

## **Schriftenreihe Bauwirtschaft**

I Forschung 1

Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel



kassel  
university



press

**Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb  
durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden**

Holger Schopbach

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Seeling

Weitere Mitglieder der Promotionskommission:  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter  
Prof. Dr.-Ing. Antonius Busch

Tag der mündlichen Prüfung

14. Dezember 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Schopbach, Holger**

Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden / Holger Schopbach. - Kassel : kassel univ. press, 2002.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2001  
(Schriftenreihe Bauwirtschaft : I, Forschung ; 1)  
ISBN 3-933146-81-X

© 2002, kassel university press GmbH, Kassel

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsschutzgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Jochen Roth, Kassel  
Druck und Verarbeitung: Zentraldruckerei der Universität Kassel  
Printed in Germany

## **Vorwort des Herausgebers**

Eine wichtige Aufgabe des Bauingenieurs liegt in der Suche nach technisch möglichen und wirtschaftlich optimalen Lösungen bei der Planung und Realisierung von Bauwerken. Diese Aufgabe wird erschwert durch die Vielzahl an Möglichkeiten und Alternativen von Materialien, Formen und Ausführungsvarianten.

Die Einflußmöglichkeit auf die Baukosten ist gerade während der Planungsphase am größten und nimmt mit Fortschritt der Baumaßnahme überproportional ab. Daher ist der Einfluß bei der Bauausführung schon wesentlich geringer, da die grundlegenden kostenbeeinflussenden Parameter in der Planung festgelegt und in der Realisierungsphase nur noch umgesetzt werden.

Zur Lösung dieser Aufgabe sind die Verfahren der mathematischen Optimierung in hervorragender Weise geeignet. Operations Research-Methoden, als Verfahren zur Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen auf rationaler Basis, gehören seit geraumer Zeit zu den anerkannten Lösungsalgorithmen und werden im unternehmerischen Planungswesen bereits mit großem Erfolg eingesetzt. Im Bereich des breitgefächerten Bauingenieurwesens ist das Potential der Methoden und seine Anwendbarkeit bis heute leider nicht im gleichen Maße erkannt worden.

Es erscheint daher ratsam, die Anwendung der Operations Research-Methoden in bezug auf das Bauwesen in verstärktem Maße zu untersuchen. Wissenschaftliche Erfolge, z.B. aus den Bereichen der Wirtschaftswissenschaften, des Maschinenbaus u.a., sollen in dieser Arbeit in ihrer Anwendbarkeit auf spezifische Probleme des Bauwesens überprüft werden. Vorhandene Ansätze bedürfen dabei der Reproduzierbarkeit auf die komplexen Fragestellungen des Bauingenieurwesens.

Obwohl die wirtschaftliche Bedeutung der durch optimierte Konstruktionen erreichbaren Einsparungen bekannt sind, kommen gezielt eingesetzte Optimierungsmethoden in der Bauingenieurpraxis heute nur in seltenen Fällen zur Anwendung. Dieses liegt auch an den komplexen mathematischen Zusammenhängen bei der Tragwerksplanung, die fast immer nichtlinear sind und daher besonders aufwendige Lösungsalgorithmen erforderlich machen. Zur Reduzierung der Herstellkosten sollte, gerade in der Tragwerksplanung, einer ökonomisch optimalen Bemessung verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt werden. Eine statische Berechnung alleine ergibt in den meisten Fällen keine ökonomisch sinnvolle Konstruktion. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, aus einer nahezu unendlich großen Menge von Lösungsalternativen, unter Berücksichtigung der konstruktiven Erfordernisse, die wirtschaftlich beste Lösung zu finden. Vielfach sind mehrere divergierende Parameter für eine optimale Konstruktion zu berücksichtigen.

Nach wie vor fehlt es an geeigneten Instrumenten, die es ermöglichen, sowohl ökonomische als auch konstruktive Aspekte bei der Planung zu berücksichtigen. Bei der Tragwerksplanung erfolgt beispielsweise in den meisten Fällen keine Analyse der Bauwerkskosten, obwohl für die statische Berechnung von Ingenieurbauwerken seit etlichen Jahren geeignete EDV-Software eingesetzt wird. In vielen Fällen verfügt der Projektierende auch nicht über genügend Informationen, um die Kosten der Bauteilvarianten miteinander vergleichen zu können. Die Kostenunterschiede verschiedener Ausführungsvarianten werden vom Tragwerksplaner deshalb oftmals unterschätzt.

Aber auch in der Arbeitsvorbereitung von Bauwerken können durch eine mathematische Optimierung erhebliche Einsparungen erzielt werden. So sind Großbaustellen von ihrem Umsatz, Maschineneinsatz und der Intensität ihres Materialflusses her durchaus mit größeren industriellen Anlagen zu vergleichen. Daher sollte vor allem die Baustelleneinrichtung besonders sorgfältig konzipiert und koordiniert werden, da sie einen entscheidenden Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit hat und durch Fehlentscheidungen bei der Einrichtungsplanung meist erhebliche, jedoch vermeidbare Kosten entstehen. Die Baustelleneinrichtungsplanung basiert jedoch weitgehend noch immer auf dem Erfahrungsschatz des Bauleiters, wobei mögliche Varianten intuitiv geschätzt und gewählt werden. Auch Baustellenabläufe, die während ihrer Durchführung verschiedenen Störungen, Risiken und Unsicherheiten unterworfen sind, sollten mittels Unterstützung geeigneter mathematischer Methoden, hinsichtlich einer ökonomischen Zielsetzung optimiert werden. Insbesondere die Anforderungen an die Baustellenlogistik sind in diesem Zusammenhang zu nennen.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit von Herrn Dr.-Ing. H. Schopbach besteht zum einen darin, die in der Vergangenheit zu den verschiedensten Themengebieten der mathematischen Optimierung entstandenen Veröffentlichungen zu strukturieren und zu werten, die bekannten unterschiedlichsten Optimierungsverfahren, in Abhängigkeit von der Problemstellung, aufzuzeigen und für verschiedene Anwendungen aus dem Bauwesen geeignete Verfahren zu wählen bzw. zu modifizieren. Dabei sollen durch den Einsatz geeigneter Methoden der mathematischen Optimierung verschiedene Problembereiche in der Tragwerksplanung und Ausführung erschlossen werden. Die oberste Priorität sollte jeweils in der Berücksichtigung der Kosten und der Einfachheit der Handhabung liegen, damit die Ergebnisse auch in der Praxis verwendbar sind. Daher wurden für viele in der Arbeit behandelten Teilgebiete durch Herrn Dr.-Ing. Schopbach Software-Tools entwickelt, die dem Anwender keine Kenntnis des zugrunde liegenden Algorithmus abverlangen und den Prozeß der Optimierung besonders vereinfachen.

Herr Dr.-Ing. Schopbach hat diese Arbeit im Zeitraum 1997 bis 2001 im Zuge seiner wissenschaftlichen Anstellung im Institut für Bauwirtschaft (IBW), Fachgebiet Arbeitstechnologie, unter meiner Leitung geschrieben. Ausgangspunkt der Ausarbeitung war die Tatsache, daß in den vergangenen ca. 15 Jahren die Methoden des Operations Research nur wenig angewandt und beschrieben wurden. Eine wesentliche Aufgabe sollte es daher sein, nach ausführlicher Literaturrecherche vorhandene und neue populäre ökonomische Anwendungen für die Bauwirtschaft aufzuzeigen und, für Konstruktion und Baubetrieb, Lösungsmodelle bereitzustellen, die dem Praktiker auch ohne vertiefende Operations Research-Kenntnisse eine Anwendung ermöglichen.

Basis seiner Optimierungsansätze im Bereich der Tragwerksplanung ist die vollständige Enumeration, eine Methode, die den kompletten Lösungsraum, unter Berücksichtigung der vorgegebenen Variablenbreite, durchsucht, und dabei, durch Vergleich der errechneten Lösungen, die optimale Lösung findet. Diese Methode ermöglicht es, daß keine Kombinationsmöglichkeit im Lösungsraum unberücksichtigt bleibt und ist nur dank der heute großen Rechnerleistung praktikabel. Der komplexe Aufbau der Restriktionen bei der Tragwerksbemessung ermöglicht bei der Optimierung, unter Berücksichtigung der Herstellungskosten, für die meisten anwendungsrelevanten Fälle wohl keine andere Lösungsalternative. Die von Herrn Dr.-Ing. Schopbach, im Zuge der Tragwerksoptimierung, für einzelne Bauteile entwickelten Programme lassen

sich sehr gut als Bausteine in ein komplettes Optimierungsprogramm für die Gebäudeplanung integrieren.

Darüber hinaus erschließt Herr Dr.-Ing. Schopbach die Optimierungsmethoden auch für zwei wesentliche Anwendungsfälle aus dem Bereich der Arbeitsvorbereitung. In der Baustelleneinrichtungsplanung entwickelt er einen Simulator für die Optimierung der Baustellenlogistik bei der Fertigteilmontage, und bei der Bauzeitplanung erstellt er ein Programm zur Einbindung der Fuzzy-Methode in eine kommerzielle Projektmanagementsoftware. Für beide Entwicklungen zeigt er Anwendungsfälle aus der Praxis, die das Einsparungspotential bei der Baustelleneinrichtungsplanung bzw. die Realitätsnähe der Ergebnisse in der Bauzeitplanung erkennen lassen.

Die vorliegenden Ergebnisse seiner Arbeit lassen ein hohes Maß an Kreativität bei der Bearbeitung von Problemen durch die Entwicklung praxisnaher Lösungen erkennen. Der Einsatz der Kosten als Optimierungskriterium bei der Gebäudekonstruktion zeigt, daß die Operations Research-Methoden gerade hier sehr vielversprechend angewendet werden können. Die von Herrn Dr.-Ing. Schopbach bearbeiteten Anwendungsfelder zum Einsatz von Optimierungsverfahren leisten meines Erachtens einen sehr anschaulichen Beitrag zur Steigerung der Akzeptanz der Operations Research-Methoden im Bauwesen. Damit liefert diese Arbeit einen wichtigen Beitrag für zukünftige Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Einsatzmöglichkeiten von Operations Research-Methoden im Bauwesen. Dabei wurden neue Anwendungsfelder erschlossen und für die praktische Weiterentwicklung nutzbar gemacht.

Prof. Dr.-Ing. V. Franz

Leitender Direktor des IBW



## **Persönliches Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauwirtschaft, Fachgebiet Arbeitstechnologie, im Fachbereich Bauingenieurwesen, der Universität Gesamthochschule Kassel, in der Zeit von Januar 1997 bis Dezember 2001. Besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinem 1. Prüfer, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz, Leiter des Fachgebietes Arbeitstechnologie, der mich von Anfang an in meinem Bestreben unterstützt hat, im breitgefächerten Gebiet des Operations Research (mathematische Methoden zur Entscheidungsvorbereitung) zu forschen und letztendlich auch zu promovieren.

Das Fachgebiet Baubetrieb läßt sich im allgemeinen in die Teilgebiete Baubetriebswirtschaft (BBW) und Baubetriebstechnik, an der Universität Gh Kassel als Arbeitstechnologie bezeichnet, aufteilen. Da die vorliegende Dissertation im Fachgebiet Arbeitstechnologie stattfand, sollen hier größtenteils Optimierungsansätze bei technischen Problemen behandelt werden, obwohl in der Baubetriebswirtschaft ebenso viele Anwendungsmöglichkeiten von Operations Research-Methoden gegeben sind (siehe auch [Sel], [Z-Sel]).

Für die Übernahme des Korreferates gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Seeling, Leiter des Instituts für Planungsverfahren im Baubetrieb an der RWTH Aachen, einem der wenigen Wissenschaftler in Deutschland, der schon bereits in den 70er Jahren die Einsatzmöglichkeiten des Operations Research für den Baubetrieb erkannt hat. Er hat mir wertvolle Anregungen geben können. Ebenso sei den beiden zusätzlichen Mitgliedern der Promotionskommission, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Antonius Busch, an dieser Stelle nochmals recht herzlich für die Bereitschaft zur Ausübung dieses Amtes gedankt.

Besonders bedanke ich mich ferner bei allen Mitarbeitern des Institutes für Bauwirtschaft für die sehr gute Zusammenarbeit und stets kollegiale Atmosphäre, sowie bei allen Studenten, die in Form von Diplom- oder Projektarbeiten die durchgeführten Forschungen tatkräftig unterstützt haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Simone und meinem Sohn David, die mich an etlichen D-Day's (Di + Do) entbehren mußten, für Ihre Geduld bedanken.

Kassel, Dezember 2001

Holger Schopbach



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemdefinition und Motivation.....	1
1.2 Ansätze zur Kostensenkung von Baumaßnahmen.....	3
1.3 Definition des Operations Research .....	6
1.4 Geschichtliche Entwicklung des Operations Research .....	8
1.5 Problemlösung und Klassifikation.....	9
<b>2 Lösungsverfahren des Operations Research</b> .....	<b>13</b>
2.1 Einführung .....	13
2.2 Lineare Optimierung .....	15
2.3 Nichtlineare Optimierung .....	16
2.4 Ganzzahlige Optimierung .....	17
2.5 Infinitesimalrechnung.....	17
2.6 Graphentheorie und Netzplantechnik .....	17
2.7 Heuristische Verfahren .....	18
2.8 Entscheidungsbaumverfahren .....	18
2.9 Wahrscheinlichkeits- und Warteschlangentheorie.....	20
2.10 Simulation .....	20
<b>3 Operations Research im Bauwesen</b> .....	<b>21</b>
3.1 Besonderheiten im Bauwesen .....	21
3.2 Gründe der unbefriedigenden Anwendungsbreite .....	23
3.3 Bedeutung der EDV- Unterstützung .....	25
3.3.1 Einführung.....	25
3.3.2 Graphische Unterstützung .....	27
3.3.3 Softwaremäßige Unterstützung.....	27
3.3.4 Internetpräsentation .....	29
<b>4 Einsatz von Operations Research-Methoden in der Gebäudekonstruktion unter besonderer Berücksichtigung der Kosten</b> .....	<b>31</b>
4.1 Einführung .....	31
4.2 Historische Entwicklung der Tragwerksoptimierung .....	32
4.3 Entwurf von Konstruktionen.....	34
4.3.1 Optimales Entwerfen von Baukonstruktionen .....	35
4.3.2 Optimierungsstufen von Baukonstruktionen .....	36
4.3.3 Vorherrschende Optimierungsansätze.....	38
4.3.4 Besonders geeignete Optimierungsansätze .....	39
4.3.5 Aussichten / Entwicklungstendenzen.....	40

4.4	Geeignete Lösungsverfahren .....	42
4.4.1	Mathematische Grundlagen.....	42
4.4.2	Monte-Carlo-Methode (Zufallsstichprobenmethode) .....	44
4.4.3	Methode der Zufallsrichtung .....	45
4.4.4	Rastermethode .....	46
4.4.5	Gradientenverfahren.....	46
4.4.6	Schnittebenen-Verfahren (Cutting Plane Verfahren) .....	47
4.5	Vorstellung einiger bekannter Anwendungsgebiete .....	48
4.5.1	Holzstützen .....	48
4.5.2	Räumliche Aussteifung von Gebäuden .....	48
4.5.3	Fundamente.....	49
4.5.4	Stahlbetondecken .....	49
4.5.5	Fachwerke/ Rahmentragwerke .....	50
4.5.6	Brücken.....	51
4.5.7	Stahlbau.....	51
4.5.8	Optimierung in der Gebäudeplanung.....	53
4.6	Optimierung von Dachtragwerken .....	55
4.6.1	Problemstellung .....	55
4.6.2	Pfettendächer .....	55
4.6.3	Bemessung der Dachlattenquerschnitte .....	58
4.6.4	Ergebnisse der analytischen Optimierung .....	61
4.6.5	Optimierung des Gesamtsystems.....	64
4.6.6	Dachstuhloptimierung durch Software-Tool OptimaD .....	65
4.7	Optimierung von Biegeträgern (Unterzügen) .....	74
4.7.1	Problemstellung .....	74
4.7.2	„Homogene“ Werkstoffe Holz und Stahl .....	74
4.7.3	Inhomogener Werkstoff Stahlbeton .....	76
4.7.4	Bekannte Optimierungsansätze.....	78
4.7.5	Analytischer Optimierungsansatz .....	81
4.7.6	Numerischer Optimierungsansatz durch Enumerationsmethode .....	86
4.7.7	Vorstellung des Software-Tools OptimaB.....	89
4.7.8	Optimierung durch Software-Tool OptimaB.....	94
4.8	Optimierung von Holzbalkendecken.....	97
4.8.1	Problemstellung .....	97
4.8.2	Einlagiges Balkensystem.....	97
4.8.3	Zweilagiges Balkensystem .....	97
4.8.4	Bekannte Optimierungsansätze.....	98
4.8.5	Einlagiges Balkensystem als Optimierungsaufgabe.....	99
4.8.6	Optimierung durch Software-Tool OptimaD.....	101

4.9	Optimierung von Wärmeschutzmaßnahmen .....	105
4.9.1	Problemstellung .....	105
4.9.2	Finanzmathematische Grundlagen .....	108
4.9.3	Bekannte Ansätze zur Bewertung unterschiedlicher Wärmedämmalternativen ....	110
4.9.4	Wichtige Einflußgrößen der Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	113
4.9.5	Ansatz zur Optimierung der Gesamtwärmeschutzmaßnahme .....	118
4.9.6	Vorstellung des Software-Tools OptimaW .....	122
4.9.7	Optimierung durch Software-Tool OptimaW .....	128
4.10	Aussichtsreiche, weitere Anwendungsgebiete .....	130
<b>5</b>	<b>Einsatz von Operations Research-Methoden in der Arbeitsvor- bereitung .....</b>	<b>132</b>
5.1	Einführung .....	132
5.2	Die Arbeitsvorbereitung von Baumaßnahmen .....	132
5.3	Auswahl optimaler Bauverfahren .....	134
5.4	Planung der Baustelleneinrichtung .....	135
5.4.1	Problemstellung .....	135
5.4.2	Veröffentlichte Lösungsansätze .....	137
5.4.3	Überleitung zu einem neuen Lösungsansatz .....	142
5.4.4	Lösungsansatz durch netzbasierte Simulation .....	145
5.4.5	Das realisierte Petri-Netz-Modell .....	148
5.4.6	Optimierung durch Simulation .....	152
5.4.7	Ausblick .....	158
5.5	Weitere Einsatzmöglichkeiten in der Arbeitsvorbereitung .....	160
5.5.1	Problemstellung .....	160
5.5.2	Optimierung durch Software-Tool OptimaAV V1.1 .....	162
5.5.3	Optimierung des Rundreiseproblems durch Software-Tool OptimaX .....	165
5.6	Aussichtsreiche weitere Anwendungsgebiete .....	167
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>169</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>172</b>
7.1	Monographien .....	172
7.2	Verwendete Normen und Tabellenbücher .....	177
7.3	Zeitschriftenveröffentlichungen .....	178
7.4	Weiterführende Zeitschriftenveröffentlichungen .....	180
7.5	Im Zuge des Forschungsvorhabens entstandene Diplom- und Projektarbeiten .....	183



# 1 Einführung

## 1.1 Problemdefinition und Motivation

Eine schon traditionelle Aufgabe im Bauwesen liegt in der Suche von optimalen Problemlösungen, damit diese mit möglichst wirtschaftlichem Aufwand realisiert werden können. Diese Aufgabe wird heute weitgehend schwieriger, weil eine Vielzahl von neuen Materialien, Formen und Methoden, Bedürfnissen und Interessen ein weitaus komplexeres Vorgehen als in den vergangenen Jahrzehnten erforderlich macht [Aig]. Daher wird der angesprochenen Aufgabe der Optimierung oft nicht die eigentlich notwendige Aufmerksamkeit geschenkt oder kann vom Bearbeiter aufgrund weiterer externer Einflüsse nicht konsequent verwirklicht werden.

Das deutsche Planungsverhalten bei Gebäuden sieht häufig so aus, daß die Frage nach der Statik erst dann gestellt wird, wenn zwischen Bauherr und Architekt der Einreichungstermin für das Baugesuch geklärt wird. Da die Zeit drängt, wird die Statik oft nachgereicht. Der Tragwerksplaner hat zu diesem Zeitpunkt aber kaum noch eine Möglichkeit, Planungsalternativen oder Optimierungsvorschläge unterbreiten zu können. Das resultiert auch daraus, daß der Prüfingenieur später die Übereinstimmung des Standsicherheitsnachweises mit dem Baugesuch überprüfen muß. Anschließend erfolgt die Ausschreibung des Bauvorhabens mit nachfolgend harten Vergabeverhandlungen zwischen Bauherr/Architekt und Bauunternehmung. Zu diesem Zeitpunkt hat nun auch der Bauunternehmer keine Möglichkeit mehr, seine Erfahrungen bezüglich bestimmter Bauweisen einzubringen (er muß strikt die Planung umsetzen).

Gerade während der Planungsphase sind die Einflußmöglichkeiten auf die Baukosten am größten, da hier stets unterschiedliche Alternativen miteinander verglichen und kostenmäßig bewertet werden müssen (siehe auch Abb. 1, Seite 3). Zur Lösung dieser Aufgabe sind die Verfahren der mathematischen Optimierung, im folgenden auch als Operations Research-Methoden bezeichnet, in hervorragender Weise geeignet. Operations Research-Methoden, als Verfahren zur Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen auf rationaler Basis, gehören seit geraumer Zeit zu den anerkannten Lösungsalgorithmen und werden im unternehmerischen Planungswesen bereits mit großem Erfolg eingesetzt. Im Bereich des breitgefächerten Bauingenieurwesens ist das Potential der Methoden und seine Anwendbarkeit bis heute leider nicht in gleichem Maße erkannt worden. Das liegt sicherlich auch darin begründet, daß das Bauwesen insgesamt als sehr „konservativ“ einzustufen ist; geläufige Methoden aus der stationären Industrie sowie neue effizientere Ansätze der Betriebswirtschaftslehre setzen sich hier häufig erst nach einem Zeitraum von ca. 10 bis 20 Jahren durch. Bereits 1970 stellte Hupfer [Hup] fest, daß eine große Diskrepanz zwischen der Anzahl der Veröffentlichungen zu Fragen der Optimierung von Baukonstruktionen und der geringen Anwendung dieser Methoden in der Praxis besteht (siehe hierzu auch Kapitel 3.2). Die Einsatzmöglichkeiten der mathematischen Optimierung wurden besonders ausführlich in der Zeitspanne zwischen den 70er Jahren und zu Beginn der 80er Jahre untersucht. Viele der damals entwickelten Ansätze, mit der notwendigen Berücksichtigung der Preise im Optimierungsverfahren, gingen in den zurückliegenden Jahren verloren; eine Umsetzung interessanter Ansätze in der Praxis ist nach wie vor nicht zu erkennen.

Es erscheint daher ratsam, die Anwendung von Operations Research-Methoden in bezug auf das Bauwesen weiter zu untersuchen, um sie, nach Anpassung der entsprechenden Algorithmen, auch hier verstärkt einsetzen zu können. Wissenschaftliche Erfolge, z.B. aus den Bereichen der Wirtschaftswissenschaften, des Maschinenbaus u.a., sollen in ihrer Anwendbarkeit auf spezifische Probleme des Bauwesens überprüft werden. Eventuell vorhandene Ansätze bedürfen jedoch der Reproduzierbarkeit auf die komplexen Fragestellungen des Bauingenieurwesens. Eine Vielzahl von Operations Research-Methoden soll daher im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, um die für die Anwendung von Problemen im Bauwesen besonders geeigneten zu isolieren und einer gezielten Anwendung zugänglich zu machen.

Nach einer Mitteilung des statistischen Bundesamtes vom 2.7.2001 wurden im Jahr 2000 in Deutschland im Hochbau 348.508 Baugenehmigungen erteilt. Damit gab es nun bereits im sechsten Jahr in Folge weniger Baugenehmigungen als im jeweiligen Vorjahr. Der Rückgang von 1999 auf 1998 betrug ca. 9 %, der von 2000 auf 1999 ca. 20 %!

Einsparungen im Wohnungsbau werden sowohl vom Gesetzgeber als auch vom Bauherrn gefordert. Zahlreiche Ansätze in der Entwurfsphase, wie beispielsweise die Reduzierung des Bauvolumens und des Ausbaustandards („Holländische Bauweise“), führen zwar zu einer Reduzierung der Kosten, jedoch auch zu einer Verringerung des technischen Standards und Wohnniveaus [Z-OOA]. Untersuchungen haben aber gezeigt, daß in Deutschland ein Komfortverzicht, die Reduzierung des technischen Standards, der Verzicht auf einen Keller oder sonstige Qualitätseinbußen nur sehr begrenzt angenommen werden [Z-Neu].

Obwohl die wirtschaftliche Bedeutung der durch optimale Konstruktionen erreichbaren Einsparungen auf der Hand liegt, kommen gezielt eingesetzte Optimierungsmethoden in der Bauingenieurpraxis nur in seltenen Fällen zur Anwendung. Dieses liegt, zumindest teilweise, auch an den komplizierten mathematischen Modellen des optimalen Entwerfens, die fast immer nichtlinear sind und daher besonders aufwendige Lösungsalgorithmen erforderlich machen. Es sollte daher, gerade in der Tragwerksplanung, einer ökonomisch optimalen Bemessung verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt werden; eine statische Berechnung allein ergibt in den meisten Fällen keine ökonomisch sinnvolle Konstruktion. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, aus einer nahezu unendlich großen Menge von Lösungsalternativen, unter Berücksichtigung eingrenzender Beschränkungen, die wirtschaftlich und konstruktiv beste Lösung zu finden. Vielfach sind mehrere divergierende Parameter für eine optimale Konstruktion zu berücksichtigen.

Nach wie vor fehlt es an geeigneten Planungsinstrumenten für den Tragwerksplaner, die es ermöglichen, ökonomische Aspekte bereits während der Tragwerksdimensionierung einzubinden. Obwohl für die statische Berechnung von Ingenieurbauwerken seit etlichen Jahren geeignete EDV-Software eingesetzt wird, erfolgt in den meisten Fällen keine Analyse der Bauwerkskosten. In vielen Fällen verfügt der Projektierende auch nicht über genügend Informationen, um die Kosten der Bauteilvarianten miteinander vergleichen zu können; die Kostenunterschiede verschiedener Ausführungsvarianten werden deshalb oftmals unterschätzt.

Aber auch in der Arbeitsvorbereitung von Bauvorhaben können durch eine mathematische Optimierung erhebliche Einsparungen erzielt werden. So sind Großbaustellen von ihrem Umsatz, Maschineneinsatz und der Intensität ihres Materialflusses her durchaus mit mittleren oder sogar

größeren Fabriken zu vergleichen. Daher sollte vor allem die Baustelleneinrichtung besonders sorgfältig konzipiert und koordiniert werden, da sie gerade bei Großprojekten einen entscheidenden Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit hat und durch die geringere Produktivität meist erhebliche, nur schwer kalkulierbare Folgekosten entstehen. Die Baustelleneinrichtungsplanung basiert jedoch weitgehend noch immer auf dem Erfahrungsschatz des Bauleiters, wobei mögliche Varianten intuitiv geschätzt und gewählt werden.

Die für den Einsatz von Operations Research-Methoden im Bauwesen zur Verfügung stehenden Veröffentlichungen sind nicht sehr zahlreich, zum größten Teil veraltet und setzen stets die Kenntnis des gewählten mathematischen Optimierungsalgorithmus voraus. Nur die wenigsten Bauingenieure sind jedoch zumindest mit den Standardmethoden des Operations Research vertraut.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bestand zum einen darin, die in der Vergangenheit zu den verschiedenen Themengebieten entstandenen Veröffentlichungen zu werten, die unterschiedlichen Optimierungsverfahren, in Abhängigkeit von der Problemstellung, aufzuzeigen und das unter den heutigen Gegebenheiten geeignetste Verfahren zu wählen und zu modifizieren bzw. neu zu entwickeln. Zum anderen konnten durch den Einsatz geeigneter Operations Research-Methoden weitere Problembereiche erschlossen werden. Die oberste Priorität lag jeweils in der Berücksichtigung der Kosten und der Einfachheit der Handhabung. Daher wurden für viele in dieser Arbeit behandelten Teilgebiete Software-Tools entwickelt, die dem Anwender keine Kenntnis des zugrunde liegenden Algorithmus abverlangen und daher den Prozeß der Optimierung besonders einfach machen.

## 1.2 Ansätze zur Kostensenkung von Baumaßnahmen

Bei den Kosten im Hochbau handelt es sich um Aufwendungen für Güter, Leistungen und Abgaben, die für die Planung und Ausführung von Baumaßnahmen erforderlich sind [DIN 276].

In den Zeiten abflauer Baukonjunktur, wie sie gerade heute vorherrschen, müssen alle am Bau Beteiligten nach neuen Ansätzen suchen und dazu die eingefahrenen Abläufe sowohl beim Planungsprozeß als auch beim eigentlichen Bauprozeß analysieren. Gerade in der Planungsphase ist der Einfluß auf den Kostenverlauf am größten; Vernachlässigungen in diesem Bereich können während der Ausführungsphase des Bauwerkes in der Regel nicht mehr kompensiert werden (siehe Abb. 1).

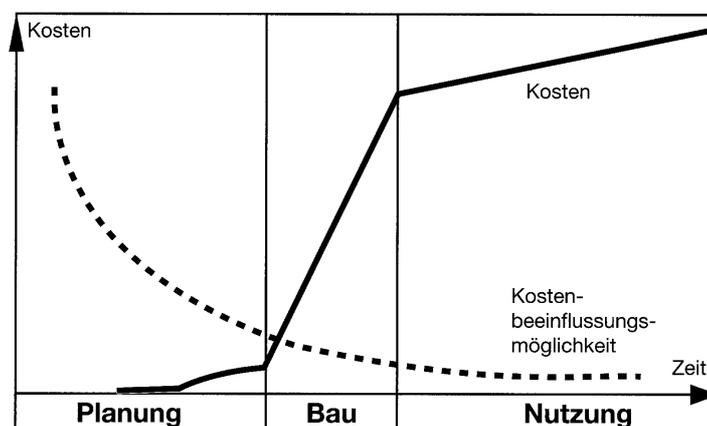


Abb. 1: Einfluß auf die Baukosten in Abhängigkeit von der Zeit [Kasa]

Planungen der beteiligten Ingenieure beginnen dagegen häufig ohne konkreten Kostenbezug. Bei der Bauingenieurausbildung an den Hochschulen Deutschlands wird beispielsweise die Bemessung des Tragwerkes meist völlig losgelöst von den dadurch entstehenden Kosten betrachtet. Auch Architekten werden bei ihrer Ausbildung an den Hochschulen viel zu wenig auf die wichtige Aufgabe des Kostenmanagements vorbereitet; Entwurf und Design bestimmen hier das Studium.

In der heutigen Planungsmentalität geschieht die Einbindung der Fachingenieure erst in einer so späten Phase, daß Einflußmöglichkeiten auf die weitere Planung nur noch in sehr geringem Maße möglich sind; die frühzeitige Einbindung des ausführenden Bauunternehmens geschieht in der Regel überhaupt nicht. Im Sinne einer Optimierung des Planungsprozesses, unter ökonomischen sowie fertigungstechnischen Gesichtspunkten, ist es jedoch erforderlich, den Bauherrn, den Architekt, die Fachingenieure sowie, im Idealfall, auch die ausführende Bauunternehmung frühestmöglich in die Planung mit einzubeziehen (Bildung eines Bauteams). Nur so kann jeder zur Optimierung des Gesamtbauwerkes beitragen.

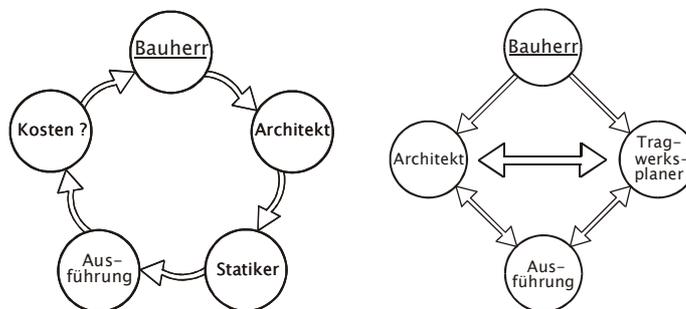


Abb. 2: Planungsverhalten (li.) und erstrebenswertes Planungsverhalten (re.) in Deutschland [Kasa]

Leider wird die Bildung von Bauteams vom Bauherrn und den Architekten mit großer Skepsis betrachtet und oft entschieden abgelehnt, so daß diese Ansätze weitgehend nur im schlüsselfertigen Bauen zur Anwendung kommen. Letztendlich wird in den meisten Fällen versucht, eine Verringerung der Baukosten durch langwierige Verhandlungen mit dem ausführenden Bauunternehmen zu erreichen. Der verantwortliche Bauleiter bemüht sich anschließend, jede noch so kleine Lücke im Leistungsverzeichnis zu lokalisieren, um wenigstens über Nachträge die mit minimalem Gewinn kalkulierten Preise aufzubessern. Bei engen Fertigstellungsterminen werden reihenweise Behinderungsanzeigen, gemäß VOB, versandt. Bei Baubesprechungen größerer Bauvorhaben ist es mittlerweile Standard, daß jeder Auftraggeber sowie Auftragnehmer juristischen Beistand einholt, um auch alle möglichen rechtlichen Schritte auszunutzen.

Da die Optimierung eines Gebäudes in der Tragwerksplanung dem fertigen Entwurf in den wenigsten Fällen direkt anzusehen ist, werden Einsparungspotentiale bei der Kalkulation einer Ausschreibung von den meisten Bauunternehmungen oft nicht berücksichtigt. Das bedeutet, daß dieses Einsparungspotential nicht dem Bauherren zugute kommt, sondern letztendlich der Bauunternehmung. Es ist daher oft vorteilhaft, wenn die Ausarbeitung des Leistungsverzeichnisses auch vom Tragwerksplaner übernommen wird. So läßt sich beispielsweise bei Dachtragwerken mit einer Vergrößerung des Rasters der Sparren bzw. Binder, trotz der gleichzeitigen Vergrößerung der notwendigen Querschnitte der Bauteile sowie der zugehörigen Traglatung, insgesamt eine Verringerung der Kosten erreichen. Diesem Umstand, des verringerten Holzvolumens, wird von den ausführenden Unternehmen sicherlich in jeder Kalkulation Rech-

nung getragen. Ist aber der gewählte Sparrenabstand auf die einzubauende Dämmung abgestimmt, so daß die Dauer der Verlegung und der entstehende Verschnitt erheblich reduziert werden, ist dieser vom Tragwerksplaner berücksichtigte Aspekt für ein außenstehendes Unternehmen in der Regel nicht so leicht erkennbar. Ebenso kann einem Unterzug nicht angesehen werden, ob er in bezug auf die Gesamtkosten, die maßgeblich von den Schalungskosten abhängen, vom Tragwerksplaner optimiert wurde. Optimierte Bauteile müssen daher im Leistungsverzeichnis und eventuell in den zugehörigen Plänen kenntlich gemacht werden. Das setzt jedoch eine frühe Einbindung des Tragwerksplaners in die Gebäudekonzeption voraus.

Ein noch weitaus größeres Einsparpotential bietet sich dadurch an, daß das gesamte Tragwerkskonzept schon während der Entwurfsphase mit dem Tragwerksplaner und den anderen beteiligten Fachingenieuren abgestimmt wird. Da die Honorare der Architekten und Fachingenieure, bisher nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI), direkt von den Baukosten abhängen, würde eine kostenoptimierte Planung, bei einer Kopplung an die erzielten Baupreise, einen erheblichen Mehraufwand, bei anschließend geringeren Honoraren bedeuten. Dieser oft zitierte Einwand dürfte jedoch im Normalfall keine Rolle spielen, da der Vertrag zwischen Bauherr und Tragwerksplaner in der Regel nicht auf einer Kostenermittlung nach DIN 276 basiert, sondern auf einer überschläglichen Kostenschätzung. Trotzdem besteht momentan kein Interesse, seitens des Architekten oder der Fachingenieure, an einer optimierten Planung, da der teilweise erhebliche Mehraufwand in der Regel nicht vergütet wird.

Vielfach wird in der Literatur zur Reduzierung der Kosten in Deutschland auch die Anwendung ausländischer Bauweisen genannt. Ein entsprechender Forschungsbericht des Fraunhofer Informationszentrums Raum und Bau zeigt jedoch auf, daß die so gewonnenen Kosteneinsparungen nur durch eine erhebliche Verminderung des Wohnkomforts und der Ausbauqualität zu erreichen sind. Es handelt sich beispielsweise um Kosteneinsparungen durch den Verzicht auf einen Keller, einen unzureichenden Trittschallschutz, Aufputzverlegung der elektrischen Leitungen, steilere Treppenkonstruktionen etc..

Bei der Tagung „Marktsegment des kostengünstigen Wohnungsbaues“ der Bau-Akademie Biberach wurden zusammenfassend folgende Punkte genannt, mit denen die Kosten im Bauwesen reduziert werden können [Z-Neu]:

- Ganzheitliches Baumanagement, d.h. kostenbewußte Planung, Koordination aller am Bau Beteiligten, stärkere Typisierung, Ausnutzung aller Rationalisierungsmöglichkeiten
- Verzicht auf kostenintensive Ausstattung
- Bereitstellung von preisgünstigerem Bauland
- Reduzierung von technischen Standards (Wärmeschutz, Schallschutz, etc.)

Da jedoch in Deutschland ein Komfortverzicht und eine Reduzierung der technischen Standards nur sehr begrenzt angenommen werden [Z-Neu] und zusätzlich die Wohnungsgröße mit steigender Tendenz der Einpersonenhaushalte ständig zunimmt, läßt sich leicht erkennen, daß hier nur durch ein ganzheitliches Baumanagement, mit den zugehörigen Teilaspekten, eine Kostenreduzierung zu erreichen ist. Eine ökonomisch sinnvolle Planung ist nur durch den Einsatz geeigneter mathematischer Optimierungsmethoden, besonders mit den Methoden des Operations Research, mit vertretbarem Aufwand zweckmäßig. Jedoch läßt sich durch eine optimierte Planung hierbei nur ein bestimmter Prozentsatz der entstehenden Kosten beeinflussen. Aufgrund einer Untersuchung des Instituts für Städtebau, Wohnungswirtschaft und Bauwesen in Bonn,

ergibt sich bei dem Kauf eines Einfamilien-Reihenhauses eine Kostenverteilung gemäß Abb. 3. Daraus ist zu folgern, daß sich im Wohnungsbau nur ca. 50 % der Kosten durch eine optimierte Planung beeinflussen lassen.

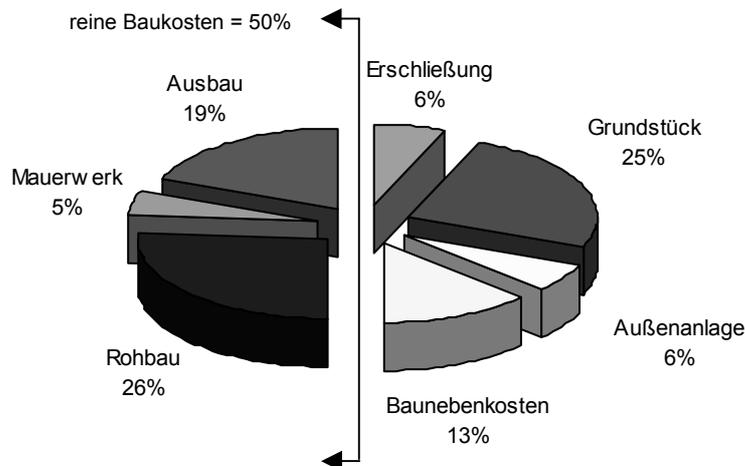


Abb. 3: Kostenverteilung beim Kauf eines Einfamilienreihenhauses [IFS, Bonn]

### 1.3 Definition des Operations Research

Vielfach wurde in der Vergangenheit versucht, den im anglo-amerikanischen Sprachraum entstandenen Begriff Operations Research zu definieren und ins Deutsche zu übersetzen. Von den vielen Übersetzungen wird der Begriff Unternehmensforschung am häufigsten verwandt. „Unternehmen“ ist hierbei jedoch als eine Handlung zu verstehen („was soll unternommen werden“), und nicht etwa als „Forschen in der Unternehmung“, was anhand des Begriffes naheliegender klingt. Diese Doppeldeutigkeit der Bezeichnung führt oft zu Mißverständnissen. Weiterhin sah man, bedingt durch die ungeschickte Übersetzung, die „Unternehmensforschung“ lange als eine Teildisziplin der Betriebswirtschaftslehre an und übersah somit die Wichtigkeit auch für andere Disziplinen. Zunehmende Bedeutung gewann diese Thematik, durch den Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung, auch für Mathematiker, Informatiker und Ingenieure. Die Übersetzung mit „Optimalplanung“ bzw. weitläufiger mit „Mathematische Methoden zur Entscheidungsvorbereitung“ scheint jedoch am aussagekräftigsten.

Im folgenden nun eine kleine Auswahl verschiedenster Definitionen von Operations Research:

#### Brüssel [Brs]:

Operations Research beinhaltet die Anwendung wissenschaftlicher Methoden analytischer, experimenteller und quantitativer Art, die es einer Unternehmensleitung ermöglichen sollen, für ihre Entscheidungen eine bessere Grundlage zu finden, indem sie die Auswirkungen der verschiedenen alternativen Möglichkeiten für das Unternehmen zu erkennen sucht.

#### Domschke/ Drexl [DoDr]

Operations Research dient der Vorbereitung einer Entscheidung im Rahmen eines Planungsprozesses. Dabei werden quantifizierbare Informationen (Daten), unter Einbeziehung eines oder mehrerer operational formulierbarer Ziele, verarbeitet.

### Stahlknecht [Sta]

Operations Research hat die Aufgabe, leitende Stellen in Wirtschaft und Verwaltung mit wissenschaftlich erarbeiteten, quantitativen Unterlagen zu versorgen, die diesen Stellen die Entscheidungen ermöglichen bzw. erleichtern.

### Müller-Merbach [MüMe]

Unter Operations Research versteht man die Anwendung mathematischer Methoden zur Vorbereitung optimaler Entscheidungen.

### Brockhaus-Lexikon

Operations Research ist die Anwendung mathematischer Methoden und Modelle zur Vorbereitung optimaler Entscheidungen.

### Seeling [Sel]

Operations Research ist die Anwendung von mathematischen Methoden zur Erarbeitung quantitativer Grundlagen für optimale Entscheidungen oder Vorhersagen.

### Franz [FrSch6]

Unter Operations Research subsumiert man alle wissenschaftlichen Methoden, Verfahren und Hilfsmittel mit der Aufgabe, den Anwendern zur Lösung von Planungs- und Koordinierungsproblemen, die sich als mathematisch berechenbare Auswahlprobleme bei mehreren Alternativen darstellen, quantitative Unterlagen zur Verfügung zu stellen.

Allen zuvor genannten Definitionen lassen sich die folgenden Charakteristika des Operations Research entnehmen [vgl. MüMe]:

- Entscheidungsvorbereitung
- Anstreben optimaler Entscheidungen
- Einsatz von mathematischen Methoden

Stahlknecht [Sta] wies bereits 1970 darauf hin, daß die Methoden des Operations Research keinesfalls Führungskräfte von Entscheidungen befreien können oder aber die Entscheidungen völlig dem Computer übertragen sollen. Aufgabe des Operations Research ist es, die verschiedenen Alternativen zum Lösen von Problemen zu formulieren und zu ordnen, also Entscheidungswege bereitzustellen. Die Entscheidung selbst ist dann eine Willensentscheidung, die nicht formalisiert werden kann, nur die Rechenmethoden des Lösungsweges, das heißt die Entscheidungsvorbereitung, kann formalisiert werden [FrSch6].

Im folgenden soll unter Operations Research allgemein die Anwendung mathematischer Methoden zur Entscheidungsvorbereitung verstanden werden. Die Grenze der Methoden, die dem Operations Research zuzurechnen sind, ist jedoch fließend. Neben den verbreiteten Standardverfahren des Operations Research sind daher unter der vorgenannten Definition noch eine Vielzahl anderer mathematischer Methoden zur Optimierung möglich.

## 1.4 Geschichtliche Entwicklung des Operations Research

Die Geschichte des Operations Research ist noch relativ jung. Kurz vor Beginn des zweiten Weltkrieges erkannte man in den USA und in England die Vorteile, die mathematische Methoden bei der Vorbereitung optimaler Entscheidungen bringen.

Es gibt jedoch eine große Anzahl von Optimalplanungen vor dieser Zeit. Plato (427-347 v.Chr.), Archimedes (285-212 v.Chr.), Bernoulli (1654-1704), Laplace (1749-1827), um nur einige zu nennen, haben bereits durch mathematische Analysen optimale Problemlösungen behandelt und damit einigen Einfluß auf die Entwicklung der Operations Research-Methoden genommen. Weiterhin sind das Warteschlangenmodell für das Kopenhagener Telefonnetz von Erlang (1909) und die Losgrößenformeln von Andler (1929) zu nennen [EII].

Auch im ersten Weltkrieg wurden bereits analytische Methoden zur Lösung strategischer Entscheidungen eingesetzt. Aber erst in der Zeit des zweiten Weltkrieges hat man die mathematischen Methoden zur Entscheidungsfindung bewußt eingesetzt, während die zuvor genannten Anwendungen vor dieser Zeit eher theoretischer Natur waren.

Während der Zeit des zweiten Weltkrieges begannen Wissenschaftler verschiedenster Fachrichtungen, kriegsstrategische Entscheidungen zu treffen, wie die optimale Zusammenstellung von Schiffskonvois [DoDr], günstigster Einsatz von Radargeräten, Jagdfliegern und Flakgeschützen zur Abwehr feindlicher Luftangriffe, Strategien zum Auffinden feindlicher U-Boote [Sta], optimale Arbeitsteilung beim Minenlegen und Treffgenauigkeit von Bombern [EII] etc., auf der Basis mathematischer Analysen. Der Krieg machte eine effektive Zuteilung der knappen Ressourcen auf die verschiedenen militärischen Operationen sowie auf die einzelnen Aktivitäten einer Operation dringend erforderlich [HiLi]. Zur Unterscheidung von anderen militärischen Methoden wurde der Name „Operational Research“ geprägt. Diese mehr oder weniger zufällig entstandene Bezeichnung wurde später als Sammelname für die Anwendung mathematischer und statistischer Analyseverfahren beibehalten.

Nach dem Ende des zweiten Weltkrieges erkannten die Wissenschaftler schnell, daß die Operations Research-Lösungsmethoden auch auf die Probleme industrieller Prozesse übertragen werden können, da die Zielsetzung nahezu identisch ist. In beiden Fällen muß aus einer Reihe von technischen und ökonomischen Bedingungen diejenige gewählt werden, die hinsichtlich eines bestimmten Zielkriteriums das optimale Ergebnis liefert [Sta]. Maßgeblich beeinflußt wurde die schnelle Entwicklung der Operations Research-Methoden durch die nachfolgend aufgelisteten Faktoren. Bedingt durch den industriellen Aufschwung nach dem Krieg begann auch die Industrie, sich für diese neuen Verfahren zu interessieren. Viele Wissenschaftler, die zum Teil auch schon während des Krieges in Operations Research-Teams gearbeitet hatten, vertieften nun ihre Forschungsaktivitäten auf Fragen des Operations Research, wodurch schnelle Fortschritte erzielt werden konnten. Ein weiterer Faktor, der maßgeblich für die schnelle Entwicklung verantwortlich zeichnete, war der rasante Fortschritt bei der Entwicklung der EDV. Arithmetische Berechnungen, die teilweise von Hand gar nicht möglich gewesen wären, konnten nun überhaupt erst oder aber sogar tausendfach schneller durchgeführt werden [HiLi].

1952 wurde in den USA die erste wissenschaftliche Gesellschaft des Operations Research gegründet, die ORSA (Operations Research Society of America). In der BRD wurden 1956/57 die

AKOR (Arbeitskreis Operational Research) und 1961 die DGU (Deutsche Gesellschaft für Unternehmensforschung) gegründet, die beide 1971 in die DGOR (Deutsche Gesellschaft für Operations Research) übergingen. 1998 entstand dann die GOR durch Verschmelzung der DGOR und der GMÖOR (Gesellschaft für Mathematik, Ökonomie und Operations Research). Die GOR hat sich die Förderung und Verbreitung des Operations Research (Unternehmensforschung) in der Wirtschaft, Verwaltung und Wissenschaft zum Ziel gesetzt. Die nationalen Gesellschaften des Operations Research schlossen sich zur IFORS (International Federations of Operations Research Societies) zusammen.

Von der Ingenieurwissenschaft in Deutschland wurden die Methoden des Operations Research weitgehend erst in den siebziger Jahren entdeckt und zur Lösung technischer Probleme eingesetzt.

## 1.5 Problemlösung und Klassifikation

„Die Probleme, die in der betrieblichen Praxis auf eine exakte Lösung warten, sind so zahlreich, daß in diesem Buch nur ein geringer Bruchteil davon skizziert werden kann“ [MüMe, 1973]. Dieses Zitat läßt sich (immer noch) uneingeschränkt auf den Bereich des Bauwesens und ebenso auf diese Arbeit übertragen.

Die Lösung eines Problems besteht im Ausgleich einer erkannten Soll-Ist-Differenz mit einem vorhandenen oder zu suchenden Lösungsoperator. Voraussetzung zur Lösung ist ein formaler, nachvollziehbarer, logischer Lösungsalgorithmus.

