

EINFÜHRUNG IN DIE CPM-NETZPLANTECHNIK

Netzpläne sind wichtige Hilfsmittel zur Planung, Koordination und Kontrolle komplexer Abläufe, bei denen zwischen den einzelnen Aktivitäten terminliche, kapazitätsmäßige und auch kostenmäßige Abhängigkeiten bestehen. In ihrer Grundform dienen Netzpläne dazu, die logische zeitliche Abfolge verschiedener Teilaktivitäten eines größeren Projektes graphisch oder auch in Tabellen darzustellen.

Netzpläne eignen sich hervorragend zur:

- Gewinnung eines Überblicks über den gesamten Projektverlauf
- Darstellung von logischen Abhängigkeiten zwischen Teilaktivitäten und ihrer zeitlichen Abfolge
- genaue Abschätzung der Dauer von einzelnen Teilaktivitäten sowie des gesamten Projekts
- vorausschauende Abschätzung von Verzögerungen im Hinblick auf die termingerechte Fertigstellung des Gesamtprojektes
- Vergleich verschiedener Planungsvarianten im Hinblick auf Termine, Kosten und Einsatzmittelbedarf

1. BEGRIFFE

Projekt: Bezeichnung für das Gesamtvorhaben, das durch einen Netzplan erfaßt werden soll. Jedes "netzplantaugliche" Projekt muss einen definierten Beginn und vor allem ein definiertes Projektende haben! "Unendliche" Projekte ohne klare Spezifikation, wann das Projektziel erreicht ist bzw. das Projekt beendet wird (solche soll es in der Praxis geben) sind nicht als Netzplan darstellbar.

Vorgang: Ein Vorgang ist ein zeiterforderndes Geschehen mit definiertem Anfang und definiertem Ende. In der Netzplantechnik wird das gesamte Projekt in Vorgänge zerlegt bzw. aus solchen zusammengesetzt. Wichtig ist dabei, daß von jedem Vorgang Beginn und Ende sachlich eindeutig festgelegt werden kann. Beispiele für mögliche Vorgänge sind: "Fundament ausheben", "Offerte einholen", "Bericht schreiben", "Entscheidung fällen", "Veranstaltung besuchen", "Trockenzeit des Anstriches", "Lieferfrist eines Bauteiles" usw.

Ereignis: darunter versteht man das Eintreten eines bestimmten Zustandes im zeitlichen Ablauf. Das **Anfangsereignis** eines Vorganges ist derjenige Zeitpunkt, an dem der Vorgang beginnt, das **Endereignis** ist derjenige Zeitpunkt, an dem ein Vorgang endet. Der Vorgang "Lieferfrist eines Bauteils" könnte etwa mit dem Zeitpunkt des Einlangens der Auftragsbestätigung beginnen und mit dem Einlangen des Bauteils enden. Der Vorgang "Entscheidung fällen" könnte mit der Festsetzung, daß eine Entscheidung gefällt werden soll, beginnen und mit dem Moment, wo die Entscheidung feststeht, enden.

Anordnungsbeziehung (AOB): Quantifizierte Darstellung der logischen (zeitlichen) Abfolge von Ereignissen. Es wird festgestellt, welches Ereignis nach welchem erfolgen muß und wie groß der zeitliche Abstand zwischen den betrachteten Ereignissen ist. Ein Vorgang läßt sich durch die

Charakterisierung **Vorgang** = **Anfang + Dauer + Ende** auf zwei Ereignisse und eine AOB zurückführen.

2. DARSTELLUNG UND TYPEN VON NETZPLÄNEN

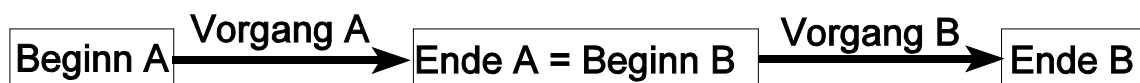
Netzpläne sind im wesentlichen gerichtete Graphen mit Bewertungen auf Kanten und Knoten. Die Kanten drücken Anordnungsbeziehungen aus, die Knoten stehen für Ereignisse. Je nach Typ des Netzplans und vorliegender Konstellation können auch mehrere Ereignisse in einem Knoten zusammengefaßt werden. Im folgenden Beispiel kommen vier Ereignisse, zwei Vorgänge und drei Anordnungsbeziehungen vor.



