

# Fuzzy-Logik und Graphentheorie als Basis einer flexiblen Bauablaufplanung

Dipl.-Ing. Martin Freundt  
[martin.freundt@bauing.uni-weimar.de](mailto:martin.freundt@bauing.uni-weimar.de)

Bauhaus-Universität Weimar

## 1. Einleitung

Der Bauablauf unterliegt vielen Unwägbarkeiten. Von besonderer Bedeutung ist dieses Problem im Umfeld der Revitalisierung von Bauwerken. In weiten Teilen sind die auszuführenden Arbeiten nur schwer im Vorfeld planbar. Die Ursachen hierfür liegen größtenteils in der Problematik des Bauens im Bestand und dem aus wirtschaftlichen Gründen geringen Umfang von Analysen. Häufig treten verdeckte, im Vorfeld der Baumaßnahme nicht erkannte Schäden auf oder Materialstrukturen und Bauteilqualitäten wurden in der Planung unzureichend berücksichtigt. Alte Ausführungsunterlagen sind oft nicht verfügbar. Viele zur Ausführung bestimmter Arbeiten nötige Informationen fehlen und werden erst zum unmittelbaren Ausführungszeitpunkt bekannt. Einzelne Arbeiten sind nur schwer kalkulierbar bzw. planbar.

Diese besondere Situation bedarf einer gezielten Berücksichtigung. Die Planung des Bauablaufes muss in einer flexiblen und leicht anpassbaren Art und Weise erfolgen. Im folgenden Beitrag wird ein Ansatz zur Entwicklung eines solchen Prozessmodells vorgestellt, der im Rahmen des SFB 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ an der Bauhaus-Universität Weimar untersucht und vorangetrieben wurde und wird. Das vorgestellte Modell kann kurzfristig flexibel auf die realen Gegebenheiten reagieren und ermöglicht trotzdem eine Planung und Steuerung des gesamten Ablaufs. Es enthält nicht wie bisher üblich deterministische Daten in starren Anordnungsbeziehungen. Vielmehr werden die Daten der Prozesse und die Beziehungen der Prozesse untereinander in einer nichtdeterministischen, unscharfen Form modelliert.

Die Modellierung erfolgt unter Zuhilfenahme der Graphentheorie und der Fuzzy-Logik. Die Vorgänge und die Verknüpfungen der Vorgänge werden als Kanten in einem schlichten Graphen abgebildet. Die Knoten dieses Graphen sind Ereignisse. Die Kanten werden einer zeitlichen Bewertung unterzogen. Diese Bewertung erfolgt nichtdeterministisch mittels Fuzzy-Zahlen. Modelliert werden also nicht exakte Dauern eines Vorganges bzw. eines Koppelabstandes, sondern variable Zeiträume.

Parallel zu dieser Art der Berücksichtigung von Unschärfen wird von einem Paradigma der Bauablaufplanung abgerückt, welches sich in der Interpretation von Verknüpfungen in einem gegebenen Ablaufplan zeigt. Einmal hergestellte Beziehungen zwischen Vorgängen werden in der Regel als verbindlich angenommen. Hier wird jedoch die Berücksichtigung mehrerer alternativer Abfolgen von Vorgängen in einem Modell vorgeschlagen, von denen selbstverständlich eine die favorisierte Wahllösung ist. Bei Auftreten von Störungen und Problemen wird jedoch durch die von Anfang an geplante Berücksichtigung anderer Möglichkeiten eine Basis geschaffen, die kalkulierte bzw. kalkulierbare flexible Reaktionen ermöglicht.

## 2. Bauablaufplanung

Die Ablaufplanung im Bauwesen ist ein umfangreicher und komplexer Prozess. Ziel ist die möglichst effiziente Durchführung eines Projektes. Dabei können sowohl die Ausführung von Bauarbeiten als auch die Planung Bestandteil des Projektes sein.

Unter „möglichst effizient“ wird in der modernen Bauwirtschaft eine möglichst schnelle bzw. termintreue und möglichst preiswerte Durchführung einer Baumaßnahme verstanden. Die Kostenfrage ist hierbei von vielen Faktoren abhängig, deren Modellierung und kalkulatorische Berücksichtigung nicht Gegenstand dieses Beitrags sind. Vielmehr liegt der Fokus auf dem Zeitfaktor, also der Planung und Steuerung des Bauablaufs in einer Art und Weise, die eine möglichst kurze aber realistische Projektdauer bei gleichzeitiger hoher Termintreue anstreben. Dieses Vorgehen ist allgemein üblich, Zeitplanung und Kostenplanung werden bei fast allen gängigen und momentan in der Erforschung befindlichen Modellen für die Bauablaufplanung in zwei Planungsphasen getrennt.