Damit die Operations Research-Methoden zur Lösung eingesetzt werden können, muß das vorliegende Problem einige Voraussetzungen erfüllen [Sel]:

- Es muß ein optimierbares Problem vorliegen
- Das Problem muß verbal beschreibbar sein
- Das Problem muß mathematisch formulierbar sein
- Das Ziel der Untersuchung muß formulierbar sein
- Das erforderliche Datenmaterial muß beschaffbar sein
- Ein notwendiger Lösungsoperator muß verfügbar sein
- Es müssen mehrere gegenläufige Einflußgrößen miteinander in Beziehung stehen

Die Lösung eines Problems resultiert aus der Möglichkeit der Optimierung. Unter Optimierung versteht man dabei die bestmögliche Gestaltung eines technischen und/oder wirtschaftlichen Prozesses, entsprechend den Zielvorgaben und Prozeßbedingungen (Relationen, Restriktionen etc.), durch entsprechende mathematische Untersuchungen [FrSch6].

Eine Optimierung kann nach verschiedenen Zielkriterien erfolgen:

- Wirtschaftlichkeit
- Zeit
- Umweltbedingungen
- Humanisierung
- Ressourcen (Mensch, Maschine, Material)

Bei der Optimierung unterscheidet man stets zwischen einem Suboptimum und einem Optimum (bestmögliche Prozeßgestaltung). Eine Optimierung setzt jedoch immer erst das Erkennen eines Verbesserungsbedarfes und eine bestimmte Zielsetzung voraus, d.h., das Bewußtsein eines Problems ist eine notwendige Voraussetzung zur Optimierung.

Im Rahmen einer mathematischen Optimierung ist eine simultane Optimierung mehrerer Kriterien zu vermeiden, da eine solche Forderung theoretisch und praktisch so gut wie nicht zu realisieren ist. Stahlknecht [Sta] bringt als Vergleich den Wunsch nach einem Auto, das seine maximale Geschwindigkeit bei minimalem Benzinverbrauch erreicht. Allenfalls kann man ein Auto konstruieren, das bei einer bestimmten Geschwindigkeit einen minimalen Benzinverbrauch aufweist oder aber bei gegebenem Benzinverbrauch eine maximale Geschwindigkeit erreicht. Besonders gründlicher Überlegung bedarf der Ansatz, mehrere einzelne Kriterien durch eine mathematische Vorschrift zu einem einzigen Entscheidungskriterium zu kombinieren, da in diesen Fällen möglicherweise sinnlose Entscheidungskriterien gebildet werden.

Planung und Optimierung im Sinne des Operations Research beschäftigt sich weitgehend mit der Lösung von Problemen. Der Ablauf der Problemlösung erfolgt in der Regel einheitlich nach folgendem Schema [FrSch6]:

1. Formulierung des Problems und Analyse des realen Systems
2. Konzipierung eines Sachmodells
3. Entwurf eines formalen Modells
4. Ermittlung einer Lösung für das formale Modell
5. Überprüfung des Modells und der daraus abgeleiteten Lösung auf Grundlage des realen Problems und der Zielfunktion
6. Praktische Einführung

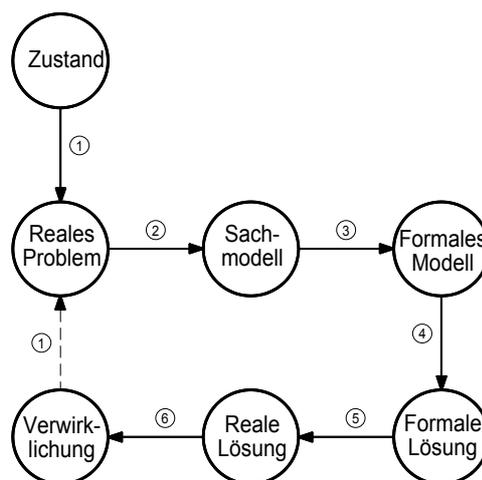


Abb. 4: Ablauf einer mathematischen Optimierung [FrSch6]

Eine Entscheidungsfindung impliziert das Vorhandensein eines Entscheidungsspielraumes. Da letzterer üblicherweise nicht unbegrenzt ist, gilt es, verschiedene Entscheidungsrestriktionen zu beachten. Eine bestimmte Entscheidung führt zu entsprechenden Veränderungen der Entscheidungsumgebung. Um unterschiedliche Entscheidungen bezüglich ihrer Effektivität vergleichen zu können, muß eine spezifische Zielsetzung festgelegt werden [Pap].

Die Faszination der Optimierungstheorie entspringt aus ihrer allgemeinen Anwendbarkeit. Ist eine Klasse von Optimierungsproblemen erst einmal formalisiert und mit geeigneten Mitteln lösbar, können die entsprechenden Algorithmen auf ein vielfältiges Spektrum spezifischer Gebiete angewandt werden. Die Optimierungsmethoden erweisen sich hierbei oft als Quellen künstlicher Intelligenz, da sie bei komplexen Problemstellungen imstande sind, Entscheidungen herauszuarbeiten, die die Entscheidungsfähigkeit menschlicher Experten übertreffen. Dieser

Ansatz ist bei den hoch gepriesenen Expertensystemen kaum möglich, da nach der Abarbeitung einer Reihe von „wenn ... dann ... sonst“ -Bedingungen bestenfalls das vom Entwickler hinterlegte Wissen empfohlen werden kann [Pap].

Menschliches und wirtschaftliches Handeln lassen sich als zielgerichteter Prozeß beschreiben, der in die Phasen Planung (Entscheidungsvorbereitung), Entscheidung, Durchführung und Kontrolle unterteilt werden kann. Planung kann als systematisch-methodische Vorgehensweise zur Analyse und Lösung von Problemen beschrieben werden. Die Alternative zur Planung kann dagegen immer nur die Improvisation sein (DoDr).

Planen ist keine mechanische Tätigkeit, sondern verlangt ein hohes Maß an Kreativität. Diese Kreativität kann durch Erfahrung sowohl verstärkt als auch vermindert werden. Eine einseitige Erfahrung verhindert oft den Einsatz bisher noch nicht verwendeter Methoden [MüMe].

### **Klassifikation von Ingenieurproblemen**

Eine einheitliche und allgemeingültige Klassifikation der Operations Research-Methoden existiert nicht. Generelle Unterscheidungskriterien sind der Charakter der Variablen, Nebenbedingungen und Zielfunktionen. In der Literatur sind generell, je nach Zielsetzung, unterschiedliche Ansätze zur Klassifizierung der Verfahren dargestellt. Durch eine Klassifikation kann die zur Ermittlung der Zielfunktion erforderliche Operations Research-Methode leichter ausgewählt werden. Im folgenden sollen ausgewählte Klassifikationen kurz vorgestellt werden, wobei die verschiedenen Möglichkeiten als gleichwertig zu betrachten sind.

Zur Darstellung der geeigneten Optimierungsmethoden sind drei Prinzipien der Gliederung möglich [Sel]:

- Gliederung nach den Entscheidungssituationen (Sicherheits-, Risiko- und Unsicherheitssituation (siehe auch [JuZi])
- Gliederung nach den Modellen und Methoden
- Gliederung nach den Anwendungsfällen bzw. den Problemen

<i>Entscheidungssituation</i>	<i>Beschreibung</i>
Sicherheit	Deterministische Parameter mit trivialen Entscheidungsmöglichkeiten
Risiko	Wahrscheinlichkeit ist bekannt, mit der die einzelnen Zustände eintreten
Unsicherheit	Wahrscheinlichkeit ist nicht bekannt, mit der die einzelnen Zustände eintreten

<i>Entscheidungsfällung bei Sicherheit</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lineare Optimierung</li> <li>• Transportproblem</li> <li>• Ganzzahlige Optimierung</li> <li>• Nichtlineare Optimierung</li> <li>• Entscheidungsbaumverfahren</li> </ul>
<i>Entscheidungsfällung unter Risiko</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wahrscheinlichkeitsrechnung</li> <li>• Statistik</li> <li>• Warteschlangentheorie</li> <li>• Entscheidungsfällung bei ein- und mehrstufigen Problemen</li> </ul>
<i>Entscheidungsfällung bei Unsicherheit und Konfliktsituation</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spieltheorie</li> <li>• Angebotsstrategie</li> <li>• Simulation</li> </ul>

Tab. 1: Gliederungsmöglichkeit nach den Entscheidungssituationen [JuZi]

<i>Allgemeine mathematische Methoden</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infinitesimalrechnung</li> <li>• Statistik</li> <li>• Wahrscheinlichkeitstheorie</li> </ul>
<i>Einstufige Lösungsverfahren</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lineare Optimierung</li> <li>• Nichtlineare Optimierung</li> </ul>
<i>Sequentielle Lösungsverfahren</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamische Optimierung</li> <li>• Branch &amp; Bound</li> <li>• Warteschlangentheorie</li> </ul>
<i>Simulation</i>	
<i>Spieltheorie</i>	
<i>Heuristische Verfahren</i>	

Tab. 2: Gliederungsmöglichkeit nach Modellen und Methoden [Sel]

Auch die diversen Probleme lassen sich nach verschiedenen Problemarten getrennt ordnen. So ordnen Jurecka und Zimmermann [JuZi] die Probleme nach folgendem System:

<i>Diskrete Probleme</i>	Es sind nur bestimmte Lösungsgrößen (z.B. ganze Zahlen) möglich
<i>Kontinuierliche Probleme</i>	Es sind alle Lösungswerte zugelassen (z.B. auch nicht ganze Zahlen)
<i>Deterministische Probleme</i>	Die Parameter der Funktionen sind feste Größen
<i>Stochastische Probleme</i>	Mindestens ein Parameter ist wahrscheinlichkeitsverteilt
<i>Lineare Probleme</i>	Die Funktionen der Zielfunktion und der Randbedingungen sind alle linear
<i>Nichtlineare Probleme</i>	In mindestens einer Funktion sind nichtlineare Parameter enthalten
<i>Statische Probleme</i>	Es wird keine oder nur eine Zeitperiode betrachtet
<i>Dynamische Probleme</i>	Es werden mehrere Zeitperioden betrachtet

Tab. 3: Gliederungsmöglichkeit der Probleme nach Jurecka/Zimmermann [JuZi]

Im Sinne der Entscheidungstheorie liegt bei deterministischen Problemen eine Sicherheitssituation vor und bei stochastischen Problemen eine Risikosituation.

Franz [FrSch6] ergänzt die Tab. 3 noch um die folgenden beiden Problemarten:

<i>Einstufige Probleme</i>	Es ist nur eine einmalige Entscheidung zur Lösung eines Problems zu betrachten
<i>Mehrstufige Probleme</i>	Dabei ist eine Folge von Entscheidungen zur Lösung eines Problems zu treffen

Im Rahmen der Tragwerksoptimierung ordnen Müller und Walther [MüWa] die Optimierungsprobleme nach folgenden Bezugssystemen:

<i>Informationsgehalt der Eingangsgrößen</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• deterministische Modelle</li> <li>• stochastische Modelle</li> <li>• heuristische Modelle</li> </ul>
<i>Zeitliche Entwicklung des Systems</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• statische Systeme</li> <li>• dynamische Systeme</li> </ul>
<i>Variationsmöglichkeiten des Entscheidungsvektors</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• diskrete Modelle</li> <li>• stetige Modelle</li> </ul>
<i>Mathematische Struktur</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lineare Modelle</li> <li>• nichtlineare Modelle</li> </ul>

Tab. 4: Gliederungsmöglichkeit der Probleme nach Müller/Walther [MüWa]

Es gibt noch viele weitere Möglichkeiten, Probleme zu klassifizieren (nach der Struktur der Probleme [Sel], nach dem Zeitbezug der Methoden [Sel], nach den Lösungsprinzipien [DoDr] etc.); die vorgestellte Auswahl zeigt daher nur einige der möglichen Klassifizierungen auf.

## 2 Lösungsverfahren des Operations Research

### 2.1 Einführung

Die Lösungsverfahren des Operations Research mit der größten Verbreitung sollen in diesem Kapitel kurz vorgestellt werden. Vertiefende Informationen zu den verschiedenen Methoden finden sich unter anderem in [DoDr], [EII], [HiLi], [JuZi], [MüMe], [Sel], [Sta].

Die verschiedenen Verfahren des Operations Research bauen auf klassischen mathematischen Verfahren auf und stehen in einer bestimmten Beziehung zueinander, d.h. sie setzen teilweise die Kenntnis anderer Verfahren voraus. In Abb. 5 ist der Zusammenhang zwischen den Methoden des Operations Research sowie der klassischen Mathematik dargestellt und in Abb. 6 die wesentlichen Beziehungen der Verfahren untereinander.

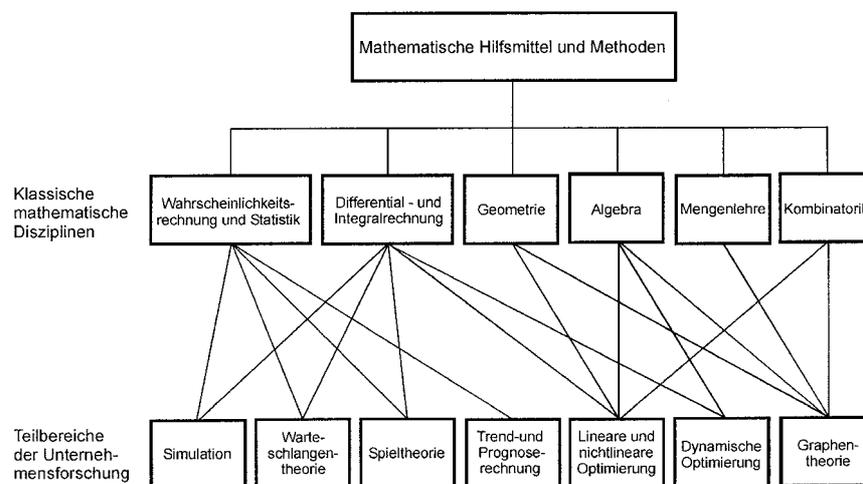


Abb. 5: Beziehungszusammenhang zwischen der klassischen Mathematik und verschiedenen Operations Research-Methoden

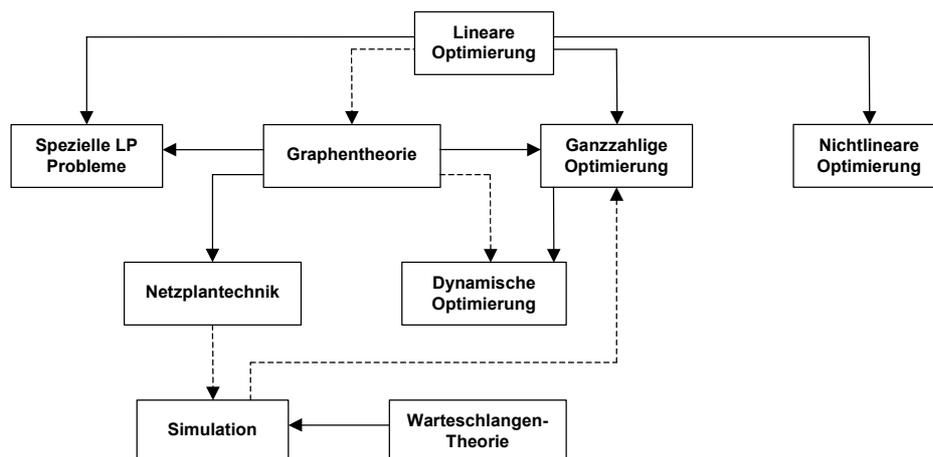


Abb. 6: Wesentliche Beziehungen und Abhängigkeiten [DoDr]

Bei den Operations Research-Lösungsverfahren wird grundsätzlich unterschieden zwischen analytischen und numerischen Methoden. Während bei den analytischen Methoden Gleichungen aufgestellt werden, aus denen eine geschlossene Lösungsfunktion entwickelt werden kann (einem methodischen Rechenverfahren folgend, z.B. lineare Optimierung, Infinitesimalrechnung), ist der Grundgedanke der numerischen Methoden die Variation der Versuchsbedingun-

gen sowie die Feststellung der daraus resultierenden Wirkungen, um aus den durch das Experiment gewonnenen Lösungen Rückschlüsse auf bestimmte Eigenschaften des Untersuchungssystems ziehen zu können (Probiervverfahren, z.B. Simulation, heuristische Lösungsverfahren).

Mit den Verfahren des Operations Research sind die unterschiedlichsten Probleme lösbar. Die verschiedenen Lösungsmethoden lassen sich entweder nach Problemklassen oder nach den hauptsächlich benutzten mathematischen Methoden gliedern. Bei Aufteilung nach Problemklassen kann man feststellen, daß sich Probleme mit verschiedener Struktur in mathematischer Schreibweise sehr ähnlich sind, während sich umgekehrt ein bestimmtes Problem mit verschiedenen mathematischen Methoden optimieren läßt. Diese Eigenschaft der Methoden, daß sich bestimmte Probleme mit verschiedenen Operations Research-Methoden lösen lassen, wird als Problemhomogenität bezeichnet. Die Eigenschaft, daß sich die meisten Operations Research-Methoden auch zur Lösung verschiedener Probleme einsetzen lassen, wird als Methodenhomogenität der Probleme bezeichnet [MüMe]. Zur Verdeutlichung dieser Eigenschaften sei beispielhaft auf Abb. 7 verwiesen.

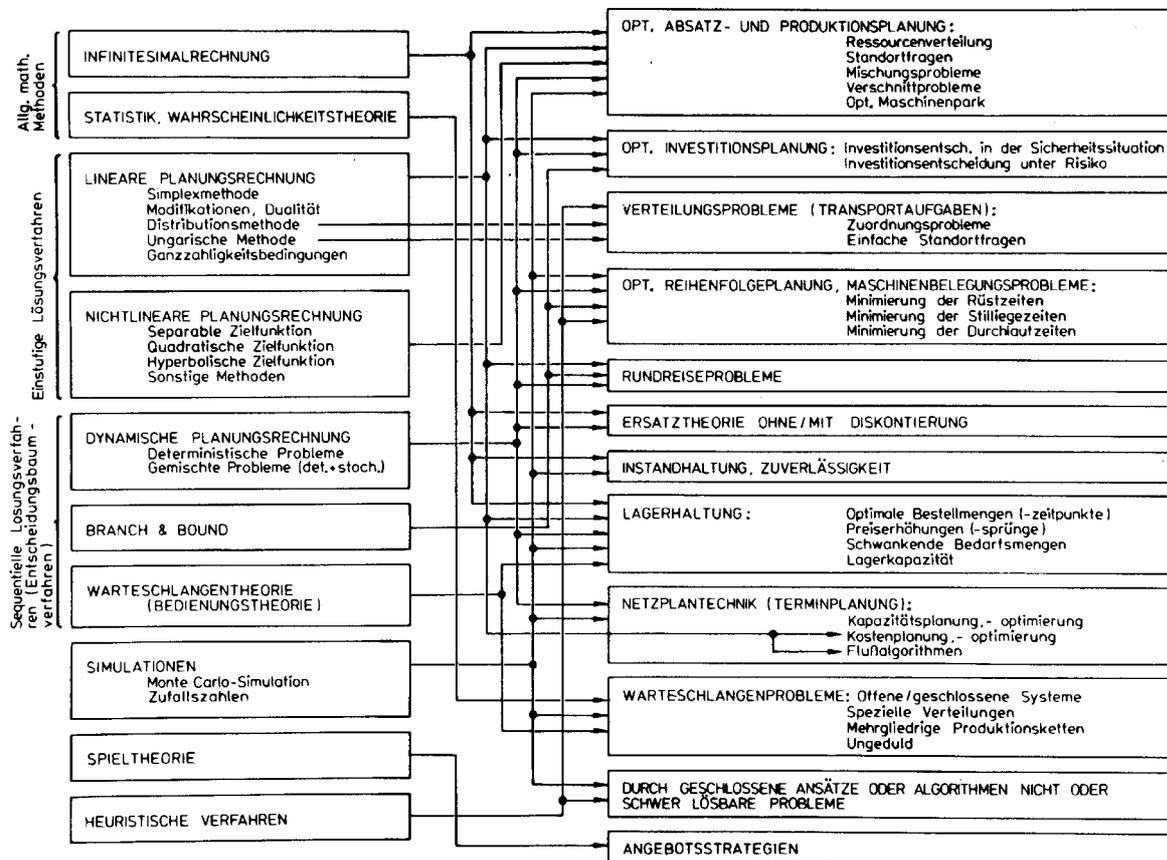


Abb. 7: Zuordnung von wichtigen Operations Research-Methoden zu Baubetriebsproblemen [Z-Se]

Für die in der Praxis auftretenden Probleme kann jedoch nur in seltenen Fällen ein geeignetes Operations Research-Verfahren gewählt werden, mit dem die Modellformulierung und alle anderen Schritte automatisiert ablaufen. Optimierung ist daher in den wenigsten Fällen eine mechanische Tätigkeit, sondern verlangt ein hohes Maß an Kreativität. Zuerst muß das zu lösende Problem erkannt werden, um dann unter den geeigneten Operations Research-Methoden die jeweils optimale auszuwählen, die anschließend unter Umständen noch an das Realproblem angepaßt werden muß. Diese Vorgehensweise erfordert eine fundierte Kenntnis der Methoden und eine ausreichende Erfahrung mit ihnen [MüMe].

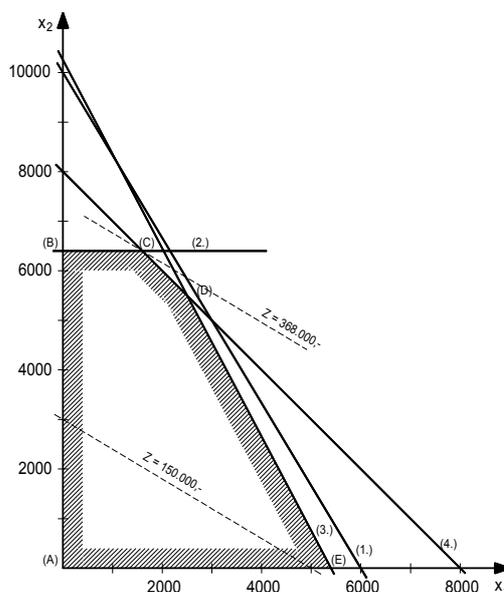
In den nachfolgenden Abschnitten sollen einige der am weitesten verbreiteten Operations Research-Verfahren kurz vorgestellt werden.

## 2.2 Lineare Optimierung

Die lineare Optimierung ist eine Rechentechnik zur Bestimmung einer linearen Zielfunktion, wobei einschränkende Bedingungen infolge linearer Gleichungen oder Ungleichungen zur Maximierung bzw. Minimierung der Zielfunktion erfüllt sein müssen. Als Zielfunktion wird dabei die Gleichung bezeichnet, die das Zielkriterium benennt. Ein mögliches Zielkriterium kann beispielsweise darin bestehen, einen maximalen Gewinn zu erwirtschaften oder aber minimale Kosten zu verursachen. Die übrigen Gleichungen und Ungleichungen des linearen Optimierungsmodells stellen die den Lösungsraum beschränkenden Nebenbedingungen oder Restriktionen dar. Eine Lösung der linearen Optimierungsaufgabe muß immer alle Nebenbedingungen erfüllen, was geometrisch bedeutet, daß die Lösung stets auf einer Ecke oder Kante des durch die Nebenbedingungen beschränkten Lösungsraumes liegt. Aus diesem Grund versagen hier die aus der Differentialrechnung bekannten Extremwertverfahren. Lineare Gleichungssysteme treten bei wirtschaftlichen und technischen Problemen häufig auf.

### 2.2.1 Graphisches Lösungsverfahren

Zweidimensionale lineare Probleme lassen sich gut graphisch darstellen und lösen, da sie noch anschaulich in einem Koordinatensystem dargestellt werden können. Durch die Nichtnegativitätsbedingungen wird der mögliche Lösungsraum auf den ersten (positiven) Quadranten beschränkt. Durch die aus dem Realproblem abgeleiteten Restriktionen wird der zulässige Lösungsraum sukzessive weiter beschnitten. Somit kann der zulässige Lösungsbereich im zweidimensionalen Koordinatensystem dargestellt werden, da die Restriktionen (formuliert als Ungleichungen) den Darstellungsbereich in einen zulässigen und einen unzulässigen Bereich einteilen. Die Zielfunktion  $Z$  wird in der Ebene durch Höhenlinien abgebildet, die Lage des Optimums kann direkt abgelesen werden. Alternativ können die einzelnen Ecken durch mathematische Schnittpunktermittlung der Geraden bestimmt werden (siehe Abb. 8).



Nichtnegativitätsbedingungen:

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

Nebenbedingungen:

$$5x_1 + 3x_2 \leq 30.000 \quad (1.)$$

$$x_2 \leq 6.400 \quad (2.)$$

$$1,9x_1 + x_2 \leq 10.260 \quad (3.)$$

$$x_1 + x_2 \leq 8.000 \quad (4.)$$

Zielfunktion

$$30x_1 + 50x_2 =! \max.$$

Lösung

$$x_1 = 1.600, x_2 = 6.400$$

$$\hookrightarrow Z = 48.000 + 320.000 = 368.000$$

Abb. 8: Graphische Lösung einer Maximierungsaufgabe mit zwei Variablen

## 2.2.2 Mathematisches Lösungsverfahren - Der Simplex-Algorithmus

Da in der Praxis häufig Probleme mit einer großen Anzahl an Variablen auftreten, ist es zu rechenintensiv und aufwendig, alle Eckpunkte eines linearen Gleichungssystems zu bestimmen und in die Zielfunktion einzusetzen. Das wohl bekannteste algebraische Lösungsverfahren ist die in den vierziger Jahren von George B. Dantzig entwickelte Simplex-Methode [Dan], die nach dem Prinzip des intelligenten Suchens vorgeht. Das mathematische Modell eines linearen Optimierungsproblems besteht immer aus drei Teilen:

- den *Nichtnegativitätsbedingungen* (Vorzeichenbedingungen)
- den im Problem enthaltenen linearen *Nebenbedingungen*
- der aus dem Realproblem entstandenen linearen *Zielfunktion*

Lineare Optimierungsprobleme liefern stets in endlich vielen Schritten ein exaktes, globales Optimum, relative Optima gibt es in der linearen Optimierung nicht. Im konstruktiven Ingenieurbau lassen sich jedoch nur wenige Probleme ohne stark vereinfachende Näherungen als lineare Optimierungsprobleme darstellen [Law].

## 2.3 Nichtlineare Optimierung

Während sich viele Probleme der Ökonomie noch auf lineare Optimierungsprobleme zurückführen lassen, sind die meisten technischen Probleme im allgemeinen nichtlinearer Natur. Dabei ist, im Gegensatz zur linearen Optimierung, mindestens die Zielfunktion und/oder mindestens eine der Nebenbedingungen eine nichtlineare Funktion (siehe auch Abb. 20, Seite 42); die Variablen müssen aber ebenfalls den Nichtnegativitätsbedingungen genügen.

Der Lösungsraum muß hier nicht unbedingt konvex, und er muß auch nicht zusammenhängend sein (siehe auch Kapitel 4.4.1). Falls Zielfunktion und zulässiger Bereich nichtkonvex sind, existieren mehrere lokale Optima innerhalb des zulässigen Bereichs (siehe auch Abb. 21, Seite 43). Weiterhin liegen bei einer nichtlinearen Zielfunktion die Lösungen nicht unbedingt auf den Ecken oder Kanten des zulässigen Bereiches. Sie können auch im Inneren des Lösungsraumes liegen, wodurch sich das Auffinden eines globalen Optimums somit als sehr schwierig erweist.

Zur Lösung nichtlinearer Probleme ist eine Vielzahl von Verfahren entwickelt worden. Neben speziellen Lösungsverfahren für besondere Problemtypen (z.B. quadratische Probleme), existieren auch Verfahren für allgemeinere Problemstellungen. Der folgende Überblick der Methoden ist Ellinger [EII] entnommen.

- Lagrangesche Multiplikatorenverfahren
- Kuhn-Tucker-Verfahren
- Gradientenverfahren
- Schnittebenenverfahren
- Hilfsfunktionsverfahren
- Heuristische Verfahren

Bei den nichtlinearen Problemen existiert jedoch keine allgemeine Lösungsmethode (wie beispielsweise der Simplex-Algorithmus bei Problemen der linearen Optimierung), und es ist zweifelhaft, ob es je möglich sein wird, solche zu finden.

## 2.4 Ganzzahlige Optimierung

Unter ganzzahliger Optimierung versteht man solche Verfahren der linearen oder nichtlinearen Optimierung, in denen alle Variablen ganzzahlige Werte annehmen müssen. Bei den gemischt-ganzzahligen müssen entsprechend nur einige der Variablen ganzzahlige Werte annehmen.

Diese Bedingung ist eine im Ingenieurbau häufig geforderte Eigenschaft, beispielsweise bei den Konstruktionsparametern (z.B. Höhe und Breite). Müller-Merbach [MüMe] teilt die Lösungsverfahren für Probleme mit Ganzzahligkeitsbedingung in folgende drei Gruppen ein:

- Schnittebenenverfahren
- Entscheidungsbaumverfahren
- heuristische Verfahren

Das Ergebnis der ganzzahligen Optimierung unterscheidet sich meist erheblich von dem durch einfaches Auf- und Abrunden gefundenen Ergebnis der nichtganzzahligen linearen Optimierung. Die Methoden der ganzzahligen Optimierung sind jedoch mit steigender Systemgröße oft nicht mehr effektiv einsetzbar.

## 2.5 Infinitesimalrechnung

Unter dem Oberbegriff Infinitesimalrechnung werden die Methoden der Differential- sowie der Integralrechnung subsumiert, wovon jedoch die Differentialrechnung im Rahmen der Optimierung die meisten Anwendungsmöglichkeiten aufweist. Diese Disziplin der Mathematik, die auf Leibniz (1646-1716) und Newton (1643-1727) zurückgeht, kann daher als typische Operations Research-Methode angesehen werden und findet in unzähligen Variationen Anwendung. Für die Differentialrechnung ist die Stetigkeit einer Funktion  $y = f(x)$  von besonderer Bedeutung, da nur stetige Funktionen differenzierbar sind.

Mit Hilfe der Differentialrechnung lassen sich unter anderem die Richtung der Tangente (Steigungsmaß) und Extremalwerte von einem beliebigen Funktionsgraphen bestimmen. Für die Extrempunkte ist es notwendig, daß an diesen Stellen das Steigungsmaß der Kurven gleich Null ist. Die Funktion des Steigungsmaßes einer Kurve wird als Ableitung der Funktion bezeichnet, das Steigungsmaß in einem festen Punkt analog dazu als Ableitung in dem entsprechenden Punkt [MüMe].

Gerade in betrieblichen Entscheidungssituationen gibt es eine große Zahl von Anwendungsmöglichkeiten für die Differentialrechnung. Die Gemeinsamkeit besteht darin, daß sich das Zielkriterium als stetige und differenzierbare Funktion formulieren läßt.

## 2.6 Graphentheorie und Netzplantechnik

Viele Probleme der verschiedenen Anwendungsgebiete lassen sich durch eine netzwerkartige Darstellung in ihrer Struktur als Modell abbilden. Solche Netzwerke, bestehend aus Knoten und verbindenden Strecken (Kanten), nennt man Graphen. Die Graphentheorie, als Teilgebiet der mathematischen Topologie, geht auf den ungarischen Mathematiker Dénes König zurück, der sich bereits 1935 mit Strukturen und Eigenschaften von Graphen beschäftigte; die betriebliche

Anwendung erfolgte allerdings erst viel später. In diesen Modellen werden die Elemente durch die Knoten dargestellt, während die Beziehungen zwischen den Elementen durch die Verbindungslinien (Kanten) repräsentiert werden. Besitzen diese Kanten eine Orientierung, werden sie als Pfeile bezeichnet und man spricht von einem gerichteten Graphen. Allein durch die graphische Anwendung werden viele Probleme anschaulicher, unabhängig davon, ob man die graphenspezifischen Methoden zur Problemlösung anwendet. Graphen sind oft so selbstverständlich, daß man sie überhaupt nicht mit diesem Begriff identifiziert. Netze von Straßen, Eisenbahnlinien, Fernsprech-, Strom-, Gas- und Wasserleitungen stellen Graphen dar, ohne daß sie üblicherweise als Graph bezeichnet werden.

Das Hauptanwendungsgebiet der Graphentheorie in der Praxis ist die Netzplantechnik, die erst gegen Ende der 50er Jahre in ihren Grundzügen entwickelt wurde [MüMe]. Die Methoden der Netzplantechnik werden jedoch als bekannt vorausgesetzt und daher hier nicht weiter behandelt. Weitere wichtige Anwendungsgebiete sind die Ermittlung optimaler (kürzester bzw. längster) Wege in Graphen, die Bestimmung maximaler Flüsse in Netzwerken sowie die Teilebedarfsrechnung (Gozinto-Graph).

## **2.7 Heuristische Verfahren**

Da sich viele mathematische Optimierungsmodelle meistens nur noch mit unverhältnismäßig hohem Aufwand exakt lösen lassen, kommen oftmals Näherungsverfahren, sogenannte heuristische Verfahren, zur Anwendung. Unter heuristischen Verfahren versteht man dabei bestimmte Vorgehensregeln zur Lösungsfindung, die hinsichtlich einer gegebenen Zielsetzung, unter Berücksichtigung der Restriktionen, vielversprechend erscheinen. Die auf diese Weise erzielte Lösung ist meist die mathematisch optimale, es fehlt jedoch der Beweis der Optimalität. Die verschiedenen heuristischen Verfahren sind jeweils auf die Lösung bestimmter Problemgruppen ausgerichtet und können auch nur in diesem Bereich sinnvoll eingesetzt werden.

Heuristische Verfahren werden vielfach exakten Optimierungsverfahren vorgeschaltet, um mit der Bestimmung einer guten Ausgangslösung den weiteren Rechenaufwand zu reduzieren. In diesem Zusammenhang bezeichnet man die heuristischen Verfahren oft auch als Eröffnungsverfahren.

## **2.8 Entscheidungsbaumverfahren**

Die Entscheidungsbaumverfahren gehören, im Gegensatz zu den heuristischen Verfahren, zu der Gruppe der exakten Verfahren. Während bei den heuristischen Verfahren in der Regel nur eine zulässige, hinreichend gute Lösung gefunden wird, ermittelt man mit den Entscheidungsbaumverfahren stets die optimale. Bei den Entscheidungsbaumverfahren werden, abgesehen von der Methode der vollständigen Enumeration, nur solche Varianten nicht weiter untersucht, die mit Sicherheit nicht zum Optimum führen.

Die Entscheidungsbaumverfahren umfassen folgende Methoden:

- vollständige Enumeration
- unvollständige Enumeration
  - Branch and Bound
  - begrenzte Enumeration
- dynamische Optimierung

### 2.8.1 Vollständige Enumeration

Die vollständige Enumeration wird auch als Methode des ungerichteten Suchens bezeichnet. Das systematische Durchsuchen des Variablenraumes ist eine einfache, aber äußerst aufwendige Methode, die aber für alle linearen und nichtlinearen Probleme geeignet ist und stets das globale Optimum findet. Zur Auswahl der besten Lösung müssen alle möglichen Ergebnisse unter der Voraussetzung, daß die Restriktionen erfüllt sind, berechnet werden. Zur Abgrenzung gegenüber der begrenzten Enumeration wird diese Methode auch als Vollenumeration bezeichnet. Charakteristisch für diese Methode ist, daß sie den Raum der Entscheidungsvariablen nicht kontinuierlich, sondern diskret durchsucht; bei kontinuierlichen Variablen ist deshalb nur eine Näherungslösung möglich.

### 2.8.2 Begrenzte Enumeration

Bei der begrenzten Enumeration werden solche Zweige des Enumerationsprozesses nicht weiter untersucht, die bereits ein schlechteres Ergebnis als das bislang beste aufweisen. Aus diesem Grund wird oftmals eine erste zulässige Lösung durch ein heuristisches Verfahren ermittelt. Die Güte der zu Anfang ermittelten heuristischen Lösung wirkt sich maßgebend auf die Anzahl der zu untersuchenden Alternativen aus. Je näher sich die Startlösung der optimalen Lösung nähert, um so mehr Zweige des Entscheidungsbaumes können von Anfang an ausgeschlossen werden und brauchen nicht weiter untersucht werden.

### 2.8.3 Branch & Bound-Verfahren

Das Branch & Bound-Verfahren ist ebenfalls eine Methode der unvollständigen Enumeration. Hierbei wird die Gesamtheit der zulässigen Lösungen in zwei oder mehrere disjunkte Mengen geteilt (Branching). Für jede dieser Teilmengen wird nun eine Grenze bestimmt (Bounding), unter bzw. über welcher der optimale Zielfunktionswert der jeweiligen Teilmenge liegen soll. Unzulässige und suboptimale Lösungen werden frühzeitig erkannt, der zugehörige Zweig des Entscheidungsbaumes wird abgeschnitten und somit nicht weiter verfolgt. Durch einen fortgesetzten Wechsel zwischen Verzweigung und Beschränkung wird das Optimum gefunden.

### 2.8.4 Dynamische Optimierung

Wenn sich ein Problem so in mehrere Stufen einteilen läßt, daß der Zustand am Beginn einer Stufe nur vom Zustand zu Beginn der vorhergehenden Stufe und den dort getroffenen Entscheidungen abhängt, spricht man von einem dynamischen Problem. Wesentlich ist dabei der stufenweise Aufbau der Gesamtentscheidungen aus den Einzelentscheidungen [EII].

Oft werden bei der dynamischen Optimierung auch zeitvariante Probleme betrachtet, die in einzelne Zeitabschnitte zerlegt werden können. Um für das Gesamtproblem ein Optimum zu erzie-

len, müssen für die einzelnen Stufen voneinander abhängige Entscheidungen getroffen werden. Im Gegensatz dazu existiert diese Zeitabhängigkeit der Parameter bei der statischen Optimierung nicht, da alle Daten und Zusammenhänge während des Betrachtungszeitraumes konstant bleiben. Im Ingenieurbereich findet die dynamische Optimierung u.a. bei der Bestellmengen- und Losgrößenplanung Anwendung.

## **2.9 Wahrscheinlichkeits- und Warteschlangentheorie**

Bei vielen Problemen der Praxis ist keine ausreichende Datenbasis bekannt. Es lassen sich vielmehr nur bestimmte Wahrscheinlichkeiten angeben, bei denen bestimmte Ereignisse eintreten. Eine gewisse Wahrscheinlichkeit bezeichnet also anteilig die Fälle, in denen ein bestimmtes Ereignis eintreten wird. Zufallsabhängige, wiederholbare Vorgänge werden dabei als Experiment bezeichnet, die Ergebnisse der Experimente als Ereignisse. Die Wahrscheinlichkeitstheorie beruht auf relativ einfachen Rechenregeln. Die verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Gleich-, Normal-, Gammaverteilung etc.) spielen eine zentrale Rolle, da sie angeben, wie sich die Wahrscheinlichkeiten auf die Ergebnisse eines Experimentes verteilen [MüMe]. Die Warteschlangentheorie ist ein wichtiges Teilgebiet der Wahrscheinlichkeitstheorie.

Warteschlangen treten genau dann auf, wenn abzufertigende Einheiten oder Bedienungsstellen unregelmäßige und teilweise unkontrollierbare Wartezeiten in Kauf nehmen müssen. Diese Warteschlangen werden mit Hilfe wahrscheinlichkeitstheoretischer Annahmen analysiert, um beispielsweise Engpässe oder durchschnittliche Wartezeiten zu ermitteln und damit eventuell verhindern zu können [EII]. Auch zur Optimierung von Mensch-Maschine-Systemen können sie eingesetzt werden.

## **2.10 Simulation**

Die bereits vorgestellten Operations Research-Methoden bieten oftmals nur für relativ einfach gelagerte Probleme die Möglichkeit, diese mathematisch exakt oder zumindest angenähert zu lösen. Kann für ein Optimierungsproblem kein analytischer Lösungsansatz gefunden werden, dessen Anwendung stets einer Simulation vorzuziehen ist, so wird man sich eines Simulationsmodells bedienen. Dafür wird die zu untersuchende Situation unter einer Reihe konkreter Annahmen in einem Modell nachgebildet. Daher kann die Simulation auch als zielgerichtetes Experimentieren an der Wirklichkeit nachgebildeter Modelle verstanden werden [MüMe]. Das Ergebnis der Simulation gilt dabei lediglich unter den zugrunde gelegten Eingangsvoraussetzungen. Demnach ist es erforderlich, die Anwendung der Simulation unter Variation der Eingangsvoraussetzungen mehrfach zu wiederholen, um abschließend verallgemeinerungsfähige Schlüsse ziehen zu können. Die eigentliche Optimierung beschränkt sich darauf, aus den simulierten Variationen die hinsichtlich eines bestimmten Zielkriteriums beste Lösung zu ermitteln. Für die praktische Durchführung von Simulationen ist eine entsprechende Hard- und Softwareunterstützung zwingend erforderlich.

Die Umsetzung eines Realproblems in ein Simulationsmodell lohnt sich im allgemeinen nur, wenn das entsprechende Problem häufiger auftritt oder es möglich ist, ähnliche Probleme ohne Änderung des Simulationsmodells im Programm zu lösen.

## 3 Operations Research im Bauwesen

### 3.1 Besonderheiten im Bauwesen

In allen Bereichen des Bauwesens, von der Planung bis zur Ausführung, müssen ständig verschiedene Alternativen gegeneinander abgewogen werden. Der Architekt versucht eine weitgehend optimale Raumaufteilung, bei einem möglichst ästhetischen Gesamteindruck des Bauwerkes, unter Berücksichtigung äußerer Einflüsse, zu erreichen. Im Anschluß daran muß der Tragwerksplaner aus einer Vielzahl möglicher Bauteileigenschaften und -abmessungen, unter Beachtung der Regelwerke und sonstiger Restriktionen, die geeigneten Bauteile, Verbindungen und Anschlüsse des Bauwerkes dimensionieren und aufeinander abstimmen. Auch die übrigen Fachplaner müssen diesbezüglich in vergleichbarer Weise agieren. Ist die Planung abgeschlossen, muß zuletzt auch die ausführende Bauunternehmung zwischen verschiedenen Bauverfahren, Möglichkeiten der Baustelleneinrichtung, der Bauabwicklung etc. wählen. Dabei geht es letztendlich in den meisten Fällen immer wieder darum, das bestmögliche Gesamtergebnis, bei einer zuvor festgelegten Zielsetzung, zu erreichen. Nach wie vor fehlt es jedoch an dafür geeigneten Planungs- und Entscheidungshilfen für den Architekt, Fachingenieur oder auch Bauleiter.

Durch den gezielten Einsatz der Methoden des Operations Research kann jedoch genau bei den zuvor beschriebenen Fragestellungen Abhilfe geschaffen werden. So kann unter anderem zu einer wesentlichen Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Bauwerken beigetragen werden, da eine Optimierung sowohl in der Tragwerksplanung als auch in der Arbeitsvorbereitung der Bauwerkserstellung erhebliche Einsparungen bei den Material- und Lohnkosten bewirkt. Für den Bereich der Baubetriebswirtschaft hat Seeling bereits zahlreiche Ansatzmöglichkeiten aufgezeigt ([Sel], [Z-Sel]); in dieser Arbeit soll jedoch verstärkt die Baubetriebstechnik im Vordergrund stehen.

Gerade in der Strukturoptimierung wurde im Zeitraum von 1970 bis 1990, bedingt durch die rasche Entwicklung der Rechenanlagen, intensiv geforscht, und es entstand eine Vielzahl von Veröffentlichungen. Viele veröffentlichte Verfahren liefern theoretisch anspruchsvolle und brauchbare Ansätze, sind aber in der täglichen Bauingenieurpraxis nur schwer umsetzbar. Hier sind Hilfsmittel gefordert, die schnell, möglichst sogar intuitiv, vom Anwender eingesetzt werden können.

Im Rahmen einer anstehenden Optimierung schlagen Dimitrov und Hoyer [DiHo] vor, Bauwerkstypen danach zu ordnen, welchen Anteil die Tragkonstruktion an der Erfüllung des Zweckes des Bauwerkes hat. Bei Brücken wäre dieser Anteil sehr hoch, bei einem Hotel eher niedriger. Je höher der Anteil der Tragkonstruktion nun ist, desto mehr ist das Optimum bei der Tragkonstruktion maßgebend für das Gesamtoptimum des Bauwerkes. Je weniger der Zweck des Bauwerkes darin besteht, Lasten abzutragen, desto störender kann es sich auswirken, wenn das Tragwerk nur mit Kriterien der Statik und Bauphysik optimiert wird.

Wenn man einen Vergleich zieht zwischen der technischen und biologischen Entwicklung, muß man erkennen, daß im Verlauf der Evolution in der Natur immer die Gesamtfunktion des Organismus optimiert wird, wobei hierbei zwischen einzelnen Teilfunktionen Kompromisse gebildet werden. In der Technik wird dagegen oft nur im Hinblick auf eine einzige, bestenfalls auf einige

wenige Zielfunktionen hin optimiert (z.B. minimales Gewicht, Fully stressed Design etc.). In welchen Ergebnissen diese kurzsichtige Denkweise im Extremum gipfeln kann, soll das folgende Beispiel verdeutlichen. Die technische Optimierung eines Bürogebäudes mit

- Stützen im Innenbereich (Vermeidung von Kältebrücken)
- Stützen im Feld (Trennung von Rohbau- und Ausbauraster)
- Breite des Raumes beträgt zwei Rasterfelder (Flächenrichtwert pro Besoldungsstufe)

führt als Ergebnis zu einer starken Beeinträchtigung, einer „Minimierung der Nutzung“, da nur zwei Stellmöglichkeiten des Arbeitsplatzes, beide zudem arbeitsphysiologisch negativ, möglich sind [BBKO].

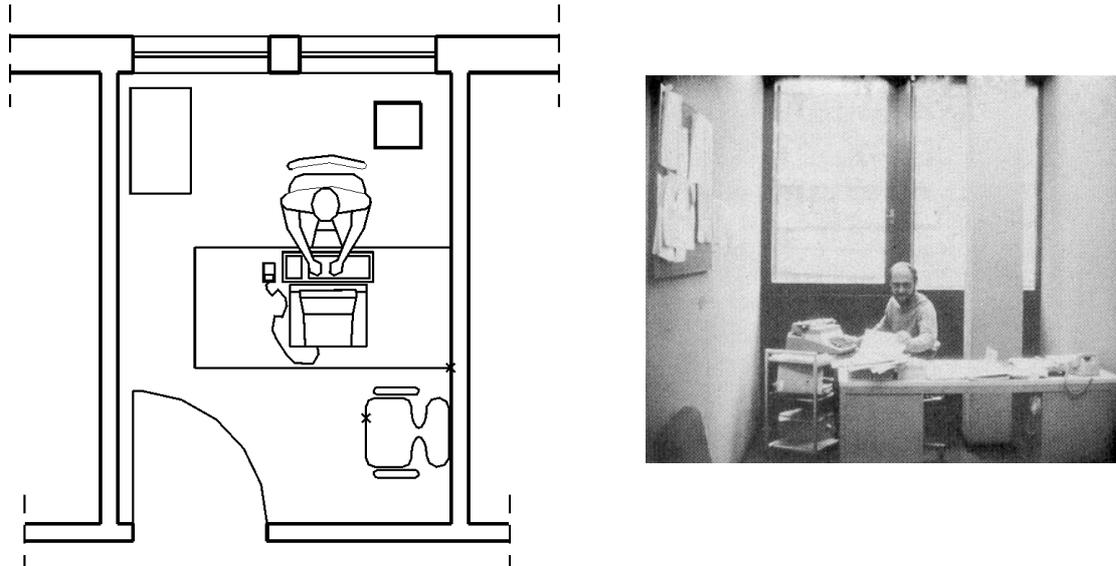


Abb. 9: Minimierung der Nutzung [BBKO]

Eine der wenigen Monographien, die sich direkt mit den Anwendungsmöglichkeiten der Methoden des Operations Research im Bauwesen beschäftigt, stammt von Jurecka und Zimmermann aus dem Jahre 1972. „Das Werk soll dem Anwender zeigen, was Operations Research kann und wo dessen Methoden zur Lösung der dem Ingenieur zufallenden Aufgaben verwendet werden können. Es sieht es nicht als eine Aufgabe an, den Leser zum perfekten Anwender von Methoden des Operations Research auszubilden“ [JuZi].

Daneben existieren noch einige Vorlesungsskripte aus dem Bauingenieurbereich, u.a.:

- Prof. Dr.-Ing. R. Seeling, RWTH Aachen: Systemtechnik und Optimalplanung
- Prof. Dr.-Ing. V. Franz, Universität Gh Kassel: Grundlagen der Optimierung
- Prof. Dr.-Ing. habil. M. Winkelmann, Fachhochschule Karlsruhe: Anwendung von Methoden des Operations Research im Bauwesen
- Prof. Dr.-Ing. R. Schach, TU Dresden: Operations Research

Weiterhin existiert eine große Anzahl von Zeitschriftenveröffentlichungen zu den unterschiedlichen Bereichen des Bauwesens, die jedoch weitgehend aus den 70er und 80er Jahren stammen (siehe Kapitel 7.3 und 7.4).