Man erkennt, daß es zwei Typen von AOB's gibt: (1) solche, die Vorgänge bezeichnen (indem sie Anfangs- und Endzustand eines Vorganges verbinden) und (2) solche, die die Aufeinanderfolge zwischen Vorgängen darstellen. Bei praktischen Netzplänen in der Regel eine der beiden Typen von AOB's hervorgehoben und die andere vernachlässigt. Auf diese Weise kann man verschiedene Netzplantypen erhalten. Die drei Grundtypen sind: *Vorgangspfeilnetzpläne (VPN)*, *Vorgangsknotennetzpläne (VKN)* und *Ereignisknotennetzpläne (EKN)*.

a. Vorgangspfeilnetzpläne (VPN)

Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen bei VPN's *Vorgänge*. Sie werden als Pfeile dargestellt. Ereignisse treten lediglich in Form von Anfangs- und Endzuständen von Vorgängen auf. AOB's zwischen Vorgängen werden im Regelfall nicht dargestellt, so daß sich die oben gezeigte Abfolge reduziert wird auf:



Der bekannteste Typus dieser Gruppe ist der **CPM-Netzplan**, (CPM= **Critical Path Method**), der im folgenden noch eingehender besprochen wird.

b. Vorgangsknotennetzpläne (VKN)

In dieser Gruppe von Netzplänen werden Anfangs- und Endzustand eines Vorganges zu einem Knoten zusammengefaßt und lediglich die Abfolge zwischen den Vorgängen (AOB Typ (2)) durch Pfeile dargestellt. Für die beiden oben dargestellten Vorgänge A und B ergibt sich folgende Darstellung:



"NF" bedeutet, daß dieser Pfeil eine "Normalfolge" (Beginn von B nach Ende A) zeigt. Je nachdem, welche Bedeutungen für die Pfeile zugelassen werden, unterscheidet man im einzelnen die Netzplanmethoden **NFM** (Normalfolgenmethode), **MPM** (Metra-Potential-Methode) und **PDM** (Precedence Diagramming Method).

c. Ereignisknotennetzpläne (EKN)

Bei EKN's werden ähnlich wie bei VPN's Ereignisse durch Knoten dargestellt sowie Abhängigkeiten zwischen den Ereignissen durch Pfeile. Die Pfeile brauchen jedoch nicht exakt als Vorgänge spezifiziert zu werden. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf den Ereignissen, die auch näher benannt werden. Bekanntester Vertreter dieses Netzplantyps ist **PERT (Program Evaluation and Review Technique)**. PERT verwendet bei der Zeitanalyse neben der zu erwartenden Zeitdauer auch optimistische und pessimistische Zeitabschätzungen.

3. CPM-NETZPLÄNE

a. Begriffe

Ein CPM-Netzplan ist aus folgenden Elementen aufgebaut: **Vorgänge** werden mit Pfeilen (gerichteten Kanten) dargestellt. Beginn und Ende eines Vorganges bilden die **Ereignisse**, die durch die Knoten am Beginn und Ende jeder Kante symbolisiert werden. Das Ende eines Vorgangs und der Beginn eines nachfolgenden Vorganges werden in der Regel durch denselben Knoten dargestellt. Der Knoten, der den Beginn des Projektes markiert, heißt auch **Startereignis**, der Knoten, bei dessen Erreichen das Projekt fertiggestellt ist, heißt **Zielereignis**. **Vorgänger** bzw. **Nachfolger** eines Vorganges nennt man solche Vorgänge, die dem betrachteten Vorgang *unmittelbar* vorausgehen bzw. nachfolgen. Damit ein Vorgang beginnen kann, müssen alle seine Vorgänger abgeschlossen sein. **Scheinvorgänge** dienen dazu, logische Abhängigkeiten zwischen Vorgängen (AOB's vom Typ (2)) darzustellen. Scheinvorgänge haben die Dauer null.