In der ersten Phase werden zunächst die Vorgänge identifiziert und in logische und zeitliche Reihenfolge gebracht. Anschließend werden in der zweiten Phase die vorhandenen Ressourcen dem geplanten Modell gegenübergestellt und zugeordnet, wodurch eine Analyse der Kosten unter verschiedenen Gesichtspunkten möglich wird. Beispiele finden sich u.a. in [Brandenberger und Ruosch 1993] und [Adeli und Karim 2001]. Das vorgeschlagene Modell ist ein Konzept für Phase 1 und ermöglicht wie die bisherigen Verfahren die Kostenabschätzung und Kostenoptimierung in Phase 2.

Weit verbreitete Methoden zur Ablaufplanung sind die CPM (critical path method) bzw. die Netzplantechnik. Hierfür wurden verschiedene Modellierungsvarianten entwickelt und untersucht. Allen diesen Varianten gemeinsam ist die Modellierung des Ablaufs in einem Graphen. Die Unterschiede liegen in der Abbildung von Vorgängen und Ereignissen auf die Knoten und Kanten der Graphen. Stets wird jedoch die Visualisierung in einem Netz vorgenommen, so dass der gesamte Bauablauf grafisch sichtbar wird.

Meist wird zu diesem Zweck ein Vorgangsknotennetzplan eingesetzt. Dabei werden die Vorgänge als Knoten und die Abhängigkeiten als Kanten eines Graphen dargestellt. Neben Vorgangsknotennetzen werden auch Vorgangspfeilnetzpläne verwendet. Dabei werden die Vorgänge als Pfeile (Kanten des Graphen) modelliert, ebenso wie einige wesentliche Abhängigkeiten der Vorgänge untereinander. Die Knoten sind Ereignisse, die jedoch nicht verbal formuliert sind. Das heißt, sie können nicht zu strukturellen Untersuchungen verwendet werden. Implizit wird angenommen, dass das Endereignis eines Vorgangs gleichzeitig das Startereignis des Folgevorgangs ist. Daraus resultiert, dass nur Normalfolgen abgebildet werden können (Ende-Anfangs-Beziehungen). Weiterhin ergibt sich die Notwendigkeit der Einführung von Scheinvorgängen (Beziehungen zwischen Ereignissen verschiedener Vorgänge, die nicht in Normalfolge liegen). Dies dient der konformen Abbildung des Ablaufs und zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten [Brandenberger und Ruosch 1993].

In der Literatur findet man außerdem Beschreibungen eines Ereignisknotennetzplans, dessen Knoten verbal umschriebene Ereignisse sind und dessen Kanten Abhängigkeiten zwischen den Ereignissen sind. Die Vorgänge zur Überführung eines Zustandes in einen anderen sind nicht beschrieben, der Fokus liegt ausschließlich auf den Ereignissen (die Kanten haben keine Bewertung). Dadurch wird eine zeitliche Bewertung und Kalkulation außerordentlich kompliziert.

Die CPM bzw. Netzplantechnik bieten gute Möglichkeiten zur Analyse von Bauabläufen. Der oder die kritischen Wege im Netz lassen sich ebenso einfach und effizient identifizieren wie Pufferzeiten, so dass Prioritäten richtig gesetzt werden können. Die Ergebnisse der Planung sind einfach zu visualisieren, z.B. in Netzplänen oder auch in Balkenplänen. Schwierigkeiten

entstehen jedoch bei Auftreten von Störungen im Bauablauf. Das erzeugte Modell ist relativ starr und unflexibel. Jede Abweichung vom Plan müsste in einem Ist-Modell mitgeführt werden, was zu ständigen Änderungen von modellierten Daten (z.B. längere Zeit für einen Vorgang und daraus folgend Verschiebung nachfolgender Vorgänge) oder sogar zu strukturellen Änderungen im Modell (neue Ereignisse und Vorgänge, also neue Knoten und Kanten) führen kann. Der Aufwand hierfür ist den meisten Nutzern dieser Pläne zu hoch, was dazu führt, dass Änderungen nicht nachgeführt werden und die Ablaufsteuerung sich immer mehr vom Plan weg und zum Wissen im Kopf des Steuerers hin bewegt. Die vorhandenen Pläne können dann, so gut sie auch ursprünglich gewesen sein mögen, nur noch bedingt als Entscheidungshilfe dienen.