### 3.2 Gründe der unbefriedigenden Anwendungsbreite

Die Tatsache, daß eines der Standardwerke des Operations Research von Müller-Merbach [MüMe] auch im Jahr 2001 noch im 10. Nachdruck der 3. durchgesehenen Auflage von 1973 (sic!) aufgelegt wird, kann als weitere Bestätigung dafür gewertet werden, daß die Grundlagen des Operations Research als gesichert anzusehen sind. Um so erstaunlicher erscheint daher die Tatsache, daß die Einsatzmöglichkeiten der Methoden gerade im Bauingenieurwesen immer noch weitgehend unbekannt sind. Seeling [Z-Sel] erwähnt in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1978, daß die Methoden des Operations Research bereits seit einiger Zeit im Bauingenieurbereich Einzug gehalten haben und daß sie sich Schritt für Schritt neue Anwendungsgebiete des Bauwesens erobern werden. Obwohl bereits damals Anwendungsmöglichkeiten aus den verschiedenen Gebieten des Bauingenieurwesens bekannt waren, muß man rückblickend jedoch erkennen, daß auch heute noch die Methoden meist nur vereinzelt in bestimmten Nischenbereichen eingesetzt werden. Nach wie vor werden in vielen Bereichen des Bauingenieurwesens Probleme, ohne geeignete Optimierungsmethoden, intuitiv gelöst, obwohl hierfür geeignete Operations Research-Methoden existieren.

Die verschiedenen Autoren haben sich in der Vergangenheit bereits mit den weiterführenden Gründen wegen der unbefriedigenden Anwendungsbreite zur systematischen Anwendung von Optimierungsmethoden im Bauwesen beschäftigt. Im folgenden sollen diese Gründe, die sowohl bei Forschungen zur Tragwerksoptimierung als auch bei Forschungen bezüglich der Optimierung in der Bauwirtschaft entstanden sind, nochmals zusammengefaßt dargestellt werden.

Für Stahlknecht ([Sta], 1970) hat die Tatsache, daß Operations Research-Methoden häufig in der Praxis nicht eingesetzt werden, im wesentlichen folgende drei Gründe:

- Die Methoden sind in der Praxis zu wenig bekannt
- Die mit den Methoden vertrauten Spezialisten kennen oft die wirklichen Probleme nicht
- Operations Research-Methoden werden oftmals aufgrund von Vorurteilen abgelehnt

Seeling ([Sel], 1986) führt für den Bereich der Baubetriebswirtschaft folgende Gründe an:

- Das mit den eigentlichen Entscheidungsproblemen beauftragte Management hat nur selten Kenntnis von den Möglichkeiten der Modellbildung und Optimierung
- Das Beharrungsvermögen bei den herkömmlichen Gepflogenheiten ist ein schwerwiegendes Handicap für alle Arten von Neuerungen
- Es fehlen geeignete, gut geschulte Fachkräfte, die die Operations Research-Methoden in ihrer ganzen Breite und Tiefe kennen und anwenden können
- Operations Research-Methoden sind Entscheidungshilfen, die das Entscheiden objektivieren, keinesfalls jedoch den Entscheidenden ersetzen können
- Operations Research-Anwendung kostet, wie jede Form der Ingenieurarbeit, Geld, zunächst für den Aufbau einer Abteilung für Operations Research, später auch für deren laufende Unterhaltung

Figel ([Fig], 1988) nennt folgende Hauptgründe für die geringe Popularität im Maschinenbau:

- Komplexität der Optimierungsverfahren, die eine lange Einarbeitungszeit erfordern
- Schwierige Handhabung, die ein automatisches Optimieren oft verhindert
- Für jede Aufgabe neu erforderlicher hoher Programmieraufwand

Im Zuge der Optimierung von Konstruktionen nennt die Kammer der Technik der ehemaligen DDR ([KdT], 1973) folgende Gründe:

- Optimierungsmethoden liegen im allgemeinen nur für Spezialfälle vor, die meist eine lange Einarbeitungszeit und spezielle Kenntnisse erfordern
- Herkömmliche Entwurfsprogramme und Berechnungsverfahren führen zum Teil relativ schnell zu einer guten zulässigen Lösung
- Der Nutzen der Optimierung wird in den Algorithmen meist unzureichend (oder gar nicht) berücksichtigt

Für Pittioni ([Pit], 1977) sind, ebenfalls für den Bereich der Tragwerksplanung, zusätzlich folgende Gründe maßgebend:

- Viele theoretische Verfahren sind für einen Praxiseinsatz ungeeignet
- Die Anpassung an ein konkretes Anwendungsbeispiel ist oft nur mit einem erheblichen Aufwand möglich
- Viele Optimierungsverfahren erfordern, neben theoretischen Grundlagen, beträchtliche Erfahrungen in der Anwendungspraxis

Auch Stahlknecht [Sta] stellte bereits 1970 fest, daß die Methoden des Operations Research in der Theorie zwar sehr gut entwickelt sind, ihre Anwendung in der Praxis jedoch als ungenügend bezeichnet werden muß. Die Bemühungen sollten sich darauf konzentrieren, neue konkrete Anwendungen zu finden, da sich ansonsten die theoretischen Entwicklungen zunehmend von der Praxis entfernen. Weiterhin stellt Stahlknecht fest, daß im Rahmen des Operations Research in steigendem Maße Systeme untersucht werden, die in der Praxis überhaupt nicht vorkommen. Er bemängelt, daß diese Entfremdung des Operations Research von der Praxis dazu angetan ist, die Methoden der mathematischen Optimierung in Mißkredit zu bringen und damit ein weiteres Vordringen in die Praxis zu verhindern oder zumindest zu bremsen.

Für die Autoren der zuvor zitierten Ablehnungsgründe bezüglich der Anwendung von Operations Research-Methoden kann die Anwendungsbreite jedoch unter Beachtung bestimmter Kriterien geändert werden. Soll der Einsatz von Optimierungsverfahren in der Konstruktionspraxis forciert werden, sind die nachfolgend beschriebenen Punkte besonders zu berücksichtigen.

Figel [Fig, 1988]

- Um den Einarbeitungsaufwand zu verkürzen, müssen Entscheidungshilfen für die Anwendung von Optimierungsverfahren gegeben werden
- Die Handhabung von Optimierungsprogrammen muß so vereinfacht werden, daß eine direkte Anwendung bei der Konstruktionsarbeit am CAD-System möglich wird
- Der Programmieraufwand ist durch eine Integration von Optimierungsmethoden in CAD-Programme zu reduzieren

Kammer der Technik [KdT, 1973]:

- Die Optimierungsalgorithmen sind Bestandteile eines Programmpaketes, notwendige Anpassungen entfallen
- Vom Anwender wird keine Kenntnis des Algorithmus vorausgesetzt
- Die Erfahrungen des Ingenieurs sollten genutzt werden (z.B. bei der Angabe von Startlösungen und der Vorgabe eines Entscheidungsspielraumes)
- Der Anwender sollte nach eigenem Ermessen die Optimierung und deren Umfang festlegen können
- Die Algorithmen müssen gestatten, sowohl das globale Optimum zu finden als auch bei nicht nachweisbarer Effektivität, die weitere Rechnung abubrechen

Stahlknecht [Sta] stellt fest, daß es bei objektiver Betrachtungsweise nur drei Gründe geben dürfte, warum die Methoden des Operations Research nicht angewandt werden:

- Das Problem läßt sich nicht exakt beschreiben bzw. es ist nicht möglich, ein entsprechendes Modell zu formulieren
- Die für ein Operations Research-Modell erforderlichen Daten sind nicht vorhanden oder nicht verwendbar
- Der erforderliche Aufwand übersteigt bei weitem den zu erwartenden Vorteil

Für Pittioni [Pit] sollte die Auswahl der Optimierungsverfahren nach folgenden Gesichtspunkten erfolgen:

- Kein Risiko hoher Mißerfolgsquoten
- Verfahren soll unproblematisch sein, kein neues Rechenprogramm für jedes neue Problem
- Anforderungen an den Benutzer sollen die Formulierungen des mathematischen Modells nicht übersteigen

Seeling [Z-Sel] weist darauf hin, daß es in den nachfolgenden Anwendungsbereichen keine gleichwertigen Alternativen zu den Operations Research-Verfahren gibt:

- Häufig wiederkehrende Entscheidungsprobleme (Transport-, Zuweisungs-, Mischungsprobleme etc.)
- Seltener auftretende komplexe Entscheidungsprobleme (Stunden-, Touren-, Ersatzprobleme etc.)
- Zukunftsorientierte Entscheidungen mit mehreren Handlungsalternativen (Standortfragen, Investitionsentscheidungen, Verkaufsstrategien etc.)

### 3.3 Bedeutung der EDV- Unterstützung

#### 3.3.1 Einführung

Eine besondere Bedeutung bei der Verbreitung der Methoden des Operations Research kommt der Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung zu. „EDV-Anlagen sind immer dort besonders gut einsetzbar, wo Aufgaben von Menschen prinzipiell nicht gelöst werden können, weil der Rechenaufwand zu groß ist, oder wo Aufgaben sinnentleert immer wieder in identischer Form auftreten“ ([BBKO], 1977). Bereits 1989 wies Thierauf [Z-Thi] darauf hin, daß der Einsatz von Optimierungsmethoden im Ingenieurbau ganz entscheidend von der Verbreitung leistungsfähiger Computer abhängt. Die Leistungsfähigkeit heutiger Personalcomputer ist sehr gut und wächst auch weiterhin überproportional an. Durch die stetige Zunahme der Rechenleistung von EDV-Anlagen, verschiedene Quellen gehen heute von einer Verdoppelung der Leistung alle 2 Jahre aus, angefangen bei den früheren Großrechnern bis hin zu heutigen Personalcomputern, konnten so im Laufe der Zeit immer komplexere Probleme gelöst werden. Im Rahmen der internationalen Funkausstellung in Berlin, im August 2001, erwähnte ein Manager der Firma Intel, daß sich die Leistung der Prozessoren seit 1971 um das 40.000-fache gesteigert hat. So haben sich zwar die Anforderungen an die Methoden der mathematischen Optimierung nicht geändert, wohl aber die technischen Möglichkeiten, mit denen die Ergebnisse erreicht werden können. In Abb. 10 ist die Entwicklung der Rechenleistung, exemplarisch am Beispiel der Datenzentrale Schleswig-Holstein, dargestellt.

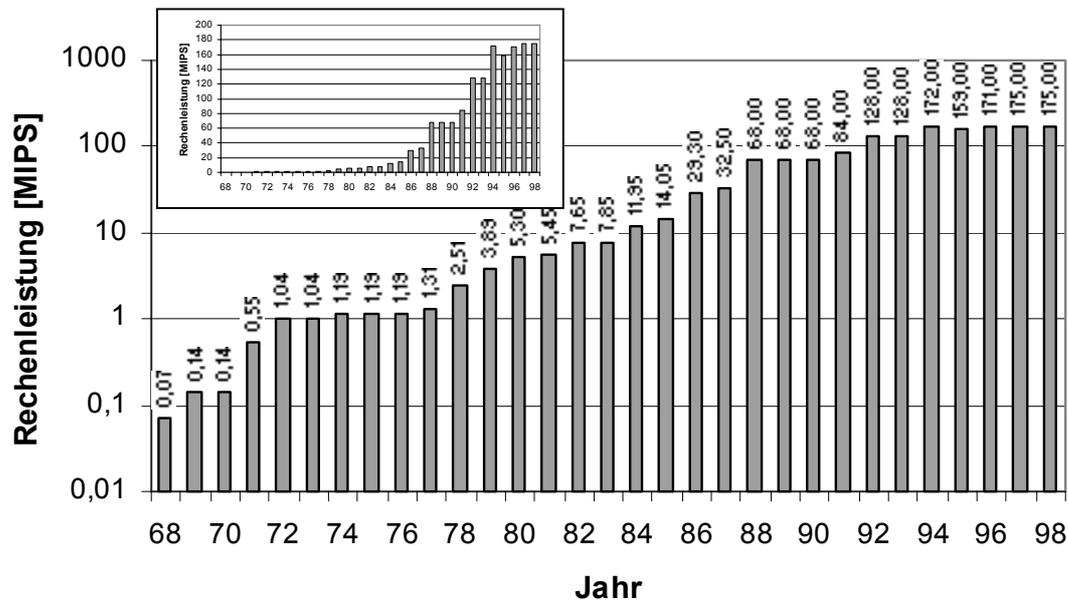


Abb. 10: Entwicklung der Rechenleistung (MIPS) am Beispiel der Datenzentrale Schleswig-Holstein; lineare (klein) und logarithmische Darstellung [Z-DaSH]

Die in der Praxis auftretenden Probleme liefern unter Umständen, trotz ihrer scheinbaren Einfachheit, oftmals eine so große Anzahl an möglichen Lösungen, daß der Einsatz einer geeigneten EDV-Unterstützung unverzichtbar wird. Obwohl heute, im Vergleich zu früher, wesentlich leistungsfähigere Rechner zur Verfügung stehen, ist nur ein Bruchteil der in der Praxis auftretenden Probleme zu lösen, da sie durch sehr viele Parameter beeinflusst werden und die Struktur der Probleme im allgemeinen zu komplex ist. Man ist deswegen darauf angewiesen, Strukturen zu vereinfachen, Beschränkungen in der Anzahl der in Betracht kommenden Parameter vorzunehmen, Teilprobleme mathematisch zu formulieren und anschließend zu untersuchen. Daher ist die Anwendung der Methoden des Operations Research bei weitem nicht nur ein mathematisch-rechentechnisches Problem, sondern vielmehr ein ingenieurmäßiges. Allein die Festlegung der Anzahl und Art der Variablen, der Restriktionen und Ziele, die in der Regel nur ein Ingenieur vornehmen kann, wird in den meisten Fällen schon über den möglichen Effekt der Anwendung der mathematischen Optimierung entscheiden [TLS].

Bei einem Großteil der in den 70er und 80er Jahren entstandenen Dissertationen, die sich mit Optimierungsfragen im Bauwesen beschäftigten, wurde zur Lösung in den meisten Fällen eine beschränkte Enumeration gewählt. In Abhängigkeit der Problemstellung und der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität variierte der herangezogene Algorithmus. Während bei diskreten Problemen auf diese Weise in der Regel eine gute Lösung gefunden wurde, konnte man die Güte der Optimierung kontinuierlicher Probleme schlecht abschätzen. Darüber hinaus mußten oftmals die Parameter beschränkt oder aber die Problemstellung in einer anderen Art und Weise vereinfacht werden. Bedingt durch die enorme Entwicklung der Leistungsfähigkeit heutiger Hardware kann entweder in vielen Fällen auf solche Vereinfachungen verzichtet werden oder aber es ist möglich, rechenintensivere und abweichende Algorithmen zu wählen. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, für eine gestellte Aufgabe sicher das globale Optimum zu finden. Nach wie vor kann der Rechner den Anwender nur unterstützen, ihm aber keinesfalls die Arbeit abnehmen. Die schwierige Aufgabe der Modellabstraktion und der Wahl einer geeigneten Optimierungsmethode liegt nach wie vor in den Händen des planenden Ingenieurs.

### 3.3.2 Graphische Unterstützung

Eine Vorstufe für eine softwareunterstützte Lösungsfindung kann durch entsprechend aufbereitete Bemessungsdiagramme erreicht werden. Hierdurch ist es möglich, dem Anwender eine Kombination aus manueller Methode und computergestützter Optimierung zur Verfügung zu stellen. Sie gibt dem Ingenieur die Möglichkeit, bei komplexen Berechnungen eine Optimierung mit logischen Entscheidungen zu kombinieren.

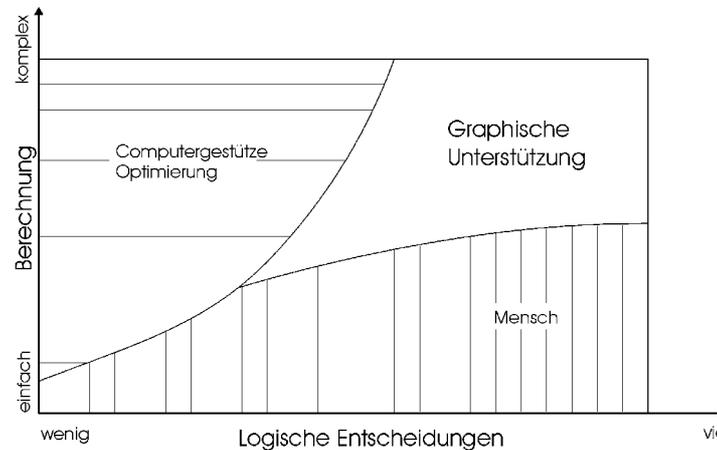


Abb. 11: Anwendungsraum für eine graphische Unterstützung [Rih]

So kann beispielsweise in der Tragwerksoptimierung der entwerfende Ingenieur aus einem bestimmten Profilsortiment (Holz, Stahl), anhand einer mit Hilfe der computergestützten Optimierung erstellten Graphik, unter Vorbestimmung eines oder mehrerer Querschnittswerte den einer bestimmten Zielfunktion zugehörigen optimalen Querschnitt ermitteln (siehe Abb. 51, Seite 87).

Durch entsprechend aufbereitete Bemessungsdiagramme/ -nomogramme kann das vorhandene Fachwissen auf einfache Weise den verschiedenen Anwendern zur Verfügung gestellt werden. In der Entwurfsphase eines Bauwerks entstehen häufig negative statisch-ökonomische Zwangspunkte dadurch, daß der Architekt die statische Zweckmäßigkeit unzureichend einschätzt. Abgesehen davon, daß das Wissen des Architekten über statisch-ökonomische Zusammenhänge in der Regel nicht ausreicht, sind exakte Vergleichsrechnungen, auch für den Bauingenieur, meist zu zeitaufwendig [Z-Thl]. Genau hier bieten sich graphisch aufbereitete Bemessungshilfen an, die mit einem geringen Aufwand an Zeit und Spezialwissen, eine hinreichend genaue Vorbemessung, unter Berücksichtigung der Kosten, erlauben (siehe auch Abb. 62, Seite 100 bzw. [Sas], [Z-Thl]).

### 3.3.3 Softwaremäßige Unterstützung

Will man die Akzeptanz für den Einsatz von Operations Research-Methoden erhöhen, scheint es unumgänglich, entsprechende Software-Tools zur Lösung baubetrieblicher sowie bautechnischer Probleme zur Verfügung zu stellen. Die Ingenieure in den Firmen vor Ort sowie die frisch ausgebildeten Ingenieure der Hochschulen sind mit den Lösungsmethoden des Operations Research nur in seltenen Fällen vertraut. Die meisten der zu bearbeitenden Aufträge sind terminlich und finanziell so knapp kalkuliert, daß nicht die Zeit vorhanden ist, sich in bislang unbekannte Lösungsmethoden einzuarbeiten. Diesbezügliche Voraussetzung ist weiterhin das

kannte Lösungsmethoden einzuarbeiten. Diesbezügliche Voraussetzung ist weiterhin das Bewußtsein zum Erkennen eines Problems und einer dafür geeigneten Optimierungsmethode.

Bei dieser Problematik können Software-Tools ansetzen, die zur Lösung bestimmter bauspezifischer Probleme konzipiert sind. Nach minimaler Einarbeitung können damit äußerst zügig optimierte Ergebnisse erzielt werden, da keine Kenntnis über den zugrunde liegenden Algorithmus vom Anwender verlangt wird. Weiterhin kann der Anwender durch den Einsatz von Software-Tools interaktiv erkennen, wie sich mögliche Entscheidungen auf den Zielfunktionswert und die sonstigen Nebenbedingungen auswirken.

Aus diesem Grund wurden zur weiterführenden Unterstützung der in dieser Arbeit vorgestellten Lösungsansätze im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Reihe von Software-Tools, basierend auf der Programmiersprache Visual Basic, entwickelt. Es handelt sich dabei im einzelnen um folgende Tools:

- OptimaB V 1.0  
(ökonomische Optimierung von Biegeträgern aus Holz, Stahl oder Stahlbeton)
- OptimaW V 2.0  
(Bestimmung geeigneter Wärmedämmmaßnahmen unter ökonomischen Gesichtspunkten)
- OptimaD V 1.2  
(ökonomische Optimierung von Pfettendächern und Holzbalkendecken)
- OptimaX V 1.1  
(Ermittlung einer opt. Zielfunktion bei frei formulierbaren Problemen unter Restriktionen, Lösung von Rundreiseproblemen)
- OptimaAV 1.1  
(Optimierung von linearen Problemen in der Arbeitsvorbereitung)
- Stochprojekt V 1.1  
(stochastische Bauablaufplanung durch Einsatz von Fuzzy-Logic-Methoden)

Die einzelnen Tools werden in den nachfolgenden Kapiteln, unter Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzmöglichkeiten, näher vorgestellt.

Bei der Recherche im Internet wurden auch einige Software-Tools gefunden, die ausgezeichnet zur Lösung von Problemen des Operations Research geeignet sind. Es handelt sich dabei aber meist um solche Tools, die streng am jeweiligen Algorithmus programmiert sind und daher die Kenntnis des verwendeten Algorithmus voraussetzen. Für mit den Grundlagen vertraute Anwender ergibt sich bei einem Einsatz jedoch eine enorme Zeitersparnis gegenüber einer manuellen Ermittlung der Ergebnisse.

Besonders hervorzuheben sind hier die Programme der Reihe „Tutorial Environment for Operations Research“ des Fachgebietes für Operations Research am Institut für Betriebswirtschaftslehre der TU-Darmstadt. Unter der Leitung von Prof. Dr. W. Domschke sind dort folgende kostenlose Programme als „Lernsoftware“ entstanden:

- Babe 1.0 (Lösung gemischt-ganzzahliger linearer Optimierungsprobl. mit Hilfe von B&B)
- Grappa 1.0 (Darstellung und Lösung von Problemen aus der Graphentheorie)
- Lino 2.1 (Modellierung und Lösung linearer Optimierungsprobleme)
- Tabs 1.0 (Veranschaulichung der Vorgehensweise von Tabu Search)
- TSP 1.0 (Modellierung und Lösung von Traveling Salesman- Problemen)
- Wasi 1.0 (Simulation von Warteschlangensystemen)

Die Programmteile können einzeln heruntergeladen werden und sind frei für die nichtkommerzielle Anwendung (<http://www.bwl.tu-darmstadt.de/bwl3/welcome.htm>).

An der TU-Chemnitz ist ebenfalls ein Programmpaket zur Entscheidungsunterstützung bei betriebswirtschaftlichen Problemen entstanden. PLT (Produktion-Lager-Transport) besteht aus mehreren voneinander unabhängigen Programmen, von denen jedes zur Lösung von Aufgaben aus einem bestimmten Problembereich verwendet werden kann. Die gegenwärtige Version von PLT besteht aus den Programmteilen Engpass, JobShop, LosSplit, Statistik, Fließband, Kalender, Netzplan, Transport, FlowShop, Lager, OpenShop, Gozinto, Layout und Simplex. Das Programmpaket kann nun auch von extern heruntergeladen werden (<http://www.tu-chemnitz.de/~luta/plt>).

Auch zur Durchführung einer netzbasierten Simulation stehen eine nahezu unüberschaubare Menge geeigneter Petri-Netz-Tools auf dem Markt zur Verfügung, unter anderem eine sehr große Anzahl von Tools, die kostenlos für eine nichtkommerzielle Anwendung erhältlich sind. Zur Analyse dieser Vielfalt wurden in der Vergangenheit bereits mehrere vergleichende Studien erstellt und vorzugsweise im Internet veröffentlicht. Solche Studien befinden sich beispielsweise auf folgenden Internet-Seiten:

- <http://www.dsi.unimi.it/Users/Tesi/trompede/petri/> (ca. 62 Tools)
- <http://www.daimi.au.dk/PetriNets/tools/quick.html> (ca. 48 Tools)
- <http://home.arcor-online.de/wolf.garbe/petrisoft.html> (ca. 98 Tools)

Weitere Informationen zu diesen Studien sind in Kapitel 5.4.7 enthalten.

### 3.3.4 Internetpräsentation

Das Internet, als Medium zur Informationsbeschaffung, erlangt zunehmend an Bedeutung. Mit Hilfe der verschiedenen Suchmaschinen ist man heute in der Lage, schnell und unkompliziert Informationen über die unterschiedlichen Themenbereiche zu sichten und auszuwerten. Einer der Hauptgründe für die unbefriedigende Anwendungsbreite der Methoden des Operations Research liegt in dem geringen Bekanntheitsgrad der verwendeten Algorithmen sowie der möglichen Einsatzgebiete. Durch eine entsprechende Präsentation im Internet könnte damit Abhilfe geschaffen werden. Aus diesem Grund wurde ein Domainname beantragt, der sowohl den Begriff des Operations Research als auch den Bezug zum Bauwesen beinhalten und möglichst kurz und einprägsam sein sollte. Daher wurde der Name „[www.OR-Bau.de](http://www.OR-Bau.de)“ gewählt. Unter dieser Adresse entsteht eine Seite, die die Möglichkeiten der Theorie mit der Praxis verbinden soll. Es ist beabsichtigt die Ergebnisse erfolgreich durchgeführter Forschungen in der Tragwerksplanung sowie der Arbeitsvorbereitung vorzustellen. Es soll die Möglichkeit geboten werden, entstandene Softwareprogramme direkt von der Adresse zu downloaden, um auf diesem Weg die Programme sukzessive verbessern zu können. Des weiteren soll hier ein Forum entstehen, über das interessierte Anwender miteinander kommunizieren und Erfahrungen austauschen können, aber auch eine Liste mit empfehlenswerter Literatur soll vorgehalten werden. Die Seite wird so aufgebaut, daß sie von den gängigsten Suchmaschinen gefunden und mit den markanten Suchbegriffen in Verbindung gebracht werden kann.

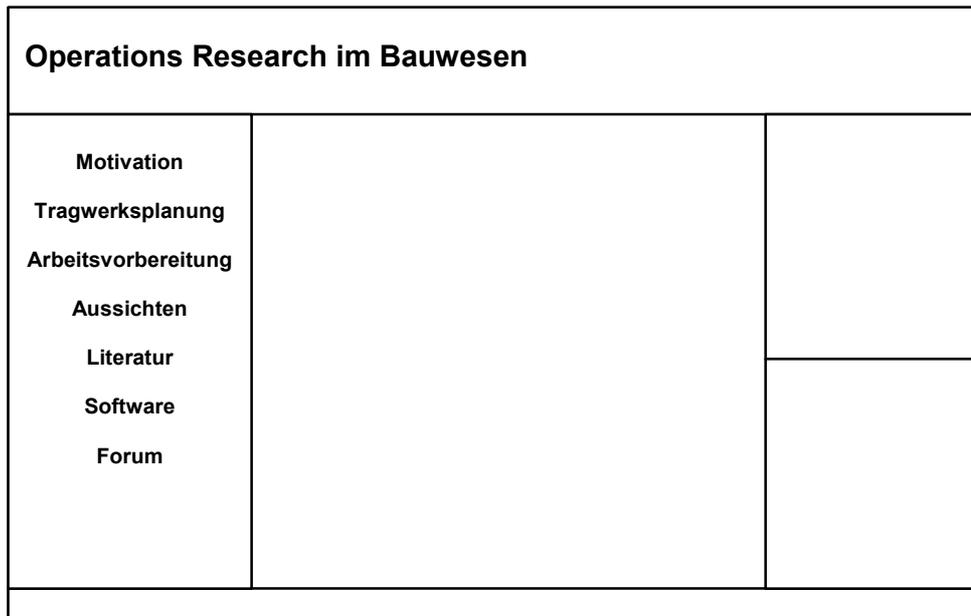


Abb. 12: Ideenskizze zur Aufteilung der Homepage „www.OR-Bau.de“

Auf der linken Seite der Homepage sollen die verschiedenen Rubriken ausgewählt werden können, die dann im mittleren Bereich näher erläutert sind und weiter vertieft werden können. Auf der rechten Seite soll der vorgestellte Sachverhalt durch Bilder, Diagramme und Texte zusätzlich ergänzt werden. Diese Homepage wird im Frühjahr 2002 fertig gestellt sein und dann, unter der vorgenannten Internetadresse, zur Verfügung stehen.

## 4 Einsatz von Operations Research-Methoden in der Gebäudekonstruktion unter besonderer Berücksichtigung der Kosten

### 4.1 Einführung

Da die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion eine immer wichtigere Rolle spielt, muß in der Tragwerksplanung einer ökonomisch optimalen Bemessung verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt werden. Eine statische Berechnung alleine, auch eine einmalige komplette Durchrechnung im bautechnischen und wirtschaftlichen Sinne, ergibt oftmals noch keine ökonomisch sinnvolle Konstruktion. Vielfach sind mehrere divergierende Parameter zur Verwirklichung einer optimalen Konstruktion zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit, eine wirtschaftliche Konstruktion zu erarbeiten, ist der Einsatz von Operations Research-Methoden in der Planung.

Gerade bei biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen stehen dem Ingenieur durch die Wahl der Konstruktionsbreite und -höhe theoretisch unendlich viele Lösungsvarianten zur Verfügung. Diese verschiedenen Alternativen besitzen zwar oft annähernd die gleiche Tragfähigkeit, unterscheiden sich aber grundlegend in ihren Kostenaufwendungen für Material und Arbeitszeit. Auch Skelettbauten, gleichgültig ob aus Stahlbeton, Stahl oder Holz, sind durch die unterschiedlichen Rastermöglichkeiten und Spannweiten sehr gut für eine Optimierung geeignet. Das Ziel der wirtschaftlichen Optimierung in der Konstruktion liegt also weitgehend in der Minimierung der Kosten, mathematisch dargestellt als Zielfunktion des Optimierungsprozesses. Das Ergebnis der Zielfunktion hängt jeweils von den Konstruktionsvariablen (Trägerhöhe, -breite, Spannweite etc.) und den sogenannten technologischen bzw. ökonomischen Parametern (Material- und Arbeitszeitaufwand für Beton, Schalung, Stahl etc.) ab.

Mit zunehmender Verbreitung der Methoden des Operations Research seit den 70er Jahren, auch bedingt durch die Entwicklung stetig leistungsfähigerer Rechenanlagen, erkannte man schnell die sich durch eine mathematische Optimierung ergebenden Möglichkeiten für die Tragwerksplanung und Konstruktion. Die Euphorie der ersten Jahre über die neuen Methoden hat sich jedoch schnell gelegt und einer gedämpften Erwartung Platz gemacht [DiHo, 1982]. Parameter, wie Behaglichkeit, Schönheit und Zweckmäßigkeit, können nur schwer optimiert werden, und eine rein funktional optimierte beste Lösung ist nicht unbedingt die bequemste (siehe auch Abb. 9, Seite 22). Des weiteren kann eine frühzeitige Abstimmung unter den Planern über die Einflüsse in allen Teilaspekten ein Gesamtoptimum ergeben, das nicht mit der Summe aller Teiloptima identisch ist. Dennoch bieten die Methoden des Operations Research gerade unter den heutigen Bedingungen hochleistungsfähiger Personalcomputer eine Fülle von Ansatzmöglichkeiten zur Optimierung in der Tragwerksplanung und Konstruktion. Einige wenige davon sollen in diesem Kapitel exemplarisch aufgezeigt werden.

„Unter Optimierung versteht man die bestmögliche Gestaltung eines technischen und/oder wirtschaftlichen Prozesses entsprechend der Zielvorgaben und der Prozeßbedingungen (Relationen, Randbedingungen, Störgrößen etc.) durch entsprechende mathematische Untersuchungen“ [FrSch6]. Die durch eine Optimierung erzielbaren Material- bzw. Kosteneinsparungen sind, in Anbetracht des erheblichen Anteiles der Baukosten an den Investitionskosten, von erstrangiger volkswirtschaftlicher Bedeutung [Hup].

Optimieren ist ein Zentralbegriff, wenn es um das Konstruieren geht. Huber [Z-Hub] stellte bereits 1968 die konstruktive Optimierung, also die Realisierung eines Bauvorhabens zu minimalen Kosten, als neues Teilgebiet des Operations Research vor. Um so mehr verwundert es, daß mathematische Optimierungsverfahren bisher nicht stärker bei der Konstruktion eingesetzt werden (vgl. auch [Fig, 1988]). Das liegt teilweise sicher daran, daß die meisten technischen Probleme im allgemeinen nichtlinearer Natur sind und für diese Probleme kein allgemeingültiger Lösungsalgorithmus existiert. Im konstruktiven Ingenieurbau versteht man unter mathematischer Optimierung gewöhnlich nur die Volumen- oder Gewichtsminimierung von Tragwerken. Dabei gelten die Querschnittsabmessungen und/oder Geometrieparameter als Variablen und die Spannungen, einzelne Knotenverformungen etc. als Nebenbedingungen. Diese aus der Luftfahrttechnik stammende Sichtweise macht die Optimierung jedoch in vielen Fällen wenig praxistauglich. Zum ersten deshalb, weil die Querschnittsabmessungen in der Regel nur diskrete Werte annehmen können und zum zweiten, weil das Konstruktionsgewicht nur bei geeigneten konstruktiven Nebenbedingungen die tatsächlichen Kosten eines Tragwerkes mitbestimmt [Law].

Die Optimierung eines gestellten Problems beruht immer auf einer zuvor gewählten Zielsetzung. Daher darf man nie von optimalen Lösungen sprechen, sondern nur von solchen, die hinsichtlich einer gewissen Zielsetzung optimal sind. Der Begriff des Optimums ist stets nur von relativer Bedeutung, da er abhängig ist von der Definition des Ziels der Optimierung [Zho].

Vereinfacht läßt sich eine Optimierungsaufgabe wie folgt formulieren: „Suche in einem gegebenen Lösungsraum unter Berücksichtigung bestimmter Restriktionen den optimalen Wert einer gewählten Zielfunktion.“

Abschließendes Zitat von Tauber [Tau]:

„So war zu Beginn des Jahrhunderts zumeist diejenige Lösung die wirtschaftlichste, welche den geringsten Materialbedarf hatte. Heute läßt sich das nicht mehr so pauschal feststellen, mit steigenden Personalkosten und zunehmendem Geräteeinsatz wird das Finden eines Kostenminimums schwieriger, weil nunmehr neben der Berechnung des Tragwerks auch Belange der Herstellung berücksichtigt werden müssen.“

## **4.2 Historische Entwicklung der Tragwerksoptimierung**

Die Optimierung von Tragwerken und Konstruktionen wurde von den früheren Baumeistern schon lange vor der Entwicklung analytischer Beschreibungen des mechanischen Verhaltens von Material und Struktur (also vor ca. 350 Jahren) praktiziert. Beispiele dafür sind unter anderem die Konstruktionen von Steinbrücken in Bogenform, welche von Römern und Chinesen bereits lange vor Christi Geburt errichtet wurden. Durch die Bogenform der Konstruktion erfolgt die Lastabtragung ausschließlich durch eine Druckbeanspruchung des Baustoffes. Dadurch wird eine optimale Ausnutzung des Materials Stein erreicht, das bekanntlich eine hohe Druck-, aber nur eine geringe Zugbeanspruchbarkeit aufweist [Zho].

In der wahrscheinlich ersten bekannten Arbeit zur Idee des optimalen Entwerfens versucht Galileo Galilei bereits im Jahre 1638, einen Material- und gewichtsminimierten Kragbalken zu entwerfen. Seine Annahme, daß die Spannungen in jedem Querschnitt des Balkens konstant sein müssen, entspricht einem ideal plastischen Werkstoffverhalten des Materials. Als Ergebnis sei-

ner Untersuchungen ergab sich die optimale Höhe, wenn der Kragbalken eine parabolische Form annimmt (siehe Abb. 13, rechts).

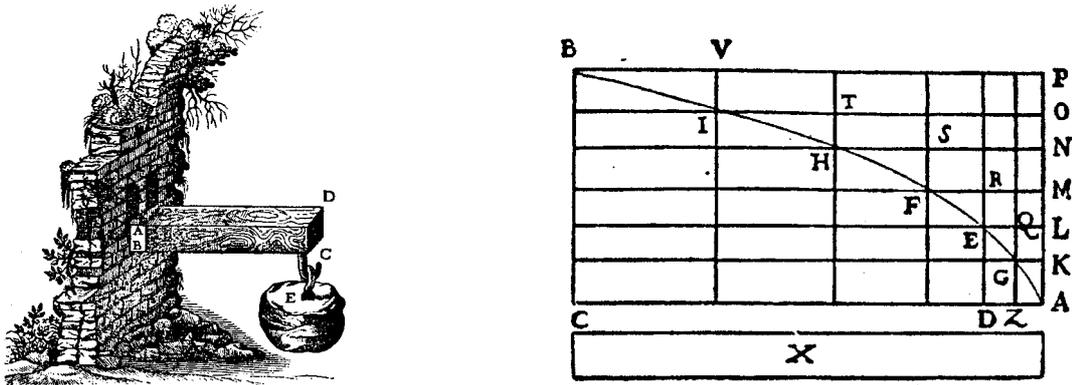


Abb. 13: Kragbalken sowie zugehörige optimale Höhe nach Galilei, 1638 [Zho]

Ein weiteres Beispiel für Ergebnisse in der Entwicklung von Optimierungsversuchen sind die sogenannten Michell-Fachwerke, die von Michell (1904) auf Basis eines Theorems von Maxwell (1872) entwickelt wurden. Die Ergebnisse lieferten jedoch für die Konstruktionspraxis unbrauchbare Fachwerkformen (Tropfenfachwerke). Michell-Fachwerke sind vollbeanspruchte Systeme, da bezüglich einer konstanten Verzerrung eine konstante Spannung in allen Elementen besteht, die als zulässige Spannung betrachtet werden kann. Dies hatte einen Einfluß auf die numerischen Algorithmen, die auf dem Konzept des vollbeanspruchten Systems (*fully stressed design*) basieren, d.h. das Tragwerk wird so ausgelegt, daß jedes Tragelement für wenigstens einen Lastfall eine maximal erlaubte Spannungsgrenze erreicht. Die genannten Verfahren umgehen jedoch das allgemeine Optimierungsproblem, da weder ein direktes Kriterium, nach dem optimiert werden soll, gegeben oder aber die Vorgabe bestimmter Größen des Tragsystems (z. B. geometrische Systemwerte etc.) erforderlich ist.

Die rasante Expansion der Luftfahrtindustrie während des zweiten Weltkrieges und die damit verbundene Forderung an hoch beanspruchbare und gleichzeitig leichtgewichtige Konstruktionen hat die Entwicklung von Optimierungsmethoden für die Gewichtsminimierung stark vorangetrieben [Law]. In den letzten Jahrzehnten entwickelte sich das Gebiet der Strukturoptimierung sehr schnell, wobei sich die Forschungsaktivitäten in zwei unabhängigen Richtungen verzweigten [Zho]:

- Numerische Methoden zur Optimierung der realen komplexen Konstruktion
- Analytische Methoden auf Basis klassischer Techniken (Energieprinzipien, Variationsrechnung etc.)

Diese Entwicklungen wurden in erster Linie durch die Verbreitung und Verbesserung von Datenverarbeitungsanlagen möglich. Die numerischen Berechnungen, die bis dahin nur mit viel Mühe und Zeitaufwand durchführbar waren, konnten nun beschleunigt werden [Les].

Lösungsversuche scheiterten allerdings sehr oft immer wieder daran, daß geeignete Lösungsmethoden fehlten [Har]. Man versuchte daher, solche Probleme, für die keine geeigneten Lösungsmethoden existierten, so abzuwandeln, daß bekannte mathematische Verfahren verwendet werden konnten oder man versuchte, sie derart umzuformulieren, daß spezielle Ersatzprobleme entstanden. Diese zwangsweise Abwandlung eines Problems führte jedoch oftmals für die Praxis zu irrelevanten Ergebnissen (siehe Abb. 19, S. 39).

### 4.3 Entwurf von Konstruktionen

Eine zunehmende internationale Konkurrenz sowie finanzielle Beschränkungen seitens des Bauherren halten den entwerfenden Ingenieur zu einer äußerst wirtschaftlichen Bemessung an. Dies ist jedoch oft nicht möglich, da zum einen die Termine in engen Grenzen liegen und auch die Vergütung eine intensivere Auseinandersetzung mit den gestellten Problemen oftmals nicht zuläßt, zum anderen sind in den meisten Fällen keine geeigneten Planungshilfen vorhanden, die den Ingenieur bei der Durchführung einer wirtschaftlichen Optimierung unterstützen.

Bei dem Entwerfen einer Konstruktion werden üblicherweise zunächst die Konstruktionsabmessungen, das verwendete Material und die Geometrie durch den Architekten festgelegt. Anschließend überprüft der Tragwerksplaner die Standsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit und dimensioniert die einzelnen Tragglieder. Meist existiert, trotz aller Einschränkungen, eine große Anzahl von Entwurfslösungen für eine Konstruktion, die alle ebenso ihre statische Funktion erfüllen, jedoch zu völlig unterschiedlichen Kosten realisiert werden können. Bestenfalls wird durch mehrmaliges, jedoch relativ ungerichtetes Probieren versucht, eine wirtschaftlichere Lösung zu finden, die aber trotz allen Bemühungen von der kostenoptimalen Lösung weit entfernt sein kann.

Bei dem herkömmlichen Entwerfen wird also eine brauchbare Lösung durch Probieren und Ausscheiden von unbrauchbaren Lösungen gefunden. In Anlehnung an Abb. 14 wird bestenfalls versucht, durch relativ zufällige Variation der Konstruktionsparameter eine Verbesserung in der Bewertung zu erreichen. Da sich die einzelnen Parameter gegenseitig beeinflussen, kann auf diese Weise allenfalls ein lokales Optimum gefunden werden. Durch den Einfluß geeigneter Optimierungsverfahren ist es jedoch möglich, die einzelnen „Stellschrauben“ der Konstruktionsparameter, unter Berücksichtigung einer vorbestimmten Zielsetzung, gezielt zu verändern, um so eine optimale Produktbewertung, im günstigsten Fall das globale Optimum, zu erreichen.

Das optimale Entwerfen steht jedoch keinesfalls im Widerspruch zum herkömmlichen, es erweitert das Entwerfen nur zu einer perfekten Tätigkeit [Les]. Eine methodische Optimierung setzt jedoch anfangs immer erst das Erkennen eines Verbesserungsbedarfes und eine bestimmte Zielsetzung voraus. Einige der möglichen mathematischen Optimierungsverfahren werden im Kapitel 4.4 kurz vorgestellt.

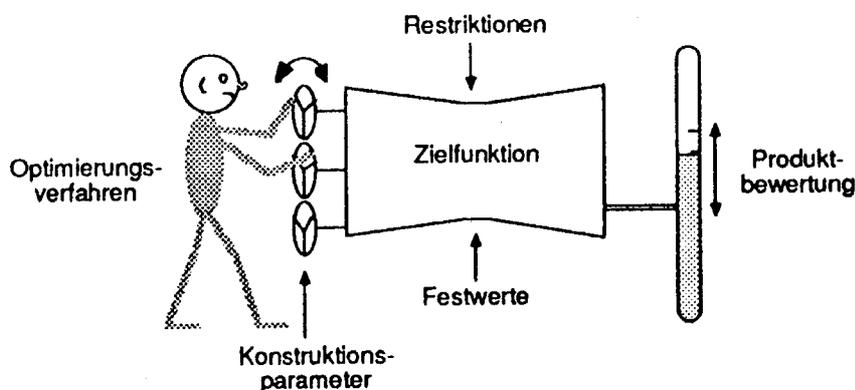


Abb. 14: Anschauliches Schema für ein Optimierungssystem [Fig]

### 4.3.1 Optimales Entwerfen von Baukonstruktionen

Der Entwurf von Konstruktionen kann definiert werden als eine Wahl des Materials, der Geometrie, der Oberflächenbeschaffenheit etc., durch die ausdrücklich, also explizit, an die Konstruktion gestellten, aber auch implizit enthaltenen funktionellen Aufgaben erfüllt werden sollen. Implizit enthaltene Aufgaben sind Bedingungen technologischer, festigkeitsmäßiger oder auch betriebstechnischer Art, die konstruktiv berücksichtigt werden müssen. Dabei ist die Wahl nicht willkürlich, sondern muß in einem begrenzten Bereich erfolgen [Les].

Aus ökonomischen Gründen und im Hinblick auf einen immer stärker werdenden Konkurrenzdruck wird es zunehmend dringlicher, neue Verfahren anzuwenden, um hinsichtlich der Kosten nicht nur eine gute, sondern die beste, d.h. die „optimale“ Konstruktion zu finden [Lip].

Um eine bestmögliche Wahl zu treffen, orientiert der planende Ingenieur seine Entscheidungen an bestimmten „Optimalitätskriterien“, die zum einen von seiner Erfahrung und Intuition, zum anderen von externen Beschränkungen (Vorschriften, maximalen Baukosten etc.) abhängen. Die verschiedenen Bedingungen und Anforderungen schränken zwar die Anzahl der möglichen Entwurflösungen ein, doch existiert insgesamt eine unüberschaubare Anzahl möglicher Konstruktionen, die alle die explizit und implizit gestellten Bedingungen erfüllen und somit als zulässig anzusehen sind. Eine wichtige Aufgabe des planenden Ingenieurs liegt darin, aus diesen zulässigen Lösungen eine auszuwählen, die nicht nur allen technischen Anforderungen genügt, sondern eventuell noch weiteren Gesichtspunkten, wie z.B. ökonomischen Aspekten, entspricht. So durchläuft jede Konstruktion einen iterativen Prozeß, der genau dann abgebrochen wird, wenn ein zufriedenstellendes Ergebnis vorliegt. Aber trotz einer sehr großen Erfahrung des planenden Ingenieurs läßt sich bei komplexen Zusammenhängen nur schwerlich eine sehr gute Lösung erreichen. Deshalb ist als Hilfsmittel der Einsatz rechnerunterstützter Optimierungsmethoden zwingend notwendig [Aig].

Dieser iterative Entwurfsprozeß eines Bauteils im konstruktiven Ingenieurbau läßt sich vereinfacht anhand der Abb. 15 verdeutlichen.

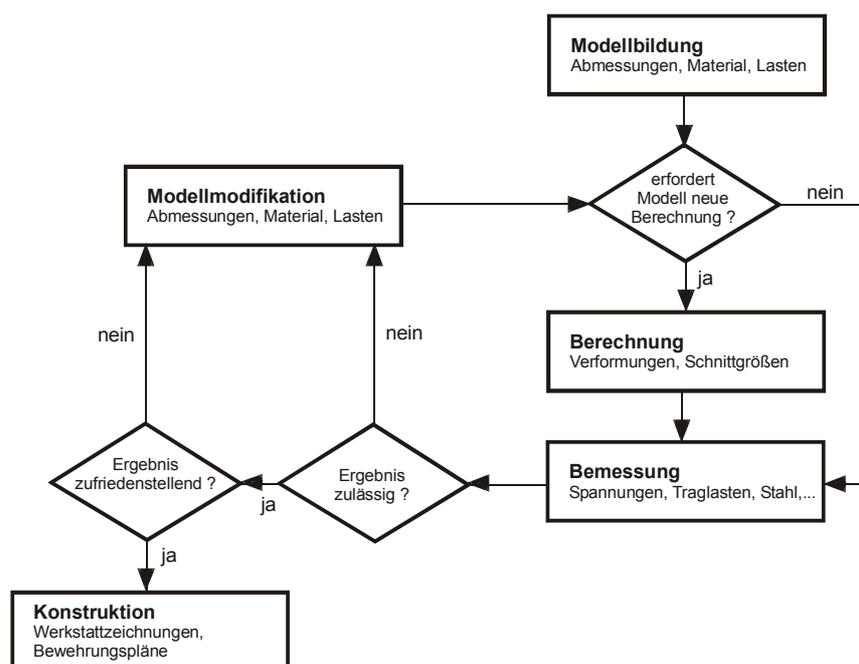


Abb. 15: Entwurfsprozeß im konstruktiven Ingenieurbau [Law]

Der Entwurfsprozeß eines Tragwerksystems gliedert sich dagegen in die folgenden hierarchisch aufgebauten Phasen [Zho]:

- Entwurfskonzept (Auswahl von Typ, Material, Topologie und Geometrie)
- Konstruktionsbemessung
- Entwurf der Konstruktionsdetails

Diese drei Phasen sind eng miteinander verknüpft und stehen in einer klaren hierarchischen Ordnung des dargestellten Entwurfsprozesses. Die Modifizierung eines Entwurfs ruft fast immer Veränderungen in den nachfolgenden Entwurfsphasen hervor. Umgekehrt erfordern Veränderungen einer nachfolgenden Phase aber nicht notwendigerweise Veränderungen in den vorausgehenden Phasen. Die hierarchisch niederen Entwurfsphasen bieten jedoch die Information über die Qualität und Effizienz des in der höheren Entwurfsphase entstandenen Entwurfs (z.B. die Auslastung eines Trägers) und zeigen auch Anforderungen und Hinweise für Verbesserungen des Entwurfs in hierarchisch höhergestellten Phasen auf. Stellt man beispielsweise in der Bemessungsphase fest, daß die Konstruktion eine zu große Verformung unter Windlast aufweist, so muß der entwerfende Ingenieur evtl. ein komplett neues Aussteifungskonzept entwickeln, anstatt lediglich die geometrischen Dimensionen der auszusteienden Bauteile zu erhöhen. Der hier dargestellte Entwurfsprozeß ist jedoch in den traditionellen Verfahren, auch unter Einsatz computergestützter Berechnungsprogramme, sehr arbeitsintensiv [Zho]. Daher können die während dieses Entwurfsprozesses gewonnenen Rückflüsse auf den Gesamtentwurf oft nicht ausreichend berücksichtigt werden. Das erschwert oftmals dem entwerfenden Ingenieur die Aufgabe, die beste Lösung hinsichtlich eines bestimmten Kriteriums zu finden. Die letztendlich vom Konstrukteur getroffene Entscheidung ist, da im allgemeinen von subjektiver Natur, nicht immer ausreichend.

#### 4.3.2 Optimierungsstufen von Baukonstruktionen

Für die Optimierung von Konstruktionen im Bauwesen sind die folgenden drei Stufen wesentlich, die zum besseren Verständnis anhand eines Beispielen aus dem Brückenbau dargestellt werden [Tha].

##### Stufe 1: Bauwerkssystem

Bei allen komplexen Optimierungsaufgaben erhält man eine allgemeine Optimierungsvariante des Objektes, z.B. Optimierung eines Herstellungsprozesses, eines Systems von Bauwerken oder der Produktionsorganisation. Als Lösungen sind dann beispielsweise die Optima der Gesamtkosten des Herstellungsprozesses oder der Materialaufwendungen für ein Bauwerk anzusehen (Bauwerksgestalt etc.).

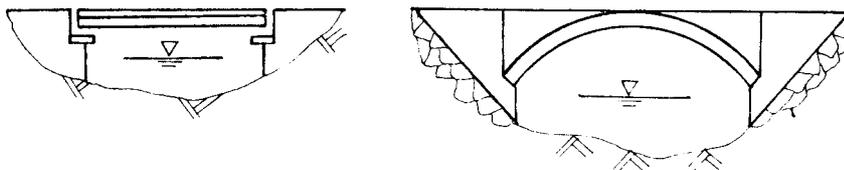


Abb. 16: Stufe 1 - Bauwerkssystem [Tha]

## Stufe 2: Bauwerk

Durch Optimierung einzelner Bauwerke bekommt man die Hauptabmessungen, Gesamtkosten und anderes mehr (Materialauswahl, Elementanordnung etc.).

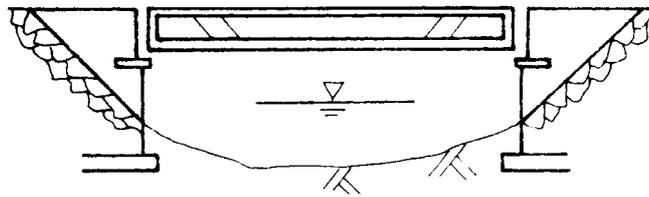


Abb. 17: Stufe 2 - Bauwerk [Tha]

## Stufe 3: Bauelement

Bei der optimalen Gestaltung der Elemente des Bauwerkes erhält man detaillierte Abmessungen und damit die genauen Materialaufwendungen und/oder Kosten (Dimensionierung, Bemessung etc.).

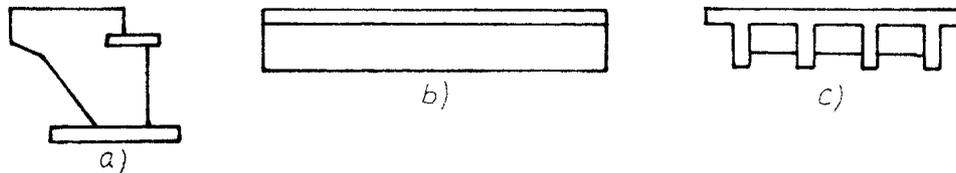


Abb. 18: Stufe 3 - Bauelemente Widerlager und Brückenträger [Tha]

Die praktische Realisierung der 1. und 2. Stufe ist eine schwierige Aufgabe, da besonders im Bauwesen die entsprechenden Daten sehr umfangreich und formal kaum handhabbar sind; lediglich die 3. Stufe findet bei den praktischen Anwendungen der Optimierung starke Beachtung. Damit wird eine solche Optimierungsaufgabe im ganzen teilweise unlösbar und erfüllt nicht mehr alle praktischen Anforderungen. Letztendlich ist insbesondere bei der 1. Stufe eine hohe Anzahl ingenieurtechnischer Erfahrungen einzubeziehen, die nur schwer mathematisch erfassbar und daher eher zur Umsetzung in ein Expertensystem prädestiniert sind.

Auch Dimitrov und Heuer [DiHo] stellen den Optimierungsprozeß von Baukonstruktionen als 3-stufigen Prozeß dar, der, abgesehen von der Reihenfolge, mit den Stufen von Thanh [Tha] identisch ist.

### 1. Stufe der Optimierung: Suche nach den besten Querschnittsabmessungen

Lasten, Form sowie Beanspruchungen sind gegeben und Randbedingungen durch Normen festgelegt; die Zahl der Variablen ist gering.

### 2. Stufe der Optimierung: Optimierung der Tragwerksgeometrie

Bestimmung der Lage der Knoten von Fachwerken bei gegebenen Auflagern und Lastangriffspunkten (Fachwerk soll nicht nur mathematisch optimal, sondern auch herstellbar sein); Zahl der Variablen ist hoch.

### 3. Stufe der Optimierung: Suche nach der Art des Tragwerkes und Materials

Ablauf der Optimierung kann nicht mehr vollständig automatisiert werden, der Mensch muß bestimmte Teile des Algorithmus übernehmen. Die Startlösung wird durch einen erfahrenen Konstrukteur gegeben, die Optimierung erfolgt durch den Computer.

#### 4.3.3 Vorherrschende Optimierungsansätze

Im Falle einer Optimierung sollte für den konstruktiven Ingenieur die Minimierung der Kosten die zentrale Rolle spielen. Dieses geschieht in der Regel über die Optimierung des Gesamtgewichtes, stellvertretend durch die minimierte Querschnittsgröße der erforderlichen Bauteile. In diesem Fall stellt die Zielfunktion rein physikalische Bezugsgrößen dar, und die Bedeutung der optimalen Lösung ist relativ einfach nachzuvollziehen.

Anders bei der Berücksichtigung der Kosten in der Zielfunktion. Da die Kosten in den wenigsten Fällen nur vom Materialvolumen abhängen, sondern oft auch vom Arbeitsaufwand und von Konstruktionsdetails, wie beispielsweise den Anschlüssen im Holz- oder Stahlbau, treten Probleme auf, die viel schwerer oder aber überhaupt nicht zu quantifizieren sind. Bisher berücksichtigen die Optimierungsaufgaben für Baukonstruktionen in der Regel zwei Arten von Zielfunktionen; zum einen die des minimalen Materialaufwands (Gewicht, Volumen) bzw. anderer physikalisch orientierter Bewertungskriterien und zum anderen die der minimalen Gesamtkosten. Sowohl für die Aufgabenstellung als auch für die Optimierungsberechnung ist die Zielfunktion der minimalen Kosten weitaus schwieriger als für die des minimalen Materialaufwandes.

Aus diesem Grund galt es in der Vergangenheit, als Zielfunktion fast aller Berechnungs- und Bemessungsverfahren das Gewicht des zu optimierenden Tragwerkes zu minimieren. Dieses Vorgehen bedingte andererseits, auf eine spannungsmäßig maximale Auslastung zu achten. Diese Vorgehensweise wird auch als Algorithmus der vollbeanspruchten Konstruktion bezeichnet. Lawo [Law] sieht sogar den Grund für den weitgehenden Verzicht von Optimierungsmethoden in der Tragwerksplanung darin, daß nicht gewichtsoptimale, sondern oft kostenoptimale Strukturen angestrebt würden, wobei die Festlegung einer Kostenstruktur gerade im konstruktiven Ingenieurbau aber sehr komplex und vielfach stark geprägt von wirtschaftlichen bzw. unternehmerischen Randbedingungen sei. Im Laufe der Jahre haben sich jedoch einige Probleme in Verbindung mit vollbeanspruchten Konstruktionen herauskristallisiert [KdT]:

- Es existieren meist mehrere vollbeanspruchte Konstruktionen für ein Tragwerk, die sich jedoch hinsichtlich eines gewählten Zielkriteriums maßgeblich voneinander unterscheiden
- Eine vollbeanspruchte Konstruktion muß keineswegs eine ökonomisch optimale Lösung darstellen

Ein Beweis für die zweite Aussage wird beispielsweise in [Zho] geführt, wo ein einfaches Drei-Stäbe-Fachwerk bei einer vollbeanspruchten Bemessung ein um ca. 7 % höheres Gewicht ergibt, als die tatsächlich gewichtsm minimale Konstruktion. Trotz des hohen Programmieraufwandes und der hohen Kosten für die Rechnernutzung in der Vergangenheit konnte die Anwendung dieser Methode seinerzeit trotzdem noch als effektiv bezeichnet werden. Wie die Optimierungsergebnisse der Abb. 19 verdeutlichen, ist die Verknüpfung mit den tatsächlichen Material- und Lohnkosten jedoch unumgänglich.

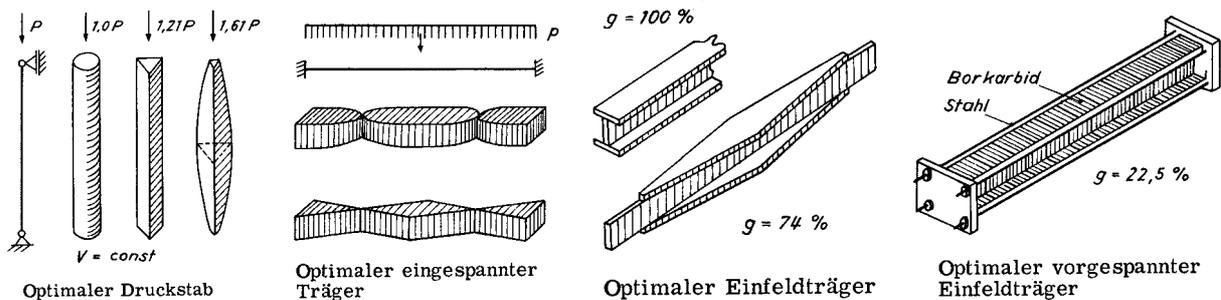


Abb. 19: Optimierungsmaßnahmen unter dem Ziel der Volumenminimierung [Hup]

Des Weiteren wurden bei vielen Untersuchungen in der Vergangenheit bestimmte statische Anforderungen, wie beispielsweise die Berücksichtigung der Gebrauchstauglichkeit oder die Stabilitätsforderungen, vernachlässigt, um das Problem zu vereinfachen und dadurch mathematisch optimierbar zu machen. Diese indiskutable Vorgehensweise muß wohl nicht weiter kommentiert werden. Harich [Hari] bemängelt richtigerweise die Vorgehensweise, Probleme so abzuwandeln oder umzuformulieren, daß bekannte mathematische Verfahren oder spezielle Ersatzprobleme angewandt werden können, da dies leicht zu unrealistischen Ergebnissen führt (Fischbauchträger etc.).

Weiterhin ist anzumerken, daß viele in den 70er und 80er Jahren entstandene Dissertationen einheitlich nach folgendem Grundschema aufgebaut waren:

- Nur ein spezielles Problem wird bearbeitet, z.B. Optimierung aussteifender Bauteile hoher Gebäude [Sas], Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Wärmeschutzmaßnahmen [Aig], [Lip], [Tau] etc..
- Als Grundlage wurden die geläufigen Operations Research-Lösungsverfahren mehr oder weniger ausführlich vorgestellt und anschließend ein geeignetes Verfahren gewählt.
- Da die Rechenkapazität damaliger EDV-Anlagen bei weitem nicht ausreichte, eine vollständige Enumeration durchzuführen, wurde von den Bearbeitern jeweils ein bestimmter Algorithmus modifiziert, um die Anzahl der zu untersuchenden Punkte zu verringern.
- Nach der Umsetzung in ein entsprechendes Rechnerprogramm konnte für das gestellte Problem meist eine gute Lösung gefunden werden.

Lawo [Law] stellte in einer vergleichenden Untersuchung dieser geläufigen und in zahlreichen Dissertationen eingesetzten Algorithmen bei der Bemessung von Stabwerken aus Stahl fest, daß diese bereits im Jahre 1987 nicht mehr dem Stand der Technik entsprachen. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigte auf, daß keiner der Algorithmen für den praktischen Einsatz bei der automatischen Bemessung im konstruktiven Ingenieurbau in Frage kommt, da den Algorithmen entweder die notwendige Zuverlässigkeit fehlt oder sie zu langsam sind. In den meisten Fällen konnten von den verwendeten Algorithmen, als Ergebnis der Optimierung, nur lokale Optima gefunden werden.

#### 4.3.4 Besonders geeignete Optimierungsansätze

Durch die enorme Entwicklung der Leistungsfähigkeit der momentan vorhandenen Hardware muß heutzutage eine abweichende Vorgehensweise gewählt werden. So brauchen viele Problemstellungen nicht mehr in der früher notwendigen Weise vereinfacht werden, sondern es be-

steht die Möglichkeit, alle relevanten Nachweise zu berücksichtigen. Oftmals ist es auch nicht mehr notwendig, die zu untersuchende Lösungsmenge durch bestimmte Algorithmen einzuschränken, da entweder eine vollständige Enumeration durchgeführt werden kann oder aber neuere Methoden der beschränkten Enumeration existieren, die das globale Optimum finden, ohne alle Lösungen untersucht zu haben. Eine Verknüpfung mit den tatsächlichen Material- und Lohnkosten ist jedoch weiterhin unumgänglich, um zu realistischen Ergebnissen zu gelangen.

Will man die Gesamtkosten zur Erstellung eines Bauwerkes optimieren, wird diese Aufgabenstellung nahezu unmöglich, da alle Teilbereiche des Facility Managements, wie Planungs- und Entwurfskosten, Finanzierungskosten, Herstellungs- und Montagekosten, Nutzungskosten, Unterhaltungskosten sowie Abbruchkosten, untersucht werden müßten. Als besonders wichtig gilt es zu beachten, daß die bestmögliche Gesamtkonstruktion nicht notwendigerweise aus für sich optimal gestalteten Einzelementen besteht [Sas]. Unter Umständen kann die Minimierung eines Teilbereiches zu einem erhöhten Aufwand in anderen Bereichen führen, insbesondere bei einer Minimierung der Planungskosten. Bei der Bewertung von Ergebnissen aus Teilbereichen ist es daher besonders wichtig, die Auswirkungen auf andere Bereiche und auf das Gesamtergebnis zu berücksichtigen. Die Minimierung der Gesamtkosten eines Bauwerkes, unter Berücksichtigung aller Bereiche, stellt ein äußerst kompliziertes Problem dar und gelingt in befriedigender Weise meist nur durch einen sehr hohen Planungs- und Entwurfsaufwand sowie frühzeitiges Zusammenwirken aller an der Herstellung des Bauwerkes Beteiligten.

Das Ergebnis einer Optimierung ist grundsätzlich von der Wertung der Optimierungsparameter abhängig. Diese Parameter sind nicht konstant, sondern abhängig von der Zeit (in der die Optimierung durchgeführt wird), dem Ort, den Randbedingungen und der Logistik. So wird die Optimierung eines Stahlbetonbalkens aufgrund der Parameter für Lohn- und Materialkosten sowie gesellschaftlicher, westlicher Rahmenbedingungen ein anderes Ergebnis liefern als in den Entwicklungsländern.

Methoden zur Optimierung von Baukonstruktionen ermöglichen Einsparungen beim Material und Arbeitsaufwand, wodurch insgesamt der Anteil der Material- und Lohnkosten gesenkt werden kann. Optimierungsmethoden zur Kostensenkung sind insbesondere bei großen Serien von Elementen oder Bauwerken oder bei Bauwerken bzw. Bauwerksteilen mit hohem Materialverbrauch sehr effizient. Aber auch bei kleineren Bauvorhaben, wie Ein- oder Mehrfamilienhäusern, lassen sich durch den Einsatz von mathematischen Optimierungsmethoden beträchtliche Summen einsparen, wie die Ergebnisse dieses Kapitels noch aufzeigen werden.

#### 4.3.5 Aussichten / Entwicklungstendenzen

Für die zukünftige Entwicklung ist zu erwarten, daß die Optimierungsverfahren stärker im Konstruktionsprozeß Einzug finden werden. Die rasante Entwicklung der Computer-Hardware, die es erlaubt, relativ komplexe Berechnungen mit großen Datenmengen lokal und unter kurzer Berechnungszeit durchzuführen, fördert diese Entwicklung ungemein.

Andererseits besteht jedoch nach wie vor die Forderung, nicht nur einzelne Komponenten einer Baukonstruktion getrennt für sich zu optimieren, sondern ein komplexes Tragwerk als Gesamtheit zu optimieren. Dabei steigt die Komplexität einer solchen Aufgabe überproportional und ist nur mit äußerstem Aufwand realisierbar. In dieser Entwicklungsrichtung sind die Expertensys-

teme angesiedelt. Sie verknüpfen die Abhängigkeiten aller Bauteile untereinander mit dem relevanten Fachwissen von der Entwurfsplanung bis hin zur Fertigung und Montage.

Bei einem Großteil der hoch zelebrierten Expertensysteme kann jedoch nach Abarbeitung einer Reihe von „wenn...dann...sonst“ -Bedingungen bestenfalls nichts anderes empfohlen werden, als das vom Entwickler Einprogrammierte. Dagegen muß die als Ergebnis gelieferte optimale Entscheidung einer mathematischen Optimierung oftmals erst einmal von dem Anwender bezüglich ihrer Zutrefflichkeit analysiert und verstanden werden, da sie von denen aus menschlicher Sicht üblichen sehr weit entfernt ist [Pap]. Daher ist es für einen sinnvollen Problemlösungsalgorithmus immer anzustreben, Expertensysteme mit Methoden der mathematischen Optimierung zu verknüpfen, wie es beispielsweise von Lennerts [Z-Len1], [Z-Len2] beim Problem der Baustelleneinrichtungsplanung realisiert wurde.

Zur Bewältigung anstehender Aufgaben sollte eine direkte Kopplung zwischen CAD, statischer Berechnung, dem Optimierungsalgorithmus bis hin zur Ausführungsplanung automatisiert werden. So werden beispielsweise heute bereits in der Ausführungsplanung des Holzrahmenbaues komplette CAD-Pläne erstellt, die im weiteren zur Ansteuerung einer vollautomatischen CNC-Abbundmaschine dienen. Alle Stäbe des Tragsystems sind dort bereits erfaßt und können in den meisten Fällen als dreidimensionales Objekt graphisch dargestellt werden. Hier fehlt lediglich ein Bindeglied zwischen CAD- und Statik-Software, damit die bereits eingegebenen Daten effektiver genutzt werden könnten.

Während die Anwendung der Optimierungstheorie, die die Hilfsmittel zur Formulierung eines Optimierungsproblems und dessen Lösung bereitstellt, relativ leicht formalisiert werden kann, ist die Übersetzung einer verbal vorliegenden in eine mathematische Aufgabenstellung in den meisten Fällen hingegen nicht zu formalisieren. Dieser nahezu wichtigste Schritt im Optimierungsprozeß muß immer der Erfahrung und dem Anwendungsgeschick des Entwicklers überlassen werden, wobei selbstverständlich in der Kenntnis der Optimierungsmethoden eine Grundvoraussetzung für ihren sinnvollen Einsatz liegt. Daher ist es trotz einer verstärkt anzustrebenden EDV-Unterstützung wünschenswert, daß die Studenten der Ingenieurwissenschaften an den Hochschulen mit den gängigsten Methoden des Operations Research vertraut gemacht werden.

## 4.4 Geeignete Lösungsverfahren

In diesem Kapitel sollen die zur Lösung von Problemen in der Baukonstruktion geeigneten Verfahren kurz erläutert werden. Neben den nachstehend neu vorgestellten Verfahren sind auch einige Verfahren aus dem Kapitel 2, in Abhängigkeit vom gestellten Problem, hervorragend zur Lösung geeignet:

- Lineare Optimierung
  - graphische Lösungsmethode
  - mathematische Lösungsmethode (Simplex-Algorithmus)
- Entscheidungsbaumverfahren
  - vollständige Enumeration
  - unvollständige oder begrenzte Enumeration
  - dynamische Optimierung
- Heuristische Verfahren

Zur Lösung von nichtlinearen Problemen existieren nach wie vor keine allgemeingültig anwendbaren mathematischen Algorithmen. Die Literatur weist zahlreiche Veröffentlichungen auf, in denen Verfahren vorgestellt werden, die aber meist nur für spezielle Optimierungsaufgaben zugeschnitten sind. Nachfolgend sollen einige wichtige Optimierungsmethoden vorgestellt werden, die unter anderem in [DiHo], [DoDr], [Hup], [Les], [Pap], [Pit] näher erläutert werden. Die Auswahl eines geeigneten Lösungsverfahrens hängt letztendlich stets von der jeweiligen Optimierungsaufgabe und den relevanten Restriktionen ab.

### 4.4.1 Mathematische Grundlagen

#### Linearität

Unter linearer Optimierung versteht man die Optimierung einer linearen Zielfunktion, unter Berücksichtigung von linearen Restriktionen und der Nichtnegativitätsbedingung. Bei linearen Problemen liegt die optimale Lösung immer in einer Ecke des zulässigen, durch die Restriktionen beschränkten Bereiches. Die Standardlösungsmethode der linearen Optimierung stellt das Simplex-Verfahren nach Danzig [Dan] dar.

#### Nichtlinearität

Im Gegensatz zur linearen Optimierung ist mindestens die Zielfunktion und/oder eine der Restriktionen eine nichtlineare Funktion, was bei den meisten Optimierungsproblemen in der Tragwerksplanung der Fall ist. Die Variablen müssen auch hier den Nichtnegativitätsbedingungen genügen.

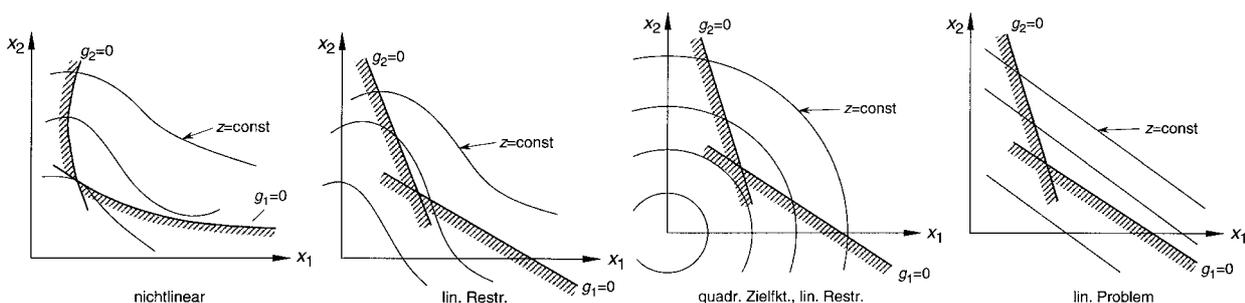


Abb. 20: Verschiedene Arten von Optimierungsaufgaben [BSS]

Der Lösungsraum muß hier nicht unbedingt konvex und auch nicht zusammenhängend sein. Falls Zielfunktion oder zulässiger Bereich nichtkonvex sind, existieren mehrere lokale Optima innerhalb des zulässigen Bereiches [Hup].

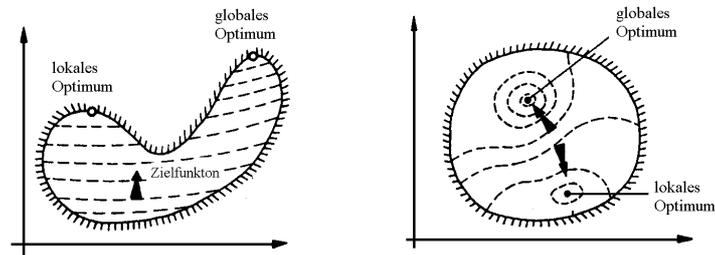


Abb. 21: Nichtlineare, nichtkonvexe Optimierungsaufgabe [Hup]

Bei einer nichtlinearen Zielfunktion liegen die Lösungen nicht unbedingt auf den Ecken des zulässigen Bereiches. Sie können auch im Inneren des Lösungsraumes liegen. Das Auffinden eines globalen Optimums erweist sich somit als sehr schwierig.

Konvexität

Eine Menge K wird als konvex bezeichnet, wenn mit zwei Punkten aus dieser Menge auch alle Punkte auf der Verbindungsstrecke zwischen den beiden Punkten vollständig zu K gehören. Eine Menge ist somit nichtkonvex, wenn die Punkte auf der Verbindungsstrecke nicht zu ihr gehören.

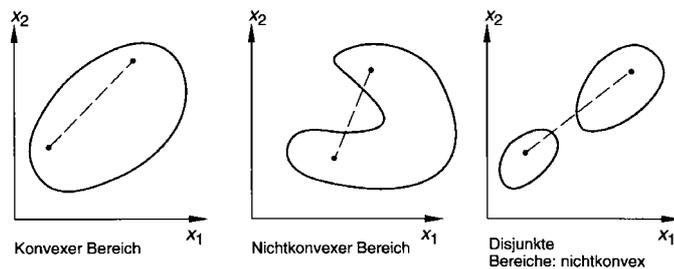


Abb. 22: Beispiele für konvexe und nichtkonvexe Variablenbereiche [BSS]

Eine Funktion ist konvex, wenn die Punkte der Verbindungsstrecke zweier Kurvenpunkte stets innerhalb oder auf der Kurve liegen [EII].

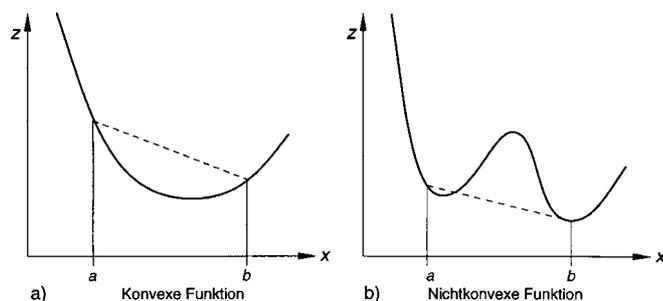


Abb. 23: Beispiele für konvexe und nicht-konvexe Funktionen [BSS]

Der zulässige Bereich ist häufig bei statisch unbestimmten Konstruktionen und mehreren Lastfällen nichtkonvex.

## Ganzzahligkeit

Eine im Ingenieurbau häufig geforderte Eigenschaft ist die Ganzzahligkeit der Konstruktionsparameter. Müller-Merbach [MüMe] teilt Verfahren für Probleme mit Ganzzahligkeitsbedingung in die Gruppen der Schnittebenenverfahren, der Entscheidungsbaumverfahren und der heuristischen Verfahren ein. Das Ergebnis der ganzzahligen mathematischen Optimierung unterscheidet sich meist erheblich von dem durch einfaches Auf- und Abrunden gefundenen Ergebnis der nichtganzzahligen linearen Optimierung. Die Forderung nach Ganzzahligkeit muß über Zusatzbedingungen für einige oder alle Variablen berücksichtigt werden.

## Stetigkeit

Den Unterschied zwischen einer stetigen und unstetigen Zielfunktion zeigt Abb. 24. Bei einer stetigen Zielfunktion existiert zu jedem Datenpunkt genau ein Funktionswert und die Gradienten der Zielfunktion sind endlich.

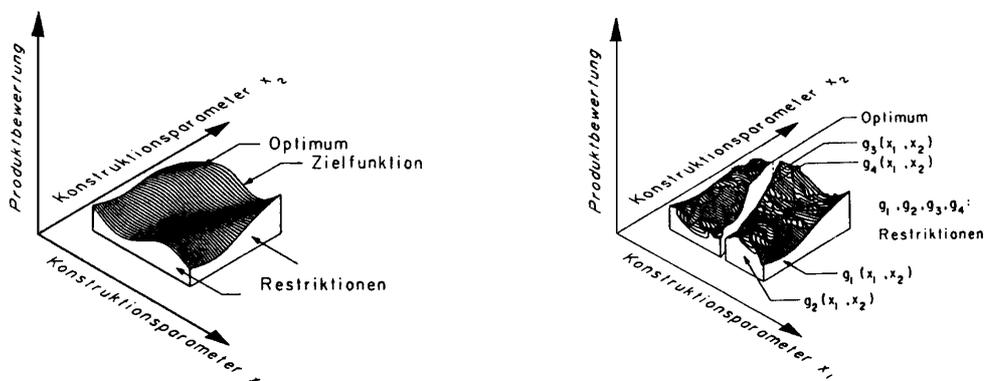


Abb. 24: Beispiel einer stetigen und unstetigen Zielfunktion [Fig]

Oft sind die Zielfunktionen bei einer Optimierungsaufgabe, bedingt durch beispielsweise sprunghafte Änderungen der Konstruktionsabmessungen, unstetig. Bei einigen Optimierungsverfahren kann eine unstetige Zielfunktion dazu führen, daß das Optimum nicht gefunden wird.

### 4.4.2 Monte-Carlo-Methode (Zufallsstichprobenmethode)

Die Monte-Carlo-Methode ist besonders für die Lösung nichtlinearer Probleme geeignet. Ihr Einsatz empfiehlt sich, wenn die Variablenzahl nicht zu groß ist und die Eigenarten von Zielfunktionen und Nebenbedingungen die Anwendung anderer Verfahren als nicht zweckmäßig erscheinen lassen (beispielsweise für nicht-konvexe Bereiche oder bei Zielfunktionen mit mehreren örtlichen Extrema).

Die diversen Varianten werden durch die Generierung von gleichmäßig verteilten Zufallszahlen erzeugt. Der durch die Restriktionen beschränkte Lösungsraum kann so beliebig genau untersucht werden. Auch bei einer verhältnismäßig kleinen Anzahl von Stichproben wird mit dieser Methode der Lösungsraum relativ gut durchsucht, wodurch das Optimum viel schneller als bei einer vollständigen Enumeration des Raumes der zulässigen Parameterwerte gefunden werden kann. Die Zufallszahlen nehmen stets Werte zwischen 0 und 1 an und werden anschließend in die Skala der entsprechenden Parameter normiert. Anschließend wird der Zielfunktionswert  $Z$  im Punkt  $x$  berechnet. Ergibt  $Z$  einen besseren Wert als die vorher berechneten Werte, so werden die Nebenbedingungen überprüft und die Variablen anstelle des bislang besten Suboptima

gespeichert. Nach einer endlichen Anzahl von Versuchen gelangt man so mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in die Nähe der optimalen Lösung. Dadurch liefert die Methode zwar nur eine angenäherte, aber in vielen Fällen ausreichend genaue Lösung. Nach anfänglich schnellem Fortschritt weist die Methode in der Endphase der Iteration jedoch eine ziemlich langsame Konvergenz auf.

Die Monte-Carlo-Methode bietet eine Grundlage für viele modifizierte zufällige Verfahren. Die Berechnung kann zu jeder Zeit abgebrochen werden. Gründe für den Abbruch des Verfahrens können darin liegen, daß die Anzahl der Proben beschränkt ist oder sich der Zielfunktionswert genügend einem zuvor festgelegten Grenzwert genähert hat. Existiert eine Vergleichskonstruktion, so kann die Rechnung abgebrochen werden, wenn keine weitere Verbesserung zu erwarten ist bzw. wenn eine Verbesserung des Wertes der Zielfunktion um eine bestimmte Dimension (z.B. 5 bis 15 %) vorliegt.

#### VORTEILE:

Keine Beschränkung hinsichtlich Stetigkeit und Differenzierbarkeit von Zielfunktion und Nebenbedingungen, die Entscheidungsvariablen können stetig oder diskret sein. Das Verfahren kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt abgebrochen oder wieder aufgenommen werden, es findet keine Fehlerfortpflanzung statt. Sie ist auch mit anderen Methoden (z.B. der Gradientenmethode) kombinierbar.

#### NACHTEILE:

Das Optimum wird nur mit einem Fehler von 5 - 10 % gefunden. Mit steigender Genauigkeit muß der Aufwand vervielfacht werden. Das Erreichen eines guten, dem Optimum nahen Punktes hat auf den weiteren Verlauf der Stichproben keinen Einfluß. Außerdem werden auch Punkte außerhalb des zulässigen Bereiches untersucht, d.h. es werden Konstruktionen, die den Anforderungen nicht genügen, mit der gleichen Sorgfalt untersucht.

### 4.4.3 Methode der Zufallsrichtung

Im Gegensatz zur Monte-Carlo-Methode wird hier nicht immer der gesamte Variablenraum betrachtet, sondern die Untersuchung erfolgt in der für die Optimierung günstigsten Bewegungsrichtung. Man beginnt mit einem beliebig zulässigen Ausgangspunkt  $x_0$ , und bestimmt einen neuen Punkt  $x_i$ . Dieser Punkt wird durch einen normierten Vektor dargestellt.

Der neue Punkt  $x_i$  ist zulässig, wenn sich der Wert der Zielfunktion verbessert oder wenigstens nicht verschlechtert hat. Wird ein zulässiger Punkt gefunden, wird die Richtung für die weitere Suche beibehalten. Bei einem Schritt in die falsche Richtung wird wieder in der Richtung gesucht, „die bisher erfolgreich war“ [Hup]. Die Schrittweite  $M$  ist abhängig von einem Effektivitätskoeffizienten  $k$ . Dieser gibt das Verhältnis der Anzahl der erfolgreichen Schritte zur Anzahl der nicht erfolgreichen an, d.h. überwiegen die erfolgreichen Schritte, wird  $M$  größer und umgekehrt. Ein sogenannter „Operator des Vergessens“, der mit  $N$  bezeichnet wird, speichert eine Folge von Informationen. Bei wiederholt erfolglosen Schritten verschwindet der Einfluß in diese Richtung.

**VORTEIL:**

Die Vorteile des Verfahrens entsprechen denen der Monte-Carlo-Methode, allerdings wird hier nicht der gesamte Variablenraum durchsucht.

**NACHTEIL:**

Der Rechenaufwand ist größer als bei der Monte-Carlo-Methode. Er kann mehr Zeit beanspruchen, da der nächste Schritt innerhalb des Optimierungsprozesses als Lernprozeß vollzogen wird und Irrtümer nur rekursiv korrigiert werden können.

#### 4.4.4 Rastermethode

Die Rastermethode gehört zu den Suchmethoden und stellt eine Weiterentwicklung des systematischen Durchsuchens dar. Bei der Durchsuche mit fortschreitender Rasterverfeinerung wird der Variablenraum im ersten Rechengang in einem relativ groben Raster abgesucht. So wird ein vorläufig genähertes Optimum gefunden, in dessen Umgebung dann die weiteren Rechenoperationen durchgeführt werden. Im Vergleich zur systematischen Durchsuche entfällt, daß unzulässige Lösungen mit der gleichen Intensität untersucht werden wie zulässige Lösungen.

Ausgehend von vorgegebenen Rasterpunkten (Startpunkte) werden die Nachbarpunkte untersucht. Ist ein besserer Punkt gefunden, so wird er zum neuen Mittelpunkt und erneut werden die Punkte untersucht, die im gleichen Rasterabstand in der Umgebung der Suboptima liegen. Aus allen Rastern werden die besten Punkte zu neuen Mittelpunkten der neu entstandenen Raster. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis keine neuen Suboptima aufzufinden sind. Sodann wird eine Rasterverfeinerung vorgenommen, bei der die Suboptima die neuen Mittelpunkte bilden. Werden bei der kleinsten Rasterweite keine neuen Mittelpunkte mehr gefunden, ist der Vorgang beendet.

**VORTEIL:**

Das Optimum wird in den ersten Schritten bereits näherungsweise gefunden und nur in dieser Umgebung wird nach besseren Lösungen gesucht. Bei einer großen Anzahl von Entscheidungsvariablen und Einschränkungen ist die Rastermethode vom Aufwand her wesentlich effektiver als die Methode der vollständigen Enumeration, da hier nicht alle möglichen Lösungen zu überprüfen sind. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß man mit der geeigneten Rastergröße auch über untergeordnete Optima hinweg geht, ohne diese genau zu untersuchen.

**NACHTEIL:**

Ist das zu Anfang gewählte Raster zu grob, besteht die Möglichkeit, daß das Gebiet des globalen Optimums unentdeckt geblieben ist und im weiteren Verlauf dann nur ein lokales Optimum gefunden wird.

#### 4.4.5 Gradientenverfahren

Die Gradientenverfahren bilden aufgrund ihrer weiten Verbreitung eine bedeutende Gruppe der Methoden der nichtlinearen Optimierung. Im Gegensatz zu den Entscheidungsbaumverfahren werden hier die Ableitungen der Zielfunktion analytisch oder numerisch zur Bestimmung der Suchrichtung und Schrittweite ausgewertet. Von einem gegebenen Startwert wird die Suche

nach dem Optimum (meist als Minimum formuliert) sukzessive in Richtung des steilsten Abstieges durchgeführt. Dabei besteht die Gefahr, abhängig vom Startwert, anstatt des gesuchten globalen Minimums nur ein lokales Minimum zu erreichen. Auch kann die Suche, bedingt durch die Komplexität der Zielfunktion, recht umständlich erfolgen. Nur in dem Sonderfall, daß die Zielfunktion und der zulässige Bereich konvex sind, führt diese Methode direkt und von allen Startwerten aus zu dem globalen Minimum. In praktischen Beispielen wird diese stark einschränkende Bedingung nicht erfüllt, so daß im allgemeinen immer davon auszugehen ist, nur ein lokales Minimum erreicht zu haben. Die erneute Suche mit einem geänderten Startwert ist dann notwendig, um die Güte der gefundenen Lösungen zu beurteilen. Die Literatur weist eine große Anzahl von Lösungsalgorithmen auf. Ihre Unterschiede liegen meist in der Bestimmung der Ableitungen (Gradienten), in der Bestimmung der Iterationsschrittweiten und im Verhalten beim Überschreiten der Restriktionen. Klassische Verfahren sind die Methode des steilsten Abstieges und das Newton-Verfahren.

#### VORTEIL:

Die Lösungsalgorithmen sind weit verbreitet und als kommerzielle Software verfügbar. Ein zumindest lokales Minimum kann relativ schnell bestimmt werden.

#### NACHTEIL:

Die Bestimmung der Gradienten der Zielfunktion ist immer erforderlich, was bei komplexen Optimierungsaufgaben aufwendig werden kann. Das gefundene Optimum ist meist nur ein lokales und nicht das gesuchte globale Optimum. Weiterführende Schritte zur Beurteilung der gefundenen Lösung sind notwendig.

#### 4.4.6 Schnittebenen-Verfahren (Cutting Plane Verfahren)

Nach [ZimW] wurde das Verfahren zuerst von Gomory im Jahre 1958 vorgestellt. Es dient zur Lösung von linearen Problemen mit einer ganzzahligen Lösungsmenge. Gomory hat seine Verfahren stets weiter verbessert, was erklärt, daß es unterschiedliche Gomory'sche Schnittebenen-Verfahren gibt. Generell unterscheidet man zwei Arten von Verfahren [ZimW]:

- Verfahren, die bereits nichtganzzahlige Lösungen voraussetzen
- Verfahren, die direkt auf eine ganzzahlige Lösung zusteuern

Ausgangspunkt des erstgenannten Verfahrensart ist die optimale Lösung einer ganzzahligen linearen Optimierungsaufgabe, die man erhält, wenn die Ganzzahligkeitsbedingung fallengelassen wird. Diese sog. „Relaxation“ des Problems wird in der Regel mit Hilfe des Simplex-Verfahrens gelöst. Sind in dieser Lösung bereits alle Basisvariablen ganzzahlig, ist das Optimum des ganzzahligen Problems gefunden. Dies ist in den meisten Aufgabenstellungen aber nicht der Fall, und der „Gomory-Schnitt“ ist zu führen. Dabei wird eine Folge zusätzlicher linearisierter Restriktionen (Schnittebenen) konstruiert, d.h. der zulässige Bereich schrittweise eingehüllt. Durch diese Restriktionen wird erreicht, daß die jeweils nicht-ganzzahlige Lösung weggeschnitten wird. Der Schnitt erfolgt im Raum zwischen dem nichtganzzahligen Optimum und dem ganzzahligen Lösungspunkt. Im nächsten Rechenschritt werden nun die neuen Restriktionen berücksichtigt, indem mit Hilfe des Simplex-Algorithmus erneut die Optimallösung errechnet und auf Ganzzahligkeit hin überprüft wird. Mit jeder Iteration wird durch das Wegschneiden der nicht-ganzzahligen Lösungen eine Approximation an die ganzzahlige Lösung erreicht. Durch

eine Anhäufung von Nebenbedingungen wird die optimale ganzzahlige Lösung somit nach einer endlichen Zahl von Schritten gefunden. Es wird also zuerst eine nicht-ganzzahlige optimale Lösung ermittelt und dann die Ganzzahligkeit durch zusätzliche lineare Restriktionen erzwungen.

Das zweitgenannte Verfahren führt ohne die vorherige Ermittlung der nichtganzzahligen Lösungen direkt zu einer ganzzahligen Lösung. Zu diesen Verfahren gehört der primal-ganzzahlige Algorithmus von Gomory, der beispielsweise in [ZimW] genauer beschrieben wird.

VORTEIL:

Beide Varianten des Schnittebenen-Verfahrens führen in einer endlichen Zahl von Schritten zur optimalen ganzzahligen Lösung.

NACHTEIL:

Die Schnittebenen-Verfahren sind sehr rechen- und zeitaufwendig. Der Rechenaufwand steigt mit der Anzahl der Variablen, wobei der Algorithmus, bei dem keine nicht-ganzzahlige Lösung vorausgesetzt wird, mit weniger Rechenschritten zurechtkommt. Bei vorzeitigem Abbruch des Verfahrens stehen keine ganzzahligen Näherungslösungen zur Verfügung. Praktische Erfahrungen mit dem Algorithmus haben gezeigt, daß die Konvergenz vielfach sehr langsam und somit für größere Probleme ungeeignet ist. Außerdem können in der Praxis Fälle auftreten, bei denen sich die neue Optimierungsaufgabe in irgendeiner Iterationsstufe als unlösbar erweist.

## **4.5 Vorstellung einiger bekannter Anwendungsgebiete**

### **4.5.1 Holzstützen**

Aigner [Aig] erläutert in seiner Dissertation unter anderem die Optimierung einer rechteckigen Holzstütze, die durch ein vorgegebenes Biegemoment und eine Normalkraft belastet ist. Unter der für einfache Holzquerschnitte zutreffenden Annahme, daß sich die Kosten proportional zur Querschnittsfläche verhalten, wird mit Hilfe einer graphischen Darstellung die optimale Lösung ermittelt. Nicht berücksichtigt wird jedoch, wie so oft, die Tatsache, daß eine Holzstütze in der Regel Holzbauteile stützt und daher in den meisten Fällen die Einhaltung der zul. Querpressungen bemessungsrelevant wird.

### **4.5.2 Räumliche Aussteifung von Gebäuden**

Das von Sassenberg [Sas] angewandte Optimierungsverfahren, aus der Gruppe der sogenannten Direkt-Such-Verfahren, eignet sich, mathematisch gesehen, besonders für umfangreiche Zielfunktionen bei einer relativ kleinen Variablenanzahl. Am Beispiel eines aussteifenden Stahlbetonkerns hoher Gebäude wurden mit Hilfe des Optimierungsverfahrens durch Variation der Dimensionierungs- bzw. Gestaltungsvariablen zuerst die technisch machbaren Grenzen erreicht, bevor, durch Veränderung der Bauwerksgeometrie (Bauwerkshöhe, Grundriß), unterschiedliche Werkstoffeigenschaften (Betonfestigkeit, Stahlfestigkeit) oder unterschiedliche Lastkonzepte, wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt wurden. Weiterhin konnten die zu benutzenden Baustoffe und die Schalung bei jeweils aktuellen, marktgerechten Einheitspreisen und lokalen Gegebenheiten, wie Baugrundannahmen oder Grundstückskosten, in dem Berechnungsprozeß

berücksichtigt werden. In Abb. 25 sind die vergleichsweise gravierenden Veränderungen vom Start zum Optimalquerschnitt des Kerns aufgezeigt, womit Kosteneinsparungen von ca. 10 % erreicht wurden; als Nebeneffekt ergab sich zusätzlich eine Vergrößerung der nutzbaren Fläche.

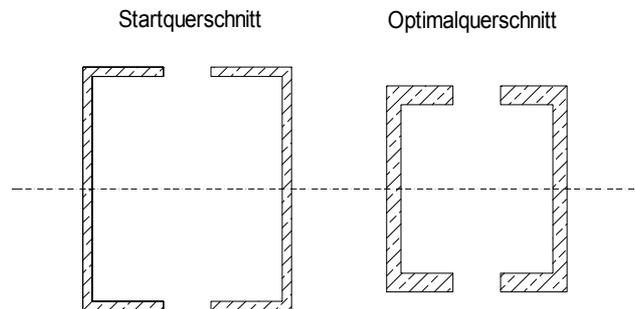


Abb. 25: Kernquerschnitt vor und nach der Optimierung

#### 4.5.3 Fundamente

Bei der Optimierung von Gründungsmaßnahmen muß für die Einflußgrößen Materialbedarf, fertigungstechnischer und zeitlicher Arbeitsablauf, Tragfähigkeit des Bodens und Lasten aus der Konstruktion, unter Berücksichtigung gegenseitiger Abhängigkeiten, ein optimaler Kompromiß gefunden werden. Die Arbeit von Blecken und Großmann [Z-BIGr] nimmt sich dieses Problems an und gliedert in bewehrte und unbewehrte Streifenfundamente, unter Berücksichtigung nichtbindiger und bindiger Böden.

Bei unbewehrten Streifenfundamenten besteht das Optimierungsziel darin, die Fundamenthöhe  $h$  bei bestimmten Restriktionen (Lastausbreitungswinkel, zul. Bodenpressung, Bodenart etc.) zu minimieren. Dafür werden Formeln hergeleitet, mit denen iterativ die optimale Fundamenthöhe ermittelt werden kann. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt auf, daß die wirtschaftlichste Ausführung von unbewehrten Fundamenten die zulässige Bodenpressung exakt ausnutzt.

Bei den bewehrten Einzel- und Streifenfundamenten ist die Senkung der Kosten das Optimierungsziel; die endgültige Kostengleichung ist eine Funktion von Breite und Höhe des Fundamentes. Zusätzlich zu den Restriktionen bei unbewehrtem Beton muß hier in einem separaten Schritt auch die Einhaltung der Restriktionen nach DIN 1045 (bzw. EC 5) überprüft werden. In der Kostengleichung werden zusätzlich die Faktoren Stahl, Beton, Schalung, Unterbeton, Aushub und Wiederverfüllung berücksichtigt. Die Optimierung kann sowohl bei gegebener Fundamentbreite  $b$  als auch bei unbekannter Fundamentbreite und -höhe durchgeführt werden. Im ersten Fall hängt die Kostengleichung nur noch von der Höhe  $h$  ab und kann durch Differentiation und Umformung nach dieser Variablen aufgelöst werden. Im zweiten Fall erhält man durch Differentiation und Umformung nach der Breite  $b$  eine Gleichung, die wiederum in die Kostengleichung eingesetzt werden muß.

#### 4.5.4 Stahlbetondecken

Tauber [Tau] entwickelte ein Optimierungsverfahren speziell für Deckensysteme, indem für die in der Arbeit untersuchten Decken eine Kostenfunktion aufgestellt wurde. Mit Hilfe der Differentialrechnung wird das Kostenminimum gesucht. Wo möglich, werden Bedingungen gewonnen,

mit denen sich die minimalen Kosten des jeweils untersuchten Deckensystems ermitteln lassen. Die Kosten einer Deckenkonstruktion ergeben sich aus den Kostenanteilen für das Deckensystem und für die sie lastabtragenden Unterzüge. Die verschiedenen Deckensysteme werden fertigungsmäßig, konstruktiv und kostenmäßig verglichen und anhand von Bemessungsdiagrammen die Ergebnisse graphisch dargestellt. Damit kann der Anwender schnell und sicher ermitteln, welches Deckensystem für das gestellte Problem, in Abhängigkeit von Stützweite, statischem System und Anzahl der Geschosse, das am besten geeignetste ist.

#### 4.5.5 Fachwerke/ Rahmentragwerke

Harich [Hari] entwickelte ein Verfahren zur optimalen Bemessung von Raumfachwerken bezüglich ihrer Grenztragfähigkeit. Grundlage ist die Verknüpfung der Methoden der mathematischen Optimierung mit denen der Strukturanalyse, wobei jedoch sowohl der Konstruktionstyp Raumfachwerke, mitsamt der Geometrie und Topologie als auch der Werkstoff mit den entsprechenden Kennwerten, vorgegeben werden. Das Verfahren beschränkt sich auf die Querschnittsoptimierung, wobei die Kosten wieder näherungsweise über das Gewicht der Stahlquerschnitte erfaßt werden. Harich wendet das Optimierungsverfahren auf verschiedene Raumfachwerke an und vergleicht die erzielten Ergebnisse mit denen anderer Verfahren.

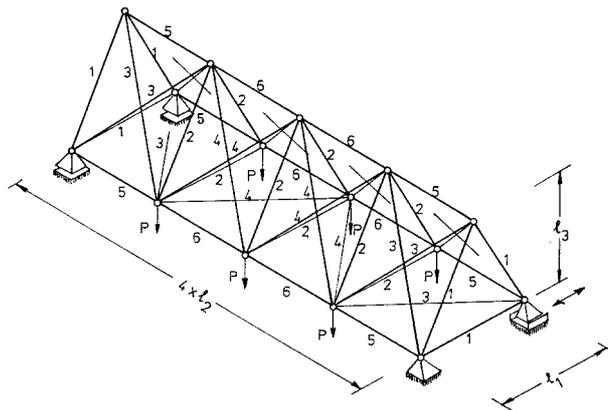


Abb. 26: System eines Raumfachwerkträgers [Hari]

Ullman [Ull] benutzt als Grundlage des entwickelten Optimierungsverfahrens den Algorithmus der vollbeanspruchten Konstruktion und optimiert den Materialaufwand mit einem stochastischen Suchverfahren. Geometrie und Belastung des Tragwerkes werden als gegeben vorausgesetzt; für die Dimensionierung der Stäbe steht ein diskretes Material- und Profilsortiment zur Verfügung. Die Untersuchungen zeigten, daß sich vollbeanspruchte Konstruktionen in Richtung optimaler Lösungen bewegen und somit eine wirtschaftliche Lösung vom Standpunkt der Planung darstellen können. Das Suchverfahren ermittelt, unter Verwendung der herkömmlichen Berechnungsmethode des Algorithmus der vollbeanspruchten Konstruktion und unter Beachtung ökonomischer Kriterien und Effektivitätsbedingungen, eine weitgehend optimale Lösung. Der Lösungsalgorithmus wird an ebenen, stählernen Rahmentragwerken demonstriert, die nach Theorie I. Ordnung berechnet werden; die Bemessung der Stäbe des Tragwerkes erfolgt allerdings unter Außerachtlassung von Stabilitätsbedingungen.

#### 4.5.6 Brücken

P. Thanh [Tha] beschreibt in seiner Arbeit die Optimierung von Stahlbetonkonstruktionen. Da vergleichbare Untersuchungen oft eine Vielzahl von Forderungen der technischen Vorschriften vernachlässigten, wird vom Autor zunächst ein allgemeines Optimierungsmodell, auf Grundlage der Bemessung nach Grenzzuständen mit Zielfunktion, Variablen und den Nebenbedingungen, erarbeitet, in dem alle notwendigen Parameter für das bautechnische Projekt einer Stahlbetonkonstruktion enthalten sind. Als Zielfunktion werden die Kosten der Konstruktion angenommen, wobei die Kosten des Betons, des Stahls und der Schalung Berücksichtigung finden. Es entsteht eine, mit diskreten Werten lösbare, nichtlineare und nichtkonvexe Optimierungsaufgabe. Es werden Zufallsverfahren mit relativ einfachen Algorithmen eingesetzt, bei denen zwar der Rechenaufwand höher als bei deterministischen Verfahren ist, aber, im Gegensatz dazu, keine Ableitungen der Zielfunktion und Nebenbedingungen benötigt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden auf Aufgaben des Stahlbetonbrückenbaus angewandt. Zielkriterium sind die Baukosten, die sich aus den Kosten für Beton, Schalung und Bewehrung des Trägers ergeben. Die so optimierten Brückenträger sind um 20 % billiger als die standardisierten Träger. Die Stahleinsparung beträgt im Mittel 25 %, die Betoneinsparung im Mittel 12 %.

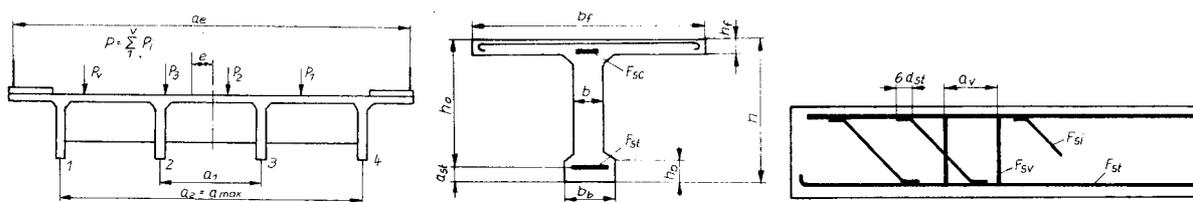


Abb. 27: Brückenquer-, Trägerquer- und Trägerlängsschnitt [Tha]

#### 4.5.7 Stahlbau

G. Pittioni [Pit] benutzt ein lineares Optimierungsverfahren unter Verwendung des Simplex-Algorithmus. Da die wenigsten Probleme aus dem Bereich der Tragwerksoptimierung ein ausschließlich lineares Modell besitzen, werden die nichtlinearen Bestandteile linearisiert. Es muß zunächst ein Lösungsanfangswert angenommen werden, der in den folgenden Iterationen so lange neu ermittelt wird, bis sich keine weitere Verbesserung dieses Wertes ergibt. Je näher die zu Beginn der Optimierung gewählte Lösungsannahme am Optimum liegt, desto weniger Iterationsschritte müssen bei einem relativ kleinen Linearisierungsfehler durchgeführt werden. Ist das mathematische Modell des Optimierungsproblems im zulässigen Bereich jedoch nichtkonvex, muß der zulässige Bereich in Abschnitte unterteilt und in den so entstandenen, mit hoher Wahrscheinlichkeit konvexen Teilräumen, Optimierungsrechnungen durchgeführt werden. Wenn bei einem nichtkonvexen Problem mehrere Suboptima auftreten oder aber das Optimum nicht in einer Ecke liegt, muß durch Unterteilung des zulässigen Bereiches und Durchführungen von Teiloptimierungen diesem Problem entgegengetreten werden. Das vorgestellte Verfahren wird an verschiedenen Beispielen des Stahlbaues, z. B. Hohlkastenträger, Kranbahnträger oder einem parallelgurtigen Fachwerk aus Rundrohren, vorgestellt, wobei die Optimierung nur mit dem Kriterium einer minimalen Querschnittsfläche bzw. eines minimalen Trägergewichts erfolgt und Kosten oder Topologieänderungen bei der Optimierung der Querschnitte nicht berücksich-

tigt werden. Die Ergebnisse der Beispielberechnungen werden in Tabellen zusammengestellt und können als Bemessungshilfe für eine überschlägliche Dimensionierung im Zuge von Entwurfsaufgaben verwendet werden.

Auch Sasmita [Sasm] stellt in seiner Arbeit ein Modell der technischen Optimierung vor, welches geeignet ist, unterschiedliche Problemstellungen, mit geringem Aufwand, in ein vorhandenes Optimierungsmodell zu integrieren. Der Einsatz der Finite-Elemente-Methode wird mit allgemeinen Optimierungsmethoden verknüpft, um exemplarisch die Optimierung von Stabtragwerken des Stahlbaues darzustellen. Der Ansatz zur Lösung der hier vorgestellten Optimierungsmethode besteht darin, die verschiedenen Abstraktionsebenen der technischen Optimierung zu definieren. Jede Ebene enthält eine oder mehrere Methoden und die zugehörigen Datenstrukturen. In einem Iterationsprozeß wird die Veränderung der Entwurfsvariablen so lange durchgeführt, bis keine Verbesserung der Zielfunktion, ohne Verletzung der Restriktionen, mehr möglich ist. An dem Beispiel einer allgemeinen Stabwerkskonstruktion im Stahlbrückenbau konnte durch Optimierung der Querschnittsabmessungen des Hauptträgers, des Bogens und der Hänger sowie der Parabelstichhöhe das Gesamtvolumen um 7,2 % verringert werden; eine zusätzliche Erhöhung des Parabelstiches des Bogens erbringt eine weitere Reduzierung des Gesamtvolumens um 7,6 % gegenüber den Startwerten.

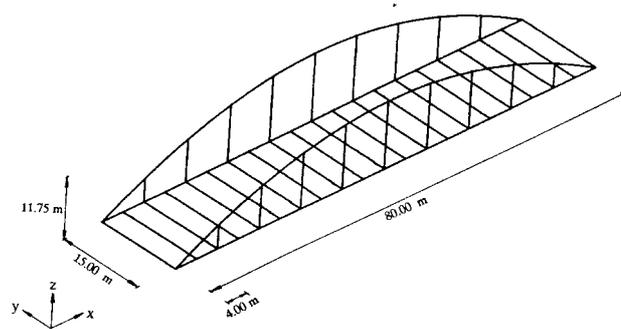


Abb. 28: Stabbogenbrücke [Sasm]

Die Arbeit von Wirth [Wir] beschäftigt sich mit der Anwendung der Methode der dynamischen Optimierung auf die Dimensionierung ebener Fachwerksysteme aus Stahl, unter ruhender Belastung. Als zu minimierende Zielfunktion wurde auch hier wieder der Materialaufwand, ausgedrückt durch das Volumen, gewählt. Daher muß für alle Fachwerkstäbe das gleiche Material verwendet werden. Veränderlich sind die Querschnittsflächen der Stäbe und die Systemgeometrie der Fachwerkkonstruktion; eine Veränderung des Eigengewichts wird im Laufe des Optimierungsalgorithmus allerdings nicht erfaßt. Ebenfalls werden der Materialaufwand für Verbindungsmittel, Knotenbleche, Auflagerkonstruktionen u.ä. im Optimierungsprozeß nicht berücksichtigt. Das Ergebnis einer so durchgeführten Optimierung ist in der Abb. 29 dargestellt.

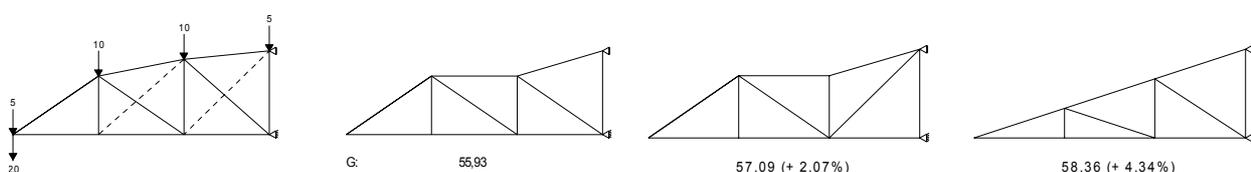


Abb. 29: Ausgangsvariante und verschiedene Lösungen mit den zugehörigen Gewichtsminimierungen

Golinski und Lesniak [Z-GoLe] stellen in einer Veröffentlichung, am Beispiel eines eingespannten Stabes, exemplarisch die Optimierung mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode vor. Anschließend werden die Ergebnisse anhand der optimalen Abmessungen des Querschnittes eines Längsträgers einer Eisenbahnbrücke verifiziert. Auch hier ist wieder der minimale Stahlverbrauch das Optimierungsziel. Die Aufgabe besteht in der Wahl solcher Abmessungen (Steghöhe, -dicke, Flanschhöhe, -dicke), daß die Querschnittsfläche minimal wird. Als Restriktionen gelten Festigkeits- sowie konstruktive und technologische Bedingungen. Es wurde die Monte-Carlo-Methode (Zufallsstichprobenmethode) zur approximativen Lösung des Problems angewandt.

Des weiteren hat sich Lesniak [Les], neben der Optimierung gewalzter I-Träger, auch mit unterschiedlichen Schweißträgern beschäftigt. In dieser Veröffentlichung wird unter anderem exemplarisch die Optimierung eines breitflanshigen Schweißträgers, mit kombinierten Methoden, vorgestellt. Zuerst wird nach der Monte-Carlo-Methode eine Näherungslösung ermittelt, wobei diese Näherungslösung als Ausgangspunkt für die anschließende Enumeration dient.

In beiden Fällen entsprechen jedoch die Normen und das verwendete Programm nicht mehr dem heutigen Stand.

#### 4.5.8 Optimierung in der Gebäudeplanung

Auch in der Optimierung von Grundrissen wurden in der Vergangenheit bereits Ansätze aufgezeigt, die mit Hilfe von Operations Research-Verfahren die gestellten Probleme lösen konnten. Es geht bei der Grundrißoptimierung in erster Linie um die Lösung eines Anordnungs- und eines Dimensionierungsproblems. Infolge des kombinatorischen Charakters der Aufgabenstellung ist jedoch eine exakte Lösung nur bei einer sehr kleinen Anzahl möglicher Grundrißvarianten möglich, bei größeren Problemen müssen Näherungsverfahren eingesetzt werden.

So stellt Flemming in [BBKO] und in [Die] schon 1977 ein Verfahren zur automatischen Erzeugung von Grundrißvarianten vor, das jedoch nur bei bestimmten Bedingungen (geometrische und topologische Restriktionen gegeben, Beschränkung auf rechteckige Grundflächen und auf T-förmige Grundrisse etc.) Lösungsvarianten erzeugt. Das Verfahren arbeitet in zwei Stufen (Bestimmung der Topologie, anschließend der Geometrie), da es bei variablen Abmessungen der Grundfläche äußerst schwierig ist, zulässige Lösungen in einem geschlossenen Ansatz zu finden. Das Verfahren hat allerdings Schwierigkeiten, wenn bei Entwurfsproblemen mit vielen Grundflächen nur wenige topologische Restriktionen vorhanden sind.

Auch Gauchel [BBKO] entwickelte ein Verfahren zur Erzeugung von optimierten Grundrißvarianten, das, im Gegensatz zu dem Verfahren von Flemming, nur für Industrie- und Verwaltungsgebäude geeignet ist. Bei dieser Gebäudeklasse besteht die grundlegende Schwierigkeit der Anordnungsplanung in der Minimierung der internen Transportaufwendungen und der Optimierung der technischen Erfordernisse. Auch bei diesem Verfahren wird in einem ersten Schritt die Topologie ermittelt, während in einem zweiten Schritt die Dimensionierung der Anordnungstopologie erfolgt. Auch die sonstigen Bedingungen sind weitgehend identisch. Zur Bestimmung der Anordnungstopologie wird das Transportminimierungsproblem mit einem Umlaufverfahren kombiniert. Zur Optimierung der technischen Erfordernisse muß das Reihenfolgeproblem jedoch halbautomatisch gelöst werden, d.h. alle Zwischenergebnisse sind visuell zu kontrollieren und zu bewerten.

Weitendorf stellt in [Z-Wei] die funktionelle Optimierung ein- und mehrgeschossiger Mehrzweckgebäude vor. Das Verfahren wurde so aufgebaut, daß eine mögliche Lösung in enger Anlehnung an die manuelle Arbeitsweise des Projektbearbeiters gegeben ist. Dafür muß das Verfahren in Teilprozesse aufgegliedert werden, die dann mit unterschiedlichen Lösungsalgorithmen, wie Vertauschungsverfahren, Umlaufmethode etc., bearbeitet werden. Nähere Einzelheiten über das Verfahren sind der Veröffentlichung nicht zu entnehmen.

Einen weiteren interessanten Ansatz liefern Hupfer und Untermann, die in [Z-HuUn] eine Methode zur linearen Optimierung bei der Entwicklung einer Wohnungsbaureihe vorstellen. Die mathematische Optimierung unterstützt hierbei den Entwurf der Grundrisse sowie der kompletten Gebäudeeinheiten. Die Gebäudebildung erfolgt nach dem Bausteinprinzip, wobei die Funktionseinheiten Wohnen und Erschließen zu Geschossen und diese wiederum zu Gebäuden zusammengefaßt werden. Da diese Wohnungsbaureihen im vorliegenden Beispiel anschließend in sehr großer Anzahl unverändert gebaut wurden, erweist sich eine vorherige Optimierung um so lohnender. Eine Vorauswahl von über 30 Grundrißtypen, die bei der Planung einer Gebäudeeinheit auch noch kombiniert werden konnten, wurde durch ein erstes Optimierungsmodell zunächst eingeschränkt. In einem weiteren Optimierungsschritt wurde die Anzahl der Gebäudeeinheiten, die sich aus den Grundrißtypen der ersten Optimierung ergaben, nochmals verringert.

Da sich die Anforderungen und Bedürfnisse von Mietern und Bauherren in den letzten Jahren stark verändert haben, und die Menschen nicht mehr in „Wohneinheiten“ zu Hause sein wollen, sind die Ansätze von [Z-HuUn] in der vorgestellten Form heute nicht mehr sinnvoll anwendbar. Und sicher sind auch die weiteren vorgestellten Ansätze nicht geeignet, individuelle Einfamilienhäuser zu optimieren. Aber bei der Entwicklung von Fertighaustypen scheinen die Ansätze auch noch in der heutigen Zeit vielversprechend zu sein. Immer größere Anforderungen seitens der Haustechnik, aber auch Schall-, Brand- und Wärmeschutz müssen unter den statischen Gegebenheiten optimal in der Planung berücksichtigt werden. Es gilt, alle Anforderungen mit möglichst geringen Herstellungskosten zu berücksichtigen oder anders ausgedrückt, in der Zielfunktion die Herstellungskosten, unter Berücksichtigung aller Restriktionen, zu minimieren. Und was ist zur Lösung dieser Aufgabe besser geeignet als ein mathematischer Algorithmus? Oder um es mit den Worten von Dierks [Die] auszudrücken: „Durch den Einsatz entsprechender Software-Programme eröffnet sich dem planenden Ingenieur die Möglichkeit, Routinearbeiten in gleicher Zeit für mehr alternative Entwürfe zu erstellen und so insgesamt zu einem besseren Entwurf zu gelangen“.

## 4.6 Optimierung von Dachtragwerken

### 4.6.1 Problemstellung

Dächer sollen Bauwerke vor Witterungseinflüssen und, in den meisten Fällen, auch vor Wärmeverlust schützen [FKNW2]. Das Dach eines Gebäudes besteht im wesentlichen aus der Dachhaut und aus dem Dachtragwerk. Bei der Auswahl von Dachtragsystemen spielen Wirtschaftlichkeitsüberlegungen eine besondere Rolle. Die Kostenunterschiede verschiedener Ausbildungsvarianten werden oft unterschätzt. So kann der Mehraufwand eines üblichen Dachtragwerkes, gegenüber einem sinnvoll ausgewählten und durchgebildeten, im Einzelfall bis zu 50 % betragen [BFHH]. Die Frage, welches Tragwerk in einem bestimmten Fall insgesamt am günstigsten ist, läßt sich nur schwer beantworten, da die Fragen zur Auswahl und wirtschaftlichen Durchbildung der Tragwerke weniger erforscht sind, als solche zur Statik und Festigkeitslehre.

Eine genauere Untersuchung der Thematik wurde bereits in den 70er Jahren von Wolfgang Brennecke, mit Unterstützung des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, durchgeführt, deren Ergebnisse sich in seiner Dissertation [Bre] und dem darauf aufbauenden Buch „Dach-Atlas: Geneigte Dächer“ [BFHH] wiederfinden. Der Autor geht in seiner Arbeit auf die unterschiedlichen Ausbildungsvarianten eines Dachtragwerkes ein und gibt Entscheidungshilfen, bei welchen Gebäudegeometrien man welches Dachtragwerk, z.B. Pfettendach, Sparrendach etc., sinnvoll wählen sollte. Unberücksichtigt bleibt hier jedoch die Frage nach den kostenoptimalen Rastermaßen der Sparren, innerhalb der verschiedenen Ausbildungsvarianten.

Das Ziel der folgenden, auf Pult- und Pfettendächer beschränkten Untersuchungen bestand also darin, den ökonomisch sinnvollsten Sparrenabstand, unter Berücksichtigung verschiedenster Randbedingungen, zu ermitteln. Bei gegebenen Belastungen aus Eigen-, Wind- und Schneelast und den daraus resultierenden Schnittgrößen ergeben sich, in Abhängigkeit vom gewählten Rastermaß der Sparren, eine Vielzahl von Ausführungsmöglichkeiten. Mit zunehmendem Sparrenabstand ergibt sich zwar eine schrittweise Verringerung der Sparrenanzahl, der zugehörige Querschnitt muß jedoch, resultierend aus der größeren Einzugsfläche, ebenfalls vergrößert werden. Auch der Dachlattenquerschnitt muß schrittweise vergrößert werden, da eine größere Distanz zu überbrücken ist. Eine zusätzlich vom Bauherrn gewünschte tragende Dachhaut, als Brettschalung oder aus Holzwerkstoffplatten, als zweite wasserführende Schicht, hat ebenfalls Auswirkungen auf das zu wählende Rastermaß, wenn beispielsweise die Holzwerkstoffplatten nur auf einem Sparren gestoßen werden dürfen, und der Verschnitt der Platten minimiert werden soll.

### 4.6.2 Pfettendächer

Bei den weit verbreiteten Pfettendächern werden die Sparren durch darunterliegende, längslaufende Balken (Pfetten) getragen, die wiederum mittels Stützen die Kräfte in die unteren Geschosse ableiten. Die einfachste Durchbildung besteht aus einer Fuß- und einer Firstpfette, bei größeren Spannweiten werden zusätzlich eine oder mehrere Mittelpfetten angeordnet; gegebenenfalls kann bei solchen Maßnahmen auch auf eine Firstpfette verzichtet werden. Bei einem Pultdach handelt es sich um eine Sonderform eines Pfettendaches, da lediglich eine Dachhälfte vorhanden ist.

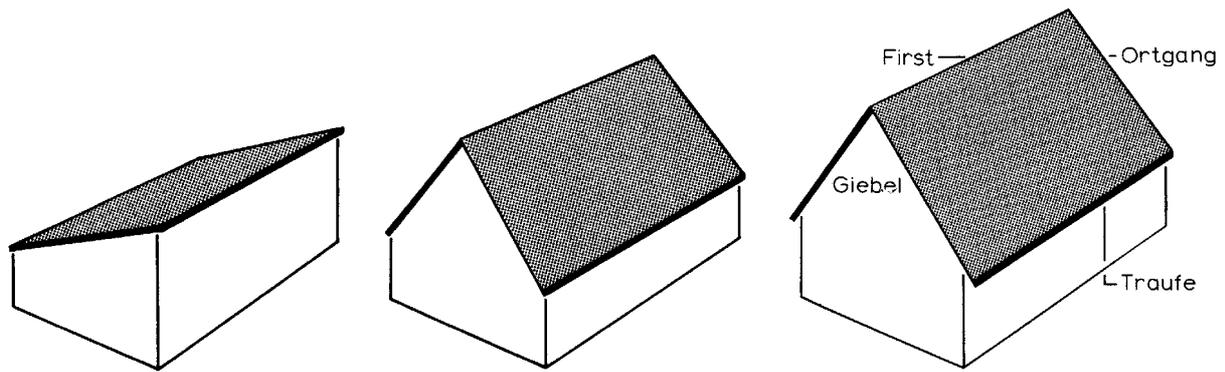


Abb. 30: Pulldach, Satteldach und Bezeichnung von Dachteilen [FKNW2]

Bei der herkömmlichen Bemessungsmethode wird nach der Ermittlung der Schnittkräfte die minimal erforderliche Trägerhöhe  $h$  bei vorgewähltem Sparrenabstand  $e$  und vorgewählter Sparrenbreite  $b$  bestimmt. Dafür müssen die in der DIN 1052-1 geforderten Nachweise geführt werden (Überprüfung der Biege- und Schubspannungen, Beschränkung der Durchbiegung etc.).

Ein Kippverband ist in der Regel für die Ausbildung eines Steildaches nicht relevant, da hier durch die Vielzahl der Dachlatten die Sparren seitlich gehalten sind. Die Auflagerpressung am Fußpunkt spielt ebenfalls für die Bemessung der Sparren eines herkömmlichen Steildaches in der Regel keine Rolle.

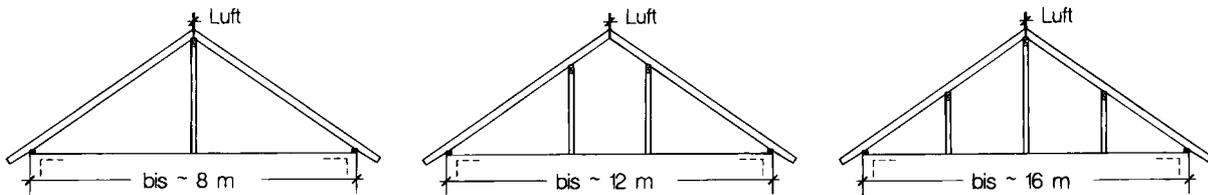


Abb. 31: Konstruktionsprinzip eines ein-, zwei- und dreistieligen Pfettendaches [HH232]

Das Konstruktionssystem der meisten Dachtragwerke ist in Abb. 31 und Abb. 32 dargestellt. Die Bauglieder werden in mehreren Trägerlagen kreuzweise übereinandergelegt. Die Dachlatten haben den kleinsten Abstand und sind oben angeordnet, nach unten hin folgen dann Sparren und Pfetten, bei größeren Spannweiten eventuell zusätzliche Binder.

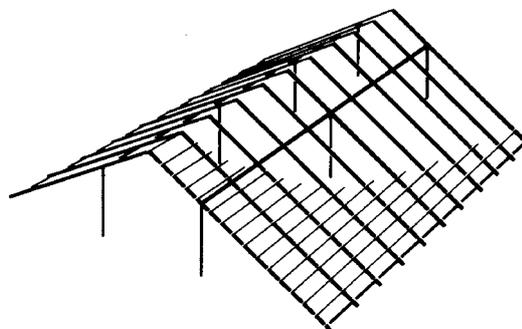


Abb. 32: Trärgitter mit drei sich kreuzenden Trägerlagen [BFHH]

Die Träger der einzelnen Lagen können statisch als Einfeld- oder Mehrfeldträger ausgebildet sein. Wieviel Trägerroste übereinander angeordnet werden, hängt von der Spannweite und vom Entwurf des Architekten bzw. Tragwerkplaners ab. In der Regel besteht der Trägerrost aus 3 Lagen (Dachlatten, Sparren und Pfetten).

Wie bereits erwähnt, wurden Ansätze zur wirtschaftlichen Optimierung von geneigten Dächern bereits 1977 von Brennecke ([Bre], [BFHH]), im Rahmen eines Forschungsvorhabens, entwickelt. Neben allgemeinen Informationen über Kostenunterschiede für unterschiedliche Dachtragwerke gibt er auch Regeln an, mit denen bereits der Konstrukteur vorab einen kostengünstigen Entwurf erreichen kann. Brennecke hat sich mit der "zweckmäßigsten Wahl und Durchbildung der Tragwerke", unter wirtschaftlichen, statischen und handwerklichen Gesichtspunkten, beschäftigt.

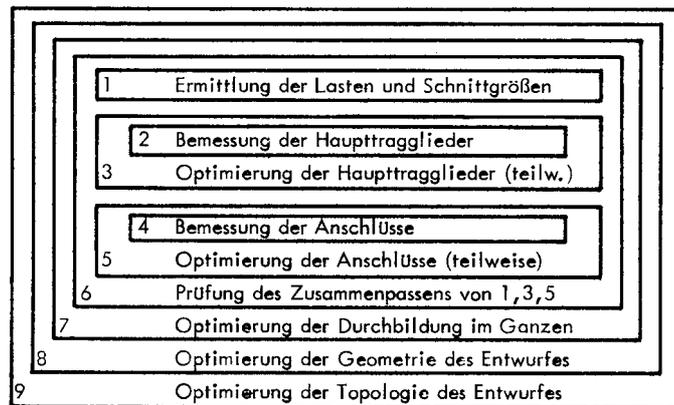


Abb. 33: Vorgehensweise bei der Optimierung [BFHH]

Da das Dachtragwerk oftmals schon durch den Architekten festgelegt wird, besteht das Ziel der Arbeit von Brennecke darin, Architekten und Ingenieuren die wichtigsten Gesichtspunkte zur Auswahl des richtigen Tragwerks näherzubringen. So wurden als Ergebnis der Optimierung Diagramme entwickelt, mit denen, in Abhängigkeit der Dachneigung und des Verhältnisses von Bauholzkosten zu Abbundkosten, die wirtschaftlichste Ausbildungsform eines Daches bestimmt werden kann. Diese Diagramme beruhen auf ca. 2500 Dachkonstruktionen, die in sich optimiert und bis zur genauen Anordnung aller Nägel bemessen, durchkonstruiert, kalkuliert und mit zahlreichen Ausbildungsalternativen verglichen wurden. Aus den Veröffentlichungen ist jedoch nicht zu erkennen, welches mathematische Verfahren dem Optimierungsalgorithmus zugrunde liegt.

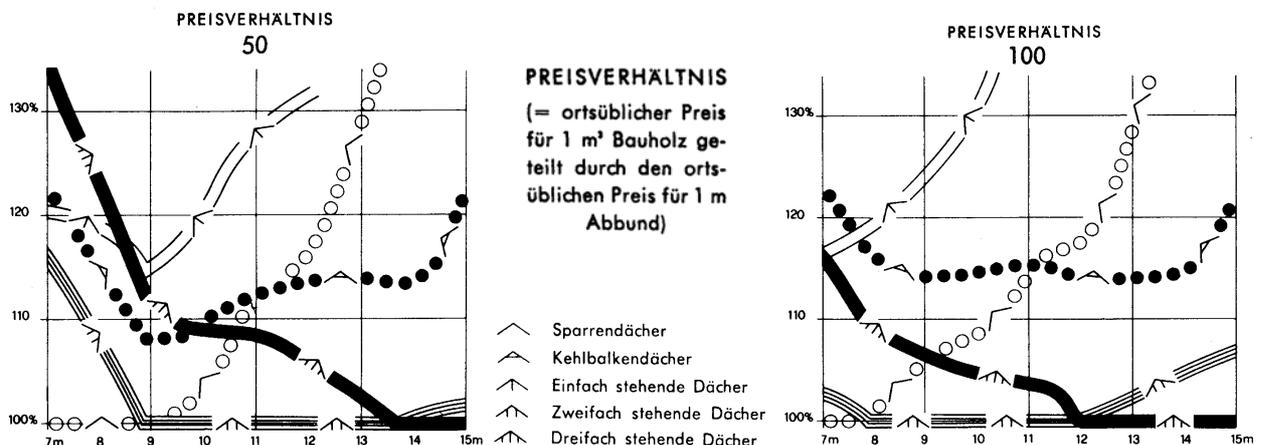


Abb. 34: Kostenvergleich der Ausführungsalternativen bei 40° Dachneigung [BFHH]

Bei Ein- und Mehrfamilienhäusern wird die Möglichkeit zur Optimierung bei der Durchbildung des Dachtragwerkes auch heute oftmals noch außer acht gelassen. Gemäß DIN 1055-3, gestützt auf eine Mitteilung des Deutschen Instituts für Bautechnik, hat sich der am weitesten verbreitete Dachlattenquerschnitt, 24/48 [mm], bis zu einer Spannweite von 70 cm erfahrungsgemäß bewährt. Bei größeren Spannweiten ist entweder ein gesonderter statischer Nachweis zu führen oder andere Querschnitte zu wählen. Umfragen in mehreren Büros von Prüfsingenieuren ergaben, daß in den meisten vorliegenden Standsicherheitsnachweisen von Gebäuden des privaten Wohnungsbaues ein Sparrenabstand von 70 cm gewählt wurde, ein weiterer Nachweis der Traglattung wurde nicht geführt. Es ist also festzuhalten, daß sehr oft als Standardsparrenabstand ein Maß von 70 cm gewählt wird, um auf einen gesonderten Nachweis der Traglattung verzichten zu können. Mit einem größer werdenden Sparrenabstand wird zwar die Lasteinzugsfläche der einzelnen Sparren sowie der Traglattung größer, d.h. es müssen größere Querschnitte gewählt werden, aber das Gesamtholzvolumen des Dachtragwerkes wird mit zunehmendem Abstand immer geringer. Um die Gesamtkosten zu verringern, ist es daher sinnvoll, den Sparrenabstand zu vergrößern und größere Lattenquerschnitte, bei ebenfalls größeren Sparrenquerschnitten, zu wählen. Telefonate mit verschiedenen Zimmereien bestätigten prinzipiell diese Aussage. Den Zimmereien kommt jedoch die momentan gängige Dimensionierungspraxis sehr entgegen, da sie durch das größere verbaute Holzvolumen auch einen höheren Umsatz erzielen können.

#### 4.6.3 Bemessung der Dachlattenquerschnitte

An dieser Stelle sollen zunächst die erforderlichen Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise zusammengestellt werden, um anschließend für ein Dachtragwerk eine kostenoptimale Bemessung, mit der Ermittlung der ökonomisch günstigsten Rasterweite, durchführen zu können.

Für die Bemessung ist die Beachtung der DIN 1052-1 und DIN 1055-3 erforderlich. Wie bereits erwähnt, wird ein Dachtragwerk in der Regel als 3-lagiger Trägerrost ausgebildet. Für die nötigen Nachweise der Sparren und Pfetten stehen in jedem Planungsbüro geeignete Softwarelösungen zur Verfügung, aber auch der Nachweis ohne EDV-Unterstützung stellt in der Regel für den Ingenieur kein Problem dar. Die Schwierigkeit besteht dagegen in der Optimierung des Gesamtsystems, bestehend aus Sparren und Dachlatten. Bei einer Vergrößerung des Sparrenabstandes müssen zum einen die Sparren neu dimensioniert werden, zum anderen muß die Tragfähigkeit der Dachlatten überprüft und gegebenenfalls durch solche mit größerem Querschnitt ersetzt werden. Da die Tragfähigkeit der verwendeten Dachlatten maßgebend für die Bestimmung des Sparrenabstandes ist, sollen die erforderlichen Nachweise im folgenden zusammengetragen werden.

#### Dachlattenquerschnitte

Nach DIN 1055-3 Abschnitt 6.2.3 ist kein Nachweis für Dachlattenquerschnitte erforderlich, wenn die nachfolgenden, erfahrungsgemäß bewährten Sparrenabstände eingehalten werden:

- 24/48 mm      ↪ Sparrenabstand  $e \leq 0,70$  m
- 30/50 mm      ↪ Sparrenabstand  $e \leq 0,80$  m
- 40/60 mm      ↪ Sparrenabstand  $e \leq 1,00$  m

Will man diese genannten Stützweiten der Dachlatten überschreiten, so muß der Lattenquerschnitt statisch nachgewiesen werden. Der Lattenquerschnitt ist abhängig von dem lichten Abstand der Sparren, dem Gewicht der Dacheindeckung und der gewählten Lattenweite. Der Bemessung sind dabei zwei Belastungsfälle zugrunde zu legen [HH231]:

- Eingedeckter Zustand
- Reparaturzustand

Für die Bemessung muß die auftretende Dachlast, gemäß Abb. 35, in die verschiedenen Lastkomponenten zerlegt werden.

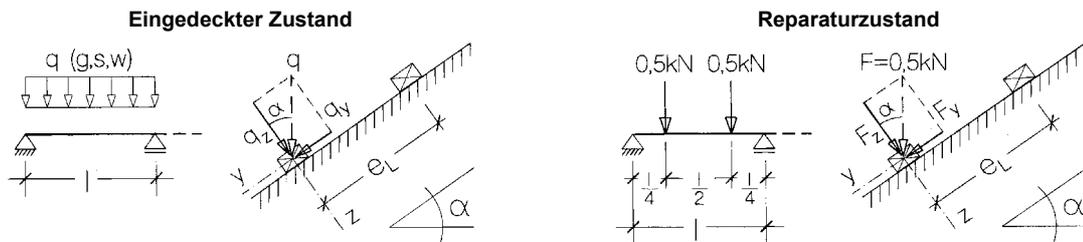


Abb. 35: Aufteilung der Lastkomponenten für den eingedeckten Zustand und den Reparaturzustand [HH231]

### Eingedeckter Zustand

Lastfall H:

$$q_z = (g \times \cos \alpha + s \times \cos^2 \alpha) \times e_L = (g \times \cos \alpha + (k_s \times s_0) \times \cos^2 \alpha) \times e_L \quad [\text{kN/m}]$$

$$q_y = (g \times \sin \alpha + s \times \sin \alpha \times \cos \alpha) \times e_L = (g \times \sin \alpha + (k_s \times s_0) \times \sin \alpha \times \cos \alpha) \times e_L \quad [\text{kN/m}]$$

Lastfall HZ:

$$q_z = (g \times \cos \alpha + s \times \cos^2 \alpha + w_D) \times e_L = (g \times \cos \alpha + (k_s \times s_0) \times \cos^2 \alpha + (c_p \times q)) \times e_L \quad [\text{kN/m}]$$

### Reparaturzustand

$$F_z = 0,5 \times \cos \alpha \quad [\text{kN}]$$

$$F_y = 0,5 \times \sin \alpha \quad [\text{kN}]$$

g = Eigenlast	[kN/m <sup>2</sup> ]
s = Schneelast	[kN/m <sup>2</sup> ]
k <sub>s</sub> = Abminderungswert	[-]
s <sub>0</sub> = Regelschneelast	[kN/m <sup>2</sup> ]
c <sub>p</sub> = Druckbeiwert	[-]
α = Dachneigung	[°]
e <sub>L</sub> = Lattenweite	[m]

Für die Ermittlung der max. zulässigen Spannweite sind anschließend eine Reihe von Nachweisen erforderlich:

- Biegebemessung infolge Gleichstreckenlast durch Dacheindeckung im LF H und LF HZ
- Durchbiegungsbeschränkung infolge Gleichstreckenlast durch Dacheindeckung
  - für  $l/200$
  - für  $f \leq 1\text{cm}$
- Biegebemessung infolge Mannlast im LF HZ
  - zwei Einzellasten in den äußeren Viertelpunkten der Stützweite
- Durchbiegungsbeschränkung infolge Mannlast
  - für  $l/100$
  - für  $f \leq 2\text{cm}$

Alle zuvor aufgelisteten Nachweise können unter der Annahme des statischen Systems eines Einfeldträgers oder eines Mehrfeldträgers geführt werden. Sicherlich ist es bei einem komple-

den Dachstuhl nicht auszuschließen, daß an einigen wenigen Stellen eine Dachlatte als Einfeldträger eingefügt und belastet wird, der Regelfall dürfte jedoch ein Mehrfeldsystem sein. Es erscheint daher unangemessen, den kompletten Dachstuhl für den Ausnahmefall zu bemessen, da überdies in den meisten Fällen der Reparaturzustand bemessungsrelevant ist, bei dem es sich auch nur um einen Ausnahmezustand handelt. Für die weitere Bemessung wurde daher die Annahme eines 3-Feld-Trägers zugrunde gelegt.

Zusammenstellung der zur Bemessung erforderlichen Formeln

Der Nachweis der Traglattung wird weder in DIN 1052 bzw. dem Kommentar zur DIN 1052 noch in anderer weiterführender Literatur umfassend genug dargestellt. Daher wurden hier die erforderlichen Nachweise sorgfältig herausgearbeitet und zusammengestellt. Die angegebenen Formeln wurden jeweils nach der max. zulässigen Spannweite l [m] aufgelöst.

- Biegebemessung infolge Gleichstreckenlast durch Dacheindeckung  
 ↳ Annahme: 3-Feld-Träger (Stützmoment maßgebend)

LF H	LF HZ
$\sigma = \frac{M_z}{W_y} + \frac{M_y}{W_z}$ <p style="text-align: center;">zul. <math>\sigma = 1,1 \times 1,0 = 1,1 \text{ kN/cm}^2</math></p> $1,1 = \frac{0,1 \times q_z \times l^2}{W_y} + \frac{0,1 \times q_y \times l^2}{W_z}$ $1,1 = l^2 \times \left( \frac{0,1 \times q_z \times W_z + 0,1 \times q_y \times W_y}{W_y \times W_z} \right)$ $l = \sqrt{\left( \frac{1,1 \times W_z \times W_y}{0,1 \times q_z \times W_z + 0,1 \times q_y \times W_y} \right)} \times 0,1$	$\sigma = \frac{M_z}{W_y} + \frac{M_y}{W_z}$ <p style="text-align: center;">zul. <math>\sigma = 1,1 \times 1,25 \times 1,0 = 1,38 \text{ kN/cm}^2</math></p> $1,38 = \frac{0,1 \times q_z \times l^2}{W_y} + \frac{0,1 \times q_y \times l^2}{W_z}$ $1,38 = l^2 \times \left( \frac{0,1 \times q_z \times W_z + 0,1 \times q_y \times W_y}{W_y \times W_z} \right)$ $l = \sqrt{\left( \frac{1,38 \times W_z \times W_y}{0,1 \times q_z \times W_z + 0,1 \times q_y \times W_y} \right)} \times 0,1$

- Durchbiegung infolge Gleichstreckenlast durch Dacheindeckung

für l/200	für f ≤ 1cm
$f_{z,y} = 6,8 \times q \times \frac{l^4}{l_{z,y}}$ $\frac{l}{2} = \sqrt{f_z^2 + f_y^2} \quad (l \text{ in cm})$ $= \sqrt{\left( 6,8 \times \frac{q_z \times l^4}{l_y} \right)^2 + \left( 6,8 \times \frac{q_y \times l^4}{l_z} \right)^2}$ $= l^4 \times 6,8 \sqrt{\frac{q_y^2}{l_z^2} + \frac{q_z^2}{l_y^2}}$ $l = \left( 13,6 \sqrt{\frac{q_y^2}{l_z^2} + \frac{q_z^2}{l_y^2}} \right)^{-1/3}$	$f_{z,y} = 6,8 \times q \times \frac{l^4}{l_{z,y}}$ $1 = \sqrt{f_z^2 + f_y^2}$ $= \sqrt{\left( 6,8 \times \frac{q_z \times l^4}{l_y} \right)^2 + \left( 6,8 \times \frac{q_y \times l^4}{l_z} \right)^2}$ $= l^4 \times 6,8 \sqrt{\frac{q_y^2}{l_z^2} + \frac{q_z^2}{l_y^2}}$ $l = \left( 6,8 \sqrt{\frac{q_y^2}{l_z^2} + \frac{q_z^2}{l_y^2}} \right)^{-1/4}$

- Biegebemessung infolge Mannlast (LF HZ)
  - ↳ Annahme: 3-Feld-Träger (Feldmoment maßgebend)

$$\sigma = \frac{M_z}{W_y} + \frac{M_y}{W_z}$$

zul.  $\sigma = 1,25 \times 1,0 \text{ kN/cm}^2 = 1,25 \text{ kN/cm}^2$

$$1,25 = \frac{0,21 \times F_z \times l}{W_y} + \frac{0,21 \times F_y \times l}{W_z}$$

$$1,25 = \frac{0,21 \times F_z \times l \times W_z + 0,21 \times F_y \times l \times W_y}{W_y W_z}$$

$$l = \frac{1,25 \times W_y \times W_z}{21 \times F_z \times W_z + 21 \times F_y \times W_y}$$

- Durchbiegung infolge Mannlast

für $l/100$	für $f \leq 2\text{cm}$
$f_{z,y} = 19,4 \times F \times \frac{l^3}{I_{z,y}}$	$f_{z,y} = 19,4 \times F \times \frac{l^3}{I_{z,y}}$
$\frac{l}{1} = \sqrt{f_z^2 + f_y^2} \quad (l \text{ in cm})$	$2 = \sqrt{f_z^2 + f_y^2} \quad (l \text{ in cm})$
$= \sqrt{\left(19,4 \times F_z \times \frac{l^3}{I_y}\right)^2 + \left(19,4 \times F_y \times \frac{l^3}{I_z}\right)^2}$	$= \sqrt{\left(19,4 \times F_z \times \frac{l^3}{I_y}\right)^2 + \left(19,4 \times F_y \times \frac{l^3}{I_z}\right)^2}$
$= l^3 \times 19,4 \sqrt{\frac{F_y^2}{I_z^2} + \frac{F_z^2}{I_y^2}}$	$= l^3 \times 19,4 \times \sqrt{\frac{F_y^2}{I_z^2} + \frac{F_z^2}{I_y^2}}$
$l = \left(19,4 \times \sqrt{\frac{F_y^2}{I_z^2} + \frac{F_z^2}{I_y^2}}\right)^{-1/2}$	$l = \left(\frac{2}{19,4 \times \sqrt{\frac{F_y^2}{I_z^2} + \frac{F_z^2}{I_y^2}}}\right)^{1/3}$

#### 4.6.4 Ergebnisse der analytischen Optimierung

Erste Untersuchungen mit den zusammengestellten Dachlattennachweisen haben gezeigt, daß die gängigen Querschnitte 24/48 [mm] und 30/50 [mm] durch einen genaueren statischen Nachweis in der Regel eher versagen, als wenn die zul. Stützweiten erfahrungsgemäß bewährter Lattenquerschnitte nach DIN 1055 zugrunde gelegt werden.

Weiterhin ist zu beachten, daß Gespräche mit einem großen Personenkreis sowohl aus der Praxis (Zimmerleute und Dachdecker) als auch aus der Theorie (Universitäten) bestätigten, daß die auf den Baustellen vorliegende Qualität der Dachlatten eher der Sortierklasse S7, als der eigentlich geforderten Sortierklasse S10 für tragende Bauteile entspricht; das bedeutet eine um weitere 30 % verringerte Tragfähigkeit. Dadurch liegt der genauere statische Nachweis der Dachlattenquerschnitte noch weiter auf der ungünstigen Seite der Bemessung, da hier von NH S10 ausgegangen wurde.

Interessant, im Rahmen einer Optimierung, wird daher der Querschnitt 40/60 [mm], da erst hier, durch einen genaueren statischen Nachweis, größere Spannweiten möglich werden. Auch der weniger gebräuchliche, aber durchaus mögliche Querschnitt 40/40 [mm], bringt, gegenüber dem gängigen Querschnitt 30/50 [mm], noch eine erhebliche Steigerung in der Tragfähigkeit.

Insgesamt gesehen sollte der Querschnitt 24/48 [mm] überhaupt nicht mehr eingesetzt werden, da selbst bei einer Spannweite von 70 cm die statischen Reserven völlig erschöpft sind (max. Spannweite beim statischen Nachweis, unter Annahme von NH S10, liegt zwischen 50 - 60 cm!, siehe auch Abb. 36, S. 63). Der Querschnitt 30/50 [mm] liefert dagegen bei einer um 30 % vergrößerten Fläche eine Steigerung in der zulässigen Spannweite um ca. 55 % (im wesentlichen baupraktischen Bereich zwischen 25° und 45° Dachneigung). Außerdem ist hier eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den überlieferten Erfahrungswerten und dem statischen Nachweis zu erkennen. Der relativ selten eingesetzte Querschnitt 40/40 [mm] liefert, gegenüber dem Querschnitt 30/50 [mm], auch wieder eine Steigerung der mittleren Spannweite von ca. 20 % bei einer um nur 7 % vergrößerten Fläche.

Das Verhältnis in der Steigerung der Fläche zur Steigerung der mittleren Spannweite, bezogen auf den Standardquerschnitt 24/48 [mm] im maßgebenden Dachneigungsbereich von 25- 45°, ist in Tab. 5 zusammengestellt.

Lattenquerschnitt [mm/mm]	Verhältnis der Fläche/ Kosten [%]	Verhältnis der Spannweite [%]
24/48	100	100
30/50	130	155
40/40	139	184
40/60	208	319
60/60	313	519

Tab. 5: Steigerungen [%] im Bezug zur Standardlatte 24/48 mm

Die Bemessung der Dachlatten wurde mit Hilfe einer Tabellenkalkulation (MS-Excel), entsprechend der vorgestellten Formeln, realisiert. Um eine effizientere Vorabdimensionierung zu realisieren, wurden in Abb. 36 die zulässigen Spannweiten der verschiedenen Querschnitte für die maßgebenden Lastfälle nochmals zusammengestellt.

Bei den Querschnitten 24/48, 30/50 und 40/40 [mm] ist jeweils die Biegespannung im Reparaturzustand maßgebend und beim Querschnitt 40/60 [mm] die Beschränkung der Durchbiegung im eingedeckten Zustand.

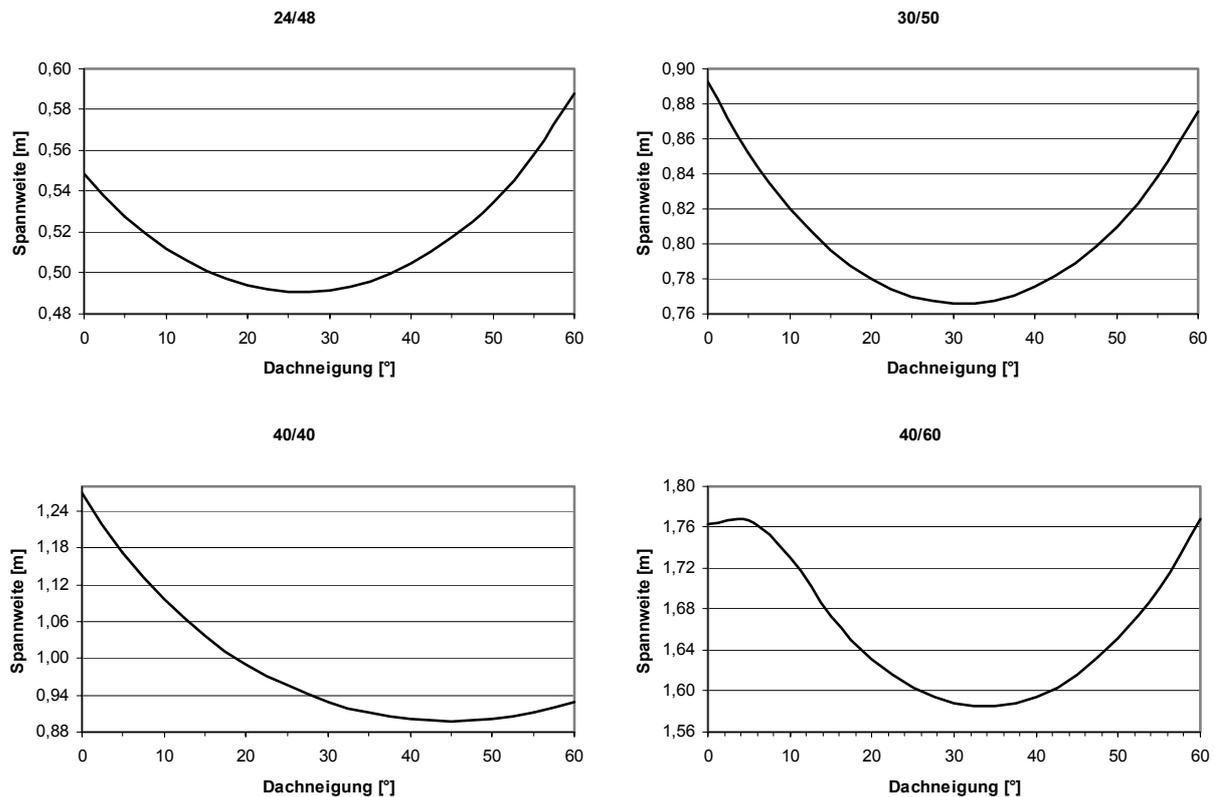


Abb. 36: Zulässige maximale Spannweite der Standarddachlattenquerschnitte ( $g = 0,55 \text{ kN/m}^2$ ,  $s_0 = 0,75 \text{ kN/m}^2$ , Staudruck  $q = 0,5 \text{ kN/m}^2$ , Lattenweite 33 cm)

### Besonderheiten bei der Dachlattenbemessung

In der folgenden Auflistung sind abschließend nochmals einige erwähnenswerte Besonderheiten bei der Bemessung von tragenden Dachlatten zusammengestellt:

- Nach DIN 1055-3 ist für tragende Bauteile die Sortierklasse S10 gemäß DIN 4074-3 erforderlich. Nach Aussage des Zentralverbandes des Dachdeckerhandwerkes wird jedoch aus Kostengründen auf den meisten Baustellen unsortiertes Holz verwendet. Zur Zeit erarbeitet der Zentralverband eine Richtlinie, die wenigstens die Verwendung der Sortierklasse S7 vorschreibt.
- Tragwerksplaner, Dachdecker und Zimmerleute richten sich weitgehend nach der Tabelle der „erfahrungsgemäß bewährten Lattenquerschnitte“, die vom Institut für Bautechnik in Berlin herausgegeben wurde. Diese Tabelle wurde aus bis zu 100 Jahren zurückliegenden Erfahrungswerten der Zimmerleute und Dachdecker entwickelt; ihr liegt daher kein rechnerisches Verfahren und keine Vorschrift zugrunde. Weiterhin sind weder Güteklasse noch Sortierklasse benannt, so daß in der Regel, ohne schriftliche Vereinbarung, unsortiertes Holz verwendet wird.
- Bei der Ausführung von Sparrenabständen größer als 1,0 m bestehen seitens der Verbände Bedenken über die Sicherheit am Bau, da die Güte der verwendeten Materialien und die ordnungsgemäße Ausführung kaum überwacht werden. Außerdem ist die Gefahr von Unfällen, bedingt durch die höheren Abstände und die dadurch federnden Dachlatten, höher.

- Bei dem Nachweis der Biegebemessung im Reparaturzustand sind, da die Normen in diesem Punkt nicht eindeutig sind, kontroverse Meinungen vorhanden. So ist es denkbar, den Nachweis mit der Mannlast und zusätzlich dem Eigengewicht der Dachdeckung zu führen (wenn beispielsweise Reparaturen am gedeckten Dach durchgeführt werden). Durch diese Annahme verringert sich allerdings die Tragfähigkeit erheblich, da dieser Lastfall überwiegend bemessungsrelevant wird. Hierbei handelt es sich jedoch, wie auch die denkbare Annahme eines Einfeldträgers bei der Wahl des statischen Systems, um einen absoluten Ausnahmezustand. Weiterhin ist fraglich, ob für diesen Bemessungsfall das gewählte statische System überhaupt noch der Realität entspricht, da durch die Eindeckung eine gewisse Lastverteilung stattfindet, die der Annahme von zwei Einzellasten in den äußeren Viertelpunkten widerspricht. Daher wird hier nach gründlicher Recherche und Studie der gängigen Literatur der Biegenachweis für den Belastungsfall Reparaturzustand nur mit der Mannlast (ohne Eigengewicht der Dachdeckung) im Lastfall HZ geführt.
- Bei der Verwendung von Holzwerkstoffplatten als äußere Beplankung ergibt sich der zulässige Sparrenabstand aus der Tragfähigkeit der Platte bzw. der bauaufsichtlichen Zulassung. Somit ist oftmals der zulässige Sparrenabstand auf 1,0 Meter beschränkt.

#### 4.6.5 Optimierung des Gesamtsystems

Durch die Erläuterungen des vorherigen Abschnitts kann der planende Ingenieur nun relativ schnell den maximal zulässigen Sparrenabstand, bei gegebenen Dachlattenquerschnitten, bestimmen. Es besteht aber weiterhin die Schwierigkeit, das kostengünstigste Gesamtragsystem zu ermitteln, da sich die Konstruktionskosten aus mehreren Positionen zusammensetzen.

- Sparren

Sparrenvolumen [m<sup>3</sup>]:

$$\left( \frac{\text{Trauflänge [m]}}{\text{Sparrenabstand [m]}} + 1 \right) \times F_D \times \text{Sparrenlänge [m]} \times \text{Sparrenbreite [m]} \times \text{Sparrenhöhe [m]}$$

Aufunden!

$F_D$  = Anzahl der Dachhälften = 2 (bei Satteldach) bzw. 1 (bei Pultdach)

Abbundlänge [m]:

$$\left( \frac{\text{Trauflänge [m]}}{\text{Sparrenabstand [m]}} + 1 \right) \times F_D \times \text{Sparrenlänge [m]}$$

Aufunden!

Anzahl der Sparrenköpfe [Stück]:

$$\left( \frac{\text{Trauflänge [m]}}{\text{Sparrenabstand [m]}} + 1 \right) \times F_D$$

Aufunden!

- 2. wasserführende Schicht (Unterspannbahn / Schalung / Holzwerkstoffplatte)

Dachfläche [m<sup>2</sup>]:

$$\text{Trauflänge [m]} \times \text{Sparrenlänge [m]} \times F_D$$

- Konterlattung

Kostenäquivalente Dachfläche [m<sup>2</sup>):

$$\text{Dachfläche [m}^2] \times F_{\text{Sa}} = \text{Trauflänge [m]} \times \text{Sparrenlänge [m]} \times F_{\text{D}} \times F_{\text{Sa}}$$

$$F_{\text{Sa}} = \text{Umrechnungsfaktor des Sparrenabstandes} = \frac{0,7 \text{ [m]}}{\text{Sparrenabstand [m]}}$$

- Kosten der Dachlattung

Kostenäquivalente Dachfläche [m<sup>2</sup>):

$$\text{Dachfläche [m}^2] \times F_{\text{Lw}} = \text{Trauflänge [m]} \times \text{Sparrenlänge [m]} \times F_{\text{D}} \times F_{\text{Lw}}$$

$$F_{\text{Lw}} = \text{Umrechnungsfaktor der Lattenweite} = \frac{0,33 \text{ [m]}}{\text{Lattenweite [m]}}$$

### Gesamtkosten der Konstruktion [DM]

- (Sparrenvolumen [m<sup>3</sup>] × Bauholzkosten [DM/m<sup>3</sup>])
- + (Abbundlänge [m] × Abbundkosten [DM/m])
- + (Anzahl Sparrenköpfe [Stück] × Kosten der Sparrenkopfausbildung) [DM/Stück]
- + (Dachfläche [m<sup>2</sup>] ×  $\frac{0,7 \text{ [m]}}{\text{Sparrenabstand [m]}}$  × Kosten der Konterlattung [DM/m<sup>2</sup>])
- + (Dachfläche [m<sup>2</sup>] ×  $\frac{0,33 \text{ [m]}}{\text{Lattenweite [m]}}$  × Kosten der Dachlattung [DM/m<sup>2</sup>])
- + (Dachfläche [m<sup>2</sup>] × Kosten der 2. wasserführenden Schicht [DM/m<sup>2</sup>])

Die Ermittlung der ökonomisch sinnvollsten Konstruktion wurde wieder in einer Tabellenkalkulation (MS-Excel), entsprechend der vorgestellten Formeln, umgesetzt. Hierbei werden zunächst die zulässigen Spannweiten der erfahrungsgemäß bewährten Querschnitte zugrunde gelegt. Erst wenn diese Spannweiten überschritten werden, wird die Tragfähigkeit der Traglattung rechnerisch überprüft und gegebenenfalls ein größerer Querschnitt gewählt. Die Sparrenhöhe muß, bei gegebener Breite, in Abhängigkeit des Sparrenabstandes, mit Hilfe einer separaten Software ermittelt und die Werte in die Tabellenkalkulation übertragen werden. Bei einer äußeren Beplankung mit Holzwerkstoffplatten muß der Anwender darauf achten, daß der Sparrenabstand ein Teiler der vorhandenen Plattenlänge ist, da Platten mit Nut und Feder nur auf einem Sparren gestoßen werden dürfen. Bei Platten ohne Nut und Feder wird so gleichzeitig eine Verschnittminimierung gewährleistet.

Um das Auswahlverfahren des kostenoptimalen Dachtragwerkes weiter zu beschleunigen und die Einbindung zusätzlicher Bemessungssoftware zu vermeiden, wurde das Software-Tool OptimaD entwickelt.

#### 4.6.6 Dachstuhloptimierung durch Software-Tool OptimaD

Auf Grundlage der zuvor erarbeiteten Kenntnisse wurde das Software-Tool OptimaD entwickelt, das sowohl für Pfettendächer als auch für Holzbalkenlagen (siehe Kapitel 4.8) das kostenoptimale Rastermaß, innerhalb frei wählbarer Grenzen für die Sparren bzw. Balken, ermittelt. Ausgangsproblem des Pfettendaches ist, wie bereits erläutert, der nahezu standardisierte Sparren-

abstand von 70 bis 75 cm bei Gebäuden des privaten Wohnungsbaues. Hinzu kommt, daß die erforderliche Sparrenhöhe oftmals nicht mehr aus der Standsicherheitsbemessung resultiert, sondern infolge verstärkter Wärmeschutzmaßnahmen erforderlich wird. Der Sparrenquerschnitt wird, in Abhängigkeit von Dachneigung, Dachdeckung und Dachlast, statisch eventuell nicht voll ausgenutzt, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit der Gesamtkonstruktion weiter verschlechtert. In Abhängigkeit der Tragfähigkeit der Sparren sowie der tragenden Dachlattung sind jedoch oftmals größere Sparrenabstände möglich.

Die Aufgabe des Software-Tools OptimaD liegt darin, bei bekannten Lastannahmen und den sich daraus ergebenden Schnittgrößen, alle zulässigen Varianten, d.h. alle Kombinationen aus Sparrenabstand, Sparrenhöhe, Sparrenbreite und zugehörigem Dachlattenquerschnitt, zu ermitteln und sie, nach Kosten sortiert, auf dem Bildschirm auszugeben bzw. auszudrucken. Alle erforderlichen Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise werden nach DIN 1052-1 geführt.

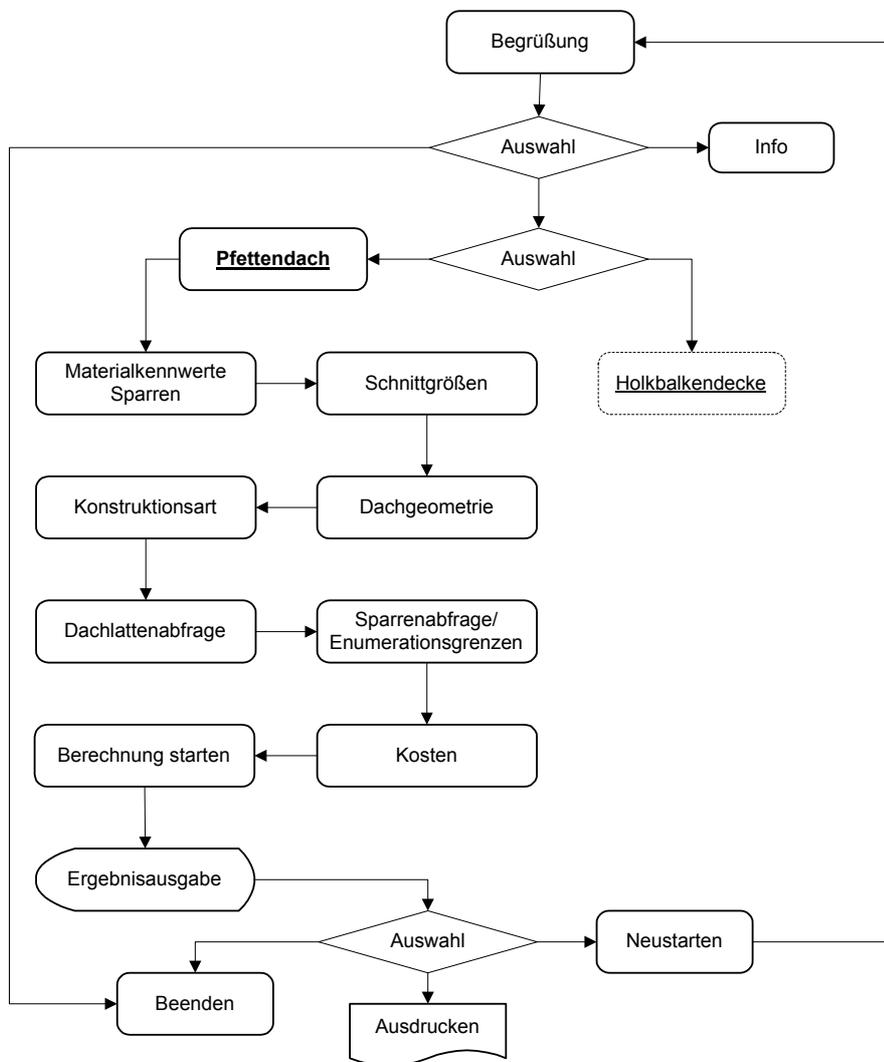


Abb. 37: Allgemeine Programmstruktur der Pfettendachoptimierung bei OptimaD

Nach der Begrüßung kann der Anwender wählen zwischen der Optimierung eines Pfettendaches und einer Holzbalkenlage. Nachdem er sich für das Pfettendach entschieden hat, werden sequentiell die im folgenden genannten Informationen abgefragt (siehe auch Abb. 37).

### Erforderliche Eingabeparameter

- Materialgüte der Sparren: NH S10 bzw. NH S13
- Schnittgrößen: Feldmoment, Stützmoment, Querkraft, erf. Flächenträgheitsmoment
- Dachgeometrie: Dachneigung, Trauflänge und Sparrenlänge
- Ausbildungsart der Dachschalung: Unterspannbahn, Holzwerkstoffplatte, Brettschalung  
↳ bei der Variante mit Holzwerkstoffplatten sind die Plattenabmessungen anzugeben
- Dachlasten: Eigenlast (Dachdeckung), Schneelast, Windlast
- Optimierungsparameter: Sparrenabstand, Sparrenhöhe und -breite  
↳ Iterationsbereich vom kleinsten bis zum größten Wert sowie zugeh. Schrittweite
- Material- und Fertigungskosten: Sparren (Bauholz, lfdm. Abbund, Sparrenköpfe), Trag- und Konterlattung, Dachschalung (Unterspannbahn, Holzwerkstoffplatte, Brettschalung)

Die Schnittgrößen für den statischen Nachweis der Dachsparren müssen bislang mit einer separaten Statiksoftware ermittelt werden. Eine Implementierung der Schnittkraftermittlung wurde noch nicht verwirklicht, da zum einen die allgemeingültige Umsetzung (Ein- und Mehrfeldträger, unterschiedliche Stützweiten etc.) sehr aufwendig ist und zum anderen entsprechende Software, teils als Freeware, weit verbreitet ist. In Abhängigkeit vom statischen System ist eventuell sogar eine manuelle Berechnung möglich.

Mit Hilfe der eingegebenen Informationen ist es nun möglich, die kostenoptimale Ausbildungsvariante zu ermitteln. Hierbei ist zu beachten, daß vom Anwender zusätzliche Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. So ergibt sich die Mindestsparrenhöhe oftmals nicht aus dem Standsicherheitsnachweis, sondern resultiert aus dem Wärmeschutznachweis.

In Abb. 38 sind exemplarisch zwei der insgesamt sieben Eingabemasken dargestellt.

The image shows two side-by-side screenshots of software input masks. The left one is titled 'Eingabe der Dachlasten' and the right one is 'Eingabe der Kosten'.

**Eingabe der Dachlasten:**

- Dachdeckung:** Three radio buttons for selection:
  - Betondachsteine:  $g=0.55 \text{ kN/m}^2$ , Lattenabstand el [m] = 0.320
  - kleinf. Biberschwänze:  $g=0.95 \text{ kN/m}^2$ , Lattenabstand el [m] = 0.144
  - andere:  $g \text{ [kN/m}^2\text{]} =$  [ ] el [m] = [ ]
- Schneelast:**
  - Radio button selected: Eingabe der Regelschneelast  $S_o \text{ [kN/m}^2\text{]} =$  0.75 oder
  - Radio button unselected: Berechnung
    - Geländehöhe bis 200 m [ ] Schneezone I [ ]
    - Schneelast je  $\text{m}^2$  Grundrissprojektion der Dachfläche  $S =$  0.469  $\text{kN/m}^2$
- Windlast:**
  - $W \text{ [kN/m}^2\text{]} =$  0.35
  - Dachhöhe über Gelände:
    - Radio button selected: 0 bis 8 m
    - Radio button unselected: 8 bis 20 m
    - Radio button unselected: > 20 m

Buttons: Weiter, Zurück, Beenden

**Eingabe der Kosten:**

- Sparren:**
  - Bauholz [DM/m<sup>3</sup>] 550.00
  - lfdm. Abbund [DM/m] 12.00
  - Sparrenköpfe [DM/St.] 2.50
- Dachlattung:**
  - 24/48 [DM/m<sup>2</sup>] 12.30
  - 30/50 [DM/m<sup>2</sup>] 13.00
  - 40/60 [DM/m<sup>2</sup>] 13.30
- Konterlattung:** [DM/m<sup>2</sup>] 4.20
- Unterspannbahn:** [DM/m<sup>2</sup>] 8.00
- Brettschalung:** [DM/m<sup>2</sup>] 35.00
- Holzwerkstoffplatte:** [DM/m<sup>2</sup>] 39.00

Buttons: Weiter, Zurück, Beenden

Abb. 38: Eingabemaske der Dachlasten (links) und der Kosten (rechts)

Da es sich um ein nichtlineares Problem handelt, bieten sich besonders hier die Methoden der Entscheidungsbaumverfahren an. Die prinzipielle Vorgehensweise soll anhand der folgenden Abbildungen verdeutlicht werden. So zeigt Abb. 39 einen Entscheidungsbaum für jeweils vier mögliche Sparrenbreiten (6, 8, 10, 12 [cm]) bzw. -höhen (12, 16, 20, 24 [cm]), bei einem fixen Sparrenabstand von 70 cm. Somit sind hier  $4 \times 4 = 16$  mögliche Alternativen vorhanden.

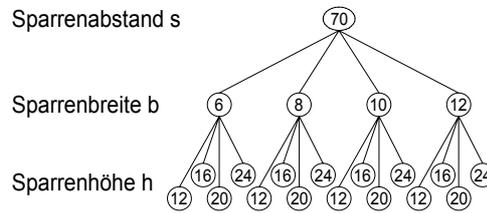


Abb. 39: Entscheidungsbaum bei fixem Sparrenabstand s

Stehen für den Sparrenabstand ebenfalls vier Alternativen zur Verfügung (70, 80, 90, 100 [cm]), ergeben sich insgesamt  $4 \times 4 \times 4 = 64$  Möglichkeiten, die auf Zulässigkeit zu überprüfen sind. Werden tatsächlich alle 64 Möglichkeiten untersucht, handelt es sich um eine vollständige Enumeration (siehe hierzu den in Abb. 40 dargestellten vollständige Entscheidungsbaum).

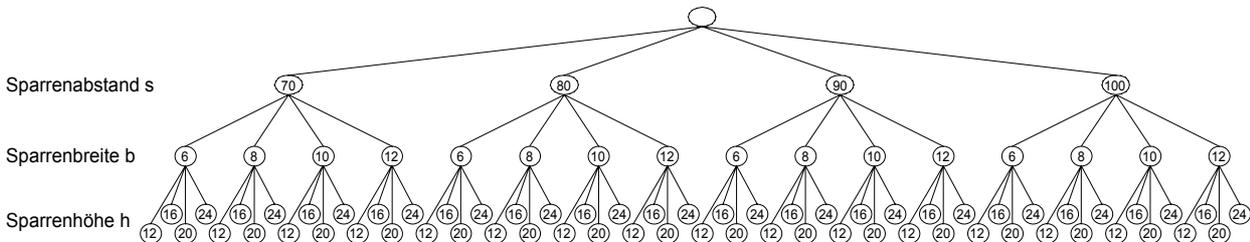


Abb. 40: Vollständiger Entscheidungsbaum bei je vier Wahlalternativen

Die Enumeration beginnt mit dem geringsten Sparrenabstand sowie der kleinsten Sparrenbreite und variiert zunächst die Sparrenhöhe. Sodann wird die Sparrenhöhe bei fixem Sparrenabstand variiert und zuletzt der Sparrenabstand verändert. Auf diese Weise werden alle Alternativen, die sämtliche Nachweise erfüllen, mit den zugehörigen Gesamtkosten bestimmt.

Um die Anzahl der zu untersuchenden Alternativen zu verringern, kann auch eine beschränkte Enumeration gewählt werden. Dieses kann beispielsweise dadurch realisiert werden, daß die Enumeration zum nächsten Sparrenabstand wechselt, sobald ein zulässiger Balkenquerschnitt ermittelt wurde. Da die Enumeration stets mit dem kleinsten Querschnitt beginnt, wird somit auch für jeden Sparrenabstand der Querschnitt ermittelt, der bei kleinster Querschnittsfläche alle Nachweise erfüllt. Abb. 41 verdeutlicht, wie auf diese Weise die Menge der zu untersuchenden Alternativen stark eingeschränkt werden kann (hier ca. 50 %).

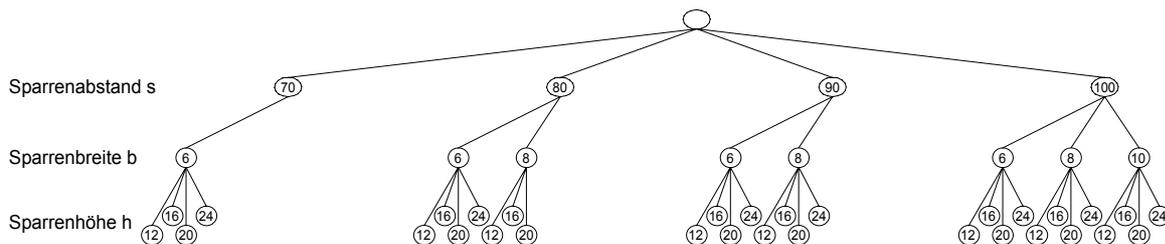


Abb. 41: Beschränkter Entscheidungsbaum; Abbruchkriterium: eine zul. Lösung ermittelt

Der in dem Software-Tool OptimaD implementierte Lösungsalgorithmus ist die Methode der vollständigen Enumeration, mit der die Gesamtheit aller zulässigen Lösungen ermittelt wird. Bedingt durch die enorme Rechenleistung heutiger Personalcomputer birgt die vollständige Enumeration in diesem Fall keinerlei Nachteile gegenüber der beschränkten Enumeration. Der wesentliche Vorteil liegt jedoch darin, daß hier alle zulässigen Varianten ermittelt werden und somit für den Anwender die Möglichkeit besteht, mehrere Alternativen kostenmäßig gegeneinander abzuwägen. So ist direkt zu bestimmen, welche Mehrkosten durch eine bestimmte Vorgabe seitens des Bauherrn oder der Zimmerei, z.B. eine Sparrenbreite von 8 oder 10 [cm] oder ein gewünschter Sparrenabstand, gegenüber der optimierten Ausführung entstehen. Die eigentliche Optimierungsprozedur, programmtechnisch realisiert anhand mehrerer ineinander verschachtelter Schleifen, ist in Abb. 42 dargestellt.

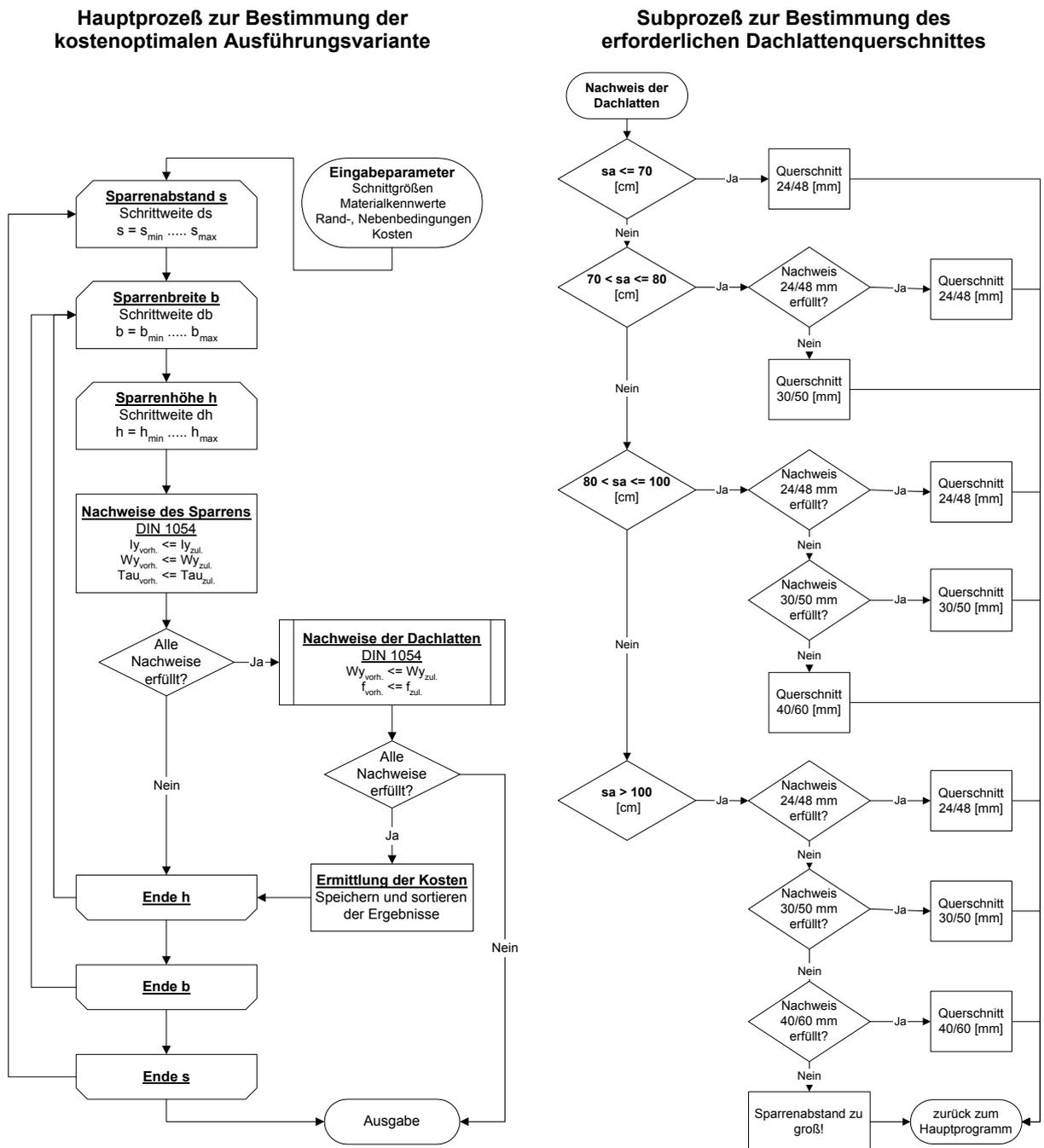


Abb. 42: Flußdiagramme des Haupt- und Subprozesses bei OptimaD

Nach Eingabe der erforderlichen Parameter führt OptimaD einen iterativen Prozeß durch, in dem für die jeweilige Konstruktion die Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise geführt werden. Die Iteration beginnt mit der kleinsten Sparrenbreite, Sparrenhöhe und dem kleinsten Sparrenabstand. Diese unteren Grenzen werden, ebenso wie die oberen Grenzen (max. Sparrenbreite, -höhe und -abstand), vom Anwender während der Eingabe festgelegt. Für den Sparren führt OptimaD dann den Biege- und Schubspannungsnachweis durch und überprüft die zul. Durchbiegung. Kann der Nachweis nicht eingehalten werden, wird zuerst die Sparrenhöhe erhöht und die Berechnung erneut durchgeführt. Bei weiteren Überschreitungen der zulässigen Spannungen wird weiterhin zunächst die Sparrenhöhe bis zur oberen Grenze erhöht und anschließend auch die Sparrenbreite bis zur oberen Grenze. Wenn der Nachweis des Sparrens erfüllt ist, wird der dem vorliegenden Sparrenabstand zugehörige Dachlattenquerschnitt bestimmt. Dafür sind die Parameter der drei gängigsten Dachlattenformate 24/48, 30/50 und 40/60 [mm], inklusive der erfahrungsgemäß bewährten Spannweiten, im Programm fest implementiert. Bei Überschreitung der erfahrungsgemäß bewährten Spannweiten werden für das entsprechende Dachlattenformat die Nachweise für die Belastungsfälle „Eingedeckter Zustand“ und „Reparaturzustand“, unter der Annahme des statischen Systems eines Durchlaufträgers, mit gleichen Stützweiten, geführt. Kann der Nachweis der Tragfähigkeit nicht erbracht werden, erfolgt automatisch die Auswahl des jeweils größeren Dachlattenformates.

Sind die Nachweise für den Sparren und die Dachlatten erbracht, ermittelt das Programm die zugehörigen Kosten und speichert diese zulässige Variante ab. Danach wird die Sparrenhöhe in der gewählten Schrittweite erhöht und die Berechnung erneut gestartet. Die Optimierungsprozedur wird vorzeitig unterbrochen, wenn entweder der Sparren mit den maximalen Abmessungen, sowohl in der Höhe als auch in der Breite, oder aber die Dachlatten bei dem vorliegenden Sparrenabstand, auch mit dem maximalen Querschnitt von 40/60 [mm], die geforderten Nachweise nicht mehr erfüllen. Nachdem auf diese Weise alle möglichen Varianten berechnet wurden, gibt das Programm alle zulässigen Kombinationen, sortiert nach den Gesamtkosten, auf dem Bildschirm oder Drucker aus.

Wenn die Dachschalung aus Holzwerkstoffplatten besteht, ist eine modifizierte Vorgehensweise notwendig, da es hier nicht möglich ist, den Sparrenabstand innerhalb bestimmter Grenzen mit einer festgelegten Schrittweite zu variieren. Um den Verschnitt bei der Beplankung zu minimieren, sind als Sparrenabstand nur bestimmte Größen zulässig. Es ergeben sich maximal 11 theoretisch mögliche Sparrenabstände, wenn die Plattenlänge durch einen Wert von 2 bis maximal 12 dividiert wird (bei einer maximal möglichen Länge der Holzwerkstoffplatte von 5,00 m ergibt sich bei einem Divisor von 12 noch ein eventuell sinnvoller Sparrenabstand von 41,7 cm). Anschließend wird geprüft, ob der auf diese Weise ermittelte Sparrenabstand innerhalb der vom Anwender vorgegebenen Grenzen liegt und ob weiterhin die zulässigen Spannungen und Verformungen bei der Holzwerkstoffplatte eingehalten werden. Bei dieser Ausführungsvariante bleiben letztendlich nur einige wenige mögliche Konstruktionsalternativen übrig, da die Holzwerkstoffplatte in der Regel bei einer Spannweite von über einem Meter in ihrer Tragfähigkeit versagt (weitere Erläuterungen im Abschnitt 4.8.6, Seite 101).

Die aus der Berechnung resultierende Ergebnistabelle beinhaltet, im oberen Bereich, zusammenfassend nochmals einige der wesentlichen Eingabeparameter (Dachneigung, Konstruktion der Dachschalung etc.). Ausgegeben wird die Sparrenbreite, Sparrenhöhe und der Sparrenab-

stand, das erforderliche Dachlattenformat, das Gesamtholzvolumen der Konstruktion (zusammengesetzt aus dem Volumen der Sparren, der Trag- und Konterlattung) sowie die daraus resultierenden Gesamtkosten (siehe auch Abb. 43). Bei der in der Bildschirmausgabe angegebenen Variantenummer handelt es sich lediglich um eine intern vergebene Größe.

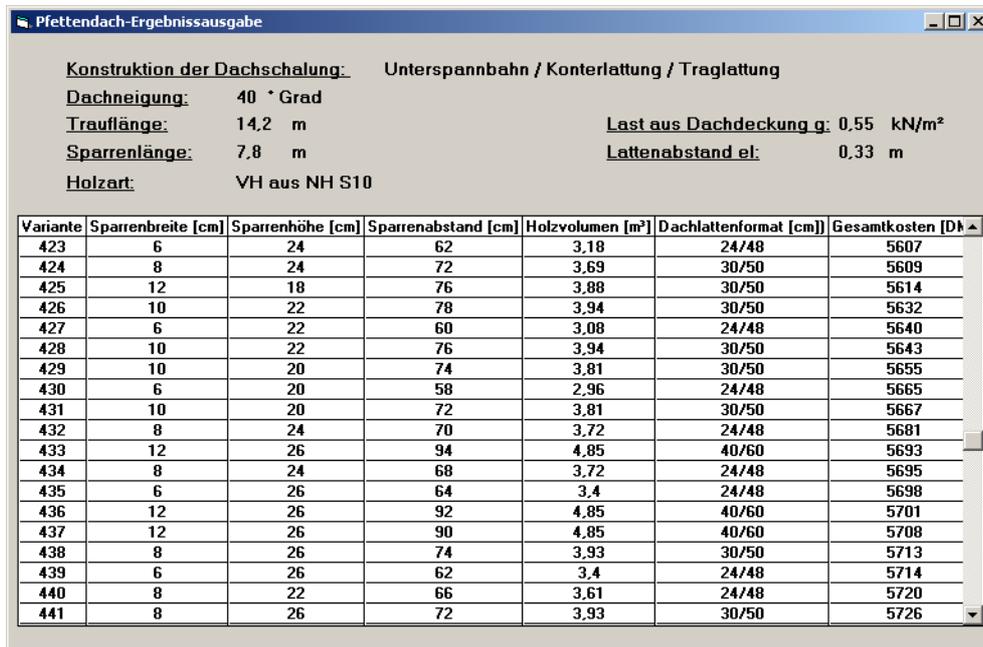


Abb. 43: Bildschirmausgabe der zul. Lösungen (nach Kosten sortiert)

### Anwendungsbeispiel

Zur weiteren Verifizierung wurden abschließend, in enger Zusammenarbeit mit einem Ingenieurbüro, an einigen Standsicherheitsnachweisen existierender Gebäude nachträgliche Variantenuntersuchungen, bezüglich der Ausbildung des Dachstuhles, mit den entwickelten Planungshilfen durchgeführt. Am Beispiel des in Abb. 44 dargestellten Einfamilienwohnhauses in Massivbauweise, aus dem Jahr 1997, sollen die Ergebnisse exemplarisch aufgezeigt werden.

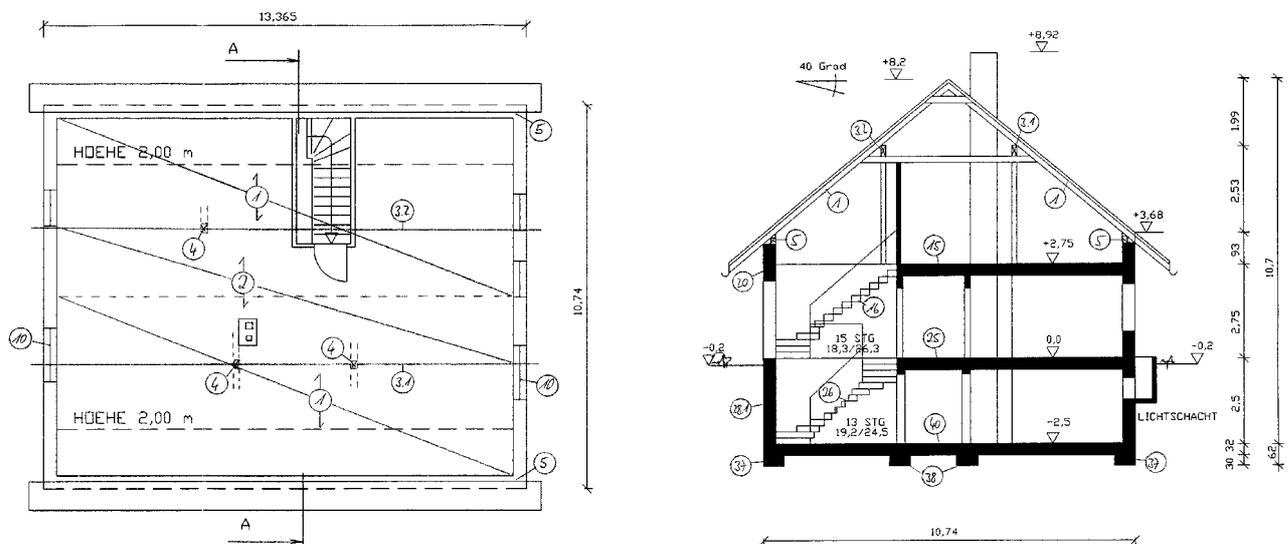


Abb. 44: Dachgeschoßgrundriß und Schnitt des untersuchten Gebäudes

Für das Pfettendach des Gebäudes, Dachneigung  $\alpha = 40^\circ$ , wurden in der Ausführung Sparren mit einem Querschnitt von  $b/h = 8/20$  cm bei einem Sparrenabstand von  $e = 75$  cm verwendet. Die Sparrenlänge beträgt 7,79 m, die Trauflänge, incl. beidseitigem Dachüberstand, beträgt 14,20 m. Es wurden Dachlatten  $b/h = 30/50$  mm bei einer Lattenweite von  $e_L = 33$  cm verwendet. Die Sparren wurden oberseitig mit einer Holzschalung und einer diffusionsoffenen Unterspannbahn versehen. Die Kosten für diese obere Bekleidung und die Art der Ausführung bleiben, unabhängig von der Ausbildung des Dachstuhls, konstant und werden daher bei den weiteren Kostenuntersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Für die Variantenuntersuchungen wurden folgende Kostenansätze zugrunde gelegt:

- Bauholzkosten: 485,- [DM/m<sup>3</sup>]
- Sparrenkopfausbildung: 2,50 [DM/Stück]
- Kosten Traglattung 24/48: 12,30 [DM/m<sup>2</sup>]
- Kosten Traglattung 40/40: 13,10 [DM/m<sup>2</sup>]
- Abbundkosten: 8,50 [DM/lfdm.]
- Kosten Konterlattung: 4,20 [DM/lfdm.]
- Kosten Traglattung 30/50: 13,- [DM/m<sup>2</sup>]
- Kosten Traglattung 40/60: 13,30 [DM/m<sup>2</sup>]

Die Ergebnisse der so durchgeführten Variantenuntersuchungen sind in Tab. 6 dargestellt.

Sparrenabstand	Sparrenhöhe	Sparrenanzahl	Bauholzkosten	Abbundkosten	Kosten Sparrenköpfe	Kosten Konterlattung	Abm. Traglattung	Kosten Traglattung	Gesamtkosten	Ersparnis gegenüber Ist-Zustand	
[m]	[cm]	[Stück]	[DM]	[DM]	[DM]	[DM]	[mm/mm]	[DM]	[DM]	[DM]	[%]
<b>Ist-Zustand [8/20]</b>											
0,75	20	40	2.418,02	2.648,60	100,00	1.308,72	30/50	2.876,07	9.351,40		
<b>Sparrenbreite 6 cm</b>											
0,70	18	44	1.795,38	2.913,46	110,00	1.439,59	24/48	2.721,20	8.979,63	371,77	<b>4,0</b>
0,80	20	38	1.722,84	2.516,17	95,00	1.243,28	30/50	2.876,07	8.453,36	898,05	<b>9,6</b>
0,83	20	38	1.722,84	2.516,17	95,00	1.243,28	40/40	2.898,19	8.475,48	875,92	<b>9,4</b>
0,90	22	34	1.695,63	2.251,31	85,00	1.112,41	40/40	2.898,19	8.042,55	1.308,86	<b>14,0</b>
1,00	22	32	1.595,89	2.118,88	80,00	1.046,98	40/60	2.942,44	7.784,19	1.567,22	<b>16,8</b>
1,05	22	30	1.496,15	1.986,45	75,00	981,54	40/60	2.942,44	7.481,58	1.869,83	<b>20,0</b>
<b>Sparrenbreite 8 cm</b>											
1,00	18	32	1.740,97	2.118,88	80,00	1.046,98	40/60	2.942,44	7.929,27	1.422,14	<b>15,2</b>
1,07	18	30	1.632,16	1.986,45	75,00	981,54	40/60	2.942,44	7.617,59	1.733,81	<b>18,5</b>

Tab. 6: Ergebnisse der Variantenuntersuchungen an dem Dachstuhl eines bestehenden Gebäudes

Da zur Erfüllung des Wärmeschutznachweises gemäß WSchVo im vorliegenden Fall eine Mindestdämmstärke von 18 cm erforderlich war, wurden hier nur die Querschnitte mit einer Sparrenhöhe von mindestens 18 cm aufgelistet. Für den Nachweis der Dachlatten wurden die zul. Stützweiten erfahrungsgemäß bewährter Lattenquerschnitte nach DIN 1055-3 zugrunde gelegt, bei einer Abweichung wurde ein rechnerischer Nachweis der Traglattung geführt.

Es ist zu erkennen, daß im vorliegenden Fall Einsparungen bis zu 20 % zu erzielen sind. Diese Ergebnisse konnten durch Untersuchungen an zahlreichen weiteren Wohngebäuden gefestigt

werden. Auch dort hat sich gezeigt, daß, je nach Ausbildung des ursprünglichen Dachstuhles, Einsparungen von 15 bis 20 % möglich sind. Besonders interessant ist ein Sparrenabstand von 1,05 m bei 6 cm breiten Sparren bzw. 1,07 m bei 8 cm breiten Sparren, da sich hierbei jeweils eine lichte Weite von 0,99 m ergibt.

Die meisten plattenförmigen Festdämmstoffe haben eine Höhe von 1,0 m, auch Rollmatten sind in einer Breite von 1,0 m erhältlich. Da der Dämmstoff mit etwas Vorspannung zwischen die Sparren gepreßt werden muß, kann er hier direkt, ohne einen entsprechenden Zuschnitt, eingebaut werden, was sich, neben dem erwähnten Effekt der Bauholzreduzierung, zusätzlich positiv auf die Einbauzeiten auswirkt. Leider waren, trotz intensiver Recherche und gezielter Anfragen an verschiedene Hersteller von Dämmstoffen, keine Arbeitszeitrichtwerte für den Einbau von Dämmmaterialien in Erfahrung zu bringen, um diese Zeitersparnis weiter verifizieren zu können.

#### Abschließende Bemerkung:

Die Allgemeinen technischen Vertragsbedingungen (ATV) DIN 18334 „Zimmer- und Holzbauarbeiten“, wie sie in der VOB 1998 abgedruckt sind, stammen aus dem Jahr 1985. Seit dieser Zeit wurden lediglich redaktionelle Änderungen übernommen. Erst nach Abschluß der hier vorliegenden Untersuchungen wurde in Erfahrung gebracht, daß bereits im Jahr 1997 der Bund Deutscher Zimmermeister (BDZ) eine Überarbeitung der ATV beantragte. Eine der geforderten Änderungen betrifft Abschnitt 3.8-Dachlatten. Die geltende Forderung „Dachlattung ist aus Latten der Güteklasse I nach DIN 68365 herzustellen“, soll zukünftig ersetzt werden durch die Forderung „Dachlattung ist mindestens aus Latten mit einem Querschnitt von 30 x 50 [mm] nach DIN 4074-1, Sortierklasse S 10, herzustellen“. Diese Forderung des BDZ untermauert die Ergebnisse, die im Rahmen der eigenen Untersuchungen erzielt wurden.

## 4.7 Optimierung von Biegeträgern (Unterzügen)

### 4.7.1 Problemstellung

Bei der Bemessung stabförmiger, quer zur Längsachse belasteter Bauteile wird die Betrachtung der zugehörigen Kosten meist außer acht gelassen. Im Normalfall wird der planende Ingenieur versuchen, durch eine iterative Verringerung des Querschnittes möglichst die zulässigen Spannungen zu erreichen, in der Hoffnung, dadurch den Trägerwerkstoff möglichst optimal auszunutzen. Während dieses Vorgehen bei den weitgehend homogenen Werkstoffen Holz und Stahl durchweg gelingt, da die Kosten überwiegend an den Querschnitt gekoppelt sind (eine Verringerung des Querschnittes bewirkt gleichzeitig eine Kostenreduzierung), ist dieser vereinfachte Ansatz bei dem inhomogenen Werkstoff Stahlbeton nicht mehr möglich. Der Ansatz, den Bewehrungsanteil möglichst gering zu halten, wird hier keinesfalls zu einem ökonomisch sinnvollen Querschnitt führen, da sich die Gesamtkosten bei der Herstellung eines Stahlbetonträgers aus mehreren Positionen (Beton, Bewehrung, Schalung) zusammensetzen. Um diesen Sachverhalt deutlicher zu machen, werden die beiden angesprochenen Werkstoffgruppen im folgenden näher untersucht.

### 4.7.2 „Homogene“ Werkstoffe Holz und Stahl

Der Werkstoff Holz soll im Rahmen der hier getroffenen Definition als homogen gelten, obwohl es sich eigentlich um einen inhomogenen Werkstoff handelt, da Holz quer und längs zur Faser völlig unterschiedliche Materialkennwerte aufweist. Weil sich aber, wie bei Stahl, in den meisten Fällen eine Kostenreduzierung, allein durch eine Verringerung der Querschnittsfläche, erreichen lässt, wird für den Ansatz der Optimierung eine Homogenität vorausgesetzt.

#### Anwendungsbeispiel

Ein parallelkantiger Holzträger (NH S10) auf zwei Stützen, mit einer Länge  $l = 4,00$  m, wird mit einer Gleichstreckenlast  $q = 3,0$  kN/m belastet. Bei Kosten von  $600,-$  DM/m<sup>3</sup> ist der ökonomisch günstigste Querschnitt gesucht, der den Bemessungsanforderungen der DIN 1052-1 entspricht.

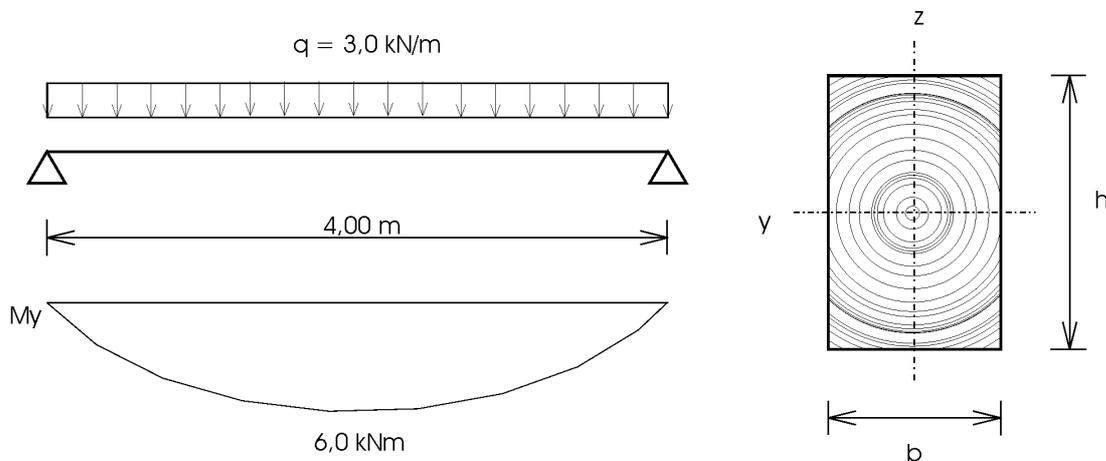


Abb. 45: Statisches System und qualitativer Verlauf der Momentenfläche

### Herkömmlicher Bemessungsansatz

Ermittlung der Schnittgrößen und Bemessung des Querschnittes, unter Berücksichtigung der zul. Spannungen bzw. Durchbiegungen:

- Schnittgrößen  
A = B = 6 kN; max.  $M_F = 6,0$  kNm
- Bemessung  
erf.  $A_q = 100$  cm<sup>2</sup> (zul. Abminderung gemäß DIN 1052-1, Abschnitt 8.2.1.2, ist nicht berücksichtigt!)  
erf.  $W_y = 600$  cm<sup>3</sup>  
erf.  $I_y = 7488$  cm<sup>4</sup>  
↳ Überprüfung der zul. Querpressung am Auflager des Balkens wird vernachlässigt.

Der bemessende Ingenieur wird nun für eine bestimmte Breite, anhand eines Tabellenwerkes, die erforderliche Höhe wählen. Ob aber der so gewählte Balkenquerschnitt die minimale Querschnittsfläche aufweist, läßt sich nur durch den Vergleich verschiedener Varianten feststellen.

### Bemessung als Optimierungsaufgabe

Um die gestellte Aufgabe zu lösen, muß eine Zielfunktion unter gegebenen Restriktionen optimiert werden. Da die Kosten hauptsächlich von der gewählten Querschnittsfläche abhängen, muß diese in der Zielfunktion minimiert werden. Bei den Restriktionen muß man zwischen Neben- und Hauptrestriktionen unterscheiden. Nebenrestriktionen beschreiben beispielsweise die Grenzen der Abmessungen (minimale Breite und Höhe bzw. maximale Breite und Höhe) oder beschränken die möglichen Abmessungen auf baupraktische Verhältnisse (z.B.  $h/b \leq 4$ ). In den Hauptrestriktionen wird sichergestellt, daß der Querschnitt sowohl die Standsicherheits- als auch die Gebrauchstauglichkeitsnachweise einhält.

Als Optimierungsaufgabe ausgedrückt:

Nichtnegativitätsbedingungen:  $b, h \geq 0$

Nebenrestriktionen:  $h/b \geq 1$  (R I)  
 $h/b \leq 4$  (R II)

Hauptrestriktionen: vorh  $\sigma_B \leq$  zul  $\sigma_B$  (R III)  
 vorh  $\tau \leq$  zul  $\tau$  (R IV)  
 vorh  $f \leq l / 300$  (R V)

Zielfunktion:  $A = b \times h = \min.!$

Zur Lösung dieser Aufgabe sind sowohl Methoden der nichtlinearen Optimierung als auch Methoden der Entscheidungsbaumverfahren geeignet. Da es sich in diesem Fall um ein 2-dimensionales Problem handelt, kann die Aufgabe auch graphisch gelöst werden. Es kann eine Beschränkung auf den ersten Quadranten der Ebene stattfinden, da Höhe und Breite des Trägers nur positive Werte annehmen dürfen. Dieser weiterhin unendlich große Lösungsraum wird nun durch die statischen Erfordernisse beschränkt; Wertepaare, die unterhalb einer bestimmten Kurve liegen, erfüllen nicht die notwendigen Anforderungen (siehe Abb. 46). Weiterhin muß beachtet werden, daß es sich um eine ganzzahlige Optimierung für diskrete Werte handelt, da von den Sägewerken in der Regel nur bestimmte Vorzugsabmessungen zur Verfügung gestellt werden.

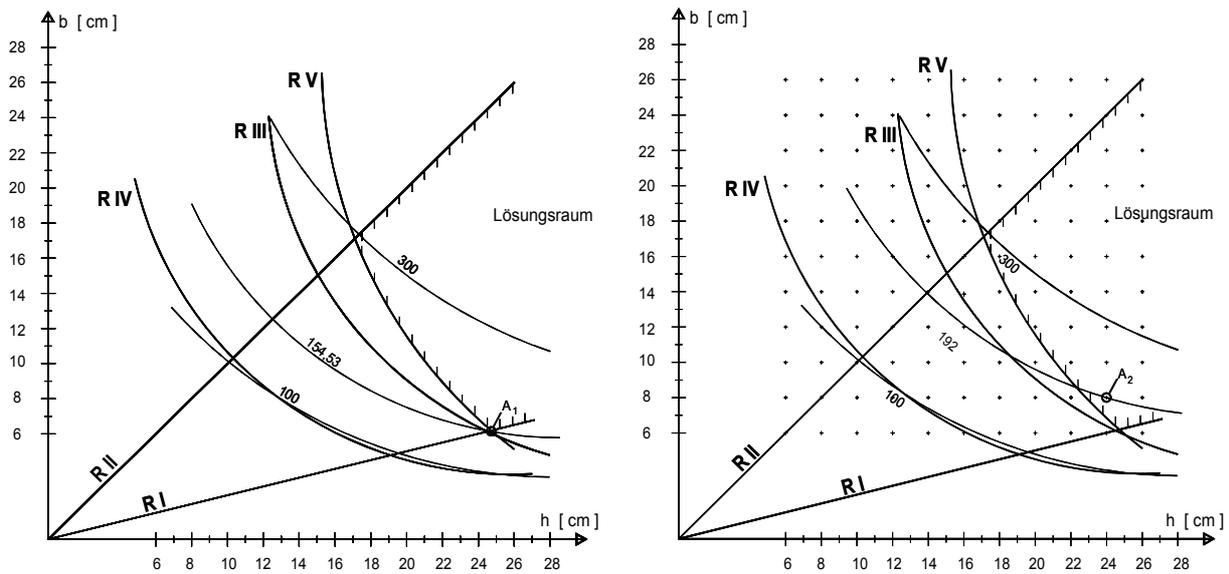
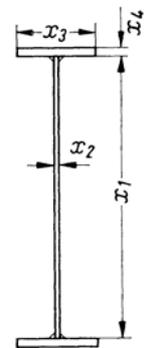


Abb. 46: Graphische Lösung mit Berücksichtigung aller Restriktionen (links kontinuierlicher, rechts diskreter Lösungsraum) [D-ChOs]

Während die optimale Lösung bei kontinuierlichen Entscheidungsvariablen den Zielfunktionswert  $A = 154,5 \text{ cm}^2$  ( $h = 6,3 \text{ [cm]}$ ,  $b = 24,5 \text{ [cm]}$ ) liefert, ergibt sich bei der Berücksichtigung diskreter Größen ein Wert von  $A = 192 \text{ [cm}^2\text{]}$  ( $h = 8 \text{ [cm]}$ ,  $b = 24 \text{ [cm]}$ ).

Dimitrov / Hoyer [DiHo] schlagen in diesem Zusammenhang vor, einen logarithmischen Maßstab zu wählen, damit die Kurven der Restriktionen zu Geraden gestreckt und die Ergebnisse besser abgelesen werden können.

Auch die Dimensionierung eines Stahlträgers kann in entsprechender Weise als Optimierungsaufgabe dargestellt werden. Als Optimierungskriterium wird das Minimum der Querschnittsfläche des Trägers gewählt, da das Kostenminimum mit dem geringsten Stahlverbrauch gleichgesetzt wird. Es handelt sich ebenfalls um eine ganzzahlige Optimierung mit diskreten Werten, da nur ein bestimmtes Profilsortiment zur Verfügung steht. Jedoch ist bereits hier eine graphische Lösung nicht mehr möglich, da auch bei einem doppelt symmetrischen Querschnitt bereits mehr als zwei Variablen vorhanden sind (Stegbreite, Stegdicke, Flanschhöhe, Flanschdicke).



#### 4.7.3 Inhomogener Werkstoff Stahlbeton

Ein Stahlbetonunterzug besteht, im Gegensatz zu Holz oder Stahl, aus verschiedenen Materialien, der meist erst vor Ort, unter einem gewissen personellen Aufwand, seine endgültige Form erhält. Die Kosten zur Herstellung sind abhängig von den Materialkosten für Beton und Stahl, Abschreibungskosten der Schalung, Aufwandskosten für Betonage sowie Bewehrungs- und Schalarbeiten.

##### Anwendungsbeispiel

Ein Stahlbetonträger soll für eine bestimmte Belastung zu den niedrigsten Kosten ausgeführt werden. Die Kosten für das Material des Trägers ergeben sich entsprechend nachfolgender Aufstellung:

**Beton:**

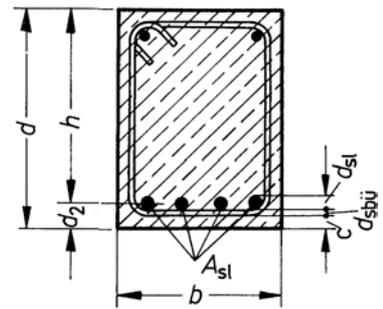
- Preis: 138,- [DM/m³]
- Aufwand: 0,7 [h/m³] × 75,- [DM/h]

**Schalung:** (pro m³ Beton)

- Abwicklung:  $\frac{2h + b}{h \times b}$  [m²/m³]
- Preis: Abwicklung × 14,- [DM/m²]
- Aufwand: Abwicklung × 0,8 [h/m²] × 75,- [DM/h]

**Stahl:**

- Kosten: 1.150,- [DM/t]



Herkömmlicher Bemessungsansatz

Nach Ermittlung der Schnittgrößen wird die Bemessung nach DIN 1045 in der Regel unter Berücksichtigung des  $k_h$ -Verfahrens durchgeführt. In Abhängigkeit der Güte des Betons und Baustahls wird bei zuvor festgelegten Querschnittsabmessungen, unter Berücksichtigung des maximalen Momentes, der  $k_h$ -Wert bestimmt. Für diesen  $k_h$ -Wert wird mit Hilfe eines zugehörigen und tabellierten  $k_s$ -Faktors die erforderliche Querschnittsfläche der Bewehrung ermittelt. Bei Biegung ohne Druckbewehrung sind beispielsweise die folgenden Formeln maßgebend:

$$k_h = \frac{h}{\sqrt{\frac{M_s}{b}}} \quad \Leftrightarrow \quad A_s = \frac{M_s}{h} \times k_s \quad [\text{cm}^2]$$

$h$  [cm],  $b$  [m],  $M_s$  [kNm]

Damit das  $k_h$ -Verfahren angewendet werden kann, müssen die Abmessungen des Stahlbetonträgers zuvor festgelegt werden. Wenn überhaupt eine iterative Verbesserung vom planenden Ingenieur vorgenommen wird, beschränkt sich diese, wegen des hohen Aufwandes, in der Regel auf nur wenige Verbesserungsschritte.

Bemessung als Optimierungsaufgabe

Um die gestellte Aufgabe zu lösen, muß auch hier eine Zielfunktion unter gegebenen Restriktionen optimiert werden. In diesem Fall sind jedoch die Kosten nicht nur von der gewählten Querschnittsfläche des Trägers abhängig.

Als Optimierungsaufgabe ausgedrückt:

Nichtnegativitätsbedingungen:  $b, h \geq 0$

Nebenrestriktionen:  $h/b \geq 1$  (R I)

$h/b \leq 4$  (R II)

$10 \leq h \leq 60$  [cm] (R III)

$10 \leq b \leq 30$  [cm] (R IV)

Hauptrestriktionen:  $k_h \geq 1,48$  (R V)

$A_{s,ges} \leq 0,09 \times b \times h$  (R VI)

Zielfunktion:  $\text{Kosten}_{\text{Beton}} + \text{Kosten}_{\text{Schalung}} + \text{Kosten}_{\text{Stahl}} = \min.!$

Die Restriktion R V ( $k_h \geq 1,48$ ) begrenzt den  $k_h$ -Wert auf den zulässigen Bereich. Genausogut ist es möglich, die Anordnung einer Druckbewehrung auszuschließen ( $k_h > 2,22$ ). Durch die Restriktion R VI wird eine Obergrenze für den Bewehrungsgrad vorgegeben. Die Möglichkeit einer graphischen Lösung gestaltet sich hier weitaus schwieriger, als bei den "homogenen" Werkstoffen Holz bzw. Stahl. Sassenberg [Sas] zeigt die Möglichkeit eines Bemessungsdiagramms auf, das jedoch nur für festgelegte Beton-, Stahl- und Schalungspreise Gültigkeit besitzt und keine Aufwandskosten berücksichtigt.

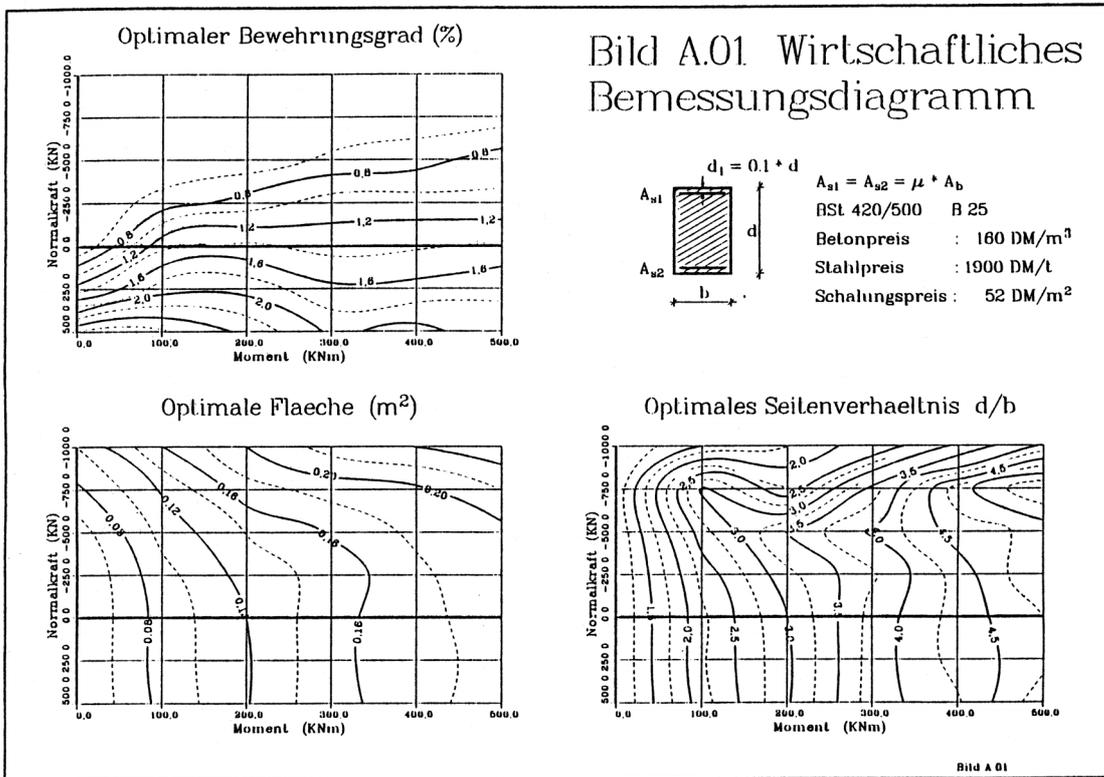


Abb. 47: Wirtschaftliches Bemessungsdiagramm für Stahlbetonträger [Sas]

#### 4.7.4 Bekannte Optimierungsansätze

Die Optimierung eines Biegeträgers läßt sich mit unterschiedlichen Methoden der mathematischen Optimierung verwirklichen. Die Ordnung dieser Verfahren ist in Abb. 48 zusammengestellt.

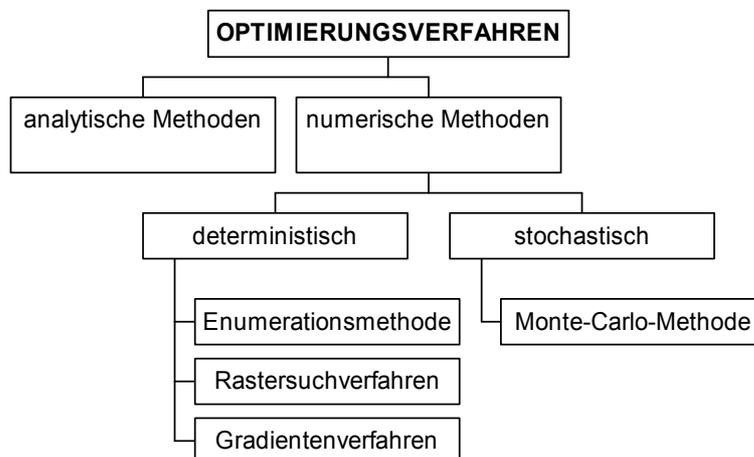


Abb. 48: Einteilung der Optimierungsverfahren [D-ChOs]

Die Schwierigkeit der dargestellten Problemstellung besteht darin, daß es sich um ein Problem der nichtlinearen Optimierung, unter Berücksichtigung der Ganzzahligkeit sowie diskreter Ziel-funktionswerte, handelt. Einige bekannte Lösungsverfahren sind im folgenden, nach verschiedenen Ansätzen getrennt, dargestellt.

### Analytische Verfahren

Blecken greift in seiner Veröffentlichung „Kostenoptimierung von Deckensystemen im Stahlbetonbau“ [Z-Ble1] die Optimierung von Unterzügen auf; die bereits von ihm ermittelte Kostengleichung für eine Decke wird hier zusätzlich um eine Trägerseitenschalung ergänzt. Für die Optimierung wird die Variable der Unterzugbreite auf eine Mindestbreite festgelegt, so daß ausschließlich die Unterzughöhe optimiert wird. Neben einer allgemeinen Trägergleichung gibt er eine weitere Kostengleichung für Durchlaufträger an:

$$K = \left( \alpha \times P_{eo} \times \frac{K_e}{h} [\alpha_{St} \times M_{St} + \alpha_{Fl} \times M_{Fl}] + P_b \times b \times d + P_s (2d + b) \right) \times l$$

- b = Unterzugbreite
- P<sub>b</sub> = Kosten für Beton
- P<sub>s</sub> = Kosten für Schalung
- d = Dicke der Deckenplatten
- f<sub>e</sub> = Stahlquerschnitt
- P<sub>e</sub> = Kosten für Stahl
- P<sub>eo</sub> = dimensionsangepaßter Stahlpreis
- l<sub>xy</sub> = Plattenlänge/-breite
- a = Umrechnungsfaktor von d auf h
- Ke = wird mit 0,5 angesetzt; berücksichtigt die Wahl eines möglichen Erschöpfungszustandes

Die optimale Höhe h wird durch Differentiation der Kostenfunktion nach der Höhe h ermittelt:

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{K_e \times a}{2 \times P_s} \left[ P_{eo} (\alpha_{St} \times M_{St} + \alpha_{Fl} \times M_{Fl}) + \frac{P_s \times M_{El}}{0,85} \right]} \times 100$$

Im Anschluß daran wird die Schubspannung überprüft und im Falle einer Überschreitung zunächst der Balken verbreitert, Anforderungen aus brandschutztechnischen Vorschriften können in weiteren Schritten überprüft werden.

Mit der von Blecken entwickelten Gleichung können zwar Veränderungen der Preise ohne weiteres berücksichtigt werden, Aufwandskosten werden jedoch nur unmittelbar einbezogen. Weiterhin kann nur die Höhe optimiert werden, da die Breite zuvor festgelegt werden muß. Die Berücksichtigung der Schubspannungen geschieht anschließend in einem separaten Prozeß, bei Nichteinhaltung muß die Höhe nochmals korrigiert werden. Das sich ändernde Eigengewicht, bei steigender Höhe, wird ebenfalls nicht berücksichtigt. Bis ein befriedigendes Ergebnis erreicht wird, sind etliche Rechenschritte nötig.

Auch Tauber [Tau] hat sich im Rahmen der Optimierung weitgespannter Decken mit der Optimierung von Unterzügen beschäftigt. Die zu minimierende Kostenfunktion setzt sich auch hier aus den Kosten für Beton, Schalung und Stahl zusammen. Die statischen und konstruktiven Zusammenhänge werden in eine Kostengleichung eingesetzt. Mit Hilfe der Differentialrechnung wird dann das Kostenminimum gefunden. Als Ergebnis der Optimierung entwickelt Tauber Diagramme für Innen- und Randunterzüge, die jedoch auf fixen Preisen für Beton, Stahl und Schalung basieren. Die Diagramme existieren für Ein- bis Dreifeldträger, jeweils für unterschiedliche Unterzughängen. Bei bekannter Belastung (die Spannweite der Decke findet hier Berücksichti-

gung) und bei gewünschter Balkenhöhe können so die entstehenden Kosten abgelesen werden. Es wird außerdem die erforderliche Balkenbreite  $b$  angegeben, um die Bewehrung in einer Lage unterzubringen. Da jedoch die verwendeten Preise nicht mehr aktuell sind, ist auch die Anwendung der auf diesen Preisen resultierenden Diagramme ausgeschlossen. In den Diagrammen werden lediglich die Kosten angegeben, die optimalen Abmessungen sind nicht abzulesen. Die Diagramme sind nur für wenige diskrete Längen anwendbar. Ein weiterer Nachteil besteht darin, daß die Angaben nur für Unterzüge gelten, auf denen Decken mit gleichen Rasterweiten aufliegen.

### **Numerische Verfahren**

Numerische Ansätze zur Optimierung von Biegeträgern in der vorgestellten Form finden sich unter anderem bei [Sas], [Les], [Hup], [DiHo], [Pit].

Das von Dimitrov und Hoyer [DiHo] entwickelte Verfahren wählt als Optimierungskriterium die Querschnittsfläche eines Trägers und ist nur für Holzbauteile geeignet. Durch die Einführung eines Faktors  $\alpha$  für das Seitenverhältnis  $b/h$  wird die Aufgabe um eine unbekannte Variable reduziert, die Zielfunktion lautet nun: Fläche  $A = b \times h = \alpha \times h^2 = \min!$  In den Nebenrestriktionen werden die Geometriegrenzen festgelegt und in den Hauptrestriktionen die erforderlichen Standsicherheits- sowie Gebrauchstauglichkeitsnachweise geführt. Alle aufgestellten Gleichungen wurden nach der Variable  $h$  aufgelöst. Die maßgebenden Nachweise beschränken sich auf Biegung, Verformung und Kippen. Die daraus erhaltenen Ergebnisse wurden als Faktoren  $P_1 - P_5$  aufbereitet und für Einfeldträger tabelliert. Diese Faktoren sind abhängig von Material, Querschnittsform, System und Art der Belastung. Anschließend müssen, der gestellten Aufgabe entsprechend, Parameter für Eigengewicht, Trägerabstand und Trägerlänge eingesetzt werden, um den optimalen Querschnitt zu ermitteln. Die Umsetzung der Ergebnisse geschieht entweder graphisch, mit den tabellierten Werten oder mit einem Rechenprogramm, das mit einem Suchalgorithmus mit konstanter Schrittweite arbeitet, wodurch der Wert für das globale Optimum aber nicht unbedingt gefunden wird. Ferner ist nur die Optimierung von Einfeldträgern möglich.

Lesniak [Les] hat sich neben der Optimierung gewalzter I-Träger auch mit der Optimierung diverser Schweißträger beschäftigt. Während schon in dieser Veröffentlichung die Optimierung mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode favorisiert wird, beschäftigt sich eine weitere Veröffentlichung, zusammen mit Golinski [Z-GoLe], ausschließlich mit dieser Optimierungsmethode. Das Optimierungsziel ist auch hier der minimale Stahlverbrauch. Zur Lösung des Problems wurden zwei Methoden hintereinander geschaltet. Zuerst wird nach der Monte-Carlo-Methode eine Näherungslösung ermittelt, die dann anschließend Ausgangspunkt für eine weitere Enumeration ist.

Auch das von Sassenberg [Sas] angewandte Optimierungsverfahren, aus der Gruppe der sogenannten Direkt-Such-Verfahren, die Complex-Methode, ist geeignet, das Problem der Unterzugoptimierung zu lösen.

Allen hier aufgezeigten Ansätzen zur Lösung des gestellten Problems ist gemeinsam, daß sie den Lösungsraum mit unterschiedlichen Methoden, im Rahmen einer beschränkten Enumeration, nach dem optimalen Ergebnis durchsuchen. Der übereinstimmende Nachteil dieser Metho-

den liegt darin begründet, daß der Lösungsraum nicht vollständig durchsucht und dadurch oftmals nur ein Suboptimum aufgefunden wird.

Pittioni [Pit] wählt ein Verfahren, das iterativ nichtlineare, nicht notwendig konvexe Aufgabenstellungen mit Hilfe des Simplex-Algorithmus löst. Dazu werden alle nichtlinearen Restriktionen und gegebenenfalls auch die Zielfunktion linearisiert. Mit einer ersten, geschätzten Lösung für den Rechenbeginn wird die 1. Iteration durchgeführt. Die so erhaltene Lösung wird so lange weiter iterativ verbessert, bis die Ergebnisse Konvergenz aufweisen. Die Anwendung ist in dieser Veröffentlichung jedoch auf die Optimierung der Querschnittsfläche geschweißter Profile beschränkt.

#### 4.7.5 Analytischer Optimierungsansatz

In der hier vorgestellten Untersuchung soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, mit der auch analytisch die ökonomisch sinnvollsten Abmessungen eines Stahlbetonbiegeträgers zu ermitteln sind. Diese Untersuchungen konnten im Rahmen der Forschungen sowohl für einen statisch bestimmten Einfeldträger als auch für einen statisch unbestimmten Durchlaufträger mit Erfolg durchgeführt werden. Exemplarisch wird im folgenden nur der Berechnungsablauf für den statisch bestimmten Einfeldträger (kein Randträger!) aufgezeigt.

Die Belastung des Unterzuges soll aus der Auflagerung von einachsig gespannten Stahlbetondeckenplatten resultieren. Für die benötigte Bewehrung wird Baustahl BSt 500 vorausgesetzt. Für den nachfolgenden Berechnungsablauf sind im voraus folgende konstante Größen (Randbedingungen) festzulegen:

- Betonwichte  $\gamma_B$  [kN/m<sup>3</sup>]
- Ausbaulast  $g_A$  (der Deckenplatte) [kN/m<sup>2</sup>]
- Spannweite der Deckenplatte  $l_P$  [m]
- Betondeckung  $c$  [m]
- Kosten der Bewehrung [DM/t]
- Kosten für die Teilleistung Beton [DM/m<sup>3</sup>]
- Dicke der Deckenplatte  $d_p$  [m]
- Verkehrslast  $p$  (der Deckenplatte) [kN/m<sup>2</sup>]
- Spannweite des Unterzuges  $l_B$  [m]
- Durchmesser der Längsbewehrung  $d_s$  [m]
- Kosten für Schalung + Rüstung [DM/m<sup>2</sup>]

Die Balkenbreite sowie die -höhe werden im folgenden als Variablen berücksichtigt:

- Balkenbreite  $b_B$  [m]
- Balkenhöhe  $d_B$  [m]

Als Bemessungsverfahren liegt hier das  $k_h$ -Verfahren der DIN 1045 zugrunde. Im folgenden Beispiel wird exemplarisch, durchgängig die Betonfestigkeitsklasse B25 vorausgesetzt!

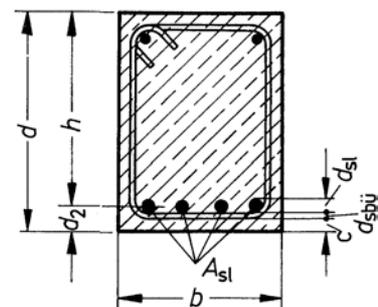
#### Ermittlung des $k_h$ -Wertes

$$k_h = \frac{h[\text{cm}]}{\sqrt{\frac{M_s[\text{kNm}]}{b_B[\text{m}]}}}$$

$$h [\text{cm}] = 100 \times (d_B - d_2) \quad (\text{statische Höhe})$$

$$d_2 = c + \frac{d_s}{2}$$

$$M_s = \frac{q_B \times l_B^2}{8}$$



Die Belastung des Balkens  $q_B$  ergibt sich aus der Lastabtragung der aufliegenden Platte ( $q_P$ ) und dem Eigengewicht des Balkens ( $b_B \times d_B \times \gamma_B$ ):

$$q_B [\text{kN/m}] = q_P [\text{kN/m}^2] \times l_P [\text{m}] + b_B [\text{m}] \times d_B [\text{m}] \times \gamma_B [\text{kN/m}^3]$$

$$q_P [\text{kN/m}^2] = d_P [\text{m}] \times \gamma_B [\text{kN/m}^3] + g_A [\text{kN/m}^2] + p [\text{kN/m}^2]$$

$$M_s = \frac{(q_P \times l_P + b_B \times d_B \times \gamma_B) \times l_B^2}{8}$$

$$k_h = \frac{100 \times (d_B - d_2)}{\sqrt{\frac{(q_P \times l_P + b_B \times d_B \times \gamma_B) \times l_B^2}{8 \times b_B}}}$$

Biegezugbewehrung erf.  $A_s$  [ $\text{cm}^2$ ] für  $k_h > k_h^*$  (ohne Druckbewehrung):

$$\text{erf. } A_s = \frac{M_s}{h} \times k_s$$

Die in Abhängigkeit von  $k_h$  tabellierten  $k_s$ -Werte für die Betonfestigkeitsklasse B25 konnten durch die folgende Funktion approximiert werden:

$$\text{B 25: } k_s(k_h) = 3,615 + \frac{4,5}{k_h^3}$$

$$\text{erf. } A_s = \frac{(q_P \times l_P + b_B \times d_B \times \gamma_B) \times l_B^2}{100 \times 8 \times (d_B - d_2)} \times \left( 3,615 + 4,5 \times \left( \frac{1}{100 \times (d_B - d_2)} \times \sqrt{\frac{(q_P \times l_P + b_B \times d_B \times \gamma_B) \times l_B^2}{8 \times b_B}} \right)^3 \right)$$

Biegezug- und Biegedruckbewehrung erf.  $A_{s1}$  [ $\text{cm}^2$ ] und erf.  $A_{s2}$  [ $\text{cm}^2$ ] für  $k_h < k_h^*$ :

$$A_s = A_{s1} + A_{s2}$$

$$A_{s1} = \frac{M_s}{h} \times k_{s1} \times \rho_1$$

$$A_{s2} = \frac{M_s}{h} \times k_s \times \rho$$

$k_{s1}$ -Wert

Der  $k_{s1}$ -Wert für die Betonfestigkeitsklassen B25 kann mit der folgenden Funktion, in Abhängigkeit von  $k_h^*$ , beschrieben werden:

$$\text{B 25: } k_{s1}(k_h^*) = 3,492 + 0,355 \times k_h - 1,382 \times (k_h)^2$$

$k_s$ -Wert

Der  $k_s$ -Wert für die Betonfestigkeitsklassen B25 kann mit der folgenden Funktion, in Abhängigkeit von  $k_h^*$ , beschrieben werden:

$$\text{B 25: } k_s(k_h^*) = 4,68 - \frac{0,915}{k_h^3}$$

$\rho$ -Wert

Auch für den  $\rho$ -Wert wurde eine Funktion, in Abhängigkeit von  $k_s$  und  $d_1/h$ , gefunden. Die Abhängigkeit des Wertes von der Betonfestigkeitsklasse ergibt sich durch den  $k_s$ -Wert. Vereinfacht kann  $d_1$  durch  $d_2 = c + d_s/2$  ersetzt werden. So ergibt sich folgende Formel:

$$\rho = 4,5 / k_s - 1,7 \times (0,22 - d_2/h) \times (4,5 - k_s)$$

$\rho_1$ -Wert

Dieser Wert ist unabhängig von der Betonfestigkeitsklasse und nur abhängig von  $d_1/h$  (bzw.  $d_2/h$  (wie vorstehend erläutert)):

$$\rho_1 = 0,988 + 35,905 \times (d_2/h)^3$$

Ermittlung der Schubspannung

$$\tau_0 = \frac{Q_s}{b_B \times z}$$

$$Q_s = Q - q_B \times r$$

$$Q = q_B \times \frac{l_B}{2} = (q_P \times l_P + d_B \times b_B \times \gamma_B) \times \frac{l_B}{2}$$

$$r = 0,5 \times (d_B - d_2)$$

$$z = k_z \times h = k_z \times (d_B - d_2)$$

Die tabellierten  $k_z$ -Werte können für die Betonfestigkeitsklasse B25 durch folgende Funktion  $k_z(k_h)$  beschrieben werden (Ausführung ohne Druckbewehrung!):

$$B\ 25: k_z = 0,98 - 0,569 / (k_h)^2$$

Bei einer Ausführung mit Druckbewehrung gilt, unabhängig von der Betondruckfestigkeit:

$$k_z = 0,78$$

$$\tau_0 = \frac{(q_P \times l_P + d_B \times b_B \times \gamma_B) \times \frac{l_B}{2} - 0,5 \times (d_B - d_2) \times (q_P \times l_P + d_B \times b_B \times \gamma_B)}{b_B \times k_z \times (d_B - d_2)}$$

Ermittlung der erf. Schubbewehrung erf.  $a_s$  [cm<sup>2</sup>/m]

Die Ermittlung der erforderlichen Schubbewehrung erfolgt unter der Voraussetzung der Anordnung lotrechter Bügel. Exemplarisch ist hier nur erf.  $a_s$  für den Schubbereich 1 dargestellt.

$$a_s = \frac{0,4 \times \tau_0 \times b}{\beta_s / 1,75}$$

$$\beta_s = 500 \text{ N/mm}^2 \text{ (bei BSt 500)}$$

Ermittlung der erforderlichen Betonstahlmenge [kg]

Die nachfolgend aufgeführten Faktoren zur annähernden Ermittlung der Betonstahlmenge basieren auf einer Veröffentlichung von Hornung/Oesterle [Z-HoOe]. Durch den hochgestellten Index \* unterscheiden sich die Werte für Platten von denen für Balken; daher sollen diese Indizes auch hier verwendet werden.

$$G^* = G_f^* + G_s^*$$

$$G_f^* = Gr_f^* + T_{af}^* \quad (\text{Feldbewehrung})$$

$Gr_f^*$  = Grundmenge der Feldbewehrung [kg]

$$Gr_f^* = 3 \times 0,262 \times l_B \times erf.A_s$$

$T_{af}^*$  = Teilmenge aus der Verankerung der bis zum Auflager durchgeführten Feldbewehrung [kg]

$$T_{af}^* = 0,116 \times f \times d_s \times erf.A_s$$

$$f = \frac{a_0}{d_s} = \frac{\beta_s}{4 \times zul.\tau_1 \times 1,75} \times d_s$$

zul.  $\tau_1$  (B25, Verbundbereich I) = 1,8 N/mm<sup>2</sup> (siehe DIN 1045)

$$G_s^* = T_{1,1}^* + T_m^* \quad (\text{Schubbewehrung; für Schubbereich 1})$$

$T_{1,1}^*$  = Teilmenge aus Mindestschubbewehrung [kg]

$$T_{1,1}^* = l_B \times b_B \times \frac{\alpha}{12,56} + 0,3 \times l_B$$

$$\alpha = 0,617 \times (2 \times d_B + b_B + 0,06)$$

$T_m^*$  = Teilmenge der Montagebewehrung in den Bügelmatte [kg]

$$T_m^* = 1,234 \times l_B$$

Gesamtkosten des Stb-Balkens

$$k = k_{Sch} \times ((2 \times d_B \times b_B) + (2 \times d_B + b_B) \times l_B) + k_{St} \times \frac{G^*}{1000} + k_B \times b_B \times d_B \times l_B$$

$k_{Sch}$  = Kosten der Schalung [DM/m<sup>2</sup>]

$k_{St}$  = Kosten des Betonstahls [DM/t]

$k_B$  = Kosten des Betons [DM/m<sup>3</sup>]

Der zuvor aufgezeigte analytische und kostenoptimale Bemessungsansatz wurde zur effizienteren Nutzung in einer Tabellenkalkulation (MS-Excel) umgesetzt. Nach der Eingabe der entsprechenden Randbedingungen werden die Optimierungsergebnisse zusammenfassend in einem Diagramm dargestellt.

Eingabedatei zur Berechnung eines Unterzugs als Einfeldsystem										
Die Berechnungen erfolgen ausschließlich für BSt 500 mit $\beta_s = 500 \text{ N/mm}^2$										
<b>Folgende Werte sind vom Anwender festzulegen:</b>										
Betonwichte	$\gamma_B =$	25 kN/m <sup>3</sup>								
<b>Außere Belastung/Randbedingungen:</b>										
Dicke der Deckenplatte	$d_p =$	0,2 m	Plattenspannweite	$IP =$	6 m	Linienlast, die auf den				
Eigenlast: $d_p \cdot \gamma_B$	$g_d =$	5 kN/m <sup>2</sup>	Balkenspannweite	$IB =$	6 m	Unterzug wirkt:				
Ausbaulast der Decke	$g_A =$	2 kN/m <sup>2</sup>	Betondeckung	$c =$	0,02 m					
Verkehrslast auf Decke	$p =$	2 kN/m <sup>2</sup>	Stabdurchm.-Längsbew.	$ds =$	0,02 m	$q_P \cdot IP =$	54 kN/m			
Gesamtbel.d. Decke:	$q_P =$	9 kN/m <sup>2</sup>	Stabdurchm.-Bügel	$dB_u =$	0,01 m					
<b>Von der Betonfestigkeitsklasse abhängige Größen:</b>										
Verbundbereich nach DIN 1045, 18.4: 2										
maßg. Grundwerte der Verbundspannung zu $\tau_1$ :					Grundwerte der Verbundspannung zu $\tau_1$ [N/mm <sup>2</sup> ]:					
B15	B25	B 35	B45	B55	Verbundbereich 1	B15	B25	B 35	B45	B55
0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,4	1,8	2,2	2,6	3	
					Verbundbereich 2	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5
<b>Grenzen der Schubspannung <math>\tau_0</math>:</b>										
					B15	B25	B 35	B45	B55	
Schubbereich 1: $\tau_{012} =$					0,5	0,75	1	1,1	1,25	
Schubbereich 2: $\tau_{02} =$					1,2	1,8	2,4	2,7	3	
Schubbereich 3: $\tau_{03} =$					2	3	4	4,5	5	
<b>Kosten:</b> Es ist anzugeben, welche Kosten für je 1 Einheit Bewehrung, Schalung und Beton jeweils geliefert und fertig eingebaut, entstehen.										
Kosten für Bewehrung:		$k_{St} =$	1,50 [DM/kg]							
Kosten für Schalung:		$k_S =$	208 [DM/m <sup>2</sup> ] Abwicklung $\leq 0,90 \text{ m}$							
			155 [DM/m <sup>2</sup> ] Abwicklung $> 0,90\text{-}1,50 \text{ m}$							
			151 [DM/m <sup>2</sup> ] Abwicklung $> 1,50\text{-}2,10 \text{ m}$							
Kosten für Beton:		$k_B =$	abhäng. v. B.-Festigk.:							
			B 15	B 25	B 35	B 45	B 55			
			220,00	238,00	247,00	257,00	262,00			
<b>Entscheidungsvariablen:</b>										
Die Berechnung kann für bis zu 10 Balkenbreiten $b_B$ [m] durchgeführt werden:										
0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	
Die Berechnung kann für bis zu 16 Balkenhöhen $d_B$ [m] durchgeführt werden:										
0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	

Abb. 49: Eingabemaske zur analytischen Lösung der Optimierungsaufgabe [D-JeUt]

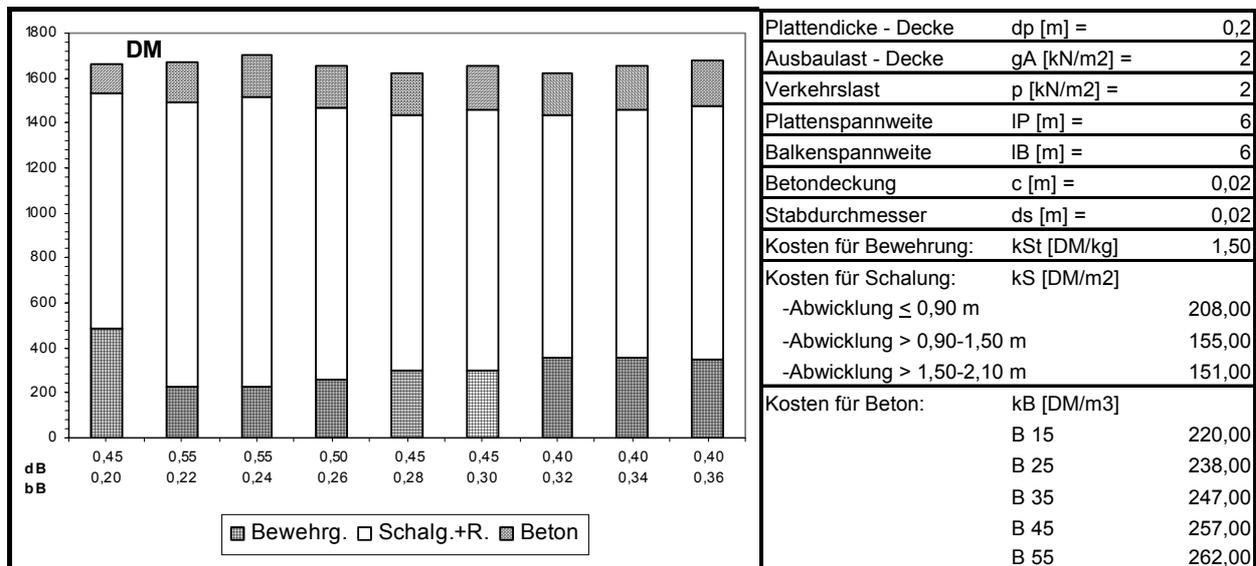


Abb. 50: Graphische Ergebnisauswertung für die Betonfestigkeitsklasse B25 [D-JeUt]

Das vorgestellte Verfahren wurde dahingehend weiterentwickelt, daß nicht nur einzelne Bauteile, wie hier die Unterzüge, optimiert werden können, sondern ganze Tragsysteme. Für die fol-

genden Anwendungsfälle konnten die mathematischen Ansätze ermittelt und in einer Tabellenkalkulation (MS-Excel) umgesetzt werden [D-JeUt]:

- Optimierung von einachsig gespannten Stahlbetondeckenplatten
  - Einfeldsysteme
  - Durchlaufsysteme
- Optimierung von Stahlbetonbalken als Unterzüge für Deckenplatten
  - Einfeldsysteme
  - Durchlaufsysteme
- Optimierung eines Deckensystems
  - Einachsig gespannte Einfeldplatte auf Einfeldbalken als Unterzug
- Optimierung des Tragwerks, bestehend aus Platte, Unterzügen und Stützen
  - Optimierung der Stützen
  - Optimierung des Tragwerks

Die Untersuchungen gelten jedoch nur für einachsig gespannte Stahlbetonmassivplatten. Außerdem fehlen noch Untersuchungen, die auch die Fundamentierung berücksichtigen, denn nur so ist man in der Lage, komplette Stahlbetonskelettbauten dahingehend zu verbessern, daß durch das optimale Raster das kostengünstigste Gesamtragsystem entsteht.

#### 4.7.6 Numerischer Optimierungsansatz durch Enumerationsmethode

Bei den meisten, in Kapitel 4.7.4 vorgestellten Verfahren handelt es sich letztendlich um Methoden der beschränkten Enumeration, bei denen der Lösungsraum nicht vollständig durchsucht wird. Des weiteren erfolgt oft eine Beschränkung auf bestimmte Eigenschaften (Einfeldträger, Holzunterzüge etc.). Von den Autoren der vorgestellten Ansätze wurde bereits zur Zeit der Erstellung der Arbeiten darauf hingewiesen, daß eine vollständige Enumeration bei gewissen Problemen die beste Lösungsmethode wäre, sie aber, bedingt durch die damals noch unzureichende Rechenkapazität, nicht effektiv anzuwenden war. Daraus resultierend wurde dann auf die bereits vorgestellten Methoden zurückgegriffen oder die Methode der Enumeration mit anderen Methoden verknüpft.

Durch die enorm gestiegene Rechenleistung heutiger Personalcomputer besteht dagegen die Möglichkeit, sogar, bei erweiterter Aufgabenstellung, den gesamten Lösungsraum, durch eine vollständige Enumeration, nach der optimalen Lösung zu durchsuchen. Hierdurch besteht stets die Gewißheit, das globale Optimum zu finden. Darüber hinaus besteht in der Regel keine Einschränkung bezüglich der Auswahl des statischen Systems (sowohl für Einfeld- als auch Mehrfeldträger geeignet). Durch die Methode der vollständigen Enumeration wird der durch die Nebenrestriktionen vorgegebene Lösungsraum, mit Hilfe der Hauptrestriktionen, nach zulässigen Lösungen durchsucht und der optimale Wert der Zielfunktion ermittelt.

Mit Hilfe der Optimierung, durch rechnergestützte vollständige Enumeration, konnten für Einfeldträger sowohl aus Nadelholz als auch aus Brettschichtholz Bemessungsdiagramme entwickelt werden, die eine ökonomische Dimensionierung unterstützen. Entsprechend der Trägerbreite und des gewünschten Materials kann nun aus verschiedenen Diagrammen, anhand der gegebenen Spannweite und Belastung, die zugehörige, kostenoptimale Höhe abgelesen werden.

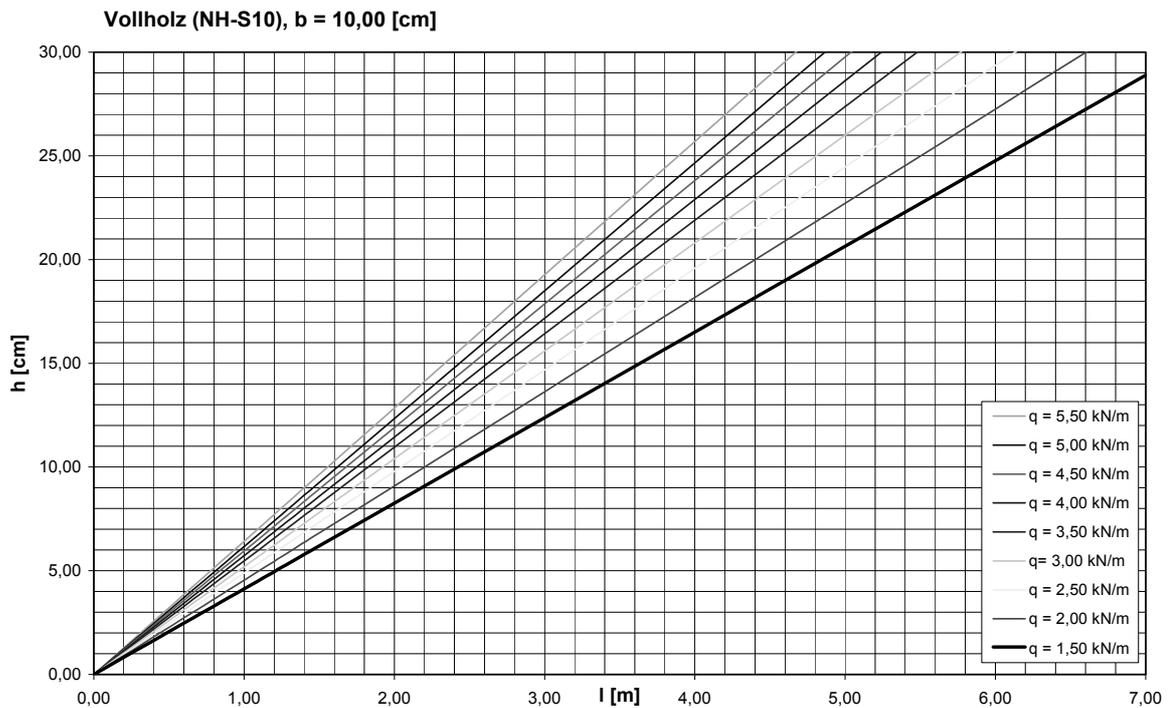


Abb. 51: Bemessungsdiagramm für Vollholzträger (NH-S10), b = 10 [cm]

Für den Bereich der Stahlbetonträger wurden mit den in Kapitel 4.7.3 genannten Kostenansätzen überschlägliche Untersuchungen durchgeführt, die jedoch nur die Längsbewehrung, nicht aber die erforderliche Schubbewehrung, berücksichtigten. Dafür wurden die kostenoptimalen Querschnitte für hochbelastete Stahlbetonträger (M = 100/200/300/400/500 [kNm]) und niedrigbelastete Träger (M = 20/40/60/80 [kNm]) ermittelt. Die Querschnittsmaße und die durchschnittliche Kostenverteilung können Abb. 52 entnommen werden.

Moment [kNm]	20	40	60	80	100	200	300	400	500
b/ h [cm/cm]	12/23	15/28	18/31	21/33	16/41	20/51	22/59	21/69	24/72

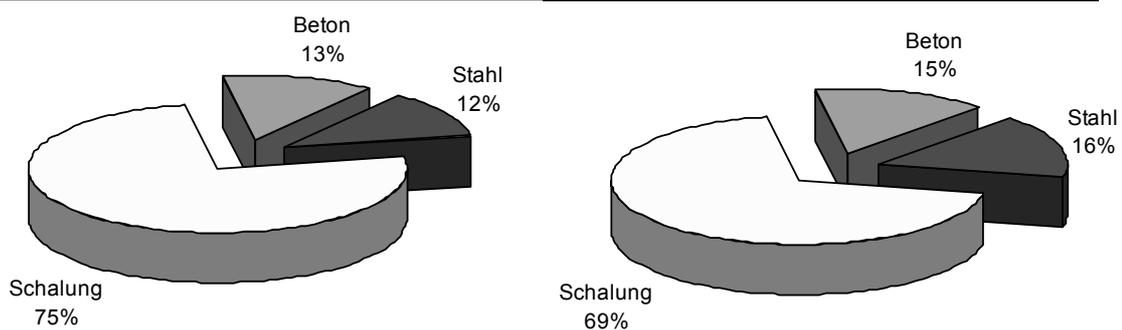


Abb. 52: Querschnittsmaße und durchschnittliche Kostenverteilung für niedrigbelastete (links) und hochbelastete (rechts) Stahlbetonträger

Es zeigte sich, daß das Verhältnis der Breite zur Höhe des kostenoptimalen Querschnittes in der jeweiligen Momentenstufe wenig aussagekräftig ist; es liegt im Mittel bei 0,57 bei niedrigbelasteten und 0,36 bei hochbelasteten Trägern.

Da in der Praxis allerdings oftmals die Breite bzw. die Höhe des Unterzuges aus konstruktiven Gründen vorgegeben ist, wurden zusätzlich die Diagramme in Abb. 53 entwickelt. So konnte

auch hier mit Hilfe der Optimierung durch rechnergestützte vollständige Enumeration, bei vorgegebenem Moment und vorgegebener Höhe bzw. Breite, der korrespondierende kostenoptimale Querschnittswert bestimmt und anschließend die zugehörigen Kosten ermittelt werden.

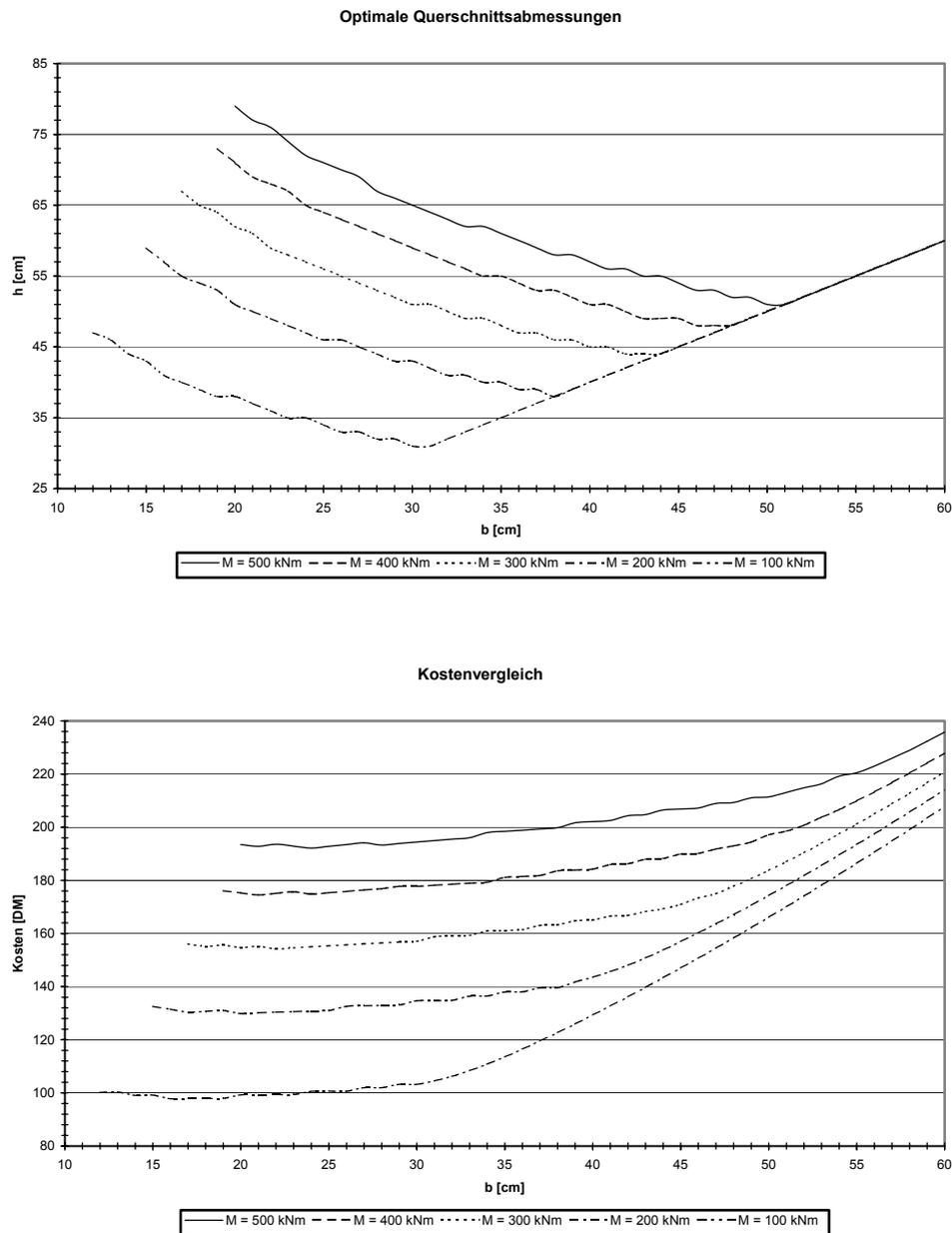


Abb. 53: Optimale Querschnittsabmessungen und Kostenvergleich für hochbelastete Stahlbetonträger

In den vorgestellten Untersuchungen ist jedoch der bei der Gesamtstahlmenge nicht unerheblich werdende Anteil der erforderlichen Schubbewehrung vernachlässigt. Außerdem sind bei dem Diagramm des Kostenvergleiches feste Kostenansätze gewählt; eine Anpassung an sich verändernde Kostenansätze ist nur in der zugehörigen Tabellenkalkulation möglich. Die Bemessung der erforderlichen Querschnitte erfolgte noch nach DIN 1045 statt EC 2.

Es wurde daher ein Software-Tool zur Unterstützung des Tragwerkplaners entwickelt, das neben Stahlbetonträgern auch solche aus Stahl bzw. Holz, durch Anwendung der vollständigen Enumeration, zu optimieren vermag.

### 4.7.7 Vorstellung des Software-Tools OptimaB

Da bei jeder Optimierung stets unterschiedliche Restriktionen und Parameter beachtet werden müssen, wurde zur Ermittlung des ökonomisch sinnvollsten Querschnittes eines Biegeträgers das Software-Tool OptimaB entwickelt. In dem Software-Tool müssen vom Anwender Zahlenwerte eingegeben oder feste Menüpunkte ausgewählt werden. So kann er zu Beginn zwischen den Werkstoffen Stahlbeton, Holz und Stahl entscheiden. Im weiteren Verlauf sind die zugehörigen Materialkennwerte zu wählen und die zuvor separat ermittelten Schnittgrößen anzugeben. Durch Eingabe der Rand- und Nebenbedingungen werden die Grenzen (Breite: von/bis, Höhe: von/bis) und die Schrittweite des Enumerationsprozesses bestimmt. Danach sind die Kosten, getrennt nach Materialpreis, Aufwandswert und Stundenlohn, einzugeben, bevor die Berechnung gestartet und die besten Ergebnisse ausgegeben werden können. Sodann kann entweder das Speichern oder das eventuelle Ändern der eingegebenen Daten für eine erneute Optimierung erfolgen.

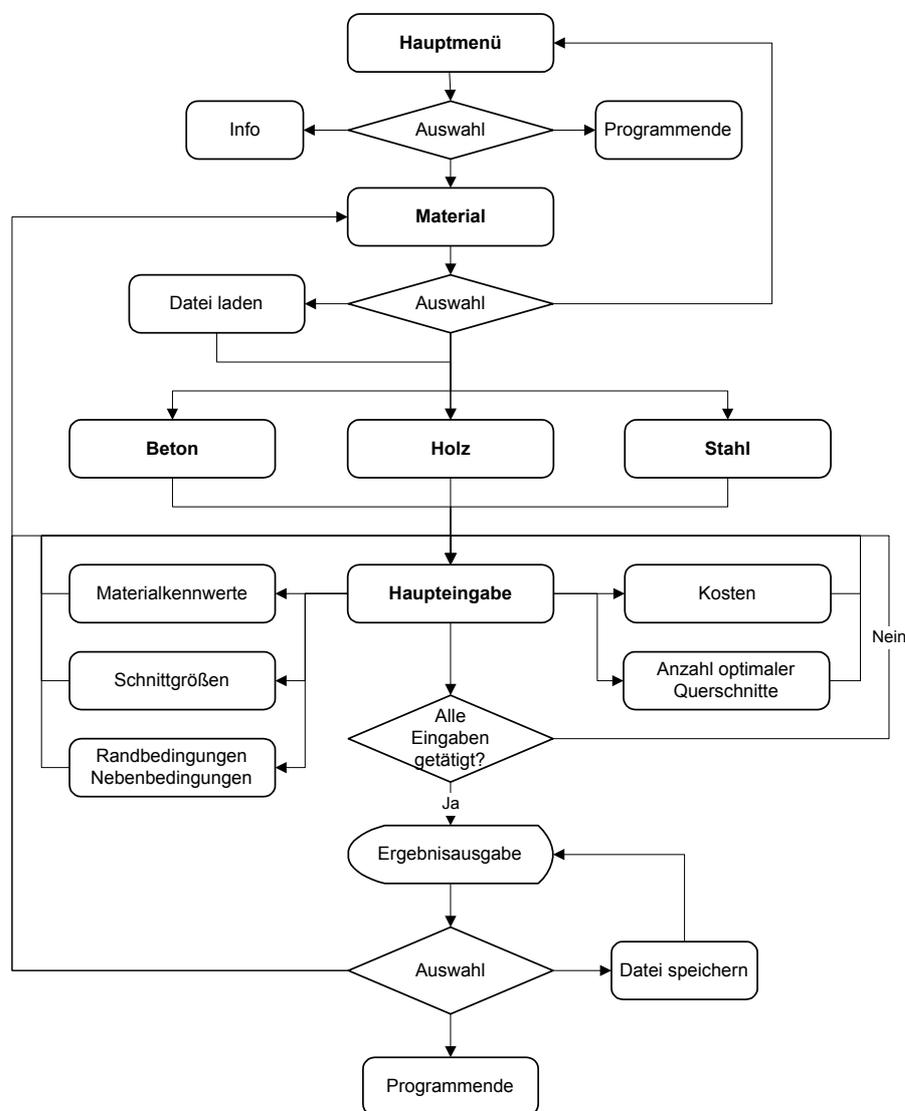


Abb. 54: Allgemeine Programmstruktur von OptimaB

Aus den bereits in Abschnitt 4.6.6 genannten Gründen ist auch hier der zugrunde liegende Algorithmus die vollständige Enumeration. Die Optimierungsprozedur ist bei allen drei möglichen Baustoffen ähnlich. In Abb. 55 ist die programmtechnische Umsetzung für Stahlbetonträger und Holzträger aufgezeigt. Bei beiden Alternativen durchläuft der Optimierungsprozeß zwei Schleifen, mit deren Hilfe die Abmessungen des Trägers, innerhalb der vorgegebenen Grenzen bei der gewählten Schrittweite, variiert werden. Zunächst wird, jeweils bei einer bestimmten Breite, die Höhe variiert, bevor die Balkenbreite um die Schrittweite  $\Delta b$  erhöht wird. Für die so ermittelten Balkenquerschnitte werden als erstes die geometrischen Randbedingungen (z.B.  $h/b \leq 4$  (wg. Kippgefahr beim Holzträger)) überprüft. Sind diese nicht erfüllt, wird der Balkenquerschnitt vergrößert.

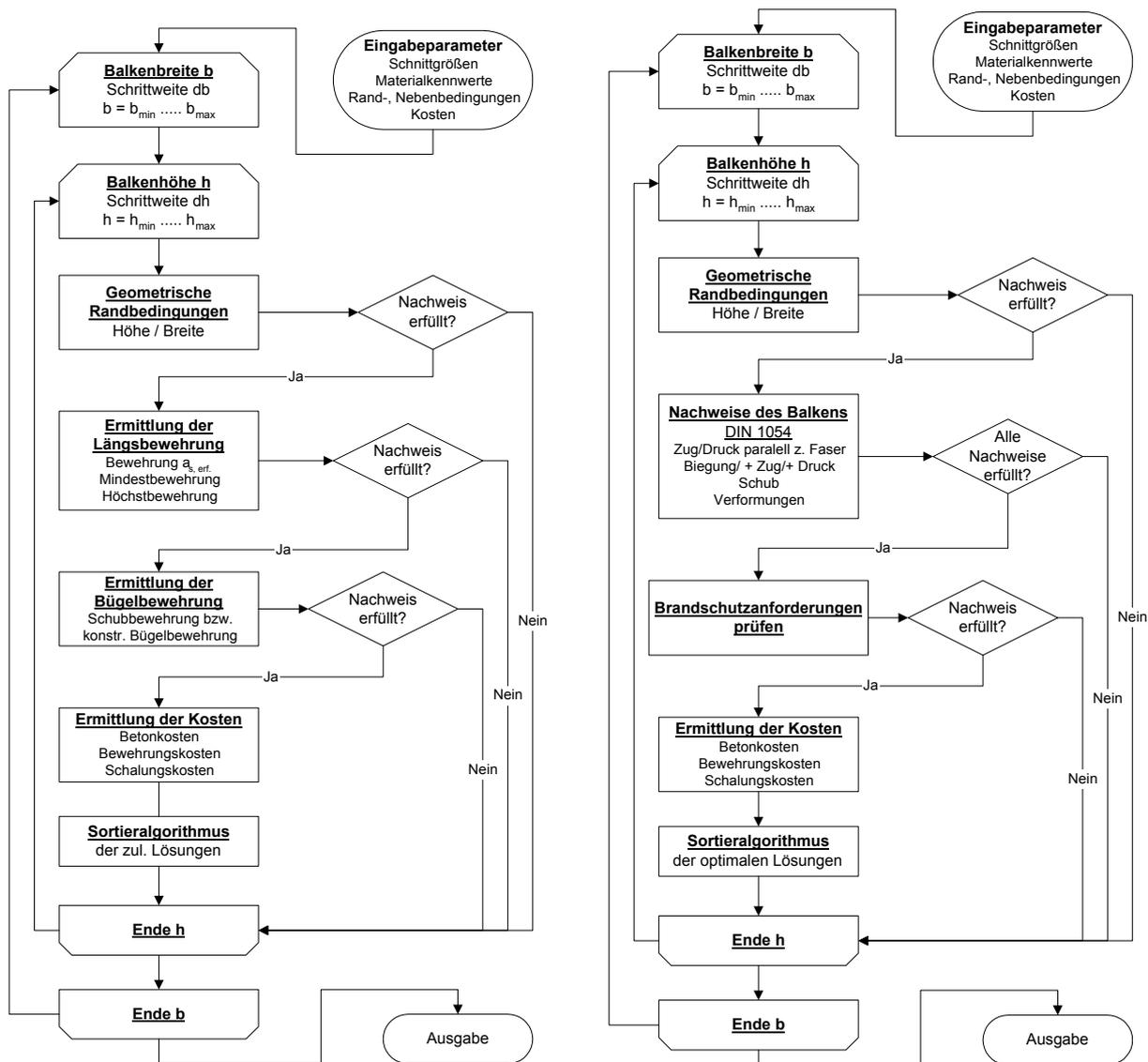


Abb. 55: Flußdiagramme für die Optimierung von Stahlbetonträgern (li.) und Holzträgern (re.) bei OptimaB  
 Sind die geometrischen Randbedingungen erfüllt, wird beim Stahlbetonträger zunächst die Längsbewehrung bestimmt. Ist dabei der Beiwert  $\mu_{sd,s} > 0,6$  oder aber die zul. Höchstbewehrung überschritten, wird zunächst der Balkenquerschnitt vergrößert. Kann der Nachweis erfüllt werden, wird anschließend die zugehörige Bügelbewehrung ermittelt. Ist auch dieser Nachweis

erfüllt, werden, unter Berücksichtigung der eingangs getätigten Angaben, die Kosten des Querschnittes pro lfdm. ermittelt. Ist der Nachweis der Bügelbewehrung nicht erfüllt, wird auch hier zunächst der Querschnitt vergrößert.

Beim Holzträger werden, nach der Überprüfung der geometrischen Bedingungen, zunächst die zulässigen Spannungen und Verformungen überprüft. Sind die Nachweise erfüllt, kann anschließend festgestellt werden, ob der Träger auch für bestimmte Brandschutzanforderungen (z.B. F-30) ausreichend dimensioniert ist. Ist auch dieser Nachweis erfüllt, werden, unter Berücksichtigung der eingangs getätigten Angaben, die Kosten des Querschnittes pro lfdm. ermittelt. Ist der Nachweis an einer bestimmten Stelle der Prozedur nicht erfüllt, wird auch hier zunächst der Querschnitt vergrößert.

In Abb. 56 ist die programmtechnische Umsetzung für einen Stahlträger aufgezeigt.

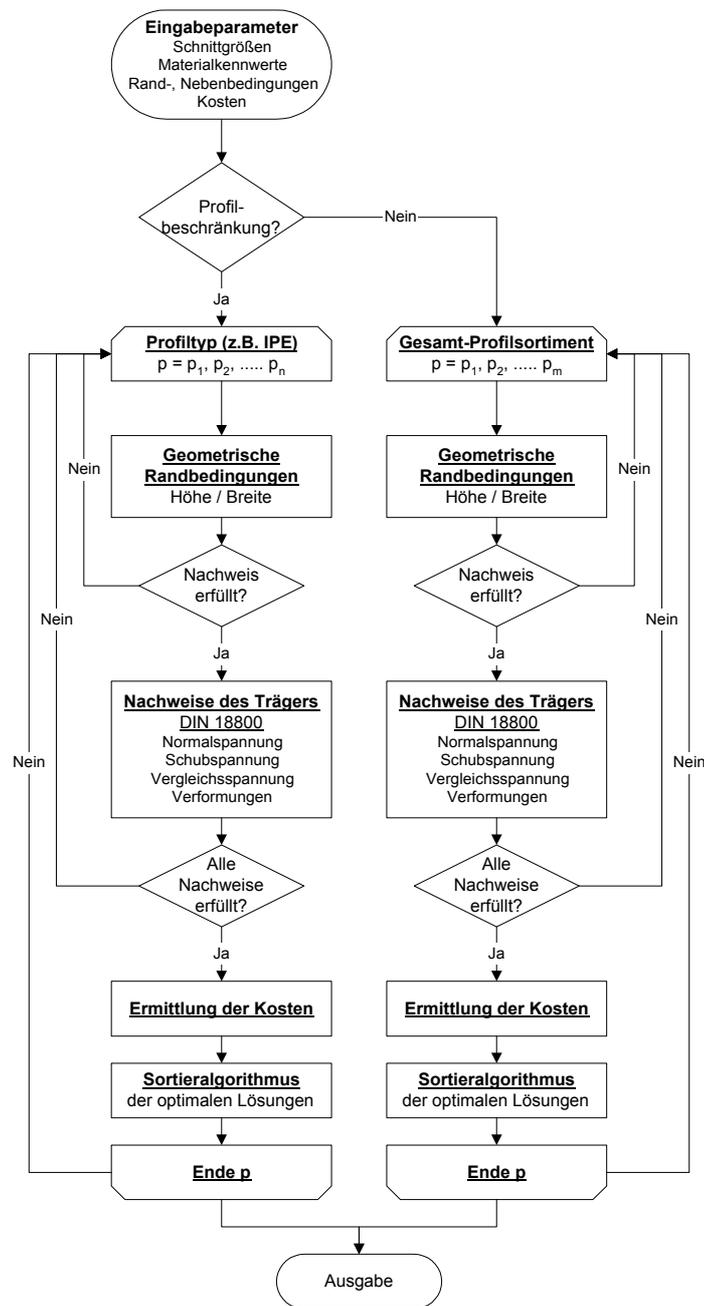


Abb. 56: Flußdiagramm für die Optimierung von Stahlträgern bei OptimaB

Bei der Optimierung eines Stahlträgers mußte eine abweichende Vorgehensweise gewählt werden, weil auf festgelegte Profilreihen zurückzugreifen ist. Der Anwender hat die Möglichkeit während der Eingabe der Parameter zu entscheiden, ob entweder die Optimierung auf eine bestimmte Profilreihe beschränkt (z.B. nur IPE-Träger) oder ob das gesamte Profilsortiment mit allen Trägerreihen untersucht werden soll. Nach dieser Entscheidung werden auch hier zunächst die geometrischen Bedingungen überprüft und bei deren Erfüllung die erforderlichen Nachweise gemäß DIN 18800 geführt. Können auch hier alle Nachweise erbracht werden, erfolgt die Ermittlung der Kosten anhand des Gewichtes des Trägers. Kann ein Nachweis nicht erbracht werden, wird der nächstgrößere Querschnitt einer Profilreihe gewählt bzw. zu einer anderen Profilreihe gewechselt.

Bei allen drei Baustoffen werden in einem nachgeschalteten Sortieralgorithmus die zulässigen Lösungen nach der Größe der entstehenden Kosten sortiert.

Die für die verschiedenen Werkstoffe geführten Nachweise werden nachfolgend aufgezeigt:

Holz (Bemessungsgrundlage: DIN 1052-1)

- Biegung
- Schub
- Biegung und Zug
- Durchbiegung
- Biegung und Druck

Stahl (Bemessungsgrundlage: DIN 18800 (11.90); Verfahren elastisch-elastisch)

- Normalspannung
- Durchbiegung
- Schubspannung
- Vergleichsspannung

Die Einhaltung der zulässigen Durchbiegung geschieht bei den Werkstoffen Holz und Stahl indirekt über die Eingabe des zur Einhaltung der zulässigen Durchbiegung erforderlichen Flächenträgheitsmomentes  $I_y$ .

Stahlbeton (Bemessungsgrundlage: DIN V ENV 206 (Eurocode 2))

- Ermittlung der erforderlichen Längsbewehrung
  - Belastung aus Biegung mit oder ohne Längskraft
  - Druckglied mit zentrisch wirkender Druckkraft
  - Zugglied mit zentrisch wirkender Zugkraft oder Zugkraft mit geringer AusmitteDie letzten beiden Fälle sind Sonderfälle und dürften bei der Bemessung von Unterzügen relativ selten auftreten.
- Ermittlung der erforderlichen Bügelbewehrung
  - Schubbewehrung bei einwirkender Querkraft und/oder Belastung durch Biegung (bei Biegung liegt meistens auch eine Querkraft vor)
  - Konstruktive Bügelbewehrung

Bei allen drei zur Auswahl stehenden Materialien gilt, unabhängig von der Bemessungsgrundlage, daß die Stabilitätsprobleme Kippen, Knicken und Beulen nicht berücksichtigt werden!

Bei der Ergebnisausgabe werden abschließend folgende Angaben für die mit dem Programm berechneten günstigsten Querschnitte gemacht:

Holz	Stahl	Stahlbeton
<p><u>Allgemein</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Breite und Höhe des Querschnitts in [cm]</li> </ul> <p><u>Statische Kennwerte</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fläche [cm<sup>2</sup>]</li> <li>- Widerstandsmoment [cm<sup>3</sup>]</li> <li>- Flächenträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]</li> </ul> <p><u>Kosten [DM/m]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Materialkosten</li> <li>- Arbeitskosten</li> <li>- Gesamtkosten des Querschnitts</li> </ul>	<p><u>Allgemein</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bezeichnung des Profils</li> </ul> <p><u>Statische Kennwerte</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Breite [mm]</li> <li>- Höhe [mm]</li> <li>- Fläche [cm<sup>2</sup>]</li> <li>- Widerstandsmoment [cm<sup>3</sup>]</li> <li>- Flächenmoment [cm<sup>3</sup>]</li> <li>- Flächenträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]</li> </ul> <p><u>Kosten [DM/m]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Materialkosten</li> <li>- Arbeitskosten</li> <li>- Gesamtkosten des Querschnitts</li> </ul>	<p><u>Allgemein</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Breite und Höhe des Querschnitts in [cm]</li> </ul> <p><u>Längsbewehrung (ob. u. unten)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- erf. Querschnitt [cm<sup>2</sup>]</li> <li>- gewählte Durchmesser [mm]</li> <li>- Anzahl der Eisen</li> <li>- Anzahl der Lagen</li> <li>- vorh. Querschnitt [cm<sup>2</sup>]</li> </ul> <p><u>Bügelbewehrung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- erf. Querschnitt [cm<sup>2</sup>/m]</li> <li>- gew. Durchmesser der Bügelbewehrung [mm]</li> <li>- Schnittigkeit der Bügel</li> <li>- Abstand in Längsrichtung [cm]</li> <li>- vorh. Querschnitt [cm<sup>2</sup>/m]</li> </ul> <p><u>Kosten [DM/m]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Materialkosten Beton</li> <li>- Arbeitskosten Beton</li> <li>- Kosten der Längsbewehrung</li> <li>- Kosten der Bügelbewehrung</li> <li>- Materialkosten Schalung</li> <li>- Arbeitskosten Schalung</li> <li>- Gesamtkosten des Querschnitts</li> </ul>

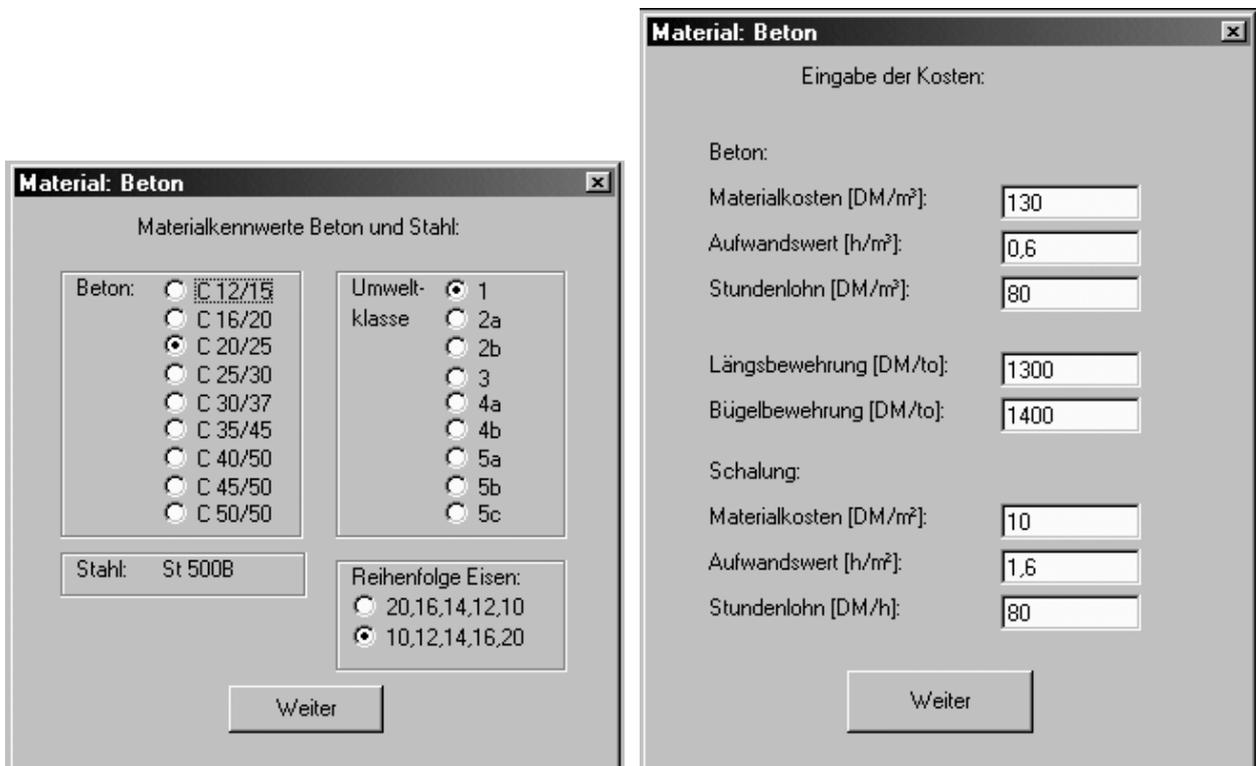


Abb. 57: Eingabemasken von OptimaB; exemplarisch für die Materialkennwerte und die Kosten von Stahlbeton

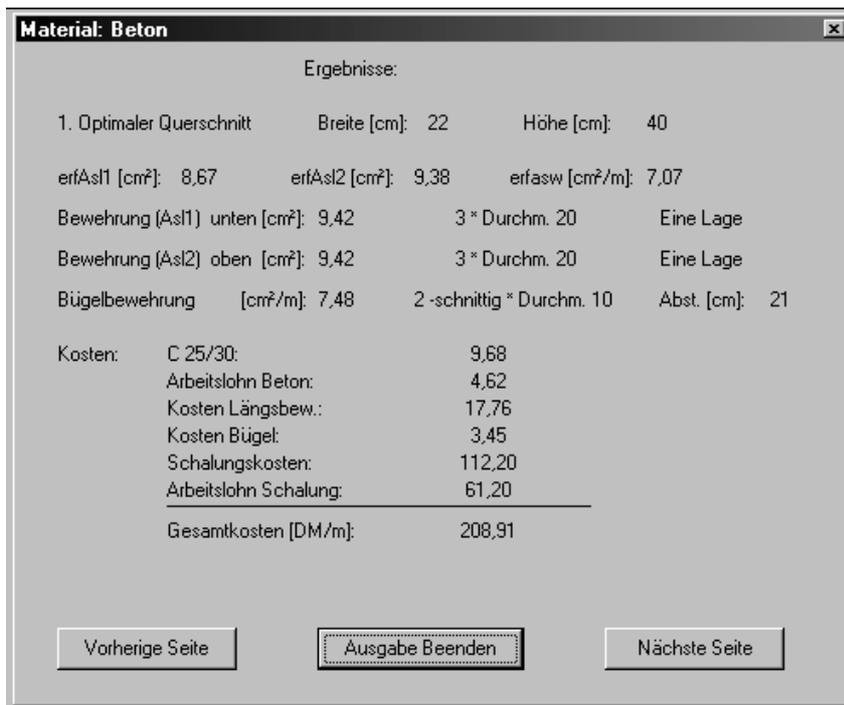


Abb. 58: Ausgabefenster der Optimierung, am Beispiel eines Stahlbetonträgers

#### 4.7.8 Optimierung durch Software-Tool OptimaB

Die in Kapitel 4.7.6 angesprochenen Untersuchungen wurden abschließend mit dem erstellten Software-Tool nochmals aufgegriffen. Obwohl hier nun auch die Schubbewehrung Berücksichtigung findet, liefern die Untersuchungen jedoch weitgehend vergleichbare Ergebnisse.

Folgende Restriktionen wurden berücksichtigt:

- $10 \leq h \leq 60$
- $10 \leq b \leq 30$
- Schrittweite 2 cm
- $h/b \geq 1$
- $h/b \leq 4$
- Bemessung nach Eurocode
- Betongüte C20/25
- Umweltklasse 1 (trocken)
- Querkraft betragsmäßig  $\frac{1}{2} \times$  Moment

Lohnkosten und Aufwandswerte:

- Betonkosten: 130,- [DM]
- Betoneinbau: 0,6 [h/m³]
- Längsbewehrung: 1.300,- [DM/t]
- Bügelbewehrung: 1.400,- [DM/t]
- Schalungskosten: 10,- [DM/m²]
- Vorbereiten, Ein- u. Ausschalen: 1,60 [h/m²]
- Gesamtlohnkosten: 80,- [DM/h]

Der für die Gesamtlohnkosten angenommene Wert von 80,- DM/h basiert auf einer Veröffentlichung des Verbandes baugewerblicher Unternehmer Hessen e.V.. Als Ergebnis einer Befragung von 110 hessischen Baufirmen mußte für das Jahr 1999 ein Wert von 78,80 DM/h angesetzt werden, für das Jahr 2000 wurden 80,63 DM/h prognostiziert (ohne Wagnis und Gewinn sowie Umsatzsteuer). Die angegebenen Aufwandswerte sind der einschlägigen Literatur [ARH], [Plü] und die Schalungskosten den Zahlentafeln von Hoffmann/Kremer entnommen, die Kosten für Beton und Bewehrung beruhen auf telefonischen Anfragen bei regionalen Betrieben.

Die Ergebnisse der Optimierung, unter Berücksichtigung der Schubbewehrung sowie neuer Kostenansätze, sind für die jeweilige Momentenstufe in Abb. 59 zusammengestellt.

<b>Moment [kNm]</b>	10	20	30	40	50	60	70	80	90
<b>b/ h [cm/cm]</b>	12/16	14/18	16/20	14/24	18/24	20/24	18/28	18/30	22/28
<b>Kosten [DM/lfm]</b>	72,91	86,63	96,77	105,96	115,88	124,22	131,93	138,00	143,15

<b>Moment [kNm]</b>	100	150	200	250	300	350	400	450	500
<b>b/ h [cm/cm]</b>	22/30	22/36	20/42	26/42	22/48	22/52	26/52	28/52	28/54
<b>Kosten [DM/lfm]</b>	147,53	170,70	187,61	206,19	218,23	231,33	245,51	256,24	267,57

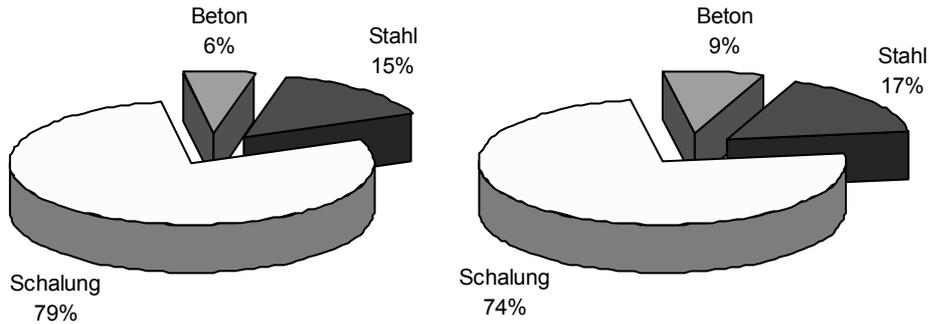


Abb. 59: Querschnittsmaße und durchschnittliche Kostenverteilung für niedrigbelastete (links) und hochbelastete (rechts) Stahlbetonträger mit Berücksichtigung der erforderlichen Schubbewehrung

Weiterhin zeigte sich bei den Untersuchungen, daß eine Verdoppelung der Querkraft nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtkosten hat, da in diesem Fall nur die Schub-/ Bügelbewehrung verstärkt werden muß. Die Abweichungen betragen im Extremfall weniger als 4 %. Aus den erzielten Ergebnissen läßt sich, unter Berücksichtigung einer Trendlinie, die einem Moment zugehörige kostenoptimal abgewickelte Schalungslänge erkennen. Die in Abb. 60 dargestellten Ergebnisse beruhen auf den eingangs erwähnten Restriktionen, Lohn-, Kosten- und Aufwandsansätzen und sind nicht ohne weiteres auf Probleme mit abweichenden Eingangsparametern übertragbar.

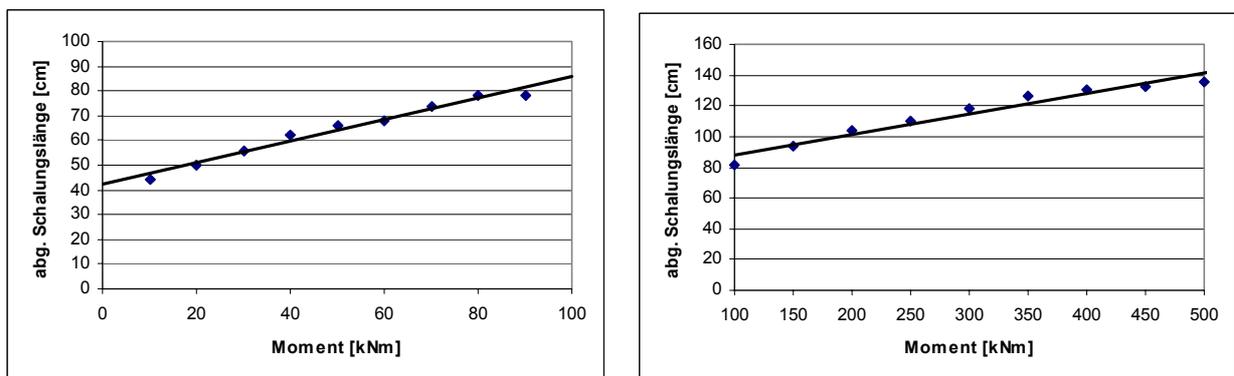


Abb. 60: Kostenoptimales Verhältnis der Schalungsabwicklung, in Abhängigkeit des vorhandenen Momentes (Eingangsparameter beachten!)

## Anwendungsbeispiel

Zur weiteren Verifizierung wurden abschließend, in enger Zusammenarbeit mit einem Ingenieurbüro, einige real erstellte Standsicherheitsnachweise nachträglich mit OptimaB genauer untersucht. In einem Fall handelte es sich um einen Stahlbetonunterzug des Kellergeschosses eines 3-geschossigen Produktionsgebäudes, aus Beton der Festigkeitsklasse B45. Die Bauwerkslasten des Gebäudes werden hauptsächlich über Unterzüge und Stützen abgeleitet. Der Grundriß des Kellergeschosses entspricht dem des Erd- und Obergeschosses, auch die Spannweiten und Auflagerbedingungen der einzelnen Unterzüge sind vergleichbar. Zur weiteren Untersuchung wurde hier der am höchsten belastete Unterzug des Kellergeschosses gewählt. Es bot sich an, diese optimierten Abmessungen auch bei den anderen Unterzügen, zumindest im KG, anzuwenden, um die Schalung mehrfach einsetzen zu können. Das statische System ist das eines Einfeldträgers, mit einer Spannweite von 5,01 m und einer Gleichstreckenlast von 86 kN/m, die vorhandenen Querschnittsabmessungen betragen  $b/h = 30/60$  cm. Die Bemessung erfolgte nach DIN 1045. Um eine bessere Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, wurde der Unterzug nochmals nach Eurocode 2, mit Beton der Festigkeitsklasse C35/45 und Betonstahl IVS nach DIN 488, bemessen.

Folgende Lohnkosten und Aufwandswerte liegen der Kostenermittlung zugrunde:

- Betonkosten: 143,- [DM/m<sup>3</sup>]
- Längsbewehrung: 1.300,- [DM/t]
- Schalungskosten: 14,- [DM/m<sup>2</sup>]
- Gesamtlohnkosten: 80,- [DM/h]
- Betoneinbau: 0,6 [h/m<sup>3</sup>]
- Bügelbewehrung: 1.400,- [DM/t]
- Vorbereiten, Ein- u. Ausschalen: 1,60 [h/m<sup>2</sup>]

Mit diesen Werten wurden verschiedene Varianten untersucht und die Ergebnisse in Tab. 7 zusammengestellt.

vorgegebene Abmessungen		optimierter Querschnitt b/h [cm/cm]	Kosten des Unterzuges [DM/lfdm]	Gesamtkosten bei vorhandener Länge von 5,01 m [DM]	Ersparnis zum vorh. Querschnitt [DM]	prozentuale Einsparungen [%]
Breite [cm]	Höhe [cm]					
30	60	30/60	267,80	1341,68	-	-
30	variabel	30/32	195,91	981,51	360,17	26,8
variabel	60	16/60	233,14	1168,03	173,65	12,9
variabel	variabel	17/41	187,92	941,48	400,20	29,8

Tab. 7: Ergebnisse der Variantenuntersuchung eines Stahlbetonunterzuges

Es zeigt sich, daß gegenüber dem vorhandenen Querschnitt erhebliche Einsparungen, bei einer gleichzeitigen Verringerung der Unterzughöhe, möglich sind. Weitere Untersuchungen an durchgeführten Bauvorhaben lassen erkennen, daß im Schnitt mind. 10 % der Herstellkosten bei den Unterzügen durch die Optimierung zu realisieren sind. Legt man in dem hier untersuchten Beispiel die für das KG optimierten Abmessungen der Unterzüge auch für das restliche Gebäude zugrunde, ergeben sich, bei einer Gesamtlänge von ca. 173 lfdm. an Unterzügen, Einsparungen von ca. 13.000,- DM. Die Auswirkungen auf die Gesamtbaukosten sind letztendlich direkt abhängig von der Anzahl der benötigten Unterzüge. Gerade bei Stahlbetonskelettbauten, aber auch bei sonstigen Produktionsgebäuden, Tiefgaragen etc., bei denen eine hohe Anzahl von hochbelasteten Unterzügen vorhanden ist, ist ein großes Einsparungspotential vorhanden.

## 4.8 Optimierung von Holzbalkendecken

### 4.8.1 Problemstellung

In Abhängigkeit der zu überbrückenden Spannweite (Abstand der tragenden Wände in Deckenspannungsrichtung) soll das wirtschaftlichste Deckensystem gewählt werden. Bei einer geringen Spannweite kommt in der Regel ein einlagiges Trägersystem zur Ausführung; die einzelnen Deckenbalken liegen direkt auf den Wänden auf. Da mit größerem Abstand der Wände dieses System unwirtschaftlich wird, erfolgt die Ausführung eines zweilagigen Trägersystems. Hierbei sind zusätzliche Unterzüge quer zur Deckenspannungsrichtung erforderlich, die, zusammen mit den Wänden, als Auflager für die Deckenbalken dienen. Bei einer weiteren Vergrößerung der zu überspannenden Fläche ist unter Umständen ein dreilagiges Balkensystem zu wählen.

Nachdem die Art des Trägersystems festgelegt wurde (ein-, zwei- oder dreilagig), muß das Raster der Deckenbalken, in Abhängigkeit von der Eigen- und Verkehrslast sowie der Art der Ausbildung des Deckenaufbaues, gewählt werden. Bei einem zwei- oder dreilagigen Trägersystem stellt sich ferner die Frage nach der Wahl des statischen Systems für die Balken und/oder der Unterzüge: Soll die Ausführung als Einfeld- oder Mehrfeldträger erfolgen?

### 4.8.2 Einlagiges Balkensystem

Die Optimierung eines Deckensystems mit Holzbalken gestaltet sich etwas komplexer als die bereits vorgestellte Optimierung eines Holzbiegeträgers, da die einzelnen Balken in einem von äußeren Einflüssen abhängigen Raster angeordnet werden müssen. Bei einer Vergrößerung des Rasters erhöht sich die Lastezugsfläche der einzelnen Balken. Dieses bedingt eine Erhöhung der statisch erforderlichen Querschnittsfläche. Die Rasterweite ist ebenso abhängig von der oberen Beplankung (in der Regel Holzwerkstoffplatten) der Decke. Um unnötigen Verschnitt der Holzwerkstoffplatten zu vermeiden, müssen die Abstände der Holzbalken untereinander so gewählt werden, daß ein Vielfaches der Abstände genau die Länge der Holzwerkstoffplatte (in der Regel 62,5 cm bzw. 83,3 cm) ergibt. Bei einem größeren Rastermaß muß auf alle Fälle die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Beplankung überprüft bzw. eine evtl. vorliegende bauaufsichtliche Zulassung beachtet werden. Auch die Ausführungsbedingungen für Scheiben ohne Nachweis gemäß DIN 1052-1 zur Aussteifung des Gebäudes, lassen, selbst bei Platten mit Nut und Feder, keine schwebenden Stöße in einem Feld zwischen zwei Balken zu. Bedingt durch diese Anforderungen läßt sich leicht die Analogie zur optimalen Ausbildung von Dachtragwerken bei Beplankung mit Holzwerkstoffen erkennen.

### 4.8.3 Zweilagiges Balkensystem

Neben den erforderlichen Restriktionen des einlagigen Balkensystems, die unverändert gelten, ist die Verwirklichung des kostenoptimalen Systems noch von weiteren Faktoren abhängig. Bei einem zweilagigen System sind die Anordnung der Deckenbalken, die Wahl des statischen Systems für die Deckenbalken und den Unterzug sowie die kostenoptimalen Abmessungen von Balken und Unterzug kostenoptimal zu ermitteln, wobei sich die gewählten Eigenschaften gegenseitig beeinflussen. Die Wahl des statischen Systems eines Durchlaufträgers bewirkt zwar einerseits eine Verringerung der Querschnittsfläche bei den einzelnen Deckenbalken, hat jedoch andererseits zur Folge, daß sich die Lasten für den Unterzug erhöhen. Bei einem Zweifeldträger mit identischen Spannweiten ergeben sich so um 25 % erhöhte Lasten für den quer-

laufenden Unterzug (siehe Abb. 61). Wird auch der Unterzug als Durchlaufträger ausgeführt, bekommen zusätzlich die Stützen des Unterzuges erhöhte Lasten. Durch eine unüberlegte Ausbildung können also Lasten erzeugt werden, deren Abtragung sich bis zur Dimensionierung der Fundamente auswirkt.

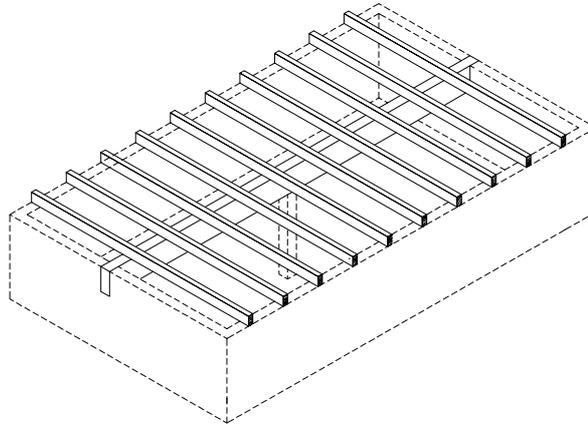


Abb. 61: Prinzipskizze eines Deckentragsystems

Gesucht wird das Tragsystem, bestehend aus Deckenbalken und Unterzügen, das bei allen zusätzlichen Restriktionen insgesamt die geringsten Herstellungskosten verursacht.

#### 4.8.4 Bekannte Optimierungsansätze

Dimitrov [Z-Dim] bzw. Dimitrov und Hoyer [DiHo] wählen als Optimierungskriterium die Querschnittsfläche eines Trägers. Die Aufbereitung des Problems erfolgt als klassische Optimierungsaufgabe. In der Zielfunktion soll die Querschnittsfläche minimiert und mit den Restriktionen die Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise (Schub-, Biegespannung, Verformung etc.) überprüft werden. Neben der graphischen Lösung für einlagige Tragwerke geben die Verfasser Gleichungen für Einfeldträger an. Daraus läßt sich das zu den maßgebenden Restriktionen, Verformung-Kippen und Biegung-Kippen, zugehörige Volumen direkt ermitteln. Feststehende Werte werden zusammengefaßt und bei der Anwendung aus Tabellen abgelesen.

Bei graphischer Lösung der zweidimensionalen Optimierungsaufgabe führt Dimitrov einen logarithmischen Maßstab ein, mit dem die Kurven zu Geraden gestreckt werden und somit einfacher abzulesen sind.

Weiterhin beschreibt er ein Rechenprogramm, bei dem der Trägerabstand  $e$  als Variable eingeführt wird. Dieses Programm wird auf eine zweite und dritte Lage erweitert und ermittelt das Gesamtvolumen des Tragwerkes. Die Zahl der Träger der oberen Lage wird gewählt und die der unteren Lagen durch Enumeration, mit konstanter Schrittweite, gefunden und das Volumen des Tragwerks ermittelt.

Auch hier wird nur die Querschnittsfläche, ohne Berücksichtigung der Gesamtkosten, minimiert; das erwähnte Rechenprogramm von 1978 steht nicht mehr zur Verfügung.

Führer [Z-Füh] hat sich ebenfalls mit der Ausführung von Holzbalkendecken, mit bis zu drei Balkenlagen, beschäftigt. Es wird vorausgesetzt, daß der Balkenabstand der oberen Lage durch

die Wahl des Belages gegeben und die Anzahl der Träger der beiden unteren Lagen variabel ist.

Wie bei Dimitrov und Hoyer [DiHo], [Z-Dim] wird das Gesamttragwerk aus einer einlagigen Balkenordnung heraus entwickelt. Die Belastung auf die einzelnen Deckenbalken wird über die Lasteinzugsfläche ermittelt, die noch eine Variable für die Anzahl der Balken enthält. Dieser Ansatz wird auf die zweite und dritte Lage erweitert. Als Optimierungskriterium wird der Materialverbrauch gewählt, da durch die Minimierung des Holzvolumens die Materialkosten gesenkt werden.

Randbedingungen sind Stützweite, Belastung und das Seitenverhältnis  $b/h$  des Trägers; Stabilitätsuntersuchungen und Gebrauchstauglichkeit können nur sequentiell überprüft werden. Ergänzend zu Dimitrov und Hoyer können hier auch Durchlaufsysteme durch einen entsprechenden Faktor optimiert werden.

Führer stellt Gleichungen auf, mit denen die Höhe  $h$  der Gesamtkonstruktion ermittelt werden kann. Durch Anwendung verschiedener Diagramme, in denen die Abhängigkeiten von Materialaufwand zu Stützweite, Belastung, Seitenverhältnis  $\alpha$ , Tragsystemfaktor, zulässiger Spannung und Tragsystemfaktor  $f$  dargestellt sind, kann die benötigte Holzmenge ermittelt werden. Diese Diagramme werden getrennt zur Berücksichtigung der Durchbiegung und Biegespannung aufgestellt.

Die Ermittlung der Werte aus den verschiedenen Diagrammen ist umständlich, ungenau und zeitaufwendig. Um die Anzahl der Parameter überschaubar zu halten, wird auch hier wieder nur der Materialverbrauch, ohne Berücksichtigung der Gesamtkosten, optimiert.

#### 4.8.5 Einlagiges Balkensystem als Optimierungsaufgabe

Wie bereits in Kapitel 4.7 vorgestellt, kann auch hier wieder das Problem als Optimierungsaufgabe dargestellt werden. Als Entwurfsvariablen werden die Querschnittsabmessungen der einzelnen Holzbalken gewählt, wobei die Abmessungen nur ganzzahlige Werte annehmen können; die Schrittweite bei der Optimierung sollte sowohl in der Breite als auch in der Höhe 2 cm betragen (Vorzugsmaße für Schnittholz). In den Nebenrestriktionen sollten die Grenzen der Bauteilabmessungen festgelegt und die möglichen Abmessungen auf „baupraktische Verhältnisse“ beschränkt werden. Durch die Hauptrestriktionen wird gewährleistet, daß der Querschnitt die Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise erfüllt. Als zusätzliche Bedingung muß die Rasterweite der Balkenlage als Entscheidungsvariable in den Optimierungsprozeß integriert werden. Da der Verschnitt bei der Beplankung minimiert werden soll, ist es sinnvoll, die Rasterweite in Abhängigkeit der Länge der Beplankung zu wählen. Aus diesem Grund ergeben sich oft nur 3 bis 4 sinnvolle Balkenabstände, aus denen der für das Gesamtsystem kostenoptimale ausgewählt werden muß. Mit der gewählten Rasterweite muß zusätzlich die geplante Beplankung auf ihre Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen werden. Durch die abschließende Verknüpfung mit den Bauteilkosten kann aus der Menge der möglichen Lösungen die optimale bestimmt werden.

Als Lösungsalgorithmus bietet sich auch hier wieder eine Enumeration an. Bei der Frage nach der optimalen Rasterweite einer Holzbalkendecke, ausgebildet als einlagiges Balkensystem, ist, in Abhängigkeit der Beplankung, der zur Lösung erforderliche Algorithmus nahezu identisch mit

dem für die Ermittlung der optimalen Rasterweite der Sparren bei Ausbildung eines Dachtragwerkes. Zur Lösung der Aufgabe wurde ein entsprechender Lösungsalgorithmus in das Software-Tool OptimaD implementiert; der Lösungsweg wird in Kapitel 4.8.6 kurz vorgestellt.

Graphischer Lösungsansatz

Im Rahmen eines vereinfachten, jedoch effektiven Bemessungsansatzes, ist es vorstellbar, für die Aufgabe einen graphischen Lösungsansatz zu entwickeln. Damit ist es in der Phase der Vorbemessung bereits möglich, die entstehenden Kosten zu berücksichtigen. Da hier mehrere voneinander abhängige Entscheidungen zu treffen sind, bietet sich die Umsetzