hard Project Scheduling Problems; in: Naval Research Logistics, Vol. 43, S. 23-40.
88. Kolisch R., Drexl A. (1997): Local Search for Nonpreemptive Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling; in: IIE Transactions, Vol. 29, S. 987-999.

89. Kolisch R., Hartmann S. (1998): Heuristic Algorithms for Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis; erscheint in: Weglarz J. (Hrsg.): Handbook on Recent Advances in Project Scheduling; Amsterdam; Kluwer.
90. Kolisch R., Padman R. (1997): An Integrated Survey of Project Scheduling; Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, Nr. 463.
91. Kolisch R., Sprecher A., Drexl A. (1995): Characterization and Generation of a General Class of Resource-Constrained Project Scheduling Problems; in: Management Science, Vol. 41, S. 1693-1703.
92. Kramer D. (1994): Kostenorientierte Reihenfolgeplanung; Bergisch Gladbach, Köln; Eul.
93. Küpper W., Lüder K., Streitferdt L. (1975): Netzplantechnik; Würzburg, Wien; Physica.
94. Kurtulus I., Davis E.W. (1982): Multi-Project Scheduling: Categorization of Heuristic Rules Performance; in: Management Science, Vol. 28, S. 161-172.
95. Laarhoven P.J.M.v., Aarts E.H.L. (1987): Simulated Annealing: Theory and Applications; Dordrecht u.a.; Reidel.
96. Lawrence S.R., Morton T.E. (1993): Resource-Constrained Multi-Project Scheduling with Tardy Costs: Comparing Myopic, Bottleneck and Resource Pricing Heuristics; in: European Journal of Operational Research, Vol. 64, S. 168-187.
97. Lee J.-K., Kim Y.-D. (1996): Search Heuristics for Resource Constrained Project Scheduling; in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 47, S. 678-689.
98. Leon V.J., Balakrishnan R. (1995): Strength and Adaptability of Problem-Space Based Neighborhoods for Resource-Constrained Scheduling; in: Operations Research Spektrum, Vol. 17, S. 173-182.
99. Li K.Y., Willis R.J. (1992): An Iterative Scheduling Technique for Resource-Constrained Project Scheduling; in: European Journal of Operational Research, Vol. 56, S. 370-379.
100. Litke H.-D. (1995): Projektmanagement: Methoden, Techniken, Verhaltensweisen; 3. Auflage; München, Wien; Hanser.
101. Mason A.T., Moodie C.L. (1971): A Branch and Bound Algorithm for Minimizing Cost in Project Scheduling; in: Management Science, Vol. 18, S. B158-B173.
102. Minciardi R., Paolucci M., Puliafito P.P. (1994): Development of a Heuristic Project Scheduler under Resource Constraints; in: European Journal of Operational Research, Vol. 79, S. 176-182.
103. Möhring R.H. (1984): Minimizing Costs of Resource Requirements in Project Networks Subject to a Fixed Completion Time; in: Operations Research, Vol. 32, S. 89-120.
104. Mori M., Tseng C.C. (1997): A Genetic Algorithm for Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: European Journal of Operational Research, Vol. 100, S. 134-141.
105. Naphade K.S., Wu S.D., Storer R.H. (1997): Problem Space Search Algorithms for Resource-Constrained Project Scheduling; in: Annals of Operations Research, Vol. 70, S. 307-326.