Die **Knoten** (Ereignisse) des Netzplanes bezeichnen wir mit fortlaufenden Nummern $0, 1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n$. Die Nummer des Startereignisses sei stets 0, die des Zielereignisses stets n. Das Ereignis j möge (zeitlich) nach dem Ereignis i liegen. Falls für einen Vorgang Startknoten i und Endknoten j bekannt sind, werden wir den Vorgang einfach mit ij ansprechen.

b. Zeitanalyse im CPM-Netzplan

Für jeden Knoten i sowie für alle Vorgänge ij werden folgende Zeitangaben in den Netzplan eingetragen:

FZ_i : *Frühester Zeitpunkt*, an dem Ereignis i eintreten kann

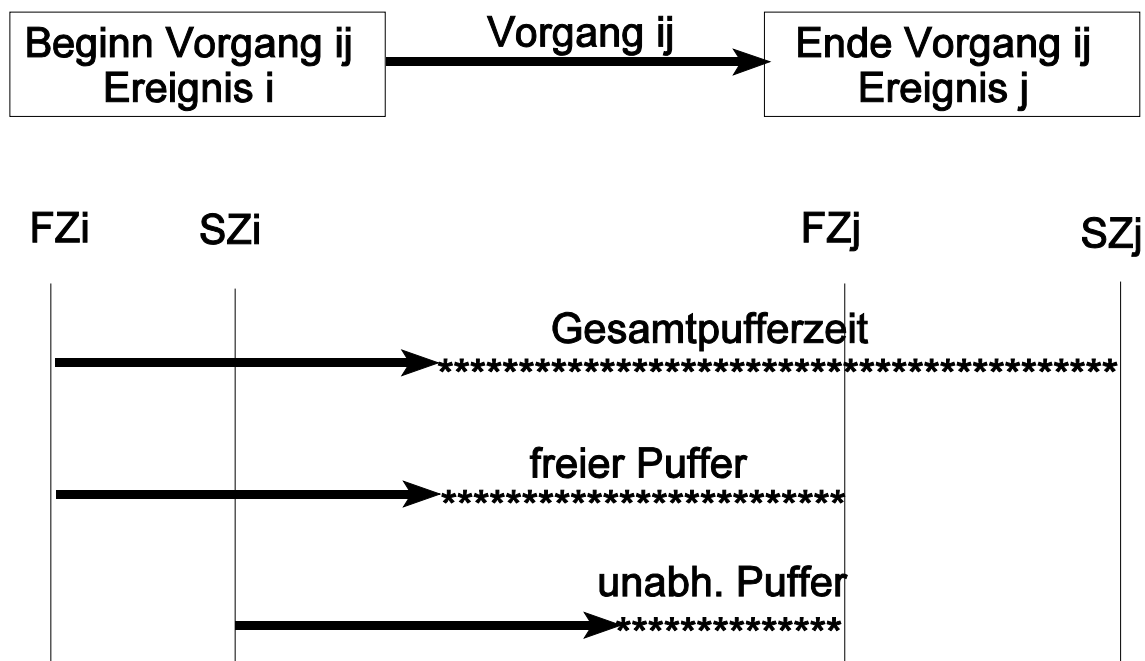
SZ_i : *Spätester Zeitpunkt*, an dem Ereignis i eintreten kann

d_{ij} : *Dauer des Vorgangs ij* mit Startereignis i und Endereignis j.

Aus den frühesten bzw. spätesten Ereigniszeitpunkten läßt sich der **kritische Weg** im Netzplan leicht bestimmen. Der kritische Weg ist der zeitlängste Weg vom Start- zum Zielknoten und determiniert die Dauer des gesamten Projektes. Für alle Knoten i entlang des kritischen Weges gilt: $FZ_i = SZ_i$. Jeder Vorgang auf dem kritischen Weg heißt ebenfalls kritisch, weil eine Verzögerung jedes kritischen Vorganges bereits die Gesamtprojektdauer verlängert. Umgekehrt kann bei gleichbleibender Netzplanstruktur eine Projektbeschleunigung nur dann erreicht werden, wenn (auch) kritische Vorgänge verkürzt werden.