Nötig ist also ein Modell, das sowohl die Vorzüge der CPM bietet als auch flexible Änderungen während der Durchführung einer Baumaßnahme mit geringem Aufwand ermöglicht.

### **3. Abbildung des Bauprozesses auf Knoten und Kanten eines schlichten Graphen**

Die Unterteilung des Bauprozesses in Ereignisse und Vorgänge und die Modellierung in einem Graphen haben sich bewährt und werden auch hier beibehalten. Gewählt wird für diesen Zweck ein schlichter (gerichteter) Graph, bestehend aus einer Menge von Knoten und einer Menge von Kanten.

Ein schlichter Graph beschreibt die Beziehungen zwischen den Elementen der Knotenmenge. Die Beziehungen werden durch Kanten hergestellt, welche durch geordnete Paare von Knoten gebildet werden. Der erste Knoten eines jeden dieser Paare ist der Anfangsknoten der Kante, der zweite Knoten ist der Endknoten. Die Kantenmenge ist demzufolge eine homogene binäre Relation auf der Knotenmenge [Pahl und Damrath 2000].

Die Abbildung des Bauprozesses auf die Elemente dieses Graphen erfolgt durch Modellierung der Knoten in Form verbal beschriebener Ereignisse. Die Knotenmenge besteht in der Menge aller Ereignisse zwischen dem Start (-ereignis) des Projekts und dem Ende (Endereignis). Die Definition der Kanten als geordnete Paare von Start- und Endknoten legt die Modellierung von Start- und Endereignissen von Vorgängen nahe. Dabei handelt es sich jedoch nicht um eine Beschränkung. Ebenso wie Start- und Endereignisse von Vorgängen können auch andere wesentliche Ereignisse als Knoten modelliert werden, z.B. Meilensteine oder eintretende Störungen im Bauablauf.

Die Vorgänge und die Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen bzw. zwischen einzelnen Ereignissen werden auf die Kanten des Graphen abgebildet. Die Kanten werden einer Bewertung unterzogen, welche Zeiträume beschreibt. Der schlichte Graph verfügt also über bewertete Kanten und wird Netz genannt. Aufgrund der Bewertung mit Zeiträumen können sowohl Vorgangsdauern wie auch Zeiträume zwischen Vorgängen (z.B. Koppelabstände) mittels der Kanten dargestellt werden. Die Richtung der Kanten ergibt sich aus der Reihenfolge der sie definierenden Knoten in den geordneten Knotenpaaren. Ein Vorgang im Sinne der Ablaufplanung besteht demzufolge im mathematischen Modell aus den Knoten Vorgangsbeginn und Vorgangsende sowie aus der Kante mit zeitlicher Bewertung für die Dauer des Vorganges. Die Kopplung zweier Vorgänge wird durch eine Kante zwischen an den Vorgängen beteiligten Knoten modelliert. Auf diese Art und Weise sind eine Reihe von Kopplungs- bzw. Folgetypen darstellbar, zum Beispiel Normalfolgen (Ende-Anfangs-Folge, der Anfang eines nachfolgenden Vorganges ist abhängig vom Ende eines vorhergehenden Vorganges), Anfangs-Anfangs-Beziehungen und andere. Im mathematischen Sinn werden also Vorgänge und Abhängigkeiten gleich behandelt, nämlich als bewertete Kanten zwischen zwei Knoten.

Nach Definition eines schlichten Graphen beschreibt er Beziehungen zwischen seinen Knoten, hier also zwischen verschiedenen Ereignissen. Genau das ist das Ziel bei der Planung von Bauabläufen. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Ereignisse zu einem Vorgang gehören und dessen Beginn und Ende (oder auch eine Störung) beschreiben, oder ob die Ereignisse Eckpfeiler des Zusammenspiels verschiedener Vorgänge sind. Am Ende interessiert immer, welches Ereignis auf ein vorangegangenes Ereignis folgt und was die Konsequenzen daraus sind, hier also: welcher Zeitraum zwischen zwei Ereignissen verstreicht. Letztendlich widerspiegelt der Bauablauf die Folge der Ereignisse zwischen Beginn und Ende des gesamten Projektes. Der Weg zwischen diesen Ereignissen ist es, der geplant und möglichst effizient gestaltet werden muss.

Die logische Konsequenz hieraus ist die mathematische Untersuchung des Netzes mit Wegalgebren, denn das zu lösende Problem ist eine Wegaufgabe. Das fachliche Problem der Wegfindung im Projekt lässt sich also Dank der Abbildung auf einen Graphen und durch die Gleichbehandlung von Vorgängen und von Abhängigkeiten durch mathematische Regeln und Vorschriften unterstützen. Dadurch wird über Jahre gewonnenes empirisches Wissen der Entscheidungsträger der Planung und Steuerung von Bauabläufen mit mathematisch kalkulierten Aussagen ergänzt, wodurch in Summe eine bessere Beurteilung von Situationen im Bauablauf und von der Zweckmäßigkeit verschiedener Reaktionen auf Störungen erreicht werden kann.

#### **4. Fuzzy-Zahlen zur Abbildung von Dauern**

Die Dauern bzw. Zeiträume in der Bauablaufplanung sind in der Regel nicht exakt deterministisch festlegbar. Vielmehr sind Vorgangsdauern, z.B. für das Betonieren einer Bodenplatte, und Zeiträume zwischen abhängigen Vorgängen, z.B. Lieferfristen, ungefähre und mittels Erfahrung auf wahrscheinliche Werte eingrenzbare Bereiche. Jedem sind Formulierungen bekannt wie „das dauert ungefähr 5 Stunden“ oder „die Lieferung kann frühestens in 3 Wochen und spätestens in 4 Wochen erfolgen“.

Diese Art von Bereichen lassen sich mit aus der Fuzzy-Logik bekannten Fuzzy-Zahlen darstellen. Eine besonders einfache aber leistungsfähige Variante sind die Fuzzy-Zahlen vom LR-Typ, mit denen sich die vier Grundrechenoperationen Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division in eleganter Form entwickeln und ausführen lassen [Böhme 1993]. Ihren Namen haben die LR-Zahlen aufgrund der Form des von ihnen beschriebenen Wertebereiches mit einem linken und einem rechten Teilbereich, die sich jeweils durch eine L- bzw. R- Zugehörigkeitsfunktion von Werten zu diesem Teilbereich definieren lassen. Die Zugehörigkeitsfunktionen beschreiben die Zugehörigkeit einer Menge reeller Zahlen zur Fuzzy-Zahl mit Hilfe des Mitgliedsgrads  $\mu$ , welcher Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Bei LR-Zahlen gilt, dass  $\mu$  nur an genau einer einzigen Stelle den Wert 1 hat, nämlich an dem Punkt, der den linken vom rechten Teilbereich trennt. Für alle Zahlen außerhalb beider Teilbereiche ist  $\mu = 0$ . Sowohl L als auch R sind zwischen den Grenzwerten 0 und 1 monoton. Definitionen, Regeln und Herleitungen sind u.a. in [Böhme 1993] verständlich und umfangreich gezeigt, so dass sie an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden.

Für die Abbildung des Bauprozesses auf den Graphen werden zunächst solche LR-Fuzzy - Zahlen verwendet. Vereinfachend wird von Dreieckszahlen ausgegangen – sowohl L als auch R sind lineare Funktionen, so dass sie zusammengesetzt ein Dreieck bilden. Sollte das zu Problemen führen, so können ohne Schwierigkeiten andere im Geltungsbereich monotone Funktionen substituiert werden. Die Interpretation der Grenzwerte des Dreiecks (linker, mittlerer und rechter Wert mit den Mitgliedsgraden von  $\mu_{\text{linker Wert}} = 0$ ,  $\mu_{\text{mittlerer Wert}} = 1$  und  $\mu_{\text{rechter Wert}} = 0$ ) im Sinne der Ablaufplanung besteht in Minimaldauer, wahrscheinlicher (mittlerer) Dauer und Maximaldauer eines Vorgangs bzw. Koppelabstands.

Von den Verknüpfungen zweier derart modellierter Dauern sind für die hier verwendeten Wegalgebren in erster Linie die Addition und Subtraktion von Bedeutung. Zwei Dreieckszahlen werden durch jeweilige Addition (Subtraktion) gleichartiger Werte verknüpft und das Ergebnis ist wieder eine Dreieckszahl (das heißt für die Addition: Minimalwert + Minimalwert, mittlerer Wert + mittlerer Wert, Maximalwert + Maximalwert). Die Verknüpfung zweier Vorgänge entspricht der Kettung zweier Kanten im Graphen. Die Bewertung der entstehenden Kante wird durch Kettung der Bewertungen der beteiligten Kanten hergestellt und ist nach dem oben erwähnten Prinzip wieder einer Dreieckszahl. Übertragen auf den gesamten Bauablauf entspricht die Bewertung jedes Weges vom Anfang zum Ende des Projektes einer Dreieckszahl.

Die nicht deterministische Modellierung der Dauern mittels LR-Fuzzy-Zahlen unterstützt die Planung von Bauabläufen. Oft erlauben die vielen Einflussfaktoren am Bau keine exakte Einschätzung von Zeiträumen sondern legen vielmehr die Angabe von minimalen, maximalen und wahrscheinlichen Dauern nahe. Allein durch die Berücksichtigung dieser Randbedingung kann ein Ablaufmodell erheblich an Aussagekraft gewinnen. Die Spannweiten der Teilbereiche zwischen Minimaldauer und Maximaldauer können darüber hinaus als Maß für die mit einem Vorgang oder einer Abhängigkeit verbundenen Unwägbarkeiten bzw. Risiken interpretiert werden. Genaue Untersuchungen dazu sind geplant.

## **5. Das flexible Gesamtmodell - und erste Beurteilungen**

Das Vorgehen der Modellierung der Dauern mit LR-Fuzzy-Zahlen erlaubt den Vergleich mit einem klassischen deterministischen Modell, wenn man als mittlere Werte die im deterministischen Plan angenommenen Vorgangsdauern wählt. Ein viel genutztes Instrument zur Steuerung des Bauablaufs ist die Betrachtung kritischer Wege. Im klassischen Modell hat der kritische Weg eine genau bestimmte Länge, auch wenn zwei parallel laufende Vorgangsketten gleichzeitig kritisch sind. Sind parallel laufende Vorgangsketten vorhanden, kann die zusätzliche Betrachtung der minimalen und maximalen Dauern jedoch zu anderen Ergebnissen führen. So kann bei Verfolgung der Maximaldauern eine andere Vorgangskette kritisch sein als bei Betrachtung der Minimal- oder mittleren Dauern. Dieses Phänomen deutet darauf hin, dass die Vorgänge aller betroffenen Ketten genau verfolgt werden müssen, denn schon bei geringen Störungen in den als nicht kritisch eingestuften Teilen können diese Teile plötzlich kritisch werden. Das Modell mit Fuzzy-Zahlen weist frühzeitig auf solche Gefahren hin.

Aber nicht nur die Dauern der Vorgänge und die Koppelabstände werden nichtdeterministisch modelliert, sondern auch die Abhängigkeiten (Verknüpfungen der Ereignisse) selbst. In den bekannten Ablaufmodellen werden Verknüpfungen zwischen zwei Vorgängen stets als verbindlich hingenommen. Existiert eine Verknüpfung von einem Vorgang zu einem anderen, so muss sie immer eingehalten werden. Dies ist oft sinnvoll, z.B. wenn zwei Vorgänge in Normalfolge technologisch bedingt in genau dieser Reihenfolge auszuführen sind. In anderen Fällen jedoch stellen solche Verbindungen nur die gewählte von mehreren Varianten dar.

Hier wird vorgeschlagen, diese Einschränkung aufzuheben. Selbstverständlich muss eine unverrückbare, z.B. technologisch unbedingt einzuhaltende Verknüpfung möglich sein. Darüber hinaus kann es aber auch Verknüpfungen geben, die unter Umständen aufgehoben werden können. Alternative Wege durch das Netz der Ereignisse sind möglich und können vom System berechnet und vorgeschlagen werden. Beim Aufheben von Verknüpfungen zwischen zwei Ereignissen ist sicherzustellen, dass die Ereignisse auf anderen Wegen vom Startereignis aus weiterhin erreichbar sein müssen bzw. nicht ohne Verbindung zum Endereignis des Gesamtprojekts auslaufen dürfen. Im mathematischen Sinne bedeutet dies, dass jeder Knoten des Graphen von einem definierten Ausgangsknoten (Projektbeginn) aus

erreichbar sein muss. Ebenso muss von jedem Knoten des Graphen ein definierter Zielknoten (das Projektende) erreicht werden können.

Die sinnvolle Auswahl von möglichen Verknüpfungen der Ereignisse ist ein komplexes Problem, welches momentan erforscht wird. Hier liegt der Schwerpunkt der für die nahe Zukunft geplanten Arbeiten. Jetzt schon klar ist jedoch, dass das Vorhandensein von alternativen Wegen im Vergleich zur klassischen Netzplantechnik einen weitaus geringeren Aufwand bei der Findung von sinnvollen Reaktionsmöglichkeiten auf Störungen des Baugeschehens und bei der Pflege aktueller Ablaufpläne bedeutet. Ebenso klar ist, dass die Berücksichtigung von Alternativen je nach Vorgehen bei der Selektion der möglichen Verknüpfungen ein Mehr an Aufwand für den Planersteller bedeutet. Treten im Bauablauf Störungen auf, bieten die von vorn herein berücksichtigten alternativen Wege gute Reaktionsmöglichkeiten. Notwendige strukturelle Änderungen (z.B. das Einfügen neuer Knoten und Kanten in den Graphen) haben oft weniger Auswirkungen auf das Gesamtgeflecht, da bereits Möglichkeiten im Plan enthalten sind, den gestörten Bereich zu umgehen. Der entstehende Aufwand bei Abweichungen vom Ursprungsplan ist weitaus geringer als in klassischen Modellen. Ein Teil des Aufwandes, der durch solche Abweichungen entsteht, wird in die Phase der Planerstellung verlagert, ein anderer Teil wird durch die Eigenschaften des Modells reduziert oder gar eliminiert. Dennoch gilt es, für die Erstellungsphase einen Kompromiss zu finden, der mit wenig mehr Aufwand viel mehr Wirkung ermöglicht.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zusammenspiel von flexiblen Zeiträumen und variablen Verknüpfungen zwischen den Ereignissen entsteht ein insgesamt bewegliches und dynamisch änderbares Gesamtmodell. Es erlaubt eine qualifizierte Beurteilung der Situation und unterstützt die Entscheidungsfindung bei der Suche nach Reaktionsmöglichkeiten auf eingetretene, nicht vorhergesehene Störungen und Änderungen des Bauablaufs. Auch in solchen Fällen kann nun, ähnlich zur Ablaufplanung im Vorfeld mit CPM oder anderen Verfahren, mit mathematischen Mitteln Hilfestellung gegeben werden. Den erfahrenen Bauleiter und Projektsteuerer wird auch ein solches Modell nicht ersetzen können. Wie alle Ingenieurmodelle kann es lediglich helfen, den Arbeitsalltag zu erleichtern.

Die weiterführenden Arbeiten werden sich zunächst auf die zweckmäßige Auswahl möglicher Verknüpfungen der Ereignisse bzw. Vorgänge konzentrieren. Die Erprobung und Verifikation des Modells soll dann an realen Baumassnahmen weitergeführt werden, um die Handhabbarkeit zu verfeinern und weiterzuentwickeln. Weiterhin sind Untersuchungen der Interpretation der entstehenden Spannweiten zwischen Minimal- und Maximaldauern geplant.

## Literatur

[Adeli und Karim 2001] Adeli, H.; Karim, A.: *Construction Scheduling, Cost Optimization, and Management*. London : Spon Press, 2001. – ISBN 0–415–24417–X (hbk)

[Böhme 1993] Böhme, G.: *Fuzzy-Logik – Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1993. – ISBN 3–540–56658–9

[Brandenberger und Ruosch 1993] Brandenberger, J.; Ruosch, E.: *Ablaufplanung im Bauwesen*. Dietikon : Baufachverlag AG, 1993. – ISBN 3–85565–222–8

[Pahl und Damrath 2000] Pahl, P.J.; Damrath, R.: *Mathematische Grundlagen der Ingenieur-informatik*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2000. – ISBN 3–540–60501–0