106. Nazareth T., Verma S., Bhattacharya S., Bagchi A. (1999): The Multiple Resource Constrained Project Scheduling Problem: A Breadth-First Approach; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 112, S. 347-366.
107. Neumann K. (1975): *Operations Research Verfahren, Band III*; München, Wien; Hanser.
108. Neumann K. (1987a): Graphen und Netzwerke; in: Gal T. (Hrsg.): *Grundlagen des Operations Research*; Band 2; Berlin u.a.; Springer; S. 1-164.
109. Neumann K. (1987b): Netzplantechnik; in: Gal T. (Hrsg.): *Grundlagen des Operations Research*; Band 2; Berlin u.a.; Springer; S. 165-260.
110. Neumann K., Morlock M. (1993): *Operations Research*; München, Wien; Hanser.
111. Neumann K., Zhan J. (1994): Heuristics for the Minimum Project-Duration Problem with Minimal and Maximal Time Lags under Fixed Resource Constraints; Universität Karlsruhe, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Report 442.
112. Nudtasomboon N., Randhawa S.U. (1997): Resource-Constrained Project Scheduling with Renewable and Non-Renewable Resources and Time-Resource Tradeoffs; in: *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 32, S. 227-242.
113. Oguz O., Bala H. (1994): A Comparative Study of Computational Procedures for the Resource Constrained Project Scheduling Problem; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 72, S. 406-416.
114. Özdamar L., Ulusoy G. (1994): A Local Constraint Based Analysis Approach to Project Scheduling under General Resource Constraints; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 79, S. 287-298.
115. Özdamar L., Ulusoy G. (1995). A Survey on the Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: *IIE Transactions*, Vol. 27, S. 574-586.
116. Padman R., Smith-Daniels D.E., Smith-Daniels V.L. (1997): Heuristic Scheduling of Resource-Constrained Projects with Cash Flows; in: *Naval Research Logistics*, Vol. 44, S. 365-381.
117. Patterson J.H. (1976): Project Scheduling: The Effects of Problem Structure on Heuristic Performance; in: *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 23, S. 95-123.
118. Patterson J.H. (1984): A Comparison of Exact Approaches for Solving the Multiple Constrained Resource, Project Scheduling Problem; in: *Management Science*, Vol. 30, S. 854-867.
119. Patterson J.H., Huber W.D. (1974): A Horizon-Varying, Zero-One Approach to Project Scheduling; in: *Management Science*, Vol. 20, S. 990-998.
120. Patterson J.H., Roth G.W. (1976): Scheduling a Project under Multiple Resource Constraints: A Zero-One Programming Approach; in: *AIIE Transactions*, Vol. 8, S.449-455.
121. Patterson J.H., Slowinski R., Talbot F.B., Weglarz J. (1989): An Algorithm for a General Class of Precedence and Resource Constrained Scheduling Problems; in: Slowinski R., Weglarz J. (Hrsg.): *Advances in Project Scheduling*; Amsterdam; Elsevier; S. 3-28.
122. Patterson J.H., Talbot F.B., Slowinski R., Weglarz J. (1990): Computational Experience with a Backtracking Algorithm for Solving a General Class of Precedence and Resource-Constrained Scheduling Problems; in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 49, S. 68-79.

123. Paulik R. (1984): Kostenorientierte Reihenfolgeplanung in der Werkstattfertigung: Eine Simulationsstudie; Bern, Stuttgart; Haupt.
124. Perridon L., Steiner M. (1993): Finanzwirtschaft der Unternehmung; 7. Auflage; München; Vahlen.
125. Pirlot M. (1996): General Local Search Methods; in: European Journal of Operational Research, Vol. 92, S. 493-511.
126. Pritsker A.A.B., Watters L.J., Wolfe P.M. (1969): Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach; in: Management Science, Vol. 16, S. 93-108.
127. Radermacher F.J. (1984): Scheduling of Resource Constraint Project Networks; Passau; Universität Passau, Fakultät für Mathematik und Informatik: MIP.
128. Radermacher F.J. (1985): Scheduling of Project Networks; in: Annals of Operations Research, Vol. 4, S. 227-252.
129. Reichert O. (1994): Netzplantechnik; Braunschweig, Wiesbaden; Vieweg.
130. Reyck B. de, Demeulemeester E., Herroelen W. (1998): Local Search Methods for the Discrete Time/Resource Trade-Off Problem in Project Networks; in: Naval Research Logistics, Vol. 45, S. 553-578.
131. Reyck B. de, Herroelen W. (1998): A Branch-and-Bound Procedure for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Generalized Precedence Relations; in: European Journal of Operational Research, Vol. 111, S. 152-174.
132. Rinza P. (1994): Projektmanagement: Planung, Überwachung und Steuerung von technischen und nichttechnischen Vorhaben; 3. Auflage; Düsseldorf; VDI-Verlag.
133. Russell A.H. (1970): Cash Flows in Networks; in: Management Science, Vol. 16, S. 357-373.
134. Russell R.A. (1986): A Comparison of Heuristics for Scheduling Projects with Cash Flows and Resource Restrictions; in: Management Science, Vol. 32, S. 1291-1300.
135. Salewski F., Schirmer A., Drexl A. (1997): Project Scheduling under Resource and Mode-Identity Constraints: Model, Complexity, Methods and Application; in: European Journal of Operational Research, Vol. 102, S. 88-110.
136. Sampson S.E., Weiss E.N. (1993): Local Search Techniques for the Generalized Resource Constrained Project Scheduling Problem; in: Naval Research Logistics, Vol. 40, S. 665-675.
137. Scheer A.-W. (1978): Projektsteuerung; Wiesbaden; Gabler.
138. Schmitz H., Windhausen M.P. (1986): Projektplanung und Projektcontrolling: Planung und Überwachung von besonderen Vorhaben; 3. Auflage; Düsseldorf; VDI-Verlag.
139. Schröder H.J. (1970): Projekt-Management: Eine Führungskonzeption für außergewöhnliche Vorhaben; Wiesbaden; Gabler.
140. Schulte K.-W. (1984): Wirtschaftlichkeitsrechnung; Würzburg, Wien; Physica.
141. Schwarze J. (1978): Ein verallgemeinertes deterministisches Netzplanmodell; in: Zeitschrift für Operations Research, Vol. 22, S. 173-194.
142. Schwarze J. (1983): Netzplanteorie; Herne, Berlin; Neue Wirtschafts-Briefe.

143. Schwarze J. (1994): Netzplantechnik; 7. Auflage; Herne, Berlin; Neue Wirtschafts-Briefe.
144. Schwindt C. (1995): ProGen/max: A New Problem Generator for Different Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Minimal and Maximal Time Lags; Universität Karlsruhe, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Report 449.
145. Simpson III W.P., Patterson J.H. (1996): A Multiple-Tree Search Procedure for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: European Journal of Operational Research, Vol. 89, S. 525-542.
146. Slowinski R. (1980): Two Approaches to Problems of Resource Allocation Among Project Activities- A Comparative Study; in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 31, S. 711-723.
147. Slowinski R. (1981): Multiobjective Network Scheduling with Efficient Use of Renewable and Nonrenewable Resources; in: European Journal of Operational Research, Vol. 7, S. 265-273.
148. Slowinski R. (1989): Multiobjective Project Scheduling under Multiple-Category Resource Constraints; in: Slowinski R., Weglarz J. (Hrsg.): Advances in Project Scheduling; Amsterdam; Elsevier; S. 151-167.
149. Slowinski R., Soniewicki B., Weglarz J. (1994): DSS for Multiobjective Project Scheduling; in: European Journal of Operational Research, Vol. 79, S. 220-229.
150. Smith-Daniels D.E., Aquilano N.J. (1987): Using a Late-Start Resource-Constrained Project Schedule to Improve Project Net Present Value; in: Decision Sciences, Vol. 18, S. 617-630.
151. Smith-Daniels D.E., Padman R., Smith-Daniels V.L. (1996): Heuristic Scheduling of Capital Constrained Projects; in: Journal of Operations Management, Vol. 14, S. 241-254.
152. Speranza M.G., Vercellis C. (1993): Hierarchical Models for Multi-Project Planning and Scheduling; in: European Journal of Operational Research, Vol. 64, S. 312-325.
153. Spinner M. (1981): Elements of Project Management; Eaglewood Cliffs; Prentice-Hall.
154. Sprecher A. (1994): Resource-Constrained Project Scheduling; Berlin, Heidelberg; Springer.
155. Sprecher A., Drexel A. (1998): Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling by a Simple, General and Powerful Sequencing Algorithm; in: European Journal of Operational Research, Vol. 107, S. 431-450.
156. Sprecher A., Hartmann S., Drexel A. (1997): An Exact Algorithm for Project Scheduling with Multiple Modes; in: Operations Research Spektrum, Vol. 19, S. 195-203.
157. Sprecher A., Kolisch R., Drexel A. (1995): Semi-active, Active, and Non-delay Schedules for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem; in: European Journal of Operational Research, Vol. 80, S. 94-102.
158. Stinson J.P., Davis E.W., Khumawala B.M. (1978): Multiple Resource-Constrained Scheduling Using Branch and Bound; in: AIIE Transactions, Vol. 10, S. 252-259.
159. Talbot F.B. (1982): Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: The Nonpreemptive Case; in: Management Science, Vol. 28, S. 1197-1210.
160. Talbot F.B., Patterson J.H. (1978): An Efficient Integer Programming Algorithm with Network Cuts for Solving Resource-Constrained Scheduling Problems; in: Management Science, Vol. 24, S. 1163-1174.

161. Thesen A. (1977): Measures of the Restrictiveness of Project Networks; in: Networks, Vol. 7, S. 193-208.
162. Ulusoy G., Özdamar L. (1989): Heuristic Performance and Network/Resource Characteristics in Resource-Constrained Project Scheduling; in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 40, S. 1145-1152.
163. Valadares Tavares L. (1989): A Multi-Stage Model for Project Scheduling under Resource Constraints; in: Slowinski R., Weglarz J. (Hrsg.): Advances in Project Scheduling; Amsterdam; Elsevier; S. 315-326.
164. Vallée F. (1995): Kapitalbindung in kurzfristigen Entscheidungsmodellen; Frankfurt a.M.; Lang.
165. Viefhues D. (1982): Mehrzielorientierte Projektplanung: Methodologie und Entscheidungskalküle zur Projektablauf- und -anpassungsplanung; Frankfurt a.M., Bern; Lang.
166. Walther H., Nägler G. (1987): Graphen, Algorithmen, Programme; Wien, New York; Springer.
167. Wasielewski E.v. (1975): Praktische Netzplantechnik mit Vorgangsknotennetzen; Wiesbaden; Gabler.
168. Wasielewski E.v. (1977): Vergleich des Aufgliederungsgrades verschiedener Netzpläne; in: Zeitschrift für Operations Research, Vol. 21, S. B97-B108;
169. Werra D. de, Hertz A. (1989): Tabu Search Techniques; in: Operations Research Spektrum, Vol. 11, S. 131-141.
170. Wille H., Gewalt K., Weber H.D. (1972): Netzplantechnik, Band 1: Zeitplanung, 3. Auflage; München, Wien; Oldenbourg.
171. Wöhe G. (1996): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre; 19. Auflage; München; Vahlen.
172. Woodworth B.M., Willie C.J. (1975): A Heuristic Algorithm for Resource Leveling in Multi-Project, Multi-Resource Scheduling; in: Decision Sciences, Vol. 6, S. 525-540.
173. Yang K.K., Talbot F.B., Patterson J.H. (1992): Scheduling a Project to Maximize its Net Present Value: An Integer Programming Approach; in: European Journal of Operational Research, Vol. 64, S. 188-198.
174. Zäpfel G. (1982): Produktionswirtschaft: Operatives Produktions-Management; Berlin, New York; deGruyter.
175. Zhan J. (1991): Heuristische Ressourcenplanung in MPM-Netzplänen mit beschränkter Kapazität; Dissertation, Universität Karlsruhe.
176. Zhan J. (1992): Calendarization of Time Planning in MPM Networks; in: Zeitschrift für Operations Research, Vol. 36, S. 423-438.
177. Zhan J. (1994): Heuristics for Scheduling Resource-Constrained Projects in MPM Networks; in: European Journal of Operational Research, Vol. 76, S. 192-205.
178. Ziegler H. (1986): Projektablaufplanung bei komplexer Ablaufstruktur; Dissertation, Universität-Gesamtschule-Paderborn.

Notationen

c_{ij}^{aa}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen den Anfangszeitpunkten von Vorgang i und Vorgang j
c_{ij}^{ae}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j
c_{ij}^{ea}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang j
c_{ij}^{ee}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen den Endzeitpunkten von Vorgang i und Vorgang j
c_{Pi}^{aa}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen dem Projektanfang und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i
c_{Pi}^{ae}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen dem Projektanfang und dem Endzeitpunkt von Vorgang i
c_{iP}^{ae}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Projektende
c_{iP}^{ee}	Bewertung des zeitlichen Mindestabstands zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Projektende
\overline{c}_{ij}^{aa}	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen den Anfangszeitpunkten von Vorgang i und Vorgang j
\overline{c}_{ij}^{ae}	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j
\overline{c}_{ij}^{ea}	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang j
\overline{c}_{ij}^{ee}	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen den Endzeitpunkten von Vorgang i und Vorgang j
\overline{c}_{Pi}^{aa}	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen dem Projektanfang und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i
\overline{c}_{Pi}^{ae}	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen dem Projektanfang und dem Endzeitpunkt von Vorgang i

$\overline{c_{iP}^{ae}}$	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Projektende
$\overline{c_{iP}^{ee}}$	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Projektende
$\overline{c_{PP}^{ae}}$	Bewertung des zeitlichen Höchstabstands zwischen dem Projektanfang und dem Projektende
C_P	Projektdauerabhängige Kosten
C_R	Ressourcenbedingte Kosten
C_{Rrt}^B	Belastungskosten der Ressource r in der Periode t
C_{Rrt}^A	Anpassungskosten der Ressource r zum Zeitpunkt t
C_V	Gesamte direkte Vorgangskosten
C_{Vim_i}	Direkte Vorgangskosten des Vorgangs i im Modus m_i
C_{im_i}	Gesamte Vorgangskosten des Vorgangs i im Modus m_i
CF_i	Cash Flow des Vorgangs i zum Zeitpunkt t_i^e
CRV_r	Ressourcenverfügbarkeitskosten der Ressource r
D_{im_i}	Durchführungsdauer des Vorgangs i im Modus m_i
D_{Z_1}	Dauer der kontrahierten Zyklenstruktur Z_1
E_c	Pfeilmenge des Netzwerks N
E'_{cl}	Pfeilmenge der Zyklenstruktur Z_1
E'_c	Pfeilmenge des kontrahierten Netzwerks N'
E_{cK}	Pfeilmenge zur betrachteten Menge M_K aller einzuplanenden Bezugszeitpunkte
f_i^a	Frühestmöglicher Einplanungstermin für den Anfangszeitpunkt t_i^a des Vorgangs i

f_i^e	Frühestmöglicher Einplanungstermin für den Endzeitpunkt t_i^e des Vorgangs i
f_p^a	Frühestmöglicher Einplanungstermin für den Projektstart t_p^a
f_p^e	Frühestmöglicher Einplanungstermin für das Projektende t_p^e
$f_u^{\prime\alpha}$	Frühestmöglicher Einplanungstermin für den Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in M_K$, bezogen auf die Menge M_K aller einzuplanenden Bezugszeitpunkte
\hat{f}_u^α	Aktualisierter frühestmöglicher Einplanungstermin für den Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in M_K$
\tilde{f}_i^a	Aktualisierter frühestmöglicher Einplanungstermin unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Ressourcenschranken für den Anfangszeitpunkt t_i^a des Vorgangs i
I	Anzahl der Vorgänge eines betrachteten Projekts
$((i, j), c'_{ij})$	Gerichteter Pfeil vom Knoten i zum Knoten j mit der Bewertung c'_{ij}
$K_{rPer}(t)$	Verfügbare Einheiten von Ressource r in der Periode t
$K_{rPr o}$	Verfügbare Einheiten von Ressource r pro Projekt
$k_{im,r}$	Bedarf des Vorgangs i im Modus m_i an der Ressource r in einer Periode
k_{rt}	Anzahl der in Periode t durch die sich in Ausführung befindlichen Vorgänge beanspruchten Einheiten der Ressource r
L	Anzahl der Zyklenstrukturen Z_1 des Netzwerks N mit $ V_1 \geq 3$
L_{ij}	Länge eines längsten Wegs vom Knoten i zum Knoten j
$L_{uv}^{\alpha\beta}$	Länge eines längsten Wegs vom Bezugsknoten t_u^α zum Bezugsknoten t_v^β
M_i	Anzahl verschiedener Durchführungsmodi für Vorgang i

m_i	Durchführungsmodus des Vorgangs i
$\bar{m} = ((m_1)_m^-, \dots, (m_I)_m^-)$	Kombination von Durchführungsmodi
M_K	Menge der einzuplanenden Bezugszeitpunkte (Einplanungsmenge)
M_E	Menge der einplanbaren Vorgänge, Zyklenstrukturen bzw. Bezugszeitpunkte (Entscheidungsmenge)
M_P	Menge der bereits eingeplanten Bezugszeitpunkte
M_V	Menge aller für die Verletzung von Ablaufbedingungen verantwortlichen Bezugszeitpunkte
M_A	Menge aller aufgrund der Verletzung von Ablaufbedingungen wieder auszuplanenden Bezugszeitpunkte
MA'_K	Minimale zeitliche Ausdehnung der betrachteten Knotenmenge M_K
MZA_1	Maximale zeitliche Ausdehnung der betrachteten Zyklenstruktur Z_1
$N = (V, E_c)$	Netzwerk
$N' = (V', E'_c)$	Kontrahiertes Netzwerk
p_u^α	Wartegrad des Bezugszeitpunkts t_u^α
P	Restriktivität eines Netzwerks
$P(i)$	Menge aller Vorgänger des Knoten i im Netzwerk N
$\bar{P}(i)$	Menge aller Vorgänger des Knoten i im weiteren Sinne im Netzwerk N
R	Anzahl verschiedener Ressourcentypen
RP	Menge aller zulässigen Ressourcenpläne y für eine vorgegebene Projektplanungssituation
RT	Abschätzer für die Restriktivität eines Netzwerks
R^{aa}	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang j ein Mindestabstand einzuhalten ist

R^{ae}	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j ein Mindestabstand einzuhalten ist
R^{ea}	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang j ein Mindestabstand einzuhalten ist
R^{ee}	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j ein Mindestabstand einzuhalten ist
R_{PA}^{aa}	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Projektanfangszeitpunkt und dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs ein Mindestabstand einzuhalten ist
R_{PA}^{ae}	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Projektanfangszeitpunkt und dem Endzeitpunkt des Vorgangs ein Mindestabstand einzuhalten ist
R_{PE}^{ae}	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs und dem Projektendzeitpunkt ein Mindestabstand einzuhalten ist
R_{PE}^{ee}	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Endzeitpunkt des Vorgangs und dem Projektendzeitpunkt ein Mindestabstand einzuhalten ist
$\overline{R^{aa}}$	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang j ein Höchstabstand einzuhalten ist
$\overline{R^{ae}}$	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Anfangszeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j ein Höchstabstand einzuhalten ist
$\overline{R^{ea}}$	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Anfangszeitpunkt von Vorgang j ein Höchstabstand einzuhalten ist
$\overline{R^{ee}}$	Menge aller Vorgangspaare $(i, j) \in (I \times I)$, für die zwischen dem Endzeitpunkt von Vorgang i und dem Endzeitpunkt von Vorgang j ein Höchstabstand einzuhalten ist
$\overline{R_{PA}^{aa}}$	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Projektanfangszeitpunkt und dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs ein Höchstabstand einzuhalten ist

$\overline{R_{PA}^{ae}}$	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Projektanfangszeitpunkt und dem Endzeitpunkt des Vorgangs ein Höchstabstand einzuhalten ist
$\overline{R_{PE}^{ae}}$	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Anfangszeitpunkt des Vorgangs und dem Projektendzeitpunkt ein Höchstabstand einzuhalten ist
$\overline{R_{PE}^{ee}}$	Menge aller Vorgänge i , für die zwischen dem Endzeitpunkt des Vorgangs und dem Projektendzeitpunkt ein Höchstabstand einzuhalten ist
$S(i)$	Menge aller Nachfolger des Knoten i im Netzwerk N
$\overline{S}(i)$	Menge aller Nachfolger des Knoten i im weiteren Sinne im Netzwerk N
s_i^a	Spätestmöglicher Einplanungstermin für den Anfangszeitpunkt t_i^a des Vorgangs i
s_i^e	Spätestmöglicher Einplanungstermin für den Endzeitpunkt t_i^e des Vorgangs i
s_P^a	Spätestmöglicher Einplanungstermin für den Projektstart t_P^a
s_P^e	Spätestmöglicher Einplanungstermin für das Projektende t_P^e
$s_u'^{\alpha}$	Spätestmöglicher Einplanungstermin für den Bezugszeitpunkt $t_u^{\alpha} \in M_K$, bezogen auf die Menge M_K der einzuplanenden Bezugszeitpunkte
st_u^{α}	Zeitstrafe des Bezugszeitpunkts t_u^{α}
t	Zeitpunkt bzw. Zeitintervall $t =]t - 1; t]$
t_i^a	Anfangszeitpunkt des Vorgangs i
t_i^e	Endzeitpunkt des Vorgangs i
t_P^a	Projektbeginn
t_P^e	Projektende

$(t_u^\alpha)_y$	Dem Bezugszeitpunkt t_u^α durch den Ressourcenplan y zugewiesener Einplanungszeitpunkt
$(t_u^{\prime\alpha})_y$	Vorläufiger Termin für den Bezugszeitpunkt $t_u^\alpha \in M_K$, bezogen auf den Teilressourcenplan y' bzw. y'_1
$(\tilde{t}_i^{\prime\alpha})_{m_i}$	Termin, zu dem der Bezugszeitpunkt t_i^α im konkreten Modus m_i im Falle seiner Auswahl eingeplant werden würde
$\tilde{t}_{Z_1}^{\prime\alpha}$	Termin, zu dem der Bezugszeitpunkt $t_{Z_1}^\alpha$ im Falle seiner Auswahl eingeplant werden würde
\tilde{T}_i^e	Sollfertigstellungstermin des Vorgangs i
V	Knotenmenge des Netzwerks N
V'_1	Knotenmenge der Zyklenstruktur Z_1
V'	Knotenmenge des kontrahierten Netzwerks N'
w_i	Gewichtungsfaktor des Vorgangs i
x	Zeitplan für eine Projektablaufstruktur
$x_{F,\bar{m}}$	Frühestmöglicher Zeitplan für eine vorgegebene Durchführungsmodi-Kombination \bar{m}
$x_{S,\bar{m}}$	Spätestmöglicher Zeitplan für eine vorgegebene Durchführungsmodi-Kombination \bar{m}
x_i	Binärvariable bezogen auf den Vorgang i
x_{ij}	Binärvariable, bezogen auf die Vorgänge i und j
y	Ressourcenplan für eine vorgegebene Projektplanungssituation
y'_1	Teilressourcenplan für die Zyklenstruktur Z_1 , $1 \in \{1, \dots, L\}$
y'	Teilressourcenplan für das kontrahierte Netzwerk N'

$Z_1 = (V'_1, E'_{c1})$	Zyklenstruktur des Netzwerks N
ZP	Menge aller zulässigen Zeitpläne x einer vorgegebenen Projektablaufstruktur
\overline{ZP}	Menge aller zulässigen Zeitpläne x einer vorgegebenen Projektablaufstruktur, für die $(t_p^e)_x \leq s_p^e$ gilt
$ZP_{\overline{m}}$	Menge aller zulässigen Zeitpläne x einer vorgegebenen Projektablaufstruktur für eine vorgegebene Durchführungsmodi-Kombination \overline{m}
z	Zinssatz
ZÖ	Ökonomisch orientiertes Zielkriterium
ZT	Technisch orientiertes Zielkriterium

LEBENS LAUF

- Persönliche Daten** Geboren am 28. April 1971 in Bonn,
deutsche Staatsangehörigkeit, ledig.
- Schule** 09/1977 - 07/1981 Grundschule in Icking.
09/1981 - 06/1990 Gymnasium und Abitur in Icking.
- Studium** 11/1990 - 04/1995 Maschinenbaustudium mit Schwerpunkt in
Fertigungs- und Betriebstechnik an der Technischen Universität
München und der University of California at Los Angeles (UCLA)
- Promotion** 07/1995 – 04/1999 Anfertigung der Dissertation am Lehrstuhl für
Betriebswirtschaftslehre mit Schwerpunkt Fertigungswirtschaft an
der Universität Passau.
12/1999 Abschluß des Rigorosums