Darüber hinaus kann man aus den frühesten bzw. spätesten Ereigniszeitpunkten FZ_i bzw. SZ_i auch sogenannte "**Pufferzeiten**" für alle Vorgänge ermitteln. Pufferzeiten geben Auskunft über tolerierbare Verzögerungen bei der Dauer bzw. beim Beginn von Vorgängen. Die **Gesamtpufferzeit** (GP) eines Vorganges ist diejenige Zeitspanne, die ein Vorgang gegenüber seinem frühestmöglichem Beginn (bzw. vorgesehener Dauer) verzögert werden kann, ohne daß notwendigerweise eine Verzögerung des Projektes erfolgt. Die **Freie Pufferzeit** (FP) ist diejenige Zeitspanne, um die ein Vorgang

gegenüber seiner frühesten Lage verschoben werden kann, ohne die früheste Lage anderer Vorgänge zu beeinflussen. Die **Unabhängige Pufferzeit** (UP) ist diejenige Zeitspanne, um die ein Vorgang verschoben werden kann, wenn seine Vorereignisse in spätester **und** seine Nachereignisse sich in frühester Lage befinden. Die folgende Graphik soll die verschiedenen Pufferzeiten veranschaulichen:



Für kritische Vorgänge sind sämtliche Pufferzeiten = 0; falls bei einem Vorgang die Differenz $FZ_j - SZ_i$ kleiner als d_{ij} ist, wird $UP = 0$ gesetzt.

4. ALGORITHMUS ZUM ERSTELLEN EINES CPM-NETZPLANES

Der folgende Algorithmus gibt eine Abfolge zur Erstellung eines CPM-Netzplanes an. Er ermöglicht es, rasch und sicher einen CPM-Netzplan zu zeichnen, ohne daß dabei Knoten oder Vorgänge im Zuge des Zeichnens wieder weggelöscht oder korrigiert werden müssen. Scheinvorgänge werden nur in einer klar definierten Weise eingesetzt. Der Algorithmus gewährleistet es, daß es zwischen zwei Knoten höchstens eine Kante gibt.

- (1) Sämtliche Vorgänge samt Vorgangsdauer auflisten.
- (2) Für jeden Vorgang alle Vorgänger ermitteln.
- (3) Vorgänge so sortieren, daß alle Vorgänger eines jeden Vorgangs **vor** diesem Vorgang liegen. Ist eine solche Sortierung unmöglich, so sind die "Vorgängerbedingungen" widersprüchlich (wenn z.B. Vorgang A Vorgang B als Vorgänger hat und gleichzeitig Vorgang B Vorgang A als Vorgänger hat.¹⁾)

¹⁾In der Praxis kann diese Erfordernis durchaus Probleme machen. Wenn z.B. in einem großen Unternehmen Abteilung X und Abteilung Y jeweils ein Budget zu erstellen haben und der Abteilungsleiter von Abteilung X sagt: "Ich erstelle das Budget für Abteilung A, sobald Abteilung

- (4) Zeichne einen Startknoten 0
- (5) Wiederhole für alle Vorgänge V in der Reihenfolge der Sortierung (3):
- Falls der betrachtete Vorgang V keinen Vorgänger hat, lasse man ihn beim Startknoten beginnen und gehe zu (d).
 - Falls der betrachtete Vorgang genau einen Vorgänger hat, lasse ihn beim Endknoten des betreffenden Vorgangs beginnen und gehe zu (d).
 - Falls der betrachtete Vorgang mehr als einen Vorgänger hat, so zeichne man von den bisher erstellten Endknoten Scheinvorgänge (mit Zeitdauer 0) derart zu einem neuen Anfangsknoten, daß in dem neuen Anfangsknoten genau alle Vorgänger des zu zeichnenden Vorganges abgeschlossen sind. Gehe zu (d).
 - Schreibe zum gezeichneten Vorgang seine Dauer und schließe ihn mit einem Endknoten ab.
- (6) Führe alle Endknoten, von denen noch kein Pfeil (Vorgang oder Scheinvorgang) ausgeht, durch Scheinvorgänge in einem Zielknoten n (Projektende) zusammen.
- (7) Ermittlung der frühesten Ereigniszeitpunkte FZ_i für sämtliche Knoten i:
- Startknoten 0 erhält $FZ_0 = 0$ (0 = "Null")
 - Wiederhole für alle Knoten j:
 - Falls j Endknoten des echten Vorganges ij mit Dauer d_{ij} , so ist $FZ_j = FZ_i + d_{ij}$.
 - Falls j Endknoten mehrerer Scheinvorgänge (die in den Knoten s_1, s_2, \dots, s_k beginnen) ist, so ist sein frühester Ereigniszeitpunkt $FZ_j = \max FZ_{s_i}$
- (8) Ermittlung der spätesten Ereigniszeitpunkte SZ_i für alle Knoten i:
- Das Zielereignis n erhält $SZ_n = FZ_n$; für den Zielknoten sind frühester und spätester Ereigniszeitpunkt gleich.
 - Wiederhole für alle Knoten i ($i = n-1, \dots, 0$), in absteigender Reihenfolge:
 - Falls i Anfangsknoten eines einzigen Vorganges ij ist, so ist $SZ_i = SZ_j - d_{ij}$. (Für Scheinvorgänge ist $d_{ij} = 0$).
 - Falls i Anfangsknoten mehrerer (Schein-)Vorgänge, die in den Knoten s_1, s_2, \dots, s_k enden, so ist sein spätester Ereigniszeitpunkt $SZ_i = \min (SZ_{s_j} - d_{ij})$. Unter den in Frage kommenden Zeitpunkten ist bei der Rückwärtsrechnung der früheste (kleinste) zu nehmen, weil die Fertigstellung aller in Knoten i beginnenden Vorgänge bis zu den Zeitpunkten SZ_j gewährleistet sein muß.
- (9) Die Anzahl von Scheinvorgängen kann auch reduziert werden. Jeder Knoten i, von dem nur ein **einziger Scheinvorgang** ij ausgeht, kann mit dem Endknoten j dieses Scheinvorganges in folgender Weise verschmolzen werden:
- Die Scheinkante ij wird eliminiert
 - für alle übrigen in j ankommenden (ausgehenden) Kanten wird i zum Endpunkt (Ausgangspunkt).
 - Die FZ_i bzw. SZ_i erhalten die Werte von FZ_j bzw. SZ_j .
 - Knoten j ist zu streichen.

Durch Reduktion der Scheinkantenzahl wird auch die Information über die Zeitabläufe im Netzplan komprimiert und damit weniger übersichtlich.

Y ihr Budget erstellt hat" - und der Abteilungsleiter von Abteilung Y sagt dasselbe vice versa: "Sobald Abteilung Y ihr Budget erstellt hat, erstellen wir unser Budget".

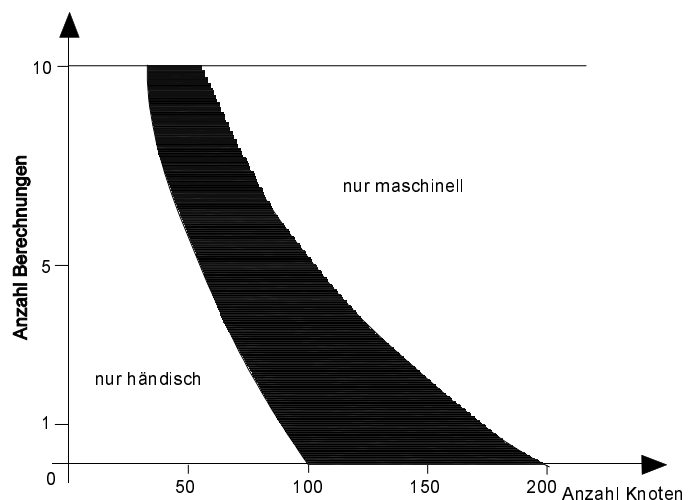
- (10) Ermittlung des kritischen Weges:
 Man markiere sämtliche Knoten i , für die $FZ_i = SZ_i$ gilt. Die Vorgänge, die diese Knoten verbinden, bilden insgesamt den **kritischen Weg** (kritischen Pfad). In Grenzfällen kann es auch verzweigte kritische Wege geben.
- (11) Ermittlung der Pufferzeiten für alle Vorgänge:
 Wiederhole für alle Vorgänge ij :
- Gesamtpuffer: $GP_{ij} = SZ_j - FZ_i - d_{ij}$
 - Freier Puffer: $FP_{ij} = FZ_j - FZ_i - d_{ij}$
 - Unabh. Puffer: $UP_{ij} = FZ_j - SZ_i - d_{ij}$ bzw. 0, falls $UP_{ij} < 0$

5. CPM-NETZPLÄNE IN DER PRAXIS

Primär dient ein Netzplan zu einer möglichst zeitökonomischen Planung eines Ablaufes. Darüber hinaus stellt er auch ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur Ablaufkontrolle dar. Beispielsweise kann zu bestimmten Terminen überprüft werden, welche der einzelnen Vorgänge bereits abgeschlossen, in Arbeit oder noch offen sind. Dies ermöglicht ein unmittelbares Erkennen von Verzögerungen und bietet eine Entscheidungsgrundlage für entsprechende Dispositionen. Durch eine terminliche Sortierung der Endzeitpunkte für alle Vorgänge kann auch für große Projekte laufend kontrolliert werden, ob alle Vorgänge zeitgerecht abgeschlossen worden sind.

a. Händische versus computerunterstützte Netzplantechnik

Ob eine händische oder maschinelle Berechnung eines Netzplanes vorteilhafter ist, hängt (abgesehen von Fragen der Verfügbarkeit entsprechender EDV-Unterstützung) einerseits von der Anzahl der betrachteten Vorgänge (Netzplanknoten) und andererseits auch davon ab, wie oft ein Netzplan durchgerechnet (nachgeführt, aktualisiert) werden soll. Die nebenstehende Darstellung bietet einen groben Anhaltspunkt, in welchen Fällen sich eine maschinelle Netzplanberechnung lohnt.



b. Feinheitensgrade von Netzplänen

Bei größeren Projekten kann zwischen *Grobnetzplänen*, die lediglich die Abfolge ganzer Vorgangsguppen wiedergeben und *Feinnetzplänen*, in denen eine detaillierte Aufspaltung in einzelne Vorgänge erfolgt, unterschieden werden. Durch eine geschickte Kombination beider Typen können große Projekte in übersichtlichere Teilprojekte (mit entsprechenden detaillierten *Teilnetzplänen*) aufgespalten werden. Oft erfolgt eine zunehmende Detaillierung der Abläufe auch erst im Zuge des Projektes.

c. Kosten- und Einsatzmittelüberwachung

Ergänzend zur Struktur- und Zeitanalyse können Netzpläne auch als Basis zur Überwachung der

Projektkosten und für die Planung eines möglichst rationalen Einsatzes an Arbeitsmitteln (z.B. in Form möglichst gleichmäßiger Auslastung verfügbarer Ressourcen über den gesamten Projektverlauf) dienen. Mittels einer Kostenanalyse kann beispielsweise ermittelt werden, für welche Vorgänge Mehrkosten im Hinblick auf eine frühere Fertigstellung des Projektes in Kauf genommen werden sollen. Durch eine Analyse von Einsatzmitteln können beispielsweise bestimmte Kapazitätsbeschränkungen bei einzelnen Einsatzmitteln und ihre Wirkung auf den gesamten Projektverlauf berücksichtigt werden.