

NETZPLANTECHNIK (NPT) ALS WICHTIGES INSTRUMENT DES PROJEKTMANAGEMENTS GRUNDLAGEN

Bodo Runzheimer, Ph.D., Dražen Barković, Ph.D.

Abstract

A challenging branch of mathematics called Graph Theory was the inspiration for developing two important procedures which are quite illustrative, and whose principles are relatively easy to understand and learn. This has certainly contributed to the importance that these procedures have gained in practice. These are the network planning technique for planning and monitoring of projects, and the decision tree procedure which is used to illustrate decision making problems

JEL classification: C44, C61, O22

Keywords: Project Management, Network Planning Technique, Decision Tree Procedure, Critical Path Method, Program Evaluation and Review Technique

Schon seit Jahren spielt das **Projektmanagement**, d.h. die Planung, Steuerung und Überwachung von Projekten in Unternehmen und Verwaltung eine wichtige Rolle. „In den letzten Jahren hat das Projektmanagement eine zunehmende Bedeutung erlangt“ (*Schwarze, J., 2006, S. 5*). Zur Bewältigung von Projekten sind neben den projektbezogenen Fachkenntnissen auch solide Kenntnisse der Grundsätze, Methoden und Techniken des Projektmanagements nötig; dabei stellt die **NPT** ein wichtiges Werkzeug dar.

In der Praxis spielen graphentheoretische Verfahren eine besondere Rolle bei:

- der anschaulichen grafischen Darstellung von Abläufen und Strukturen;
- der Berechnung von optimalen (längsten, kürzesten, kostenminimalen oder gewinnmaximalen) Wegen;
- der Berechnung maximaler Flüsse in Netzwerken.

Oft ist schon die Darstellung eines Sachverhaltes in Form eines Graphen von großem Nutzen, der allein dadurch entsteht, dass es für die Aufstellung des Graphen erforderlich ist, das Problem bis in die Details zu durchdringen.

1. Grundlagen der Netzplantechnik

Die **Netzplantechnik (NPT)** stellt Methoden zur **Planung und Überwachung** von **Projekten** bereit. Die NPT hat mehrere voneinander unabhängige Wurzeln. 1957 wurde in USA bei *Dupont de Nemours* in Zusammenarbeit mit *Ramington*

Rand die „**Critical Path Method**“ (CPM) entwickelt. Beim Bau der Polarisrakete wurde 1958 das Planungssystem „**Program Evaluation and Review Technique**“ (PERT) geschaffen. Gleichzeitig wurde von einer französischen Beratungsfirma, die zu einer internationalen Gruppe von Beratungsfirmen namens *METRA* gehört, die **Metra-Potential-Methode (MPM)** als Terminplanungsmethode für den Reaktorbau entwickelt. All diese Methoden haben ein **grafisches Modell** des zeitlichen Ablaufs eines Projektes, das **Netzplan** genannt wird, zur Grundlage. CPM, PERT, MPM und ihre zahlreichen Varianten und Weiterentwicklungen werden unter dem Begriff **Netzplantechnik** (auch Netzwerktechnik oder Netzwerkanalyse genannt) zusammengefasst. Unter **NPT** versteht man alle Verfahren zur:

- Beschreibung,
- Planung,
- Steuerung,
- Überwachung

von Projektablaufen auf der Grundlage von **Netzplan-Modellen**. Diese Definition entspricht DIN 69 900 (DIN 69900, Netzplantechnik, Deutscher Normenausschuss, Frankfurt 1983). Soweit die hier benötigten Begriffe vereinheitlicht sind, werden sie der genannten Norm bzw. den Empfehlungen der *Deutschen Gesellschaft für Operations Research* entnommen. Die Durchführung von Projekten benötigt **Zeit**, verursacht **Kosten** und erfordert den Einsatz gewisser Hilfsmittel (**Einsatzmittel**), worunter die sog. „Einsatzfaktoren“, also Betriebsmittel (Maschinen etc.), Arbeitskräfte und Werkstoffe, verstanden werden. Entsprechend werden in der **NPT** Methoden zur:

- Zeitplanung (Terminplanung),
- Kostenplanung,
- Kapazitätsplanung,
- Finanzplanung

bereitgestellt. **Kernstück der NPT ist die Zeitplanung**. Auf den Ergebnissen der Zeitplanung bauen die weiteren Anwendungen auf. Als **Beispiele** für die Anwendung der NPT seien genannt:

Aufbau einer Fabrik, Durchführung von Wartungsarbeiten, Entwicklung eines Waffensystems und Bau eines Atomkraftwerkes waren die ersten Anwendungen. In der Zwischenzeit wird die NPT in vielen Bereichen der Wirtschaft eingesetzt (siehe *Homburg, C.*, 2000, S. 475 ff.; *Schwarze, J.*, 2006, S. 13 ff.; *Domschke, W., Drexler, A.*, 2007, S. 112 ff.; *Corsten, H. u.a.*, 2008, S. 120 ff.; *Litke, H.-D.*, 2007, S. 18 ff.). Bei diesen Beispielen handelt es sich um

Projekte. Der Begriff „**Projekt**“ steht im Gegensatz zu sich dauernd wiederholenden Vorgängen. Er beinhaltet, dass eine Leistung einmalig in ganz bestimmter Art und Weise durchgeführt wird.

Da sich solche Projekte gewöhnlich nicht identisch wiederholen bzw. solche Projekte überhaupt noch nicht abgewickelt wurden, kann sich der Planer nicht allein auf seine Erfahrungen mit ähnlichen Projekten stützen. Er benötigt ein Hilfsmittel wie die **NPT**, diese wird in Zusammenhang mit dem Projektmanagement gesehen. „Netzplantechnik ist *ein* Hilfsmittel des Projektmanagements, aber nicht das Einzige“ (Schwarze, J., 2006, S. 31).

Welche **Voraussetzungen** hat ein Projekt zu erfüllen, damit es mit NPT geplant und seine Abwicklung gesteuert und überwacht werden kann?

Es geht um die Erreichung bestimmter **vorgegebener Ziele**. Dabei muss es sich um ein **abgeschlossenes Projekt** handeln, bei dem Anfangs- und Endpunkte definierbar sind.

Das Projekt muss **in einzelne Vorgänge** (Aufgaben, Tätigkeiten, Aktivitäten, „Jobs“) **aufgliedert** werden können. Alle Vorgänge, die zur Erreichung der Ziele erledigt sein müssen, bilden das Projekt.

Diese Aufgaben (Vorgänge) unterliegen hinsichtlich ihrer Durchführung **Reihenfolgebedingungen**, die auf die **Projektlogik** zurückzuführen sind. Ein Vorgang kann z.B. erst nach Abschluss von anderen Vorgängen begonnen werden. Diese Vorgänge **beanspruchen Zeit, Einsatzmittel und verursachen damit Kosten**.

Es muss sichergestellt werden können, dass die plangerechte Durchführung des Projektes **kontrolliert** werden kann, d.h. zu jedem Zeitpunkt der Projektrealisierung muss es möglich sein, **Soll-Ist-Vergleiche** durchzuführen, um ggf. **Anpassungsmaßnahmen** ergreifen zu können (Steuerungsmöglichkeit).

Ein großer **Vorteil der NPT** besteht darin, dass durch die **grafische Darstellung** ein Projekt **transparent** gemacht wird. Insbesondere können die **gegenseitigen Abhängigkeiten der Vorgänge** klar aufgezeigt werden.

Ein weiterer Vorteil der NPT ist, dass sie ohne aufwändige zusätzliche Vorarbeiten durchgeführt werden kann. Darüber hinaus kann sie sich der Unterstützung durch Computer bedienen (Netzplanprogramme wie z.B. TIME LINE mit CPM, PERT oder Microsoft Project - „MS Project“ - bzw. Algorithmen der Graphentheorie, wie z.B. in LINGO – „LINGO verbindet eine grafische Entwicklungsumgebung und eine komplette Modellierungssprache mit einem leistungsstarken linearen, ganzzahligen, quadratischen und

nichtlinearen Gleichungslöser.“ (www.additive-net.de; vgl. auch Lutz, M., 1998, S. 15 und S. 213).

Nach einer von verschiedenen Autoren vorgeschlagenen Gliederung zerfällt die NPT in die **Stufen**:

Strukturanalyse - Strukturplanung,
Zeitanalyse - Zeitplanung,
Kostenanalyse - Kostenplanung,
Kapazitätsanalyse - Kapazitätsplanung.

Die Stufen können jedoch nicht losgelöst voneinander und auch nicht für ein Projekt allein betrachtet werden. Vielmehr unterliegen die Ergebnisse jeder Planungsstufe starken Einflüssen aus anderen Stufen bzw. aus den Planungen für andere Projekte. Damit sind die eigentlichen **Probleme der NPT** angesprochen. Wenn nach einem ersten Planungsschritt (Strukturplanung, Ablaufplanung) mit einer gewissenhaften Erfassung und grafischen Darstellung des Ablaufs an die Zeitplanung als dem zweiten Schritt gegangen wird, so erscheint dies vom Standpunkt des Praktikers insofern als eine reichlich theoretische Angelegenheit, als die vorgenommenen Zeitplanungen unter einer Reihe von Abstraktionen erfolgen. Bei der Zeitplanung sind nicht nur die Struktur und die Zeit, sondern auch die Kosten und die Kapazitäten zu ermitteln und zu berücksichtigen. Die Projektplanung kann folglich erst als abgeschlossen gelten, wenn in allen Stufen des behandelten Projektes und unter Berücksichtigung der außerdem im Betrieb noch abzuwickelnden Projekte eine durchführbare Lösung gefunden ist, die darüber hinaus noch den betrieblichen Zielen möglichst nahe kommt.

2 *Strukturplanung*

Die Planung der **Ablaufstruktur** eines **Projektes** setzt detaillierte Informationen über die Struktur des Projektes voraus.

2.1 **Strukturanalyse**

Der **erste Schritt der Strukturanalyse** besteht darin, dass **sämtliche Vorgänge** des Projektes **ermittelt werden**, d.h. das Gesamtprojekt wird in die erforderlichen Arbeitsgänge zerlegt. **Vorgänge** sind alle Aktivitäten, die **Zeit beanspruchen**, also auch Lieferzeiten, technisch bedingte Wartezeiten - z.B. Abbindedauer von Beton -, Liegezeiten etc. Sämtliche Vorgänge des Projektes werden in einer Liste (**Vorgangsliste**) zusammengestellt.

Es erhebt sich hier die Frage, wie detailliert, d.h. wie fein soll das Projekt im Netzplan dargestellt werden? Die Grundsatzentscheidung ist, was als Vorgang angesehen werden soll, d.h. vor allem wie „groß“ die Vorgänge sein sollen. Der

Begriff des Vorganges ist sehr weit gefasst. So kann z.B. das Anbringen des Innenputzes in einem Gebäude als **einen** Vorgang definiert werden. Es ist aber auch möglich, diese Arbeiten aufzuteilen und beispielsweise das Verputzen jeder Zimmerdecke, jeder Zimmerwand, das Einputzen der Fenster etc. jeweils als einen Vorgang aufzufassen. Die Frage, wie **fein** die Analyse und Planung der Ablaufstruktur eines Projektes vorgenommen werden soll, kann nicht allgemein beantwortet werden. Die Gliederung eines Projektes in **Vorgänge** wird so fein vorgenommen, dass eine hinreichende Abgrenzung jedes Vorgangs gegenüber den anderen Vorgängen möglich ist und Informationen über Abhängigkeiten der Vorgänge nicht verloren gehen. Der Grad der Zerlegung des Projektes bzw. des Netzplans (**Detaillierungsgrad**) hängt in erster Linie vom Umfang der Informationen ab, die der Netzplan liefern soll. Je nach Verwendungszweck - z.B. Information für die Geschäftsleitung oder für den Bauleiter - wird man häufig für **dasselbe Projekt verschiedene Netzpläne unterschiedlichen Detaillierungsgrades** erstellen. Bei größeren Projekten - insbesondere, wenn sie sich über einen längeren Zeitraum erstrecken - ist es oft zweckmäßig, das Projekt zunächst nur sehr grob zu analysieren und einen **Übersichtsnetzplan** (Grob- oder Rahmenplan) anzufertigen. Die Vorgänge dieses Übersichtsplanes umfassen jeweils mehrere Aktivitäten („Sammelvorgänge“), die dann zerlegt werden können. Jede Detaillierung (Verfeinerung) eines Netzplanes stellt eine Untergliederung in „kleinere“ Vorgänge dar. Umgekehrt können Vorgänge eines **Detailnetzplanes** durch Zusammenfassung **verdichtet** werden.

Sind alle Vorgänge des Projektes zusammengestellt, werden im **zweiten Schritt der Strukturanalyse** die logisch bzw. technologisch und wirtschaftlich bedingten **Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen ermittelt**. Hierbei geht es vor allem um die **Reihenfolge** der Vorgänge. Dabei sind für jeden Vorgang folgende Fragen zu beantworten:

Welche Vorgänge gehen dem in Frage stehenden Vorgang **unmittelbar voraus**; welche Vorgänge müssen beendet sein, damit der betreffende Vorgang beginnen kann? Das Ergebnis sind die „**Vorgänger**“ des betrachteten Vorgangs. Z.B. müssen die Fundamente ausgeschachtet sein, bevor sie betoniert werden können - „Ausschachten der Fundamente“ ist „Vorgänger“ für „Betonieren der Fundamente“.

Welche Vorgänge **schließen sich unmittelbar** an den betrachteten Vorgang **an**? Das Ergebnis sind die „**Nachfolger**“ des betreffenden Vorgangs. Für die Strukturplanung ist es ausreichend, wenn man entweder die „**Vorgänger**“ **oder die „Nachfolger**“ für jeden Vorgang bestimmt.

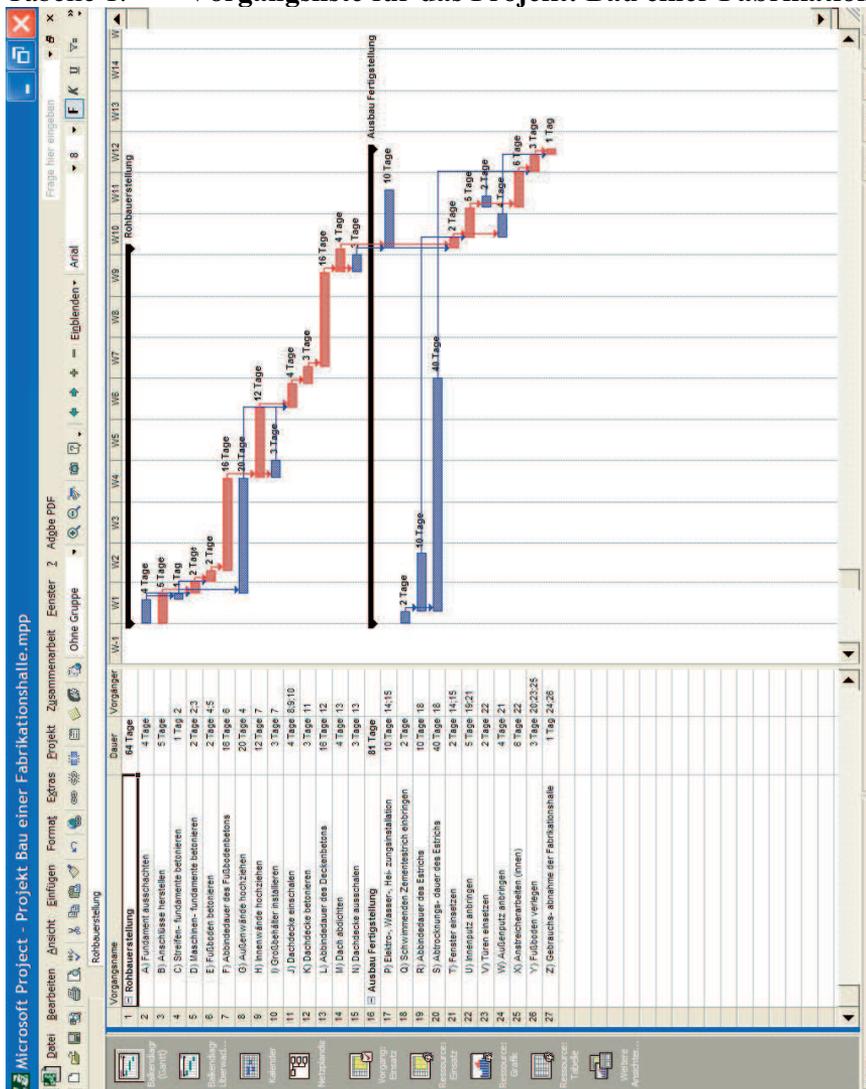
Welche Vorgänge können **parallel ausgeführt** werden?

Bei der Strukturanalyse eines Projektes zeigt sich, dass ein großer Teil der **Abhängigkeiten nicht eindeutig** festliegt. Die Reihenfolge von Vorgängen kann also vertauscht werden. Vielfach können Vorgänge sowohl nacheinander als auch parallel durchgeführt werden. Hier sind dann oft Fragen der Zweckmäßigkeit (z.B. Kapazitätsüberlegungen) ausschlaggebend. Bei der Projektplanung muss man sich jedoch für Abhängigkeit eindeutig entscheiden. Sind andere Abhängigkeiten möglich, so kann man diese protokollieren, um darauf bei einer eventuell erforderlichen Planrevision zurückgreifen zu können. In der **Vorgangsliste** können neben den Vorgängen (Aufgaben) des Projektes und den ermittelten Abhängigkeiten weitere wichtige Informationen zusammengestellt werden, wie z.B. die für die Ausführung verantwortlichen Stellen, Zeitbedarf, Kosten und differenzierter Kapazitätsbedarf der Vorgänge. Die Vorgangslisten werden häufig in Projektsteuerungssoftware implementiert. In Tabelle 1 ist für ein **Projektbeispiel** „Bau einer Fabrikationshalle“ - das im Folgenden zur Veranschaulichung ständig herangezogen werden soll – die Vorgangsliste in die Software „MS Project“ eingegeben worden. Die Liste umfasst zunächst nur den Namen, die Dauer und den Vorgänger eines jeden Vorganges. MS Project ergänzt die Vorgangsliste bereits durch eine Balkengraphik (Gantt-Diagramm). Auch wenn diese Art der Projekt-Darstellung sehr anschaulich ist, so eignet sie sich nur für kleinere Projekte oder zur Darstellung von Zusammenhängen zwischen größeren Teilprojekten. Bei einer komplexen Anzahl von Vorgängen und Vorgangsbeziehungen lässt sich ein Projekt mit Hilfe von Gantt-Diagrammen nicht mehr effizient planen. Zu jedem Vorgang ist ein Buchstabe angegeben, der später als Abkürzung für den jeweiligen Vorgang benutzt werden soll. Ein Projekt lässt sich leicht in **Teilprojekte** zerlegen, um die Übersichtlichkeit nicht zu stören. Im Beispiel bietet sich folgende Teilung an:

- Teilprojekt I: Rohbauerstellung,
- Teilprojekt II: Ausbau und Fertigstellung.

Im Gegensatz zu diesem Projektbeispiel muss nicht immer der genaue Projektablauf im Planungsstadium bekannt sein. Bei so genannten **stochastischen Strukturen** ist der Projektablauf ungewiss, weil nicht von vornherein sicher ist, welche erfassten denkmöglichen Vorgänge tatsächlich realisiert werden. Das ergibt sich erst bei Realisierung des Projekts und ist abhängig von den vorher gewonnenen Ergebnissen (z.B. Forschungs- und Entwicklungsprojekte). Einzelne Vorgänge des Projekts werden dann nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit realisiert, und es ist mit verschiedenen „Projektausgängen“ zu rechnen. Zur Behandlung der stochastischen Projektstrukturen wurde ein Zweig der NPT entwickelt, nämlich so genannte **Entscheidungsnetzpläne** (vgl. *Schwarze, J.*, 2006, S. 167 ff.; *Corsten, H. u.a.*, 2008, S. 226 ff.).

Tabelle 1: Vorgangliste für das Projekt: Bau einer Fabrikationshalle



2.2 Darstellung der Ablaufstruktur

2.2.1 Formen der Netzplandarstellung

Die **Darstellungsform der NPT** ist der „endliche **gerichtete Graph**“. Jedes Netz besteht aus einer Reihe von Knoten, die untereinander durch Pfeile („gerichtete Kanten“) verbunden sind. Je nachdem, ob bei der grafischen Darstellung die Vorgänge durch die Pfeile oder durch die Knoten des Netzes dargestellt werden, wird unterschieden in:

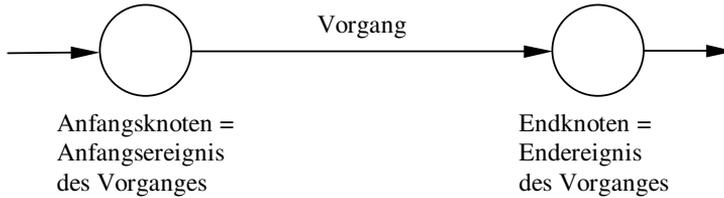
- (1) kanten- oder pfeilorientierte und
- (2) knotenorientierte Netzwerke:
 - (1a) Liegt das Schwergewicht der Projektplanung auf der Betrachtung der **Vorgänge**, dann handelt es sich um ein **Vorgangspfeilnetz**, wenn die Vorgänge durch die **Pfeile** dargestellt werden. Vorgangspfeilnetze werden bei **CPM** verwendet.
 - (2a) Liegt das Schwergewicht der Projektplanung auf der Betrachtung der **Ereignisse**, dann handelt es sich um ein **Ereignisknotennetz**, wenn die Ereignisse durch die **Knoten** dargestellt werden. Ereignisknotennetze werden bei **PERT** verwendet.
 - (2b) Liegt das Schwergewicht der Projektplanung auf der Betrachtung der Vorgänge, dann handelt es sich um ein **Vorgangsknotennetz**, wenn die Vorgänge durch die **Knoten** dargestellt werden. Vorgangsknotennetze werden bei **MPM** verwendet.

In der praktischen Anwendung der Netzplantechnik waren die Vorgangspfeilnetze nach CPM zunächst weit verbreitet. Mit Aufkommen von Netzplansoftware sind zunehmend Vorgangsknotennetze zur Anwendung gekommen (*Schwarze, J., 2006, S. 34*).

2.2.2 Critical Path Method - CPM

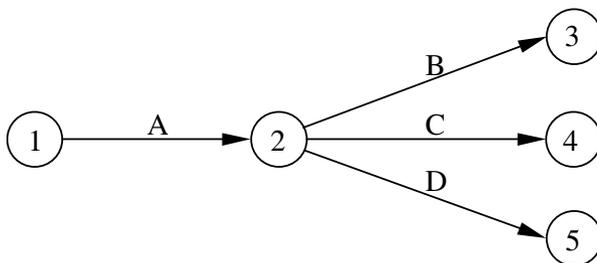
Die „**Methode des kritischen Weges**“ (**CPM**) arbeitet mit **Vorgangspfeilnetzen**. Die Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen werden bei CPM durch Pfeile dargestellt, indem man die Knoten zweier unmittelbar aufeinander folgender Vorgänge durch Pfeile verbindet. Hierbei kommt der Länge und Form der Pfeile keine Bedeutung zu.

Abbildung 1: **Anordnungsbeziehung**



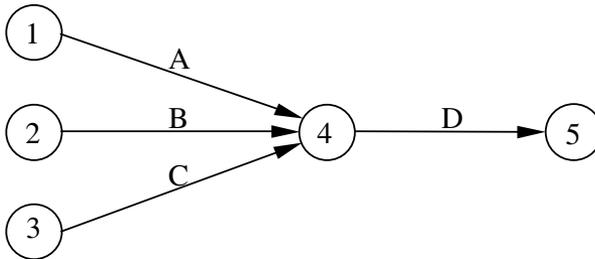
Zu jedem Vorgang gehören ein **Anfangsereignis** und ein **Endereignis**. Die Ereignisse heißen auch **Zeitpunkte**. Z.B. sind der Beginn und das Ende des ersten oder n-ten Vorgangs Ereignisse. Besonders zu erwähnen sind das **Startereignis** (Beginn der Projektdurchführung - Beginn des ersten Vorgangs) und das **Zielereignis** (Fertigstellung des Projektes). Ereignisse, denen bei der Projektrealisierung eine besondere Bedeutung beigemessen wird, heißen **Meilensteine** (z.B. Rohbaufertigstellung). Meilensteine werden in der Praxis besonders gekennzeichnet. Die Anordnungsbeziehungen in diesem System setzen voraus, dass jeder dargestellte Vorgang oder „Teil“-Vorgang abgeschlossen sein muss, ehe nachfolgende Vorgänge beginnen können. Es besteht eine „**Ende-Anfang-Beziehung**“ zweier aufeinander folgender Vorgänge. Jeder Knoten stellt - abgesehen von Start- und Zielereignis - zugleich Anfangs- und Endereignis für verschiedene Vorgänge dar. Anfang und Ende eines jeden Vorgangs werden durch je einen Knoten bezeichnet und eindeutig nummeriert. Dabei können die Knoten des Netzplanes mehrwertig sein, d.h. Ereignisse können mehrwertig sein:

Abbildung 2: **Anordnungsbeziehung**



Haben mehrere Vorgänge B, C, D einen gemeinsamen Vorgänger A (A hat dann B, C, D als Nachfolger), so ist Knoten 2 Endereignis von A und zugleich Anfangsereignis von B, C, D (also **aller** unmittelbar nachfolgenden Vorgänge). Auch der umgekehrte Fall ist denkbar:

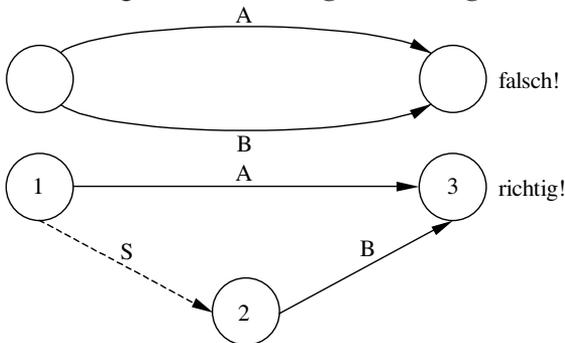
Abbildung 3: Anordnungsbeziehung



Hier ist das Anfangsereignis von D (Knoten 4) das gemeinsame Endereignis von A, B, C. Solche mehrwertigen Ereignisse werden auch **Sammelereignisse** (Knoten 2 in Abbildung 22 und Knoten 4 in Abbildung 3) genannt.

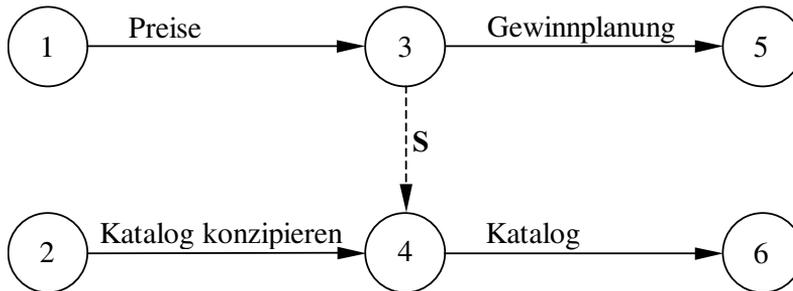
Zwei Ereignisse (Knoten) dürfen nur durch **einen** Pfeil miteinander verbunden werden. Das bedeutet zunächst, dass es nicht möglich ist, parallel verlaufende Vorgänge im Netzplan darzustellen. Durch die Einführung von **Scheinvorgängen** lässt sich dieses Problem jedoch leicht lösen. Haben zwei Vorgänge A und B gemeinsame Anfangs- und Endereignisse (d.h. können sie gleichzeitig beginnen und enden), so ist ein **Scheinvorgang S** erforderlich:

Abbildung 4: Anordnungsbeziehung mit Scheinvorgang



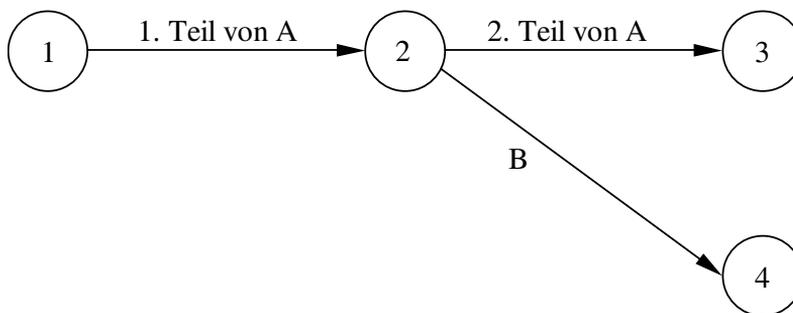
Hängen zwei oder mehrere Vorgänge mit verschiedenen Anfangs- und Endereignissen zusammen (z.B. muss ein „Katalog konzipiert“ werden und müssen die „Preise für die anzuliefernden Waren festgelegt“ sein, bevor der Vorgang „Katalog drucken“ beginnen kann), so ist ebenfalls ein Scheinvorgang S erforderlich.

Abbildung 5: Anordnungsbeziehung mit Scheinvorgang

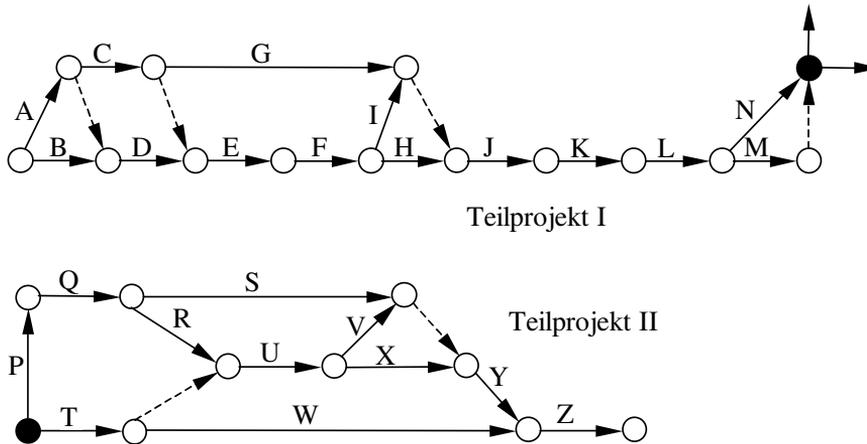


Ein **Scheinvorgang** ist ein fiktiver Vorgang **ohne Zeitbedarf**; er wird durch einen **gestrichelten Pfeil** dargestellt. Kann ein Vorgang B schon beginnen, bevor der vorhergehende Vorgang A ganz beendet ist (**überlappte Vorgänge**), so ist der letztere zu unterteilen:

Abbildung 6: Anordnungsbeziehung mit Überlappung

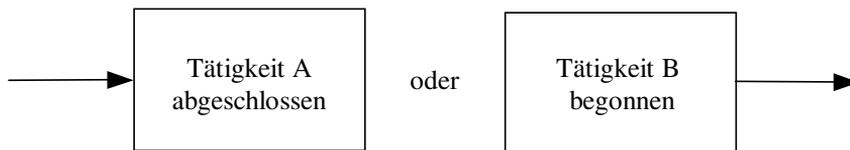


Für das Projektbeispiel (Tabelle 1) ergibt sich folgender **Strukturplan** (das „Anschlussereignis“ - Übergang von Teilprojekt I zu Teilprojekt II - ist besonders gekennzeichnet; vgl. Abbildung 7):



2.2.3 Program Evaluation and Review Technique - PERT

Ebenso wie bei CPM stellen in einem Netzplan nach **PERT** die Pfeile Vorgänge und die Knoten Ereignisse dar. Im Gegensatz zu CPM liegt bei PERT das Schwergewicht auf den **Ereignissen**, weil bei PERT Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Ereignissen angegeben werden. Die Anordnungsbeziehungen des PERT-Planes entsprechen den Anordnungsbeziehungen in einem CPM-Plan. Sie werden lediglich im Sinne der **Ereignisorientierung** ausgedrückt (Ereignisknotennetz). Es gibt zwei prinzipielle Arten, wie Ereignisse in einem PERT-Plan beschrieben werden können:



Ereignisknotennetzen kommt in erster Linie für Übersichtsnetzpläne Bedeutung zu. In der Praxis werden nicht selten sowohl Vorgänge (Pfeile) als auch Ereignisse (Knoten) im Netzplan dargestellt (gemischt-orientierte Netzpläne). CPM und PERT gestatten die Berechnung solcher gemischtorientierten Netzpläne ohne besondere Schwierigkeiten.

2.2.4 Vorgangsknotennetzpläne

Beim **Vorgangsknotennetzplan** werden die Vorgänge durch rechteckige Knoten dargestellt. Vorgangsknotennetzpläne gehen davon aus, dass eine Reihe von Vorgängen bereits beginnen kann, bevor ihre Vorgänger beendet sind; es genügt ein bestimmter Fertigstellungsgrad der Vorgänger. Bei Vorgangsknotennetzplänen geben die Pfeile lediglich die Abhängigkeitsbeziehungen der Vorgänge (Reihenfolgebedingungen) an.

2.2.5 Gegenüberstellung der Netzplantypen

Die Vorgangsknotennetze haben gegenüber den Vorgangspfeilnetzen Vorzüge:

- Bei einem Vorgangsknotennetz können in einem Knoten **alle wichtigen Informationen, die den Vorgang betreffen, aufgenommen werden**, z.B. Beschreibung des Vorgangs, Vorgangsnummer, Dauer des Vorgangs, frühester und spätester Anfang bzw. Ende des Vorgangs, Pufferzeiten des Vorgangs, kostenrechnerische und kapazitätsbezogene Angaben. Diese Angaben lassen sich in einem Vorgangsknotennetz noch unterbringen, ohne dass der Netzplan unübersichtlich wird. In einem Vorgangspfeilnetz ist dies kaum realisierbar.
- Abgesehen von „Start“ und „Ende“ kommt das Vorgangsknotennetz vollkommen ohne Scheinvorgänge aus, während Vorgangspfeilnetze aus Gründen der Projektlogik **Scheinvorgänge benötigen**. Dieser Umstand kann bei umfangreichen Projekten mit komplexen Ablaufstrukturen die Übersichtlichkeit des Vorgangspfeilnetzplans beeinträchtigen.
- Die gängige Netzplansoftware arbeitet mit Vorgangsknotennetzplänen.
- **Änderungen im Netzplan** lassen sich in einem Vorgangsknotennetz einfach und schnell durchführen. Sind z.B. in einem bereits gezeichneten Netzplan Fehler aufgetaucht oder haben sich nachträglich andere Reihenfolgebeziehungen herausgestellt, so ist es in einem Vorgangsknotennetz ohne weiteres möglich, durch Wegnahme bzw. Hinzufügen von Pfeilen den Netzplan zu ändern.
- Vorgangsknotennetze lassen sich **einfacher und schneller zeichnen** als Vorgangspfeilnetze.

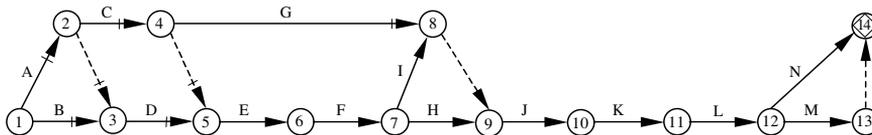
2.3 Nummerierung der Knoten

Die **Knoten** bzw. Ereignisse sind in den CPM-Netzplänen (mit natürlichen) Zahlen zu **nummerieren**. Bei der Nummerierung darf keine Zahl doppelt vorkommen. Die **lückenlos aufsteigende (systematische) Knotennummerierung** soll kurz vorgeführt werden.

Das **Anfangsereignis** jedes Vorgangs erhält eine **niedrigere** Zahl zugeordnet als das Endereignis des Vorgangs. Bezeichnet man - wie allgemein üblich - die Nummer des Anfangsereignisses eines Vorgangs mit i und die Nummer des Endereignisses mit j , so gilt $i < j$. Mit der Zahl „1“ beginnend, werden genau so viel **fortlaufende** natürliche Zahlen (lückenlos) als Knotennummern vergeben,

wie der Netzplan Knoten hat. Ein Verfahren, bei dem die lückenlos aufsteigende Nummerierung im Netzplan vorgenommen wird, soll anhand des Beispiels (Teilprojekt I) erörtert werden (vgl. **Error! Reference source not found.8**):

Abbildung 8: **Lückenlos aufsteigende Nummerierung der Ereignisse von Teilprojekt I**



Das Startereignis erhält Nummer „1“. „Entfernt“ man nun durch Durchstreichen alle Vorgänge, die vom Startereignis ausgehen, dann bleibt ein „Restnetzplan“ übrig. Der „Restnetzplan“, den man durch Streichen von A und B erhält, hat nun wieder ein „Startereignis“. Dieses neue „Startereignis“ erhält die nächstfolgende Knotennummer, also „2“. Jetzt werden alle Vorgänge, die von Knoten 2 ausgehen, gestrichen (C und Scheinvorgang). Es ergeben sich für den neuen „Restnetzplan“ zwei Ereignisse, von denen nur Vorgänge abgehen (Abbildung 8). Die beiden nächstfolgenden Nummern „3“ und „4“ können beliebig für diese beiden neuen „Startereignisse“ gewählt werden. Als Nächstes wären wieder die von Ereignis 3 und 4 ausgehenden Vorgänge zu streichen und das neue „Startereignis“ des neuen „Restnetzplanes“ zu bestimmen (im Beispiel Ereignis 5) usw. bis das Zielereignis erreicht ist.

Durch die Nummerierung der Knoten des Netzplans ist es möglich, jeden Vorgang durch das geordnete Zahlenpaar „i, j“ (Nummer des Anfangs- und Endereignisses des Vorgangs) zu kennzeichnen. Vorgang „(i, j)“ ist also der Vorgang, der in „i“ beginnt und in „j“ endet.

3 Zeitplanung

Bei der **Zeit- oder Terminplanung** eines Projektes geht es vor allem um die Beantwortung folgender Fragen:

- In welcher Zeit ist das Projekt realisierbar - **minimale Projektdauer** - oder: kann für die Fertigstellung des Projektes ein vorgegebener Termin eingehalten werden?
- Im Netzplan existieren Vorgänge bzw. Wege, die parallel, also gleichzeitig, durchgeführt werden können. Diese parallelen Vorgänge bzw. Wege müssen nun aber nicht die gleiche Ausführungsdauer haben. Dann hängt aber auch die minimale Projektdauer nicht von allen Vorgängen bzw. Wegen ab. Die zweite Frage lautet: Von welchen Vorgängen hängt die **minimale** Projektdauer ab, und

zu welchen Zeitpunkten müssen diese bei der errechneten oder vorgegebenen Projektdauer beginnen? Dies ist zugleich die Frage nach dem **kritischen Weg durch einen Netzplan**. Hiervon leitet sich auch die Bezeichnung „CPM“ ab. Der kritische Weg durch einen Netzplan ist diejenige Folge von Vorgängen, die die **minimale** Projektdauer bestimmt (**kritische Vorgänge**). Nicht immer gibt es nur **einen** kritischen Weg in einem Netzplan.

■ Alle Vorgänge im Netzplan, die nicht auf einem kritischen Weg liegen, sind in ihrer Durchführung nicht streng termingebunden. Sie können zeitlich verschoben oder ihre Ausführungsdauer ausgedehnt werden, ohne dass dadurch die errechnete oder vorgegebene minimale Projektdauer tangiert wird. Die dritte Frage lautet: Welche Vorgänge sind nicht streng termingebunden (**nichtkritische Vorgänge**), sondern können zeitlich verschoben oder ausgedehnt werden und um wie viel? Die ist die Frage nach den **Pufferzeiten**. Für die Beantwortung dieser und weiterer Fragen ist es notwendig, zunächst die für die einzelnen Vorgänge erforderlichen Ausführungszeiten zu ermitteln. Der eigentlichen Zeitplanung muss also eine **Zeitanalyse** vorausgehen.

3.1 Zeitanalyse

Die **Ermittlung bzw. Schätzung der Vorgangsdauern** ist schwierig. Für jeden Vorgang wird eine Dauer bestimmt, die gemessen, geschätzt oder auf Grund vorhandener Erfahrungen als realistisch vorgegeben wird.

Bei der Ermittlung der Vorgangsdauern sollte auf das Wissen und die Erfahrungen der mit der Projektdurchführung betrauten Mitarbeiter zurückgegriffen werden. Dabei ist aber insofern Vorsicht geboten, als von dieser Seite her oft zu großzügige Schätzungen erfolgen. Die Betroffenen wollen sich auf diese Weise eine „**Zeitreserve**“ verschaffen.

Die Vorgangsdauer ist oft von Qualität und Umfang der eingesetzten Kapazitäten (Arbeitskräfte, Betriebsmittel) abhängig. Deshalb erfolgt z.B. vielfach die Schätzung des Zeitbedarfs, den **eine** Person (oder Maschine etc.) für die Ausführung des Vorgangs benötigen würde. Das Ergebnis sind dann beispielsweise „Mann-Stunden“, „Maschinen-Stunden“.

Die Ermittlung von Vorgangszeiten durch Mitarbeiter führt zu subjektiven Einflüssen auf die Ergebnisse. Das **Unsicherheitsproblem** wird bei vielen Verfahren der NPT nicht berücksichtigt; gearbeitet dann mit **einem Zeitwert** für jeden Vorgang (**Einzeitschätzung**). CPM und MPM sowie die darauf basierenden Verfahren verwenden Einzeitschätzungen.

Bei PERT wird berücksichtigt, dass die Ausführungsdauer eines Vorgangs (i, j) nicht eindeutig ist, sondern dass dafür eine **Wahrscheinlichkeitsverteilung** existiert. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilung bedient man sich bei PERT des **Drei-Werte-Verfahrens** (Hillier, F.S., Lieberman, G.J., 2002, S. 486 ff.):

■ Die **wahrscheinlichste Vorgangsdauer** - $ND(i,j)$ - ist die Zeit, die unter normalen Bedingungen für die Ausführung eines Vorgangs benötigt wird (häufigster Wert der Verteilung bei Wiederholungen).

■ Die **pessimistische Vorgangsdauer** - $PD(i,j)$ - ist die Zeit, die unter schlechtesten Bedingungen benötigt wird (1 % Eintrittswahrscheinlichkeit).

■ Die **optimistische Vorgangsdauer** - $OD(i,j)$ - ist die kürzestmögliche Ausführungszeit (ebenfalls 1 % Eintrittswahrscheinlichkeit).

Aus den drei Zeitschätzwerten errechnet man nach einer aus der Betaverteilung abgeleiteten Formel für jeden Vorgang (i,j) die erwartete Zeitdauer - $ED(i,j)$ - und aus den Differenzen zwischen $PD(i,j)$ und $OD(i,j)$ Varianzen - $VAR D(i,j)$ - der erwarteten Vorgangszeiten:

Ausführungsdauer eines Vorgangs (i,j) (Erwartungswert bzw. gewogenes arithmetisches Mittel):

$$ED(i,j) = \frac{OD(i,j) + 4ND(i,j) + PD(i,j)}{6}$$

Varianz der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausführungsdauer eines Vorgangs (i,j) (Streuungsmaß):

$$VAR D(i,j) = \left(\frac{PD(i,j) - OD(i,j)}{6} \right)^2$$

Die Beziehungen zwischen $ED(i,j)$ bzw. $VAR D(i,j)$ und $OD(i,j)$, $ND(i,j)$, $PD(i,j)$ ergeben sich aus den Eigenschaften der unterstellten Betaverteilung; diese Verteilung ist in der Literatur als die am besten geeignete für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Vorgangsdauern ausgewählt worden. Dabei muss festgestellt werden, dass bisher weder ein empirischer Nachweis dieser Verteilungsfunktion gelungen ist, noch eine theoretische Ableitung hierfür erfolgte. Daher wurde versucht, durch möglichst genaue Beschreibung der besonderen Eigenschaften der Vorgangsdauerverteilung eine adäquate bekannte Funktion zu finden. Zum einen ist jede Vorgangsdauer zunächst dadurch beschrieben, dass sie keine negativen Werte annehmen kann und mithin die Verteilungsfunktion nur für ein abgeschlossenes, nichtnegatives Intervall erklärt sein darf. Zum anderen wird unterstellt, dass Vorgangsdauern nur um einen Wert - $ND(i,j)$ - streuen, die Wahrscheinlichkeitsverteilung also eingipflig ist. Drittens ist für die Zeit (als einem stetigen Merkmal) von einer stetigen Verteilung auszugehen.

Schließlich lassen sich - bei Unterstellung einer Normalverteilung für die Termine der Ereignisse - Wahrscheinlichkeiten für das Einhalten vorgegebener Termine berechnen (vgl. *Litke, H.-D.*, 2007, S. 154 ff.; *Runzheimer, B.*, 1999, S. 197 ff.; *Schwarze, J.*, 2006, S. 186 ff.; *Corsten, H., Corsten, H., Gössinger, R.*, 2008, S. 226 ff.).

Die **Mehrzeitenschätzung** erfordert naturgemäß einen größeren Aufwand als die Einzeitenschätzung. Diese Schätzwerte des **Drei-Werte-Verfahrens**

schalten selbstverständlich das Unsicherheitsproblem nicht aus, durch die Mehrzeitschätzung wird es aber sehr wohl offen gelegt.

3.2 Zeitplanung mit CPM

Sind die für die Zeitplanung erforderlichen Daten verfügbar, kann die Zeitberechnung beginnen.

3.2.1 Ermittlung des kritischen Weges

Die **minimale Projektdauer** wird durch den **zeitlich gesehen längsten Weg durch den Netzplan (kritischer Weg)** bestimmt. Zur Bestimmung des kritischen Weges wurde ein zweckmäßiges Verfahren entwickelt, bei dem für jeden **Vorgang (i,j)** sein **frühestmöglicher Anfang** FA (i,j) sowie sein **spätestzulässiger Anfang** SA (i,j), sein **spätestzulässiges Ende** SE (i,j) und sein **frühestmögliches Ende** FE (i,j) berechnet werden. Zugleich ergibt sich für **jedes Ereignis (j)** der **frühestmögliche Zeitpunkt seines Eintretens** (kurz: frühester Ereignis-Zeitpunkt) FZ(j) und der **spätestzulässige Zeitpunkt seines Eintretens** (kurz: spätester Ereignis-Zeitpunkt) SZ(j).

Wird die **Dauer eines Vorgangs (i,j)** mit D(i,j) bezeichnet, so lassen sich FA(i,j) bzw. FZ(j) und damit die minimale Projektdauer formal nach der folgenden Rekursionsbeziehung - die sich auch unter Anwendung der dynamischen Planungsrechnung herleiten lässt (vgl. *Lutz, M., 1998, S. 213 ff.*) - errechnen (**Vorwärtsrechnung**):

$$FZ(1) = 0$$

$$FZ(j) = \max_i [FZ(i) + D(i,j)] \quad i \in \{\text{Vorgänger (j)}\}; j \in \{\text{Nachfolger (i)}\}$$

Als Projektbeginn FZ(1) wird üblicherweise der Zeitpunkt 0 vorgegeben. Man kann aber auch jeden beliebigen anderen Wert wählen. Bei **lückenlos aufsteigender Nummerierung der Ereignisse** erfolgt die Bestimmung des **frühestmöglichen Ereignis-Zeitpunktes** FZ(j) wie folgt:

Man bestimmt alle Vorgänge (i,j), die in Ereignis (j) einmünden.

Für jeden einmündenden Vorgang wird das frühestmögliche Ende FE(i,j) berechnet: $FE(i,j) = FA(i,j) + D(i,j)$. Der frühestmögliche Anfang des Vorgangs (i,j) stimmt mit dem frühestmöglichen Ereignis-Zeitpunkt des Ereignisses (i) - des Anfangsereignisses - überein: $FA(i,j) = FZ(i)$. Mithin gilt auch: $FE(i,j) = FZ(i) + D(i,j)$. Um die Berechnungen im Netzplan übersichtlich zu halten, können die FE(i,j) an den Pfeilspitzen im Netzplan vermerkt werden (vgl.

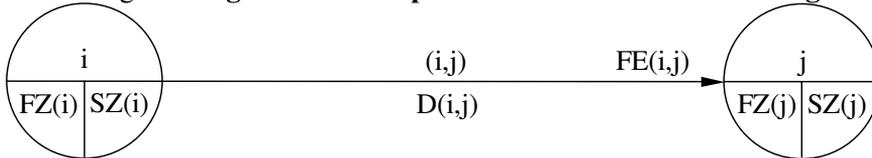
Abbildung 109).

Von den unter (2) bestimmten FE(i,j) aller einmündenden Vorgänge ist der größte Wert der gesuchte früheste Ereignis-Zeitpunkt FZ(j) für das Ereignis (j).

Das ergibt sich daraus, dass ein Ereignis erst eintritt, wenn **alle** einmündenden Vorgänge abgeschlossen sind.

Der früheste Ereignis-Zeitpunkt für das Zielereignis FZ(n) entspricht für den gegebenen Netzplan der **minimalen Projektdauer**. Solange Netzpläne manuell bearbeitet werden, erfolgen die Berechnungen am Netz. Deshalb werden an jedem Pfeil die entsprechenden Vorgangsdauern $D(i,j)$ und in jedem Knoten die Ereigniszeitpunkte vermerkt. Dazu werden die Knoten entsprechend unterteilt:

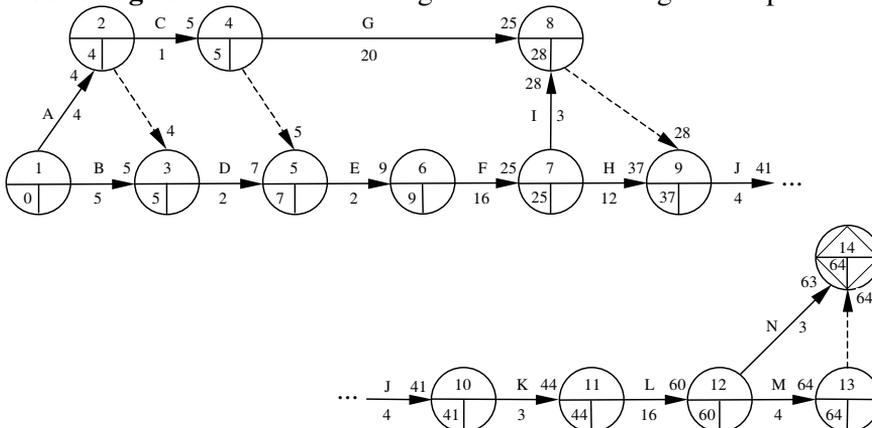
Abbildung 9: **Angaben im Netzplan bei manueller Bearbeitung**



Für das Teilprojekt I des Projektbeispiels (vgl. **Abbildung 8** und

1) ergeben sich durch **Vorwärtsrechnung** folgende Zeitwerte (vgl. **Abbildung 10**):

Abbildung 10: Bestimmung der frühesten Ereignis-Zeitpunkte



Mit der unter den gegebenen Voraussetzungen errechneten **minimalen Projektdauer** FZ(14) von 64 Arbeitstagen für das Teilprojekt I

(Rohbauerstellung) liegt eine erste wichtige Information für die Zeitplanung vor. Ist die „**erwünschte**“ **Projektdauer** kürzer als die **errechnete**, sind Anpassungen erforderlich. Im umgekehrten Fall kann eventuell durch Verlängerung dieses Projektes die Beseitigung einer Engpasssituation bei anderen Vorhaben erreicht werden. Bestehen keine zeitlichen Vorgaben, so wird in der Regel das Projekt in der kürzestmöglichen Zeit zu realisieren sein. Das bedeutet, dass der spätestzulässige Zeitpunkt des Zielereignisses $SZ(n)$ mit dem frühestmöglichen Zeitpunkt des Zielereignisses $FZ(n)$ gleichgesetzt wird - **$FZ(n) = SZ(n)$** -.

Anschließend sind für alle übrigen Ereignisse (i) innerhalb des Netzplanes die spätestzulässigen Ereignis-Zeitpunkte $SZ(i)$ zu bestimmen. Diese Berechnung entspricht derjenigen bei der Ermittlung der frühestmöglichen Ereigniszeitpunkte mit dem Unterschied, dass nunmehr vom Zielereignis ausgehend die Berechnungen rückwärts im Netzplan erfolgen (**Rückwärtsrechnung**).

Ein beliebiges Ereignis tritt nur dann so spät wie möglich ein, wenn sämtliche ihm im Netzplan unmittelbar und mittelbar vorangehenden Vorgänge noch zum spätestzulässigen Zeitpunkt realisiert werden. Formal ergeben sich die wiederum rekursiven Beziehungen:

$$SZ(n) = FZ(n)$$

$$SZ(i) = \min_j [SZ(j) - D(i,j)] \quad i \in \{\text{Vorgänger (j)}\}; j \in \{\text{Nachfolger (i)}\}$$

Sind die Ereignisse lückenlos aufsteigend nummeriert und ist der spätestzulässige Zeitpunkt für das Eintreten des Zielereignisses vorgegeben, so erfolgt die Bestimmung des **spätestzulässigen Ereignis-Zeitpunktes** $SZ(i)$ wie folgt:

Es werden alle Vorgänge (i,j) bestimmt, die von dem Ereignis (i) abgehen.

Für jeden abgehenden Vorgang wird der spätestzulässige Anfang $SA(i,j)$ berechnet:

$$SA(i,j) = SE(i,j) - D(i,j)$$

Das spätestzulässige Ende des Vorgangs (i,j) stimmt mit dem spätestzulässigen Zeitpunkt für das Endereignis dieses Vorgangs $SZ(j)$ überein:

$$SE(i,j) = SZ(j)$$

Mithin gilt auch:

$$SA(i,j) = SZ(j) - D(i,j)$$

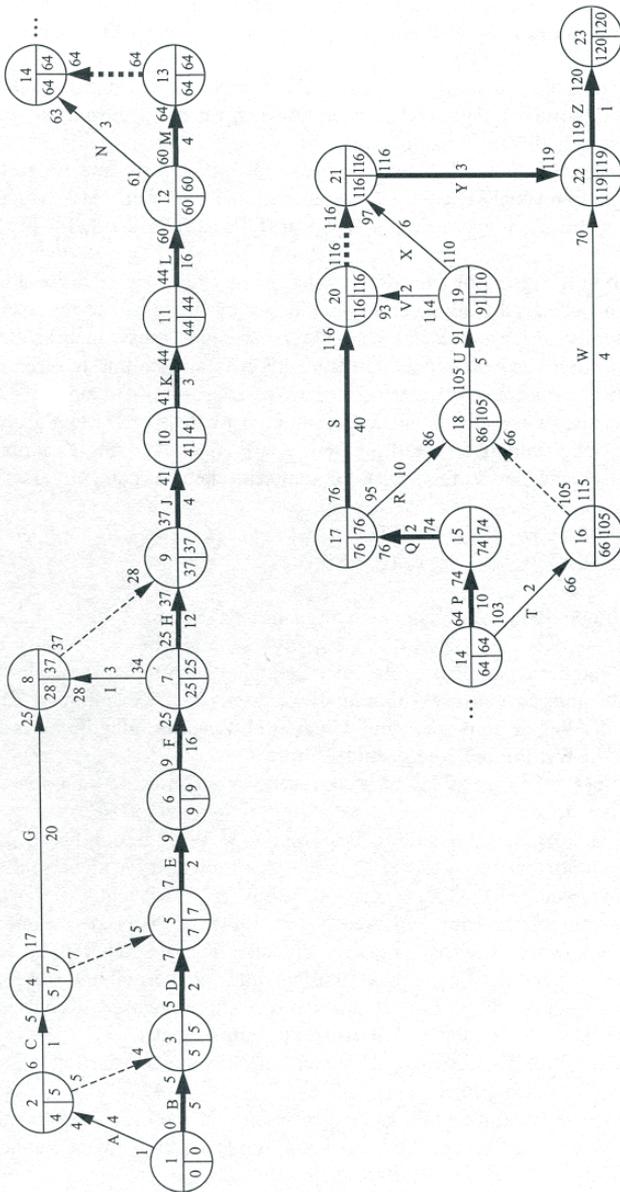
Um die Berechnungen im Netzplan übersichtlich zu halten, können die $SA(i,j)$ an den Pfeilschäften im Netzplan vermerkt werden (vgl. Abbildung 11).

Von den unter (2) bestimmten Werten $SA(i,j)$ aller abgehenden Vorgänge ist der kleinste der gesuchte spätestzulässige Ereignis-Zeitpunkt $SZ(i)$ für das Ereignis (i). Das ergibt sich daraus, dass ein Vorgang erst dann beginnen kann, wenn sein Anfangsereignis eingetreten ist.

Auch hier lässt sich der Algorithmus anpassen: Man wählt in Schritt (1) als nächstes das zu bearbeitende Ereignis i aus, für das die spätesten Zeitpunkte

aller Nachfolgeereignisse SZ(j) bereits bestimmt wurden (Schwarze, J., 2006, S. 181). Für das Projekt (vgl. 1 und Abbildung 7) ergeben sich folgende Ereigniszeitpunkte gemäß Abbildung 111:

Abbildung 11: **Bestimmung der Ereigniszeitpunkte für das Projektbeispiel**



Die Berechnung der spätestzulässigen Ereigniszeitpunkte beginnt mit dem Zielereignis und richtet sich in der Reihenfolge nach abnehmenden Ereignisnummern. Es ist zu beachten, dass mit der Ermittlung der Ereigniszeitpunkte im Netzplan gleichzeitig auch die für die Vorgänge zu bestimmenden Zeitpunkte berechnet wurden.

Vergleicht man die frühestmöglichen und die spätestzulässigen Ereigniszeitpunkte, so stellt man fest, dass außer für das Start- und Zielereignis auch noch für weitere Ereignisse hier Übereinstimmung besteht. Diese **Ereignisse** müssen also zu **genau festgelegten Zeitpunkten eintreten (kritische Ereignisse)**. Sie sind „kritisch“ in dem Sinne, dass jede Überschreitung des errechneten Zeitpunktes zu einer Verlängerung der minimalen Projektdauer führt. Bei einigen anderen Ereignissen (in realistischen Projekten sind es die meisten) stimmen FZ(j) und SZ(j) nicht überein, d.h. die Eintrittszeitpunkte sind hier verschieden. Der **Zeitpunkt** für das **Eintreten** dieser **Ereignisse** ist dann **nicht genau festgelegt**. Er kann mit FZ(j) oder mit SZ(j) übereinstimmen oder irgendwo dazwischen liegen. Die **Differenz** zwischen spätestzulässigem und frühestmöglichem Zeitpunkt für den Eintritt eines Ereignisses gibt den **zeitlichen Spielraum** an, in dem dieses Ereignis eintreten muss, wenn die geplante minimale Projektdauer eingehalten werden soll. Diese Differenz wird **gesamte Pufferzeit eines Ereignisses** GPE(j) genannt:

$$GPE(j) = SZ(j) - FZ(j) \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Je geringer diese Differenz ist, umso mehr Bedeutung kommt dem entsprechenden Ereignis im Rahmen der **Projektüberwachung** zu. Bei kritischen Ereignissen ist der gesamte Ereignispuffer $GPE(j) = 0$. Im Beispiel von Abbildung 111 wurde das Zielereignis dadurch kritisch gemacht, dass der Zeitpunkt für das frühestmögliche Eintreten mit dem für das spätestzulässige Eintreten gleichgesetzt wurde - $FZ(n) = SZ(n)$ -.

Nach diesem üblichen Vorgehen muss daher in dem Netzplan eine **Folge** (oder auch mehrere Folgen) von **kritischen Ereignissen** entstehen. In dem verwendeten Beispiel gehören 17 Ereignisse zu dieser Folge: 1, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 22, 23.

Da CPM eine vorgangsorientierte Methode ist, interessiert man sich vor allem für die **Vorgänge**. Für jeden Vorgang möchte man wissen, wann er frühestens beginnen bzw. enden kann und wann er spätestens beginnen bzw. enden muss. Insbesondere werden auch die **kritischen Vorgänge** innerhalb eines **Projektes** bestimmt. Notwendige Bedingung für einen kritischen Vorgang ist, dass sowohl sein Anfangs- als auch sein Endereignis kritisch sind. Hinreichende Bedingung ist jedoch erst, wenn auch die Differenz zwischen den Zeitpunkten des Eintretens von End- und Anfangsereignis gleich der Dauer des entsprechenden Vorgangs ist. Für den kritischen Vorgang gilt also:

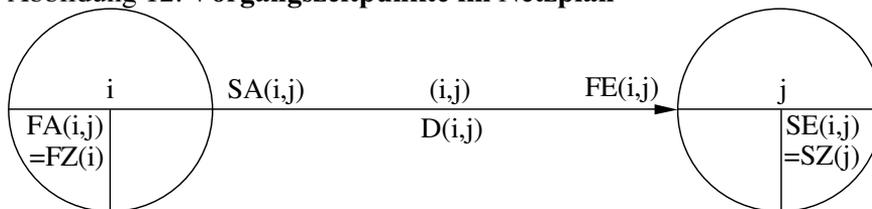
$$FZ(j) - FZ(i) = D(i,j)$$

$$FZ(j) = SZ(j); \quad FZ(i) = SZ(i)$$

Diese Definition gilt auch für die Scheinvorgänge. Wie für die Ereignisse, so muss es in jedem Netzplan auch mindestens eine **Folge** von **kritischen Vorgängen** geben. Diese Folge wird **kritischer Weg** genannt. Sie stellt den **zeitlich längsten** Weg im Netz dar und bestimmt damit die **minimale Projektdauer**. In dem Beispiel (Abbildung 111) ist der kritische Weg durch die stark ausgezogene Pfeile hervorgehoben.

Da der kritische Weg die Projektdauer bestimmt, muss dem kritischen Weg bei der Projektrealisierung besondere Bedeutung zukommen. Den kritischen Vorgängen ist daher auch im Rahmen der **Kapazitätsplanung** besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Das Problem der **Zeit-Kostenplanung** deutet sich hier an. Eine Beschleunigung der Projektrealisierung lässt sich im Allgemeinen nur mit erhöhten („Beschleunigungs-“) Kosten der kritischen Wege erreichen. Berechnet man die Ereigniszeitpunkte im Netzplan und trägt die Zwischenrechnungen in der angegebenen Form an der Pfeilspitze bzw. am Pfeilschaft eines jeden Vorgangs ein, so können die **Vorgangszeitpunkte** wie folgt aus dem Netzplan abgelesen werden:

Abbildung 12: **Vorgangszeitpunkte im Netzplan**



Es bestehen folgende Beziehungen:

- $FA(i,j) = FZ(i)$ $i \in \{\text{Vorgänger}(j)\}; j \in \{\text{Nachfolger}(i)\}$
- $FE(i,j) = FZ(i) + D(i,j)$
- $SA(i,j) = SZ(j) - D(i,j)$
- $SE(i,j) = SZ(j)$

Gesonderte Berechnungen entfallen damit. Die Differenz zwischen spätestzulässigem Ende $SE(i,j)$ und dem frühestmöglichen Anfang eines Vorgangs $FA(i,j)$ ist die Zeit, die für die Durchführung eines Vorgangs (i,j) maximal zur Verfügung steht:

$$MZ(i,j) = SE(i,j) - FA(i,j) = SZ(j) - FZ(i)$$

Für kritische Vorgänge ist $MZ(i,j) = D(i,j)$, d.h. die **maximal verfügbare Ausführungszeit** entspricht der Vorgangsdauer (gemäß Vorgangsliste). Die Kenntnis von $MZ(i,j)$ kann von Bedeutung sein, wenn man aus irgendwelchen Gründen die Ausführungsdauer eines Vorgangs ausdehnen will. Soll die minimale Projektdauer eingehalten werden, dann kann die Ausführungsdauer maximal bis $MZ(i,j)$ ausgedehnt werden.

3.2.2 Ermittlung und Interpretation der Pufferzeiten

Bei den **nichtkritischen Vorgängen** steht ein **zeitlicher Spielraum** zur Verfügung, um den die Vorgänge hinsichtlich Anfang und Ende verschoben werden können oder um den ihre Ausführungsdauer ausgedehnt werden kann, ohne dass die minimale Projektdauer tangiert wird. Diesen zeitlichen Spielraum nennt man **Puffer** bzw. **Pufferzeit** oder auch **Schlupf**. Ein Vorgang besitzt immer dann einen Puffer, wenn $MZ(i,j) > D(i,j)$.

In der NPT werden im Wesentlichen vier verschiedene Arten von Puffer unterschieden (*Schwarze, J., 2006, S. 213ff.*):

(1) Gesamte Pufferzeit eines Vorgangs GP(i,j)

$$\begin{aligned} GP(i,j) &= MZ(i,j) - D(i,j) && i \in \{\text{Vorgänger } (j)\}; j \in \\ &\{\text{Nachfolger}(i)\} \\ &= SE(i,j) && - FE(i,j) \\ &= SZ(j) && - FE(i,j) \\ &= SA(i,j) && - FA(i,j) \\ &= SZ(j) && - D(i,j) - FZ(i) \end{aligned}$$

Diese Größe gibt die Zeitspanne an, die für die Verschiebung oder Ausdehnung des Vorgangs maximal verfügbar ist. Rein rechnerisch besitzt jeder nichtkritische Vorgang einen gesamten Puffer. Liegen mehrere nichtkritische Vorgänge hintereinander, dann sind die „gesamten Pufferzeiten“ der auf diesem nichtkritischen Teilweg liegenden Vorgänge **nicht mehr unabhängig voneinander**. Eine Folge von Vorgängen wird dann **Teilweg** genannt, wenn mit Ausnahme des zugehörigen Anfangs- und Endereignisses in jedem seiner übrigen Ereignisse nur jeweils ein Vorgang beginnt bzw. endet. Der gesamte Puffer kann auf diesem nichtkritischen Teilweg **nur einmal** in Anspruch genommen werden. Er ist gewissermaßen der Puffer des jeweiligen nichtkritischen Teilweges. Wird bei einem Vorgang die gesamte Pufferzeit verbraucht, dann entsteht dadurch ein neuer kritischer Weg. Man betrachtet daher die gesamte Pufferzeit besser als einem Teilweg zugehörig, anstatt sie einzelnen Vorgängen zuzuordnen.

(2) Freie Pufferzeit eines Vorgangs FP(i,j)

$$\begin{aligned} FP(i,j) &= FZ(j) && - FE(i,j) && (i = 1, 2, \dots, n - 1; j = 2, \\ &3, \dots, n) \\ &= FZ(j) && - D(i,j) - FZ(i) \\ &= GP(i,j) && - GPE(j) \end{aligned}$$

Eine freie Pufferzeit eines Vorgangs kann nur auftreten, wenn in das Endereignis des Vorgangs noch andere Vorgänge einmünden und $FZ(j)$ nicht durch den betrachteten Vorgang bestimmt wird. Betrachtet man nur die in ein gemeinsames Endereignis einmündenden Teilwege, so bedeuten unterschiedliche gesamte Pufferzeiten auf den Teilwegen, dass für die Realisierung der Vorgänge auf einem Teilweg mit größerer gesamter Pufferzeit mehr Zeit zur Verfügung steht als auf einem Teilweg mit geringerer gesamter Pufferzeit. Wird diese **mehr** verfügbare Zeit beansprucht, so beeinträchtigt das nicht das Eintreffen des Endereignisses dieses Teilweges zum frühestmöglichen

Zeitpunkt und auch nicht die gesamte Pufferzeit der anderen Teilwege. Das besagt, dass der zeitliche Ablauf aller nachfolgenden Vorgänge in keiner Weise beeinflusst wird, wenn die freie Pufferzeit durch Ausdehnung der Vorgangsdauer oder durch Verzögerung der Ausführung verbraucht wird. Darin liegt die Bedeutung des **freien Puffers**. Er kann in Anspruch genommen werden, ohne dass dadurch die FA(i,j) der nachfolgenden Vorgänge verschoben werden, und damit die Flexibilität in der Zeitplanung des restlichen Projektes tangiert wird. Obwohl auch die freie Pufferzeit sämtlichen Vorgängen des entsprechenden Teilweges zur Verfügung steht, teilt die Berechnung sie nur einzelnen Vorgängen zu, und zwar nur dem letzten Vorgang des Teilweges.

(3) Unabhängige Pufferzeit eines Vorgangs UP(i,j)

Es liegt nahe, auch eine Pufferzeit für einen Vorgang zu definieren, die unabhängig davon ist, zu welchem Zeitpunkt die Vorgänger dieses Vorgangs begonnen werden. Die unabhängige Pufferzeit tritt immer dann auf, wenn die Differenz zwischen frühestmöglichem Eintreten des Endereignisses FZ(j) und spätestzulässigem Eintreten des Anfangsereignisses SZ(i) größer als die Dauer des Vorgangs D(i,j) ist.

$$UP(i,j) = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ FZ(j) - SZ(i) - D(i,j) \end{array} \right. \quad i \in \{\text{Vorgänger (j)}\}; j \in \{\text{Nachfolger(i)}\}$$

Die Bestimmungsgleichung für UP(i,j) bedeutet, dass UP(i,j) = 0 ist, falls $FZ(j) - SZ(i) - D(i,j) \leq 0$; sonst ist $UP(i,j) = FZ(j) - SZ(i) - D(i,j)$.

Die Differenz $FZ(j) - SZ(i) - D(i,j)$ kann also durchaus negativ sein, nur existiert dann keine unabhängige Pufferzeit ($UP(i,j) = 0$). Die **unabhängige Pufferzeit** ist die Zeitdauer, um den ein Vorgang auch dann noch ausgedehnt oder verschoben werden kann, wenn alle Vorgängerereignisse von j zum spätestzulässigen Zeitpunkt und alle Nachfolgerereignisse von i frühestmöglich stattfinden. Durch seine Inanspruchnahme bleibt der übrige Zeitplan unberührt. Aus den gegebenen Definitionen der Vorgangspufferzeiten lässt sich folgende Relation ableiten: $GP(i,j) \geq FP(i,j) \geq UP(i,j)$.

(4) Bedingte Pufferzeit eines Vorgangs BP(i,j)

Um diese Zeitspanne kann ein Vorgang ausgedehnt oder verschoben werden zu Lasten der nachfolgenden nichtkritischen Vorgänge:

$$BP(i,j) = SZ(j) - FZ(j) = GPE(j) \quad i \in \{\text{Vorgänger (j)}\}; j \in \{\text{Nachfolger(i)}\}$$

Die Summe aus freier und bedingter Pufferzeit eines Vorgangs entspricht seiner gesamten Pufferzeit:

$$GP(i,j) = FP(i,j) + BP(i,j)$$

Die Berechnung der Pufferzeiten kann in einer Tabelle (vgl. Tabelle 2 und Abbildung 11) erfolgen. In eine solche Tabelle trägt man alle bereits bekannten Zeitangaben ein, also Vorgangsdauer und Ereigniszeitpunkte - Spalten (1), (2), (3), (4) und (7) -. Die Ausführungsdauern der Vorgänge werden der Zeitanalyse, die Ereigniszeitpunkte dem Netzplan (vgl. Abbildung 111) entnommen.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass die häufig vertretene Ansicht, die NPT minimiere die Projektdauer, nicht zutreffend ist. Die Zeitplanung baut nämlich auf einer festen Projektstruktur auf. Für genau diese feste Projektstruktur wird ein detaillierter Zeitplan erarbeitet. Das schließt aber nicht aus, dass es andere Ablaufstrukturen desselben Projektes gibt, die zu einer kürzeren Projektdauer führen können. Um die absolut kleinste Projektdauer zu finden, müsste man alle denkbaren Projektabläufe untersuchen. Mit der NPT kann man also immer nur eine **minimale Projektdauer für eine „gegebene“ Projektstruktur** ermitteln.

Tabelle 2: Ergebnis der manuellen Zeitplanung des Projektbeispiels

Vorgang	D _(i)	SZ _(i)	FZ _(i)	FA _(i) =FZ _(i)	SA _(i)	FE _(i)	SE _(i) =SZ _(i)	GR _(i)	FP _(i)	UP _(i)	BR _(i)	MZ _(i)
A (1,2)	4	0	4	0	1	4	5	1	0	0	1	5
B (1,3)	5	0	5	0	0	5	5	kritisch	0	0	0	5
C (2,4)	1	5	5	4	6	5	7	2	0	0	2	3
D (3,5)	2	5	7	5	7	7	7	kritisch	0	0	0	2
E (5,6)	2	7	9	7	9	9	9	kritisch	0	0	0	2
F (6,7)	16	9	25	9	9	25	25	kritisch	0	0	0	16
G (4,8)	20	7	28	5	17	25	37	12	3	1	9	32
H (7,9)	12	25	37	25	25	37	37	kritisch	0	0	0	12
I (7,8)	3	25	28	25	34	28	37	9	0	0	9	12
J (9,10)	4	37	41	37	41	41	41	kritisch	0	0	0	4
K (10,11)	3	41	44	41	41	44	44	kritisch	0	0	0	3
L (11,12)	16	44	60	44	44	60	60	kritisch	0	0	0	16
M (12,13)	4	60	64	60	60	64	64	kritisch	0	0	0	4
N (12,14)	3	60	64	60	61	63	64	1	1	1	0	4
P (14,15)	10	64	74	64	64	74	74	kritisch	0	0	0	10
Q (15,17)	2	74	76	74	74	76	76	kritisch	0	0	0	2
R (17,18)	10	76	86	76	95	86	105	19	0	0	19	29
S (17,20)	40	76	116	76	76	116	116	kritisch	0	0	0	40
T (14,16)	2	64	66	64	103	66	105	39	0	0	39	41
U (18,19)	5	105	91	86	105	91	110	19	0	0	19	24
V (19,29)	2	110	116	91	114	93	116	23	4	4	0	25
W (16,22)	4	105	119	66	115	70	119	49	10	10	0	53
X (19,21)	6	110	116	91	110	97	116	19	19	0	0	25
Y (21,22)	3	116	119	116	116	119	119	kritisch	0	0	0	3
Z (22,23)	1	119	120	119	119	120	120	kritisch	0	0	0	1

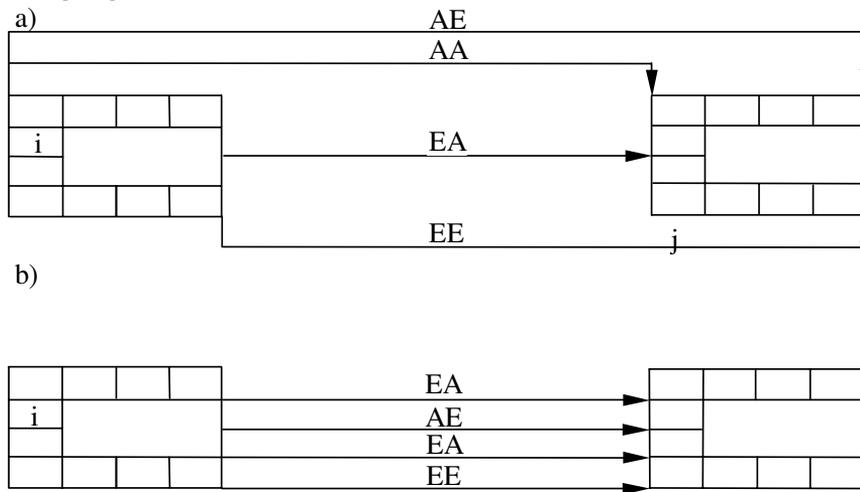
(*) Die Angaben dieser Spalten müssen vorab eingetragen werden

3.3 Zeitplanung mit Vorgangsknotennetzen

3.3.1 Grundlagen und Begriffsbestimmungen

Vorgangsknotennetze gestatten in ihrer allgemeinen Struktur die Darstellung verschiedener **Anordnungsbeziehungen** zwischen den Vorgängen. Abbildung 13 zeigt die vier zulässigen Arten von Anordnungsbeziehungen zwischen einem Vorgänger i und einem Nachfolger j:

Abbildung 13: **Zulässige Anordnungsbeziehungen bei einem Vorgangsknotennetz**



Die vier zulässigen Anordnungsbeziehungen können sein:

- Ende-Anfang-Beziehung (EA)
- Anfang-Ende-Beziehung (AE)
- Ende-Ende-Beziehung (EE)
- Anfang-Anfang-Beziehung (AA)

Alle vier dargestellten Beziehungen stellen **Mindestabstände** zwischen dem Vorgänger i und dem Nachfolger j dar. Bei der Darstellung in Abbildung 13a repräsentieren die linke Seite des Knotenrechtecks den Vorgangsanfang und die rechte Seite des Knotenrechtecks das Vorgangsende.

In Abbildung 14b wird die weniger anschauliche Darstellungsform der vier möglichen Anordnungsbeziehungen gezeigt, die auch in der Praxis anzutreffen ist. Die Art der Anordnungsbeziehungen wird hier durch die Buchstaben A und E an den Pfeilen symbolisiert.

a) Ende-Anfang-Beziehung

Die einfachste Beziehung zwischen Vorgängen ist die „**Ende-Anfang-Beziehung**“ (EA). Ist i Vorgänger von j, so kann j erst beginnen, wenn i abgeschlossen ist. Diese Ende-Anfang-Beziehung wird (nach DIN 69900) „Normalfolge (NF)“ genannt. Diese Abhängigkeit gibt einmal die Reihenfolge der Vorgänge an, zum anderen beinhaltet sie eine Aussage hinsichtlich der

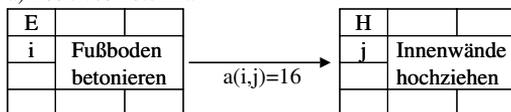
zeitlichen Reihenfolge. Die übliche Ende-Anfang-Beziehung drückt einen **zeitlichen Mindestabstand** zwischen dem Ende des Vorgängers i und dem Anfang des Nachfolgers j aus. Vorgang j kann zwar erst beginnen, wenn Vorgang i beendet ist, das Ende von i muss aber nicht mit dem Anfang von j zusammenfallen; j kann demnach auch später als das Ende von i beginnen. Diese Ende-Anfang-Beziehung mit zeitlichem Mindestabstand - kurz: MINEA - ist die häufigste Anordnungsbeziehung zwischen Vorgängen. Vorgangsknotennetze, die nur Abhängigkeiten in dieser Form berücksichtigen, heißen „einfache Vorgangsknotennetze“.

In einem Vorgangsknotennetz ist es nun möglich, einen zwei Knoten verbindenden Pfeil, der die Abhängigkeit der den Knoten zugeordneten Vorgänge darstellt, mit dem **zeitlichen Mindestabstand** MINEA zu bewerten. Dieser Zeitabstand $a(i,j)$ gibt an, wie viel Zeit bei einer Abhängigkeit der Form MINEA mindestens zwischen dem Ende des Vorgängers (Vorgang i) und dem Anfang des Nachfolgers (Vorgang j) liegen muss. Die zeitlichen Abstände $a(i,j)$ zwischen den Vorgängen i und j werden allgemein „**Potenziale**“ genannt.

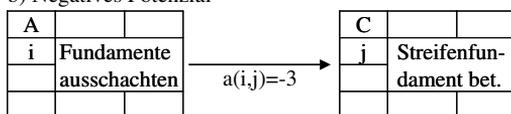
Soll z.B. in unserem Projektbeispiel (vgl.) auf den Vorgang „Fußboden betonieren“ (i) der Vorgang „Innenwände hochziehen“ (j) folgen, so kann die dazwischen notwendige „Abbindedauer des Fußbodenbetons“ mit 16 Tagen Zeitbedarf durch $a(i,j) = 16$ berücksichtigt werden (Abbildung 14a):

Abbildung 14: **Zeitabstände bei einem Vorgangsknotennetz mit Ende-Anfang-Beziehung**

a) Positives Potenzial



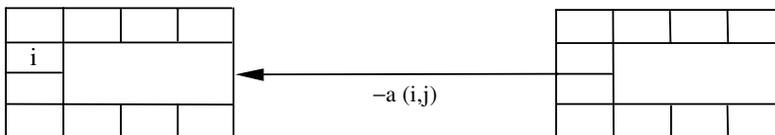
b) Negatives Potenzial



Bei einem Vorgangspfeilnetz (CPM) muss die „Abbindedauer des Fußbodenbetons“ durch einen besonderen Vorgang (Pfeil F; vgl. Abbildung 11) berücksichtigt werden. In einer Reihe von Fällen kann es sinnvoll sein, auch mit einem negativen Zeitabstand im Vorgangsknotennetz zu arbeiten ($a(i,j) < 0$). Soll es z.B. in unserem Projektbeispiel (vgl.) möglich sein, dass mit dem Vorgang „Streifenfundamente betonieren“ (j) bereits begonnen werden kann, bevor der Vorgang „Fundamente ausschachten“ (i) vollständig beendet ist, so hängt der Nachfolger „Streifenfundamente betonieren“ (j) zwar von dem Ende des Vorgängers „Fundamente ausschachten“ (i) ab, der Beginn des Vorgangs j kann aber früher liegen. Kann mit Vorgang j beispielsweise schon drei Tage vor dem Ende des Vorgängers i begonnen werden, so kann dies durch den negativen Zeitabstand $a(i,j) = -3$ an dem entsprechenden Pfeil kenntlich

gemacht werden (vgl. Abbildung 14b). Während ein positives Potenzial einen zeitlichen Mindestabstand (MINEA: minimale Wartezeit zwischen dem Ende des Vorgängers i und dem Anfang des Nachfolgers j) bedeutet, gibt ein negatives Potenzial die **maximale Überlappungszeit** der beiden aufeinander folgenden Vorgänge an. Die maximale Überlappungszeit ist die Zeit, in der die beiden betreffenden Vorgänge längstens (zeitlich) parallel laufen dürfen. Ist an einem Pfeil kein Zeitabstand angegeben, so bedeutet dies formal $a(i,j) = 0$. Besteht die Bedingung, dass bei zwei aufeinander folgenden Vorgängen zwischen dem Ende des Vorgängers i und dem Anfang des Nachfolgers j nur ein maximaler Zeitabstand liegen darf, so besagt dies, dass der Nachfolger j spätestens $a(i,j)$ Zeiteinheiten nach dem Ende von Vorgang i beginnen muss. Dieser **zeitliche Maximalabstand** wird durch MAXEA symbolisiert und wie folgt im Netzplan durch einen **Pfeil in entgegengesetzter Richtung mit einem negativen Potenzial** dargestellt (Abbildung 15):

Abbildung 15: Darstellung eines maximalen Zeitabstandes zwischen aufeinander folgenden Vorgängen



In unserem Projektbeispiel müsste beispielsweise zwischen den Vorgängen „Beton für Fußboden anfahren“ (i) und „Verteilen und Glätten des Fußbodenbetons“ (j) ein MAXEA vorgegeben werden. Würde der vorgegebene maximale Zeitabstand zwischen dem Ende des Vorgängers i und dem Anfang des Nachfolgers j überschritten, so würde der Beton schon so weit abgehärtet sein, dass man ihn nicht mehr genügend gut verteilen und glätten könnte.

Abbildung 16: Bedeutung von Potenzialen bei MINEA bzw. MAXEA

Ende-Anfang	$a(i,j) > 0$	$a(i,j) = 0$	$a(i,j) < 0$
Mindestabstand MINEA	 (1) Mindestabstand	 (2)	 (3) Maximale Überlappung
Maximalabstand MAXEA	 (4) Minimale Überlappung	 (5)	 (6) Maximalabstand

- (1) Frühestens kann j beginnen, $a(i,j)$ Zeiteinheiten nach dem Ende von i
- (2) Frühestens kann j beginnen, 0 Zeiteinheiten vor dem Ende von i

- (3) Frühestens kann j beginnen, $a(i,j)$ Zeiteinheiten vor dem Ende von i
- (4) j muss spätestens $a(i,j)$ Zeiteinheiten vor Beendigung von i beginnen
- (5) j muss spätestens mit Beendigung von i beginnen
- (6) j muss spätestens $a(i,j)$ Zeiteinheiten nach Beendigung von i beginnen

Ein maximaler zeitlicher Abstand MAXEA zwischen dem Ende des Vorgangs i und dem Anfang von Vorgang j mit dem Potenzial $a(i,j)$ bedeutet, dass der früheste Anfang von Vorgang j ($FA(j)$) maximal $a(i,j)$ Zeiteinheiten nach dem frühesten Ende des Vorgangs i ($FE(i)$) liegen darf:

$$FA(j) \leq FE(i) + a(i,j) \text{ oder (umgeformt) } FE(i) \geq FA(j) - a(i,j)$$

Diese Bedingung entspricht also dem Minimalabstand zwischen dem Anfang von Vorgang j und dem Ende von Vorgang i mit dem zeitlichen Abstand $-a(i,j)$. Diese Darstellungsart zeigt, dass die Maximalbedingung in eine Minimalbedingung überführt werden kann. Dadurch brauchen bei der Durchführung der Zeitplanung nur Minimalbedingungen berücksichtigt werden.

b) Anfang-Ende-Beziehung

Die „**Anfang-Ende-Beziehung**“ (**AE**) wird (nach DIN 69900) „Sprungfolge (SF)“ genannt. MINAE bzw. MAXAE gibt den zeitlichen Mindest- bzw. Höchstabstand an, der zwischen dem Anfang des Vorgängers i und dem Ende des Nachfolgers j liegt. Diese Abhängigkeit kommt selten vor, so dass Netzpläne auf der Basis der Anfang-Ende-Beziehung nicht üblich sind.

c) Ende-Ende-Beziehung

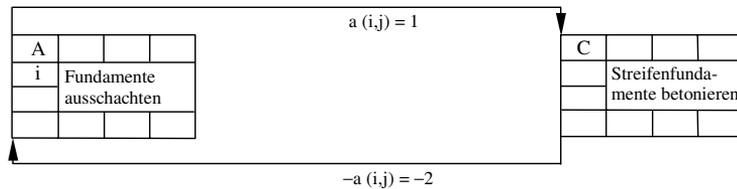
Die „**Ende-Ende-Beziehung**“ (**EE**) beinhaltet, dass ein unmittelbar nachfolgender Vorgang j erst beendet werden kann, wenn der vorausgehende Vorgang i abgeschlossen ist. Diese Beziehung wird (nach DIN 69900) „Endfolge (EF)“ genannt. Die Zeitabstände werden analog mit MINEE bzw. MAXEE symbolisiert. Die Potenziale $a(i,j)$ können positiv, Null oder negativ sein.

d) Anfang-Anfang-Beziehung

Eine letzte Beziehung zwischen Vorgängen ist die „**Anfang-Anfang-Beziehung**“ (**AA**). Diese Beziehung wird (nach DIN 69900) „Anfangsfolge (AF)“ genannt. Die **Metra-Potenzial-Methode** (MPM) arbeitet mit dieser Anfang-Anfang-Beziehung. MINAA bedeutet, dass Vorgang j **frühestens** eine bestimmte Zeit $a(i,j)$ nach dem Anfang des Vorgangs i beginnen kann. MAXAA gibt an, um wie viel Zeiteinheiten $a(i,j)$ ein Vorgang j **spätestens** nach dem Anfang des vorangehenden Vorgangs i beginnen muss. Dabei können die Zeitabstände (die Potenziale) größer oder gleich Null sein.

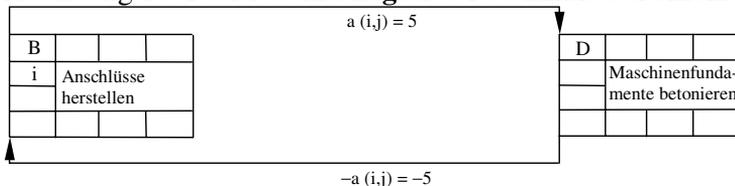
Kann im obigen Projektbeispiel () mit dem Vorgang j „Streifenfundamente betonieren“ schon ein Tag nach dem Anfang des vorangehenden Vorgangs i „Fundamente ausschachten“ begonnen werden, so kann MINAA im Netzplan wie folgt dargestellt werden ($a(i,j) = 1$):

Abbildung 17: Positive/negative Potenziale zwischen Vorgängen bei MPM-Netzplänen



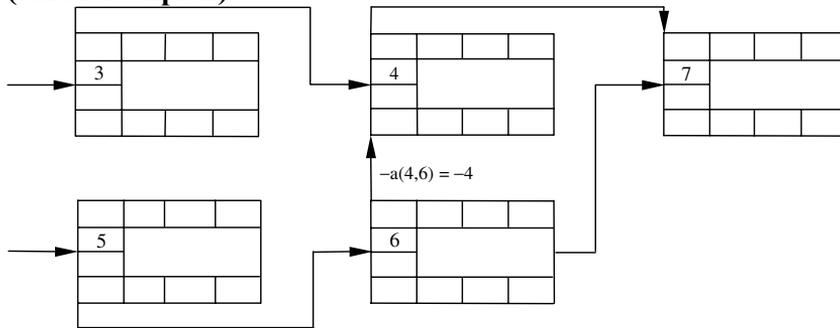
Soll sichergestellt werden, dass die ausgeschachteten Fundamente unverzüglich ausbetoniert werden, um zu verhindern, dass sie eventuell teilweise wieder zerstört werden (z.B. durch Witterungseinflüsse), so müsste ein maximaler Zeitabstand MAXAA zwischen dem Anfang des Vorgangs i „Fundamente ausschachten“ und dem Anfang des Vorgangs j „Streifenfundamente betonieren“ festgelegt werden. In **Error! Reference source not found.** ist MAXAA mit $-a(i,j) = -2$ an dem Pfeil in entgegengesetzter Richtung dargestellt, d.h. der Vorgang j muss spätestens zwei Tage nach dem Anfang des Vorgängers i beginnen. Ein spezieller Fall wird beschrieben, wenn das positive Potenzial $a(i,j)$ und das negative Potenzial $-a(i,j)$ an einem Pfeil in entgegengesetzter Richtung absolut den gleichen Wert annehmen:

Abbildung 18: Positive und negative Potenziale bei einem MPM-Netzplan



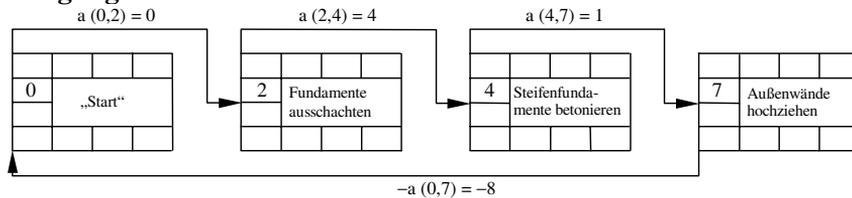
Dies bedeutet, dass mit dem Vorgang j unmittelbar im Anschluss an das Ende des Vorgangs i (Dauer: $D(i)=5$) begonnen werden muss. Der Pfeil mit positivem Potenzial allein kann diesen Sachverhalt nicht richtig wiedergeben, da er lediglich den zeitlichen Minimal-Abstand MINAA markiert. Abgesehen von dem Tatbestand, dass sich dieser Sachverhalt stets für die **kritischen Vorgänge** im Netzplan ergibt, wird diese Darstellungsform immer dann nötig sein, wenn technische oder organisatorische Umstände eine derart enge Verknüpfung von Vorgängen bedingen. Da es bei dieser zeitlichen Bedingung durchaus nicht notwendig ist, dass der Vorgang j unmittelbar Nachfolger des Vorgangs i ist, lässt sich diese Bedingung auch für andere Sachverhalte verwenden, wie beispielsweise die zeitliche Abstimmung parallel verlaufender, sich aber später vereinigender Abläufe:

Abbildung 19: **Zeitliche Abstimmung parallel verlaufender Vorgänge (MPM-Netzplan)**



In dem vorstehenden Netzplanausschnitt (Abbildung 19) stellt das negative Potenzial $-a(4,6) = -4$ an dem Pfeil zwischen den Vorgängen $i = 4$ und $j = 6$ sicher, dass der Vorgang 6 spätestens 4 Zeiteinheiten nach dem Anfang des Vorgangs 4 begonnen werden muss. Schließlich kann bei einem Vorgangsknotennetz nach MPM eine Beziehung zwischen dem spätestzulässigen Anfang eines Vorgangs j und dem „Projektstart“ hergestellt werden:

Abbildung 20: **Berechnung eines spätestzulässigen Anfangs eines beliebigen Vorgangs**



Eine solche Beziehung ist sinnvoll, wenn z.B. in unserem Projektbeispiel ein bestimmter Bautenstand vor dem Einsetzen des Winters (Frost) erreicht werden soll. So gibt das negative Potenzial $-a(0,7) = -8$ an dem Pfeil in entgegengesetzter Richtung an, dass der Vorgang „Außenwände hochziehen“ ($j = 7$) spätestens 8 Tage nach dem Projektstart ($i = 0$) begonnen werden muss. Bei Berücksichtigung einer solchen zeitlichen Nebenbedingung fällt auf, dass Zyklen in den Netzplan eingeführt werden. Dabei handelt es sich jedoch nicht um einen Widerspruch zu der allgemeinen Forderung der NPT, dass ein Netzplan zyklen- und schleifenfrei sein muss. Diese Forderung bezieht sich nämlich ausschließlich auf die **Strukturplanung**. Die Einführung derartiger zeitlicher Nebenbedingungen ist grundsätzlich zulässig; allerdings gilt dies nur insoweit, als die zeitlichen Nebenbedingungen, die zu Zyklen geführt haben, mit den übrigen Bedingungen verträglich sind. Dies ist also jeweils zu

überprüfen. Die Verträglichkeit eines solchen Zyklus ist gegeben, wenn die Summe aller Potenziale an den Pfeilen (im Zyklus), einen nichtpositiven Wert ergibt:

$$\sum_{ij} a(i,j) \leq 0 \quad (\text{für alle } (i,j), \text{ die die Pfeile im Zyklus kennzeichnen})$$

In **Error! Reference source not found.** ist die Verträglichkeit gegeben, da

$$\begin{aligned} \sum_{ij} a(i,j) &= a(0,2) + a(2,4) + a(4,7) - a(0,7) \\ &\leq 0 \\ &= 0 + 4 + 1 - 8 = -3 \end{aligned}$$

Wäre die Verträglichkeit nicht gegeben, so wäre der entsprechende Projektausschnitt nicht realisierbar.

e) Kombination von Anordnungsbeziehungen

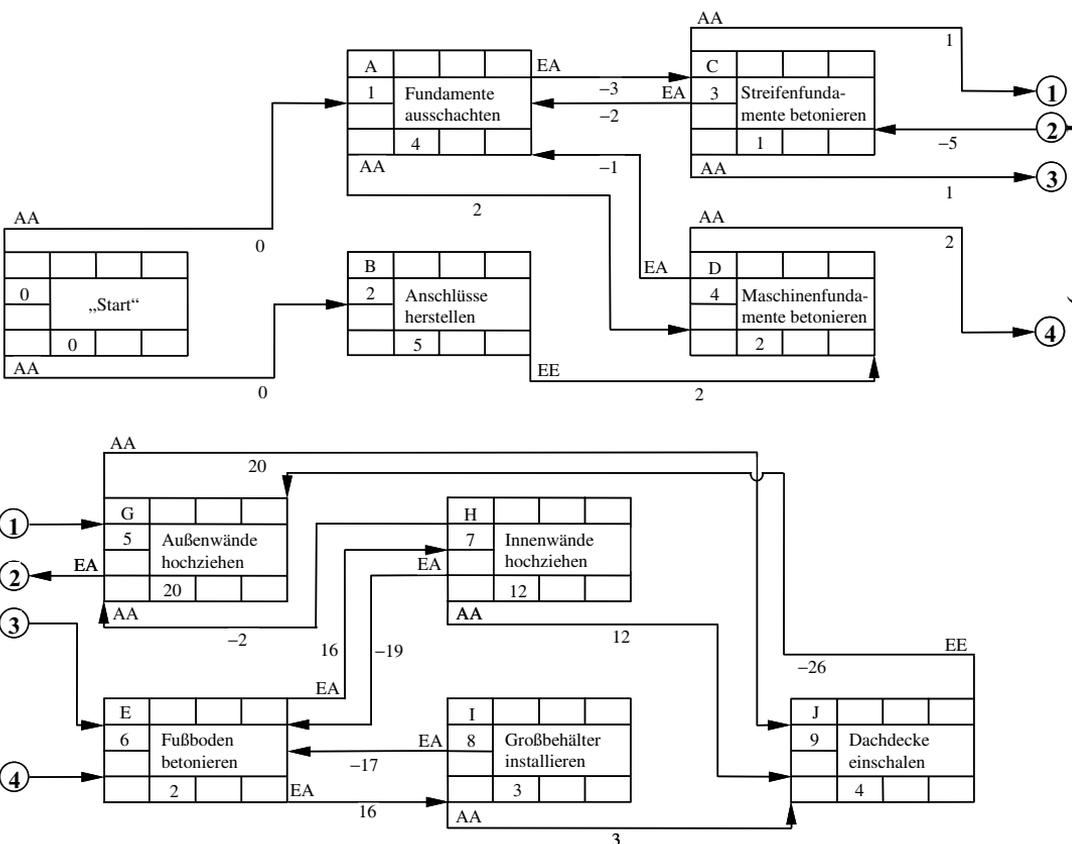
Begrifflich und graphisch ist es möglich, zwischen den Vorgängen mehrere Anordnungsbeziehungen mit minimalen und maximalen Zeitabständen und Pfeilen in beiden Richtungen zu verwenden. Voraussetzung ist jedoch, dass die Beziehungen untereinander und mit den vorgegebenen Vorgangsdauern nicht in Widerspruch geraten. Sollen verschiedene Anordnungsbeziehungen in einem Netzplan verwendet werden, so müsste die Vorgangsliste bei jedem Vorgang um die Angabe der Art der Abhängigkeit und die zugehörigen Zeitabstände ergänzt werden. Zur Demonstration soll unser Projektbeispiel (1) als Ergebnis der Strukturplanung im ersten Teil erweitert werden (Tabelle 3):

Tabelle 3: **Vorgangsliste mit Zeitabständen als Ergebnis der Strukturanalyse**

Vorgang	Ausführungsdauer in Tagen	Vorgänge	Anordnungsbeziehung	Zeitabstand in Tagen
A Fundamente ausbauechten	4	–		
B Anschlüsse herstellen	5	–		
C Streifenfundamente betonieren	1	A	MINEA	– 3
		A	MAXEA	+ 2
D Maschinenfundamente betonieren	2	A	MINAA	+ 2
		A	MAXEA	+ 1
E Fußboden betonieren	2	B	MINEE	+ 2
		C	MINAA	+ 1
F Abbindedauer des Fußbodenbetons	16	D	MINAA	+ 2
		E		
G Außenwände hochziehen	20	C	MINAA	+ 1
		C	MAXEA	+ 5

H	Innenwände hochziehen	E	MINEA	+	16
E		E	MAXEA	+	19
G		G	MAXAA	+	2
I	Großbehälter installieren	E	MINEA	+	16
E		E	MAXEA	+	17
G		G	MINAA	+	20
G		G	MAXEE	+	26
H		H	MINAA	+	12
J	Dachdecke einschalen	I	MINAA	+	3

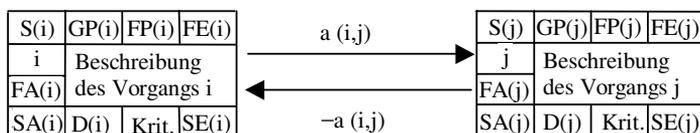
Abbildung 21: Anordnungsbeziehungen im Vorgangsknotennetz (Netzplan zum Beispiel Tabelle 3)



3.3.2 Ermittlung der Vorgangszeitpunkte in einem Vorgangsknotennetzplan mit EA-Beziehungen

In einem Vorgangsknotennetzplan können die Knoten die wichtigen Informationen aufnehmen, die den jeweiligen Vorgang betreffen. Die Pfeile hingegen werden nur mit den Potenzialen versehen (vgl. Abbildng 22):

Abbildung 22: Knoten mit Ende-Anfang-Beziehung im Vorgangsknotennetzplan



- S(i) bzw. S(j): Symbol für Kurzbezeichnung des Vorgangs i bzw. j (z.B. A, B, C, ...)
- i: Nr. des vorangehenden Vorgangs
- j: Nr. des folgenden Vorgangs ($i < j$)
- FA(i) bzw. FA(j): Frühestmöglicher Anfang des Vorgangs i bzw. j
- SA(i) bzw. SA(j): Spätestzulässiger Anfang des Vorgangs i bzw. j
- D(i) bzw. D(j): Ausführungsdauer des Vorgangs i bzw. j
- SE(i) bzw. SE(j): Spätestzulässiges Ende des Vorgangs i bzw. j
- FE(i) bzw. FE(j): Frühestmögliches Ende des Vorgangs i bzw. j
- a (i,j): Positives Potenzial (MINEA: minimaler zeitlicher Abstand zwischen Ende des Vorgangs i und Anfang des Vorgangs j)
- -a (i,j): Negatives Potenzial (MAXEA: maximaler zeitlicher Abstand zwischen Ende des Vorgangs i und Anfang des Vorgangs j); es befindet sich jeweils an einem Pfeil in entgegengesetzter Richtung
- GP(i) bzw. GP(j): Gesamte Pufferzeit des Vorgangs i bzw. j
- FP(i) bzw. FP(j): Freie Pufferzeit des Vorgangs i bzw. j
- Krit.: Krit.=ja: Es handelt sich um einen kritischen Vorgang; sonst nein.

Die Zeitplanung für ein Projekt erfolgt in mehreren Schritten:

Schritt 1:

Für jeden Vorgang j des Projektes wird der **frühestmögliche Anfang** (frühestmöglicher Beginnzeitpunkt) FA(j) ermittelt. Der letzte Vorgang $j = n$ im Vorgangsknotennetzplan ist der Scheinvorgang „Ende“ des Projektes. FA(n) entspricht der **minimalen Projektdauer**, die wiederum durch den **zeitlich längsten Weg** durch den Netzplan bestimmt wird. Bleiben zunächst die Beziehungen mit negativen Potenzialen unberücksichtigt, so ergeben sich die frühestmöglichen Anfangszeitpunkte im Wege der **Vorwärtsrechnung** wie folgt:

$$FA(0) = 0$$

$$FA(j) = \max_i [FE(i) + a(i,j)] \quad i \in \{\text{Vorgänger}(j)\}; j \in \{\text{Nachfolger}(i)\}$$

Als Projektbeginn $FA(0)$ wird üblicherweise der Zeitpunkt 0 vorgegeben (jeder beliebige andere Wert ist möglich). Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Zeitplanung nach CPM (vgl. Abbildung 11 und Tabelle 2) zu erreichen, wird die Vorgehensweise an dem obigen Projektbeispiel: „Bau einer Fabrikationshalle“ (vgl. Vorgangsliste in 1) demonstriert: In sind die $FA(j)$ jeweils an den vorgesehenen Stellen in den Knoten angegeben. Der Scheinvorgang „Ende“ des Projektes wird frühestmöglich nach 120 Tagen - $FA(22) = 120$ - erreicht (minimale Projektdauer). **Der längste Weg durch des Projekt** wurde also mit der Dauer von 120 Tagen ermittelt. Das **frühestmögliche Ende** eines jeden Vorgangs i lässt sich leicht ermitteln:

$$FE(i) = FA(i) + D(i) \quad i = 0, 1, \dots, n - 1$$

Die entsprechenden Werte sind ebenfalls an den vorgesehenen Stellen in den Knoten (Abbildung 23) eingetragen. Sind im Netzplan Pfeile mit entgegengesetzter Richtung und negativen Potenzialen vorhanden, so ist zu überprüfen, ob diese die errechneten $FA(j)$ und damit möglicherweise auch die ermittelte minimale Projektdauer beeinflussen. Dabei kann sich ein negatives Potenzial nur auf den Vorgang, in den der Pfeil mit entgegengesetzter Richtung einmündet, sowie auf die Nachfolger dieses Vorgangs auswirken; dem Vorgang vorausgehende Vorgänge bleiben unberührt.

Schritt 2:

Durch **Rückwärtsrechnung** kann für jeden Vorgang das **spätestzulässige Ende** $SE(i)$ ermittelt werden. Geht man wieder davon aus, dass die minimale Projektdauer nicht überschritten werden soll, dann entspricht das **frühestmögliche Ende** des Scheinvorgangs „Ende“ zugleich dem **spätestzulässigen Ende**:

$$SE(n) = FE(n)$$

Der **spätestzulässige Anfang** eines jeden Vorgangs i lässt sich wie folgt berechnen:

$$SA(i) = SE(i) - D(i) \quad i = 0, 1, \dots, n - 1$$

Das **spätestzulässige Ende** eines Vorgangs i wird durch den **zeitlich längsten Weg** vom Zielvorgang n (hier: „Ende“ des Projektes) bis zu dem Vorgang i bestimmt. Bleiben zunächst wieder die Beziehungen mit entgegengesetzter Richtung und negativen Potenzialen unberücksichtigt, dann gilt:

$$SE(i) = \min_j [SA(j) - a(i,j)] \quad i \in \{\text{Vorgänger}(j)\}; j \in \{\text{Nachfolger}(i)\}$$

In sind die Werte für $SA(i)$ sowie die für $SE(i)$ jeweils an den vorgesehenen Stellen in den Knoten angegeben.

Abbildung 23: Zeitplanung des Projektbeispiels im Vorgangsknotennetzplan

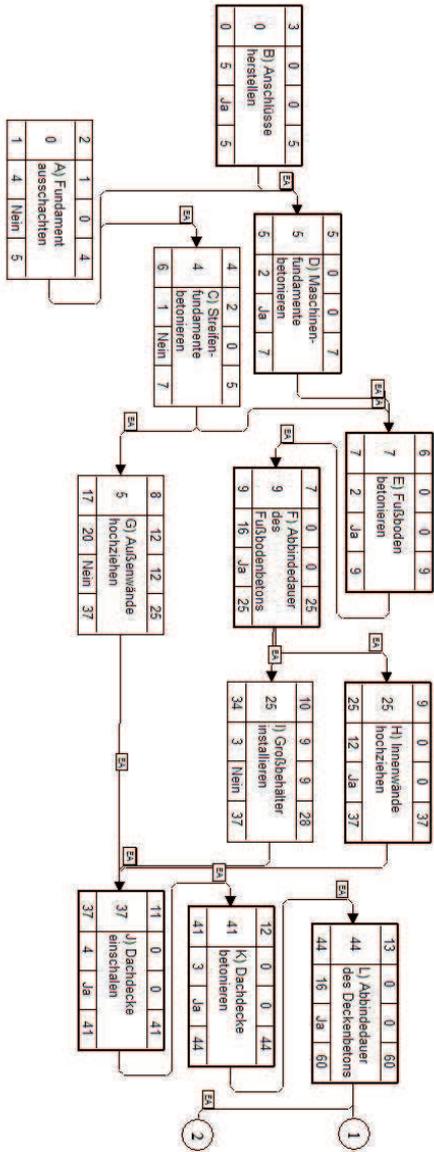
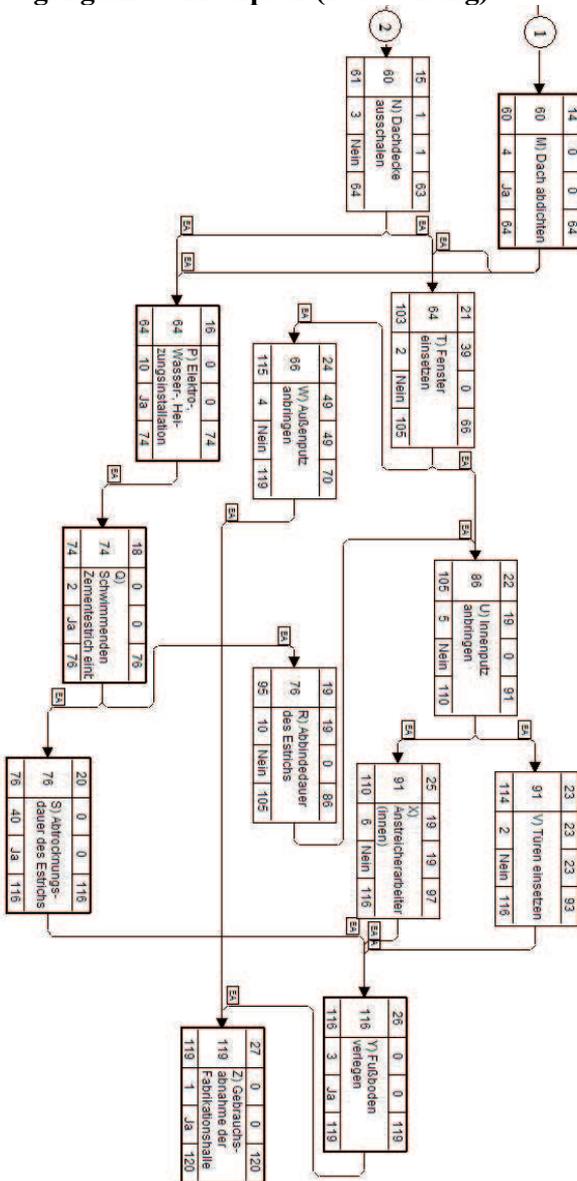


Abbildung 23: Zeitplanung des Projektbeispiels im Vorgangsknotennetzplan (Fortsetzung)



Sind im Netzplan Pfeile mit entgegengesetzter Richtung und negativen Potenzialen vorhanden, so ist ihr möglicher Einfluss zu berücksichtigen. In Umkehrung der Betrachtung bei der Ermittlung der FA(j) ist hier zu beachten, dass nur der spätestzulässige Anfang bzw. das spätestzulässige Ende eines Vorgangs beeinträchtigt werden kann, von dem der Pfeil in entgegengesetzter Richtung und mit negativem Potenzial ausgeht. Darüber hinaus kann ein

solcher Einfluss nur noch auf die Vorgänger dieses Vorgangs, nicht auf seine Nachfolger ausgehen.

3.3.3 Ermittlung und Interpretation der Pufferzeiten

Eine Erörterung der Pufferzeiten führt zu ähnlichen Betrachtungen wie sie schon im Zusammenhang mit der CPM-Zeitplanung angestellt wurden. Da für den Zielvorgang „Ende“ des Projektes die Gleichung $FA(n) = SA(n)$ vorgegeben wurde, sind die **kritischen Vorgänge** im Netzplan wie folgt definiert:

$$FA(i) = SA(i) \text{ bzw. } FE(i) = SE(i) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Die kritischen Vorgänge sind in ihrer Ausführung streng an Termine gebunden; sie haben keine **Pufferzeiten**. Bei den **nichtkritischen Vorgängen** steht ein **zeitlicher Spielraum** (Puffer, Pufferzeit, Schlupf) zur Verfügung, d.h. bei diesen Vorgängen liegt der spätestzulässige Anfang später als der frühestmögliche. Welchen Umfang die Pufferzeit annimmt und welche Auswirkungen ihre Nutzung haben kann, wird wiederum an den Arten von Pufferzeiten im Vorgangsknotennetzplan gezeigt:

(1) Gesamte Pufferzeit eines Vorgangs GP(i)

$$GP(i) = SA(i) - FA(i) \quad i = 0, 1, \dots, n$$

Die **gesamte Pufferzeit GP(i)** eines Vorgangs i gibt die Zeitspanne an, die für eine Verschiebung oder Ausdehnung des Vorgangs maximal zur Verfügung steht, ohne dass die zeitminimale Projektdauer beeinträchtigt wird.

(2) Freie Pufferzeit eines Vorgangs FP(i)

$$FP(i) = \left\{ \min_j [FA(j) - a(i,j) - FE(i)] \right\}; \quad i \in \{\text{Vorgänger}(j)\}; \quad j \in \{\text{Nachfolger}(i)\}$$

Die **freie Pufferzeit** bedarf zu ihrer Bestimmung einer vergleichenden Rechnung unter Einbeziehung mehrerer Vorgänge und insbesondere unter Beachtung der Pfeile in entgegengesetzter Richtung mit den negativen Potenzialen $(-a(l,i))$. Soll also die freie Pufferzeit bestimmt werden, die zur Ausführung oder Verschiebung eines Vorgangs zur Verfügung steht und darf eine Nutzung dieser freien Pufferzeit den frühestmöglichen Anfang der Nachfolger dieses Vorgangs nicht beeinträchtigen, dann sind - wie bei CPM - Vergleiche mit dem frühestmöglichen Anfang aller Nachfolger sowie der Potenziale an ihren Verknüpfungen anzustellen. Freie Pufferzeiten können nur bei Vorgängen vorkommen, die vor der Vereinigung von Teilwegen und auf dem zeitlich kürzesten Weg durch den Netzplan liegen. Die freie Pufferzeit entspricht dem Unterschied der Gesamtpufferzeiten der zusammengeführten Wege.

(3) Unabhängiger Puffer UP(i)

$$UP(i) = \left\{ \min_j [FA(j) - a(i,j)] - \max_h [SE(h) + a(h,i) - D(i)] \right\};$$

$h \in \{\text{Vorgänger}(i)\}; \quad j \in \{\text{Nachfolger}(i)\}$ für alle i

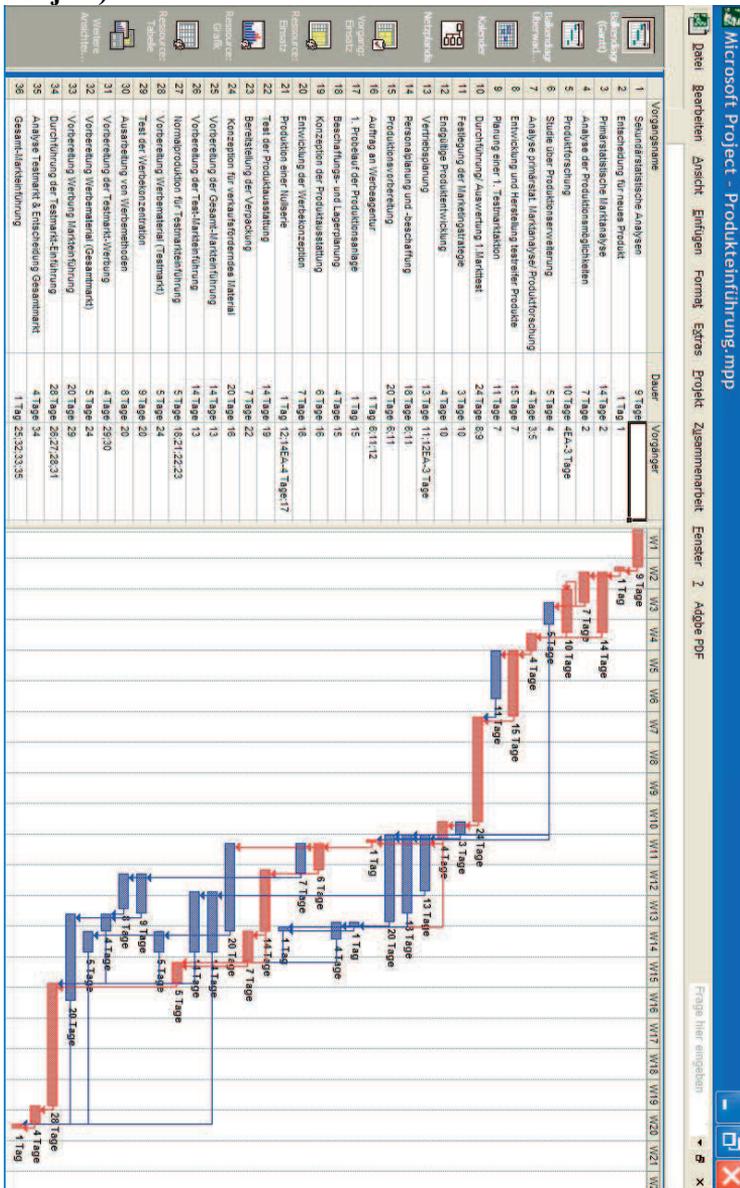
Die unabhängige Pufferzeit ist die Zeitdauer, um den ein Vorgang auch dann noch ausgedehnt oder verschoben werden kann, wenn alle Vorgänger eines Vorganges zum spätestzulässigen Zeitpunkt und alle Nachfolger des gleichen Vorganges frühestmöglich stattfinden. Durch seine Inanspruchnahme bleibt der übrige Zeitplan unberührt. Aus den gegebenen Definitionen der Vorgangspufferzeiten lässt sich folgende Relation ableiten: $GP(i) \geq FP(i) \geq UP(i)$. In Abbildung 23 sind die „gesamte Pufferzeit“ und die „freie Pufferzeit“ eines jeden Vorganges für das obige Projektbeispiel „Bau einer Fabrikationshalle“ (vgl. 1) an den vorgesehenen Stellen in den Knoten jeweils angegeben.

3.4 Beispiel: Produkteinführung mit Hilfe eines Netzplans

3.4.1 Aufgabenstellung

Eine Produkteinführung erfordert in der Regel eine Vielzahl miteinander verflochtener Aktivitäten (Vorgänge). Dabei können die Vorgänge teils nur nacheinander, teils aber auch parallel durchgeführt werden. Selbst routinierte Praktiker haben Schwierigkeiten, wenn sie für ein definiertes Projekt eine vollständige **Liste der Vorgänge** (einschließlich Verknüpfungen) aufstellen sollen. Für das Projekt der „Einführung eines neuen Produktes im Konsumgüterbereich“ sei die in aufgeführte **Vorgangsliste** aufgestellt und in *MS Project* implementiert worden. Neben den einzelnen Vorgängen sind dort die Vorgangsdauern, die EA-Vorgängerbeziehungen sowie die Potenziale der Vorgängerbeziehungen angegeben. Die Angabe „12EA-3 Tage“ bei Vorgang 13 bedeutet demnach, dass Vorgang 12 der Vorgänger von Vorgang 13 ist und dass die Vorgänge durch ein MINEA Potenzial von $a(12,13)=(-3)$ verbunden sind. Es besteht also eine maximale Überlappung des Vorganges 12 durch den Vorgang 13 von 3 Tagen. Für das Projekt soll ein Vorgangsknotennetzplan (mit EA-Beziehungen), ein Struktur- und Zeitplan aufgestellt werden. Dabei sind die minimale Projektdauer, der frühestmögliche Anfang, das frühestmögliche Ende, der spätestzulässige Anfang, das spätestzulässige Ende eines jeden Vorganges zu ermitteln; die Pufferzeiten - $GP(i)$ und $FP(i)$ - sind anzugeben und die kritischen Vorgänge zu kennzeichnen.

Abbildung 24: Vorgangsliste Übungsbeispiel „Produkteinführung“ (in MS Project)



Im vorliegenden Beispiel handelt es sich um eine Grobplanung mit Sammelvorgängen. Jeder Sammelvorgang beinhaltet dabei eine Reihe von Einzelvorgängen. So umfasst z.B. der Sammelvorgang Nr. 3: „Primärstatistische Marktanalyse“ beispielsweise folgende Einzelvorgänge: „Vorbereitung der Studie“, „Angebote von Marktforschungsinstituten

einholen“, „Angebote auswerten“, „Entscheidung über Durchführung der Analyse“, „Auftrag an Marktforschungsinstitut“, „Durchführung der Untersuchung im Feld“.

3.4.2 Lösungsvorschlag

In Abbildung 25 ist der Vorgangsknotennetzplan für das Projekt dargestellt:

Abbildung 25: Vorgangsknotennetzplan für das Projekt: **Produkteinführung**

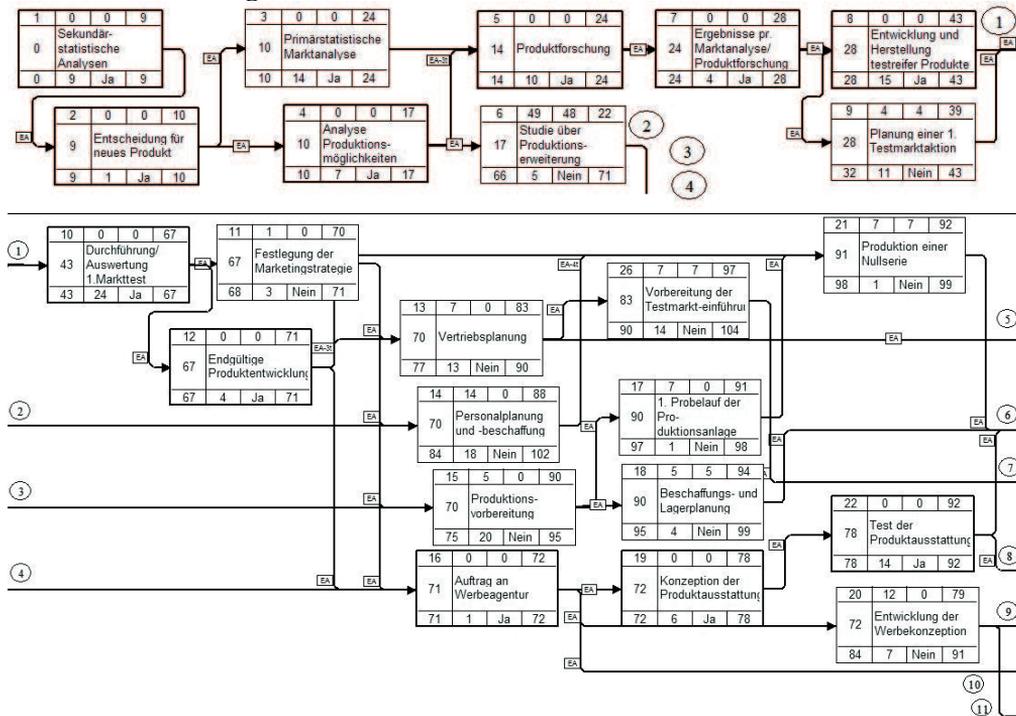
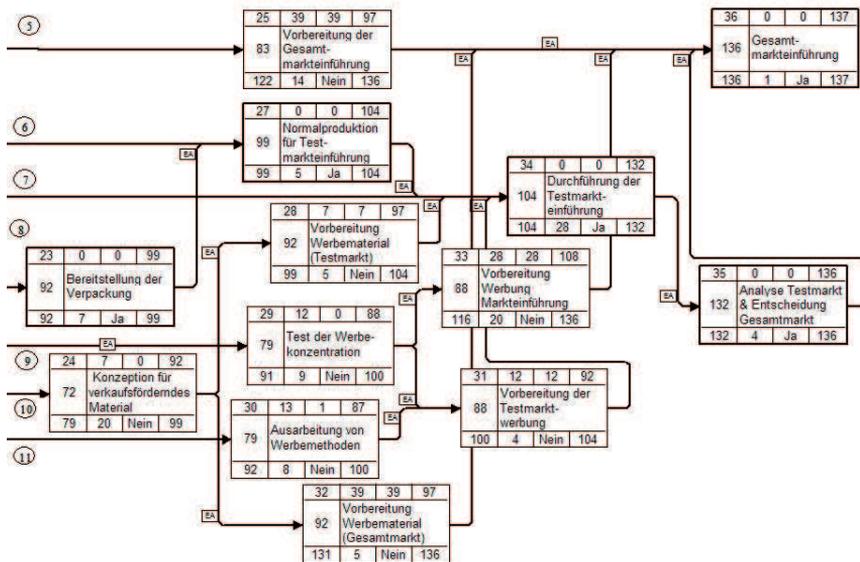


Abbildung 25: Vorgangsknotennetzplan für das Projekt: **Produkteinführung (Fortsetzung)**



4 Zeit-Kosten-Planung

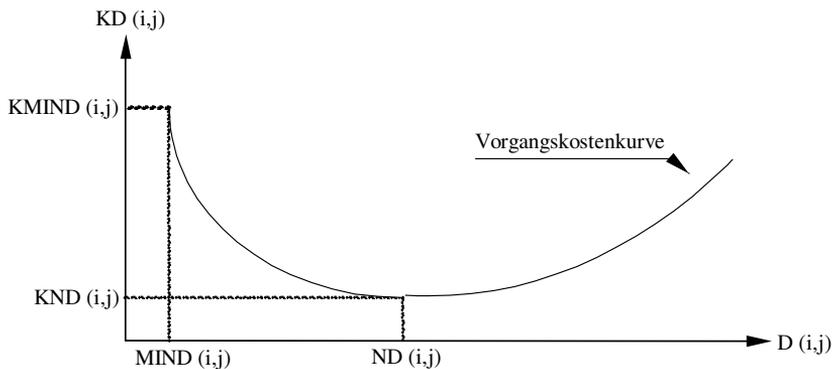
Für eine betriebswirtschaftlich aussagefähige Projektplanung wäre es notwendig, neben der Zeit auch die entstehenden Kosten und die verfügbaren Kapazitäten der einzusetzenden Produktionsmittel sowie die finanziellen Möglichkeiten und Auswirkungen in die Überlegungen einzubeziehen. Darüber hinaus wäre das Zusammenspiel mehrerer Projekte zu berücksichtigen. Hier soll auf dieses Interdependenzproblem nicht im Einzelnen eingegangen werden. Zur Illustration dieser Problematik werden lediglich die **Abhängigkeiten von Zeit und Kosten** erörtert und im Übrigen wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (vgl. z.B. *Corsten, H. u.a.*, 2008, S.186 ff.; *Litke, H.-D.*, 2007, S. 154 ff.; *Schwarze, J.*, 2006, S. 255 ff.; *Hillier, F. S., Lieberman, G. J.*, 2002, S. 502 ff.; *Zimmermann, W.*, 2002, S. 27 ff.).

4.1 Zeitabhängige Vorgangskosten

Da bei der Planung eines Projektes in aller Regel nicht von einer beliebigen, von der Länge des kritischen Weges abhängigen Projektdauer ausgegangen werden kann, sondern fest vorgegebene Termine einzuhalten sind, muss u.U. versucht werden, die „beanspruchte Vorgangsdauer“ einzelner Vorgänge zu reduzieren. Die **Kürzung der Vorgangsdauer** kann durch **zeitliche** (Überstunden, Zusatzschichten), **quantitative** (zusätzliche Arbeitskräfte, Betriebsmittel), **intensitätsmäßige** (Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit) oder **qualitative** (andere Verfahren) **Anpassung** erfolgen. Diese Anpassung

wird **Einfluss** auf die **Höhe der Kosten** haben. Wie hängen die **Vorgangskosten** von der **Vorgangsdauer** ab?

Abbildung 26: **Vorgangskostenkurve**



Die Symbole der Abbildung bedeuten: $D(i,j)$: Dauer des Vorgangs (i,j) ; $KD(i,j)$: Kosten des Vorgangs (i,j) in Abhängigkeit von $D(i,j)$; $MIND(i,j)$: Minimaldauer des Vorgangs (i,j) , für die sich auch die Bezeichnung „Zusammenbruchspunkt“ (crash-point) findet (Schwarze, J., 2006, S. 267).

Die Minimaldauer kann auch bei noch so großem Faktoreinsatz nicht unterschritten werden; $KMIND(i,j)$: Vorgangskosten bei $MIND(i,j)$; $ND(i,j)$: Normaldauer des Vorgangs (i,j) ; $KND(i,j)$: Vorgangskosten bei $ND(i,j)$ - sie sind minimal.

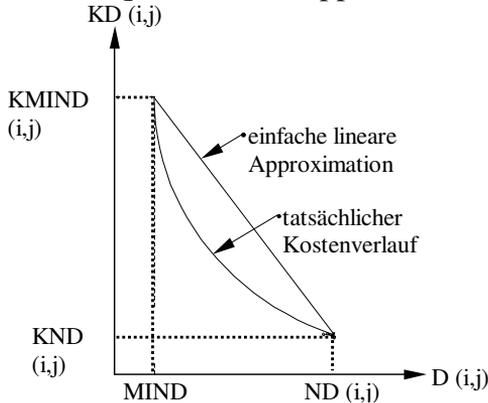
Zentraler Orientierungspunkt für die Zeit-Kosten-Planung ist die sog. **Normaldauer eines Vorgangs** $ND(i,j)$.

Sie umfasst die Zeit, bei der üblicherweise die Kosten des Vorgangs am geringsten sind. Abweichungen von der Normaldauer, wie sie bei Anpassungsmaßnahmen eintreten, führen zu einem Anwachsen der Vorgangskosten. Variiert die Vorgangsdauer nicht (auch nicht annähernd) stetig, so kann es nur einzelne Kostenpunkte für die Beziehung zwischen Vorgangsdauer und Vorgangskosten geben (z.B. Übergang vom Landweg zum Luftweg beim Transport). Tendenziell wird die Kurve der Vorgangskosten - bei wenigstens näherungsweise stetig variierender Vorgangsdauer - einen aus vorangehender Abbildung 26 ersichtlichen Verlauf haben.

Der rechts von $ND(i,j)$ aufsteigende Ast der Vorgangskostenkurve ist ineffizient und bleibt außer Betracht. Eine exakte Beschreibung der Vorgangskostenkurve links von $ND(i,j)$ wird in praktischen Problemen auf erhebliche Schwierigkeiten

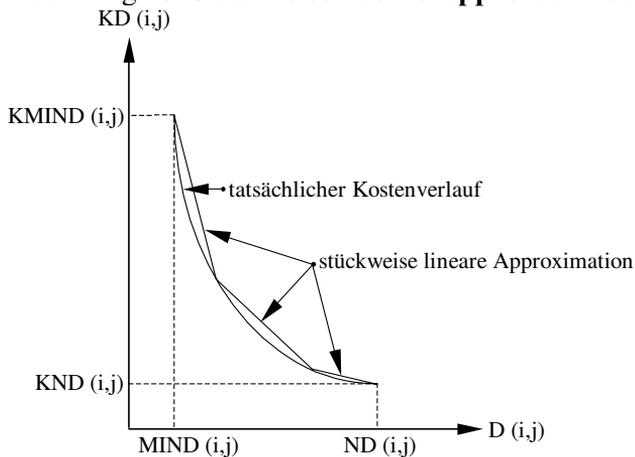
stoßen. Für $KMIND(i,j)$ bzw. $KND(i,j)$ sind oft nur Schätzwerte bekannt. Man hilft sich hier, indem man die Kostenkurve linear approximiert. Die Vorgangskosten bei Minimaldauer $MIND(i,j)$ und bei Normaldauer $ND(i,j)$ werden durch eine Gerade verbunden:

Abbildung 27: **Lineare Approximation der Vorgangskostenkurve**



Es ist auch eine stückweise lineare Approximation möglich:

Abbildung 28: **Stückweise lineare Approximation der Vorgangskostenkurve**



Die linearen Kostenfunktionen lauten (für $ND(i,j) \neq MIND(i,j)$):

$$KD(i,j) = KND(i,j) + \frac{KMIND(i,j) - KND(i,j)}{ND(i,j) - MIND(i,j)} \cdot ND(i,j) - \frac{KMIND(i,j) - KND(i,j)}{ND(i,j) - MIND(i,j)} \cdot$$

$$D(i,j) = a(i,j) - b(i,j) \cdot D(i,j)$$

$$MIND(i,j) \leq D(i,j) \leq ND(i,j); b(i,j) > 0$$

Ist $ND(i,j) = MIND(i,j)$, so ist $KD(i,j) = KND(i,j)$. Besonders wichtig ist dabei die Steigungskonstante $b(i,j)$. Sie gibt an, um wie viel sich die Kosten des

Vorgangs erhöhen, wenn man die Vorgangsdauer um eine Zeiteinheit verkürzt (**Beschleunigungskosten**).

Nach Ableitung der Vorgangskostenfunktion für einen einzelnen Vorgang können nun auch die gesamten **Vorgangskosten des Projektes** KG definiert werden. Sie ergeben sich durch Summation aller KD(i,j) über alle Vorgänge (i,j) des Netzplans. Die lineare Approximation hat den Vorteil, dass sich auf diese Weise die Kostenfunktion bei Berechnung von Optimalpunkten relativ leicht handhaben lässt.

Zur Demonstration greifen wir auf Teilprojekt I des Beispiels (vgl. und **Abbildung 8**) zurück. In der Tabelle 4 sind die normale und die minimale Dauer eines jeden Vorgangs und die dazugehörigen Kostenwerte angegeben. In der letzten Spalte ist die jeweilige Vorgangskostenfunktion eingetragen.

Tabelle 4: **Vorgangskosten und Vorgangskostenfunktion des Beispiels (Teilprojekt I)**

Vorgang	N (i,j)	MN $\bar{n}(i,j)$ (2)	KN $\bar{k}(i,j)$ (3)	KMIN $\bar{m}(i,j)$ (4)	Vorgangskostenfunktion $KD(i,j) = a(i,j) - b(i,j) \cdot D(i,j)$ $(5) = (3) + \frac{(4)-(3)}{(1)-(2)} \cdot (1) - \frac{(4)-(3)}{(1)-(2)} \cdot D(i,j)$	
A	(1,2)	4	1	2	4	$KD(1,2) = 4,67 - 0,67 D(1,2)$
B	(1,3)	5	2	3	5	$KD(1,3) = 6,33 - 0,67 D(1,3)$
C	(2,4)	1	1	1	1	$KD(2,4) = 1 - 0 D(2,4)$
D	(3,5)	2	1	1	2	$KD(3,5) = 3 - 1 D(3,5)$
E	(5,6)	2	1	2	3	$KD(5,6) = 4 - 1 D(5,6)$
F	(6,7)	16	12	0	2	$KD(6,7) = 8 - 0,5 D(6,7)$
G	(4,8)	20	16	10	12	$KD(4,8) = 20 - 0,5 D(4,8)$
H	(7,9)	12	6	12	15	$KD(7,9) = 18 - 0,5 D(7,9)$
I	(7,8)	3	2	1	2	$KD(7,8) = 4 - 1 D(7,8)$
J	(9,10)	4	2	4	5	$KD(9,10) = 6 - 0,5 D(9,10)$
K	(10,11)	3	2	3	4	$KD(10,11) = 6 - 1 D(10,11)$
L	(11,12)	16	12	0	2	$KD(11,12) = 8 - 0,5 D(11,12)$
M	(12,13)	4	2	3	5	$KD(12,13) = 7 - 1 D(12,13)$
N	(12,14)	3	1	1	3	$KD(12,14) = 4 - 1 D(12,14)$
			Σ 43			

Auf die besonderen Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Abhängigkeit der Vorgangskosten von der Vorgangsdauer, die sich daraus ergeben, dass man in

der Praxis die dazu notwendigen Informationen nicht immer beschaffen kann, sei hingewiesen. Es dürfte nur selten vorkommen, dass die Kostenrechnung der Betriebe so tief gegliedert ist wie der Projektablauf im Netzplan, so dass man sich bei der Zeit-Kosten-Ermittlung in der Mehrzahl der Fälle mit Schätzungen und Expertenbefragungen begnügen muss.

4.2 Bestimmung der vorgangskostenminimalen Projektrealisierung bei gegebener Projektdauer

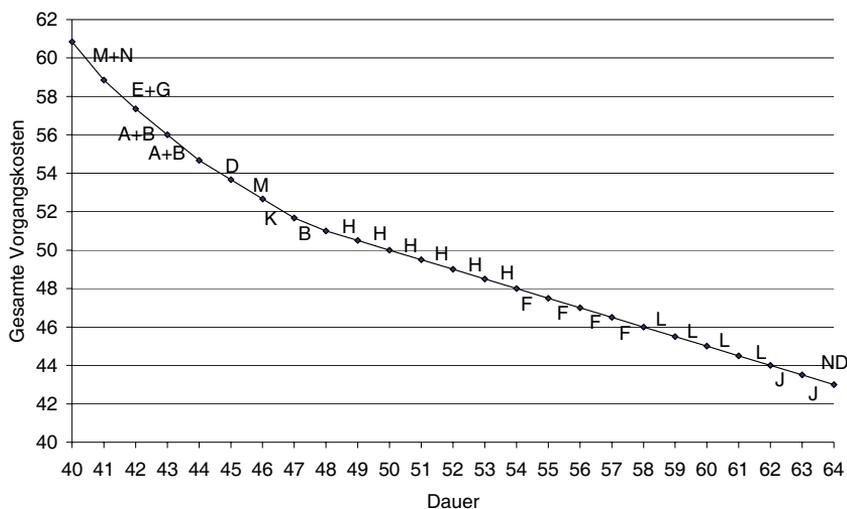
In der Regel wird man anstreben, eine **feste vorgegebene Projektdauer** mit **minimalen Kosten** zu realisieren. Die Vorgangsdauern der einzelnen Vorgänge sind so einzurichten, dass die gesamten Vorgangskosten KG ein Minimum werden. Es müssen also die **Vorgangsdauern so verkürzt** werden, dass der dadurch hervorgerufene **Kostenanstieg am kleinsten** ist. Bei unserem Beispiel (Tabelle 4) ist der Kostenanstieg durch eine Verringerung der Vorgangsdauer z.B. bei Vorgang (6,7) geringer als bei Vorgang (5,6). Eine Verringerung der Projektdauer wird man also so vornehmen, dass man zunächst den **kritischen Vorgang** mit dem **kleinsten Kostenanstieg je Zeiteinheit** verkürzt.

Im Teilprojekt I des Beispiels erhält man eine Projektdauer T von 64 Tagen bei minimalen Kosten KG in Höhe von 43 GE (Geldeinheiten), wenn jeder Vorgang in der normalen Dauer ND(i,j) ausgeführt wird.

Soll die Projektdauer T verkürzt werden, so verringert man dazu zunächst die kritischen Vorgänge (6,7), (7,9), (9,10) oder (11,12). Diese kritischen Vorgänge haben die gleiche **Kostensteigerungskonstante** $b(i,j) = 0,5$; d.h. 0,5 GE/Tag. Da durch die Verkürzung der Vorgänge (9,10) und (11,12) kein anderer Vorgang kritisch werden kann (vgl. Netzplan Abbildung 11), ist es zweckmäßig, diese zunächst zu verkürzen: Vorgang (9,10) auf 2 Tage und Vorgang (11,12) auf 12 Tage. Die Kosten betragen dann $43 + 1 = 44$ bzw. $44 + 2 = 46$ GE. Als Nächstes sind die Vorgänge (6,7) oder (7,9) zu verkürzen. Beginnt man mit Vorgang (6,7), so ergibt sich aus dem Netzplan (Abbildung 11 in Verbindung mit Tabelle 4), dass eine Verkürzung um 4 Tage möglich ist. Die Projektdauer beträgt jetzt 54 Tage mit Kosten von 48 GE. Vorgang (7,9) kann um 6 Tage auf 6 Tage verkürzt werden, ohne dass ein anderer Vorgang kritisch wird. Die Kostensteigerung dieser Verkürzung beträgt 3 GE. Als Nächstes kann die Dauer des Vorgangs (1,3) um einen Tag (anstatt 3 Tage gem. Tabelle 4) mit einer Kostenzunahme von 0,67 GE verkürzt werden. Durch eine Reduzierung der Vorgangsdauer D (1,3) auf 4 Tage wird nämlich der bisher nichtkritische Vorgang (1,2) kritisch (vgl. Netzplan Abbildung 11). Um eine weitere Verkürzung der Dauer von Vorgang (1,3) zu erreichen, müsste die Dauer des Vorgangs (1,2) gleichzeitig mitgekürzt werden; die Beschleunigungskosten würden sich entsprechend addieren. Dann lassen sich die kritischen Vorgänge (3,5), (5,6), (10,11) bzw. (12,13) verkürzen, und zwar mit jeweils einer Kostensteigerung von einer GE/Tag. Während die Vorgangsdauer D (10,11)

ohne weiteres um einen Tag verkürzt werden kann, lässt sich D (12,13) nicht um 2, sondern nur um einen Tag verkürzen, da bereits bei D (12,13) = 3 der Vorgang (12,14) kritisch wird (vgl. Netzplan Abbildung 11). Ebenso kann nur D (3,5) **oder** D (5,6) um einen Tag verkürzt werden, da bei einer Verkürzung um einen Tag der Teilweg mit den Vorgängen (2,4), (4,8) und (8,9) kritisch wird. Wir wollen zunächst D (3,5) um einen Tag reduzieren. Weitere Verkürzungen sind nur noch möglich, indem **zwei** Vorgänge in ihren Ausführungszeiten zugleich gekürzt werden. Es sind diejenigen Vorgangspaare zunächst auszuwählen, die zusammen die kleinste Kostensteigerung je Tag verursachen. Im Beispiel sind dies die Vorgänge (1,2) **und** (1,3) mit einer Kostensteigerung von (0,67 GE + 0,67 GE)/Tag. Sie können um zwei Tage verkürzt werden, da Vorgang (1,3) bereits um 1 Tag verkürzt wurde. Dann kann D (5,6) zusammen mit D (4,8) um einen Tag reduziert werden. Als Letztes lassen sich noch die Vorgangsdauern D (12,13) und D(12,14) um einen Tag mit einer Kostenzunahme von (1 GE + 1 GE)/Tag verkürzen (vgl. Abbildung 29). So wird **schrittweise** die **Projektdauer minimiert**. Im Beispiel lässt sich die Projektdauer für Teilprojekt I auf $T = 40$ Tage verkürzen mit Gesamtkosten $KG = 60,9$ GE.

Abbildung 29: **Abhängigkeit der Vorgangskosten von der Projektdauer (Teilprojekt I)**



In Abbildung 29 können die minimalen Vorgangskosten des Teilprojekts I für alternativ vorgegebene Projektdauern abgelesen werden.

4.3 Bestimmung der kostenminimalen Projektdauer

Bisher wurden die Vorgangskosten eines Projektes, d.h. die den Vorgängen zurechenbaren Kosten behandelt. Bezieht man die „übrigen“ Projektkosten (Einzel- und Gemeinkosten des **gesamten** Projekts und nicht einzelner

Vorgänge) in die Überlegungen ein, so lässt sich eine **kostenminimale Projektdauer** bestimmen, wenn sich unter diesen „übrigen“ Projektkosten **zeitproportionale Kosten** befinden. Voraussetzung ist natürlich, dass die notwendigen Informationen über diese Kosten vorliegen. Nehmen wir in unserem Beispiel für Teilprojekt I an, dass diese „übrigen“ Kosten KP, die nur dem Projekt zurechenbar sind, folgender Funktion:

$$KP = 40 + 1,1 T \quad (T = \text{Projektzeit in Tagen})$$

folgen, so setzen sich die Gesamtkosten K des Projekts aus den gesamten Vorgangskosten KG und den „übrigen“ Kosten des Projektes KP zusammen:

$$K = KG + KP$$

Für die einzelnen Projektdauern T lassen sich die Gesamtkosten K leicht errechnen:

Tabelle 5: Gesamtkosten des Teilprojekts I in Abhängigkeit von der Projektdauer

Projektdauer T [Tagel]	KG vgl. Abbildung [GE]	KG [GE]	KP = 40 + 1,1 · T	K (3) = (1) + (2)
40	60,9	60,9	84,0	144,9
41	58,9	58,9	85,1	144,0
42	57,4	57,4	86,2	143,6
43	56,0	56,0	87,3	143,3
44	54,7	54,7	88,4	143,1 = K _{min} !
45	53,7	53,7	89,5	143,2
46	52,7	52,7	90,6	143,3
47	51,7	51,7	91,7	143,4
48	51,0	51,0	92,8	143,8
·	·	·	·	·
54	48,0	48,0	99,4	147,4
·	·	·	·	·
58	46,0	46,0	103,8	149,8
·	·	·	·	·
62	44,0	44,0	108,2	152,2
·	·	·	·	·
64	43,0	43,0	110,4	153,4

Aus Tabelle 5 ergibt sich, dass - unter den genannten Annahmen - die kostenminimale Projektdauer des Teilprojekts I bei T = 44 Tagen mit K = 143,1 GE liegt. Die kostenminimale Projektdauer liegt also bei der Zeiteinheit, bei der die Beschleunigungskosten (marginale Kostenerhöhung durch Vorgangsverkürzung) der marginalen Kostensenkung der zeitproportionalen Einzel- und Gemeinkosten entspricht. Für die einzelnen Vorgänge ergeben sich

folgende Vorgangszeiten für die **gesamtkostenminimale Projektdauer** des Teilprojekts I (vgl. Tabelle 6):

Tabelle 6: **Vorgangszeiten bei kostenminimaler Projektdurchführung**

Vorgang	Gesamtkostenminimale Vorgangszeiten der Vorgänge (i,j)
(1,2)	4 Tage kritisch
(1,3)	4 Tage kritisch
(2,4)	1 Tag kritisch
(3,5)	1 Tag kritisch
(5,6)	2 Tage kritisch
(6,7)	12 Tage kritisch
(4,8)	20 Tage kritisch
(7,9)	6 Tage kritisch
(7,8)	3 Tage nicht kritisch
(9,10)	2 Tage kritisch
(10,11)	2 Tage kritisch
(11,12)	12 Tage kritisch
(12,13)	3 Tage kritisch
(12,14)	3 Tage kritisch

Bei der Bestimmung der kostenminimalen Projektdurchführungsdauer nach der beschriebenen Methode ist der Netzplan ständig den neuen Gegebenheiten anzupassen (Iterationsverfahren). Wegen weiterer Optimierungsalgorithmen wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (z.B. *Schwarze, J., 2006, S. 266 ff.*).

5 Kapazitätsplanung

Die Kapazitätsplanung soll die Voraussetzungen für einen reibungslosen Projektablauf liefern. Das „ökonomische Prinzip“ verlangt dabei, dass die verfügbaren Ressourcen (Einsatzmittel) möglichst hoch und gleichmäßig ausgelastet werden, um Leerkosten zu vermeiden. Kapazitätsüberschreitungen sind jedoch nicht zulässig (Restriktionen). Sind bereits bei Projektplanung Kapazitätsüberschreitungen erkennbar, so muss durch entsprechende Maßnahmen auf einen Kapazitätsausgleich hingewirkt werden. Bei der Kapazitätsplanung geht man in zwei Schritten vor:

Der Kapazitätsbedarf wird für jeden Vorgang dargestellt und nachfolgend unter Berücksichtigung der Zeitplanung für die verschiedenen Projektstadien

berechnet. Dazu ist es notwendig, dass man für jeden Vorgang möglichst genau angeben kann, welche Ressourcen (qualitativ differenziert) benötigt werden und in welchen Mengen. Aus dem Zeitplan für das Projekt lässt sich dann in einfacher Weise ein Kapazitätsbedarfsplan (Einsatzplan für Arbeitskräfte, Betriebsmittel, Stoffe) ableiten. Dieser Kapazitätsbedarfsplan (Einsatzplan) gibt an, **welche Produktionsmittel zu welchen Zeitpunkten in welchen Mengen bereitgestellt werden müssen** (Schwarze, J., 2006, S. 273 ff.; Corsten, H., Corsten, H., Gössinger, R., 2008, S. 170 ff.; Litke, H.-D., 2007, S. 160 ff.). Gegebenenfalls sind diese Angaben um die Bereitstellungsorte zu ergänzen. In verfahrensmäßiger Hinsicht bestehen kaum Probleme, da der Zeitplan bereits aufgestellt ist und dieser nur Erweiterungen erfährt, nämlich die zeitabhängige Angabe der einzusetzenden Produktionsmittel. Dabei ist in vielen Fällen noch eine (kapazitätsorientierte) **Zerlegung von Vorgängen** erforderlich, um den Bedarf an Ressourcen gleichmäßiger zu gestalten. So tritt der Bedarf an Arbeitskräften nicht immer zu Beginn eines Vorgangs auf; auch muss er nicht für die gesamte Ausführungsdauer eines Vorgangs gelten. Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang kann die Ermittlung der gegebenenfalls bereitzustellenden **Kapazitätsreserven** sein.

Soll-Ist-Vergleich von ermitteltem Kapazitätsbedarf und tatsächlich verfügbaren Ressourcen. Bei Abweichungen wird ein Kapazitätsausgleich angestrebt (Kapazitätsüberschreitung unterbinden und Beschäftigungsschwankungen durch Beschäftigungsplanung unter Berücksichtigung der Kapazitätsgrenzen vermeiden). Dazu stehen grundsätzlich folgende Möglichkeiten zur Verfügung (Zimmermann, W., 2002, S. 31):

- einfache Verschiebung einzelner Vorgänge,
- Unterbrechung einzelner Vorgänge, soweit dies technologisch möglich ist,
- zeitliche Ausdehnung oder Komprimierung eines Vorgangs durch Änderung der Einsatzmenge oder der Qualität der Produktionsfaktoren, soweit dies technologisch möglich ist.
- Soweit solche kapazitätsbedingten Anpassungen nicht im Rahmen der ermittelten Pufferzeiten bleiben, können sie zu einer Verlängerung der Projektdauer führen. Von Vorteil ist jedoch, dass dies bereits im Planungsstadium erkannt wird.

Exakte Lösungsverfahren haben für die Praxis nur beschränkte Bedeutung, da der Aufwand bei umfangreichen Projekten zu groß wird (Ansätze der ganzzahligen Optimierung). In der Praxis erfolgt der Kapazitätsausgleich (Glättung des Kapazitätsbedarfs) mit Hilfe **heuristischer Verfahren** (Zuhilfenahme von systematischen Probiermethoden). Es wird schrittweise geprüft, ob durch zulässige Verschiebung/Unterbrechung/Ausdehnung oder Komprimierung von Vorgängen eine gleichmäßige Kapazitätsauslastung erreicht werden kann (vgl. Schwarze, J., 2006, S. 273 ff.).

Multiprojektplanung

Die netzplantechnische Koordinierung mehrerer Projekte, die um vorgegebene Kapazitäten konkurrieren, nennt man **Multiprojektplanung**. Die Multiprojektplanung ist zwar theoretisch durchdacht und mathematisch analysiert worden, aber die praktische Anwendung ist bisher nur für wenige Fälle bekannt geworden (vgl. *Zimmermann, W.*, 2002, S. 35 f.; *Litke, H.-D.*, 2007, S. 79 f.; *Corsten, H. u.a.*, 2008, S. 64 ff. und S. 184 ff.).

Grundsätzlich ist es jedoch möglich, mehrere Projekte manuell gleichzeitig zu planen. Unter Berücksichtigung von Prioritätsregeln lassen sich die Netzpläne, die zunächst unabhängig voneinander aufgestellt werden, mit Hilfe heuristischer Methoden koordinieren.

6 Verarbeitung von Netzplänen mit dem Computer

Die EDV ist ein vorzügliches Hilfsmittel für eine schnelle Auswertung großer Datenmengen und für eine häufige Wiederholung gleicher Rechenoperationen. Aus diesem Grund bietet sie für ihren Einsatz in der NPT erhebliche Vorteile. Bei größeren Projekten kommt man nicht umhin, für die **Projektplanung, -steuerung und -überwachung** einen Computer einzusetzen. Auch bei kleineren Projekten wird Computerunterstützung erwünscht sein, wenn außer Struktur- und Zeitplanung noch andere Berechnungen - etwa Kosten- und Kapazitätsplanung - erforderlich sind. Zum Computereinsatz im Rahmen der NPT vgl. *Corsten, H.*, *Corsten, H.*, *Gössinger, R.*, 2008, S. 245 ff.; *Heinrich, G.*, *Grass, J.*, 2006, S. 361 ff.; *Lutz, M.*, 1998, S. 213; *Schwarze, J.*, 2006, S. 319 ff.; *Litke, H.-D.*, 2007, S. 247 ff. und die dort aufgeführte Spezialliteratur.

Stehen zur Netzplanberechnung große Computer zur Verfügung, so kann auf Standardprogramme wie z.B. CIPREC (IBM), SINET (Siemens), PPS/GRANEDA (CDC), 2900 PERT (ICL) oder OPTIMA 1100 (Sperry Rand/Univac) zurückgegriffen werden. Aber auch für den **Personal Computer** (PC) stehen Projektmanagementprogramme (auch Projektsteuerungs- und -planungssysteme genannt) zur Verfügung. Zur Durchführung der Struktur-, Zeit-, Kosten- und Kapazitätsanalyse bzw. -planung enthalten die Projektmanagementprogramme gewöhnlich folgende Funktionen :

- Kalenderfunktion zur Definition von Feier- und Urlaubstagen, Anzahl der Arbeitsstunden pro Tag, Projektbeginn und -dauer;
- Editier- bzw. Pflegefunktion zur Strukturierung der Aktivitäten, Fixierung der Startzeitpunkte und Ausführungsdauer, zur Zuordnung von Kosten und Ressourcen auf Aktivitäten;
- Berichts- und Grafikfunktionen zur Beschreibung und Veranschaulichung der Strukturen, Abhängigkeiten und Ergebnisse;

- Simulationsfunktion zur Berechnung von Ergebnissen als Folge der Editier- / Pflegefunktion spezifizierter Neueingaben bzw. Änderungen einschließlich eventueller Sensitivitätsanalysen.

- In der Literatur werden beispielhaft folgende PC-Projektmanagementprogramme angeführt (vgl. z.B. Lutz, M., 1998, S. 213; Litke, H.-D., 2007, S. 247 ff.; Corsten, H. u.a., 2008, S. 249 ff.): Super Project Plus, TNETZ, Harvard Total Project Manager II, MS-Project von Microsoft, PERTMASTER, PMW (Project Manager Workbench), Quicknet, TIME LINE von Symantec. In der Spezialliteratur befinden sich **Kriterien für die Auswahl einer Netzplan-Software** (Schwarze, J., 2006, S. 319 ff.). Auf jeden Fall ist es wichtig, bei der Netzplan-Software auf die Möglichkeiten der Projektsteuerung und -überwachung, d.h. auf die Möglichkeit der Berücksichtigung von Änderungen zu achten. Bei einer integrierten Netzplanung (Zeit-Kosten-Kapazitätsplanung) sind sehr viele Daten zu verarbeiten. Eine manuelle Berechnung (ohne Computer-Unterstützung) ist in solchen Fällen nur für relativ kleine Netzpläne wirtschaftlich durchführbar.

7 Beurteilung der Anwendungsmöglichkeiten der NPT als Instrument des Projektmanagements

Es bestehen kaum noch Zweifel an der hervorragenden Eignung der NPT zur Lösung von **Planungsproblemen bei Projekten**. Mit keiner anderen Methode ist es möglich, ein Projekt mit nahezu beliebigem Detaillierungsgrad grafisch darzustellen und seinen Ablauf zu planen und zu kontrollieren. Als **Vorteile der NPT** lassen sich herausstellen (vgl. auch Zimmermann, W., 2002, S. 37 f.; Schwarze, J., 2006, S. 133 ff.):

- Die Aufstellung eines Netzplans erzwingt ein frühzeitiges detailliertes Vorausdenken des Ablaufs eines Projektes. Dies ist nicht zuletzt eine Hilfestellung für die notwendige **Koordination** des Zusammenspiels verschiedener Abteilungen bzw. Firmen bei der Projektdurchführung.

- Die grafische Darstellung als Netz gibt allen Beteiligten eine gute Übersicht über den Projektablauf und die vielfältigen Abhängigkeiten der Vorgänge. Die **Transparenz** ist eine notwendige Voraussetzung für eine kritische Beurteilung und Diskussion der Zweckmäßigkeit eines Projektplans.

- Die NPT liefert u.a. einen übersichtlichen und aussagefähigen **Terminplan** mit Angabe der frühestmöglichen und spätestzulässigen Zeitpunkte. Dies ist eine entscheidende Basis für die wirtschaftliche Steuerung des Projektablaufs und eine ausgewogene Kapazitätsauslastung.

- Die Kenntnis des **kritischen Weges** lenkt die Aufmerksamkeit bei der Projektsteuerung und -kontrolle auf die Engpässe. Die Gewichtung der Vorgänge nach ihren Pufferzeiten ermöglicht eine gezielte Konzentration der

Steuerungsaktivitäten. Wird eine Verkürzung der Projektdauer verlangt, so zeigt der kritische Weg die Vorgänge, die durch den gezielten Einsatz zusätzlicher Mittel beschleunigt werden müssen.

■ Maßnahmen zur Engpassbeseitigung bzw. zur Verkürzung der Projektdauer können bereits im Planungsstadium überlegt und untersucht werden. **Soll-Ist-Abweichungen**, also Abweichungen vom Netzplan (Störungen) und deren Auswirkungen werden bei der Projektüberwachung durch die NPT frühzeitig erkannt; je früher Soll-Ist-Abweichungen zur Kenntnis genommen werden, um so größer (und damit wirtschaftlicher) sind generell die Möglichkeiten der Anpassung.

■ Die für nichtkritische Vorgänge ermittelten **Pufferzeiten** decken die Zeitreserven auf. Reserven sind die wesentlichen Elemente der Elastizität. Informationen über vorhandene Reserven erhöhen die Flexibilität der Planung und Steuerung.

■ Die Möglichkeit der Einbeziehung von Kosten- und Kapazitätsgesichtspunkten macht die NPT zu einem umfassenden **Planungs-, Steuerungs- und Überwachungsinstrument** für Projekte.

■ Die Grundlagen und Verfahren der Struktur- und Zeitplanungen mit Hilfe der NPT sind einfach.

Als **Nachteile oder Mängel der NPT** - die z.T. auch andere Planungstechniken aufweisen - sind zu nennen:

■ Die Minimierung der Projektdauer sowie die Zeit-Kosten-Kapazitätsplanung beziehen sich auf einen gegebenen Netzplan. Der Projektablauf ist aber - wie oben erörtert - in vielen Fällen mehrdeutig.

■ Die detaillierten, übersichtlichen und aussagefähigen Netzpläne können bei weniger Routinierten leicht zu dem Missverständnis führen, dass sie vergessen, dass die Planung immer die **Zukunft** zum Gegenstand hat und die Unsicherheit der Zukunft ein Wesensmerkmal der Planung ist. Soll-Ist-Abweichungen können auch mit NPT nicht ausgeschlossen werden.

■ Der Planungsaufwand ist gegenüber den herkömmlichen Verfahren - z.B. mit Balkendiagrammen (GANTT-Diagrammen) - größer.

LITERATUR

1. *Corsten, H., Corsten, H., Gössinger, R.:* Projektmanagement, 2.A., München 2008.
2. *Deutsches Institut für Normung/Ausschuss Netzplantechnik und Projektmanagement: Begriffe der Projektwirtschaft,* Berlin-Köln 1989.
3. *Domschke, W., Drexl, A.:* Einführung in Operations Research, 7..A., Berlin-Heidelberg-New York 2007.
4. *Heinrich, G., Grass, J.:* Operations Research in der Praxis, München-Wien, 2006, S. 249 ff.
5. *Hillier, F.S., Lieberman G.J.:* Einführung in Operations Research, 5.A., München-Wien 2002 (unveränderter Nachdruck der vierten Auflage).
6. *Homburg, C. :* Quantitative Betriebswirtschaftslehre, 3.A., Wiesbaden 2000.
7. *Litke, H.-D.:* Projektmanagement/Methoden, Techniken, Verhaltensweisen, Evolutionäres Projektmanagement, 5.A., München 2007.
8. *Lutz, M.:* Operations Research Verfahren - verstehen und anwenden, Köln 1998.
9. *Runzheimer, B., Cleff, Th., Schäfer, W.:* Operations Research 1: Lineare Planungsrechnung und Netzplantechnik, 8.A., Wiesbaden 2005, S. 143 ff.
10. *Runzheimer, B.:* Operations Research, Lineare Planungsrechnung, Netzplantechnik, Simulation und Warteschlangentheorie, 7. A., Wiesbaden 1999.
11. *Runzheimer, C.:* Management komplexer Investitionsprojekte - klassische versus neugefasste Managementkonzeption, in: *Runzheimer, B., Barkovic, D. (Hg.):* Investitionsentscheidungen in der Praxis - Quantitative Methoden als Entscheidungshilfen, Wiesbaden 1998, S. 151 - 165.
12. *Schwarze, J.:* Projektmanagement mit Netzplantechnik, 9.A., Herne-Berlin 2006.
13. *Zimmermann, H.-J.:* Methoden und Modelle des Operations Research, 2. A., Wiesbaden 2008.
14. *Zimmermann, W.:* Operations Research, Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung, 10.A., München-Wien 2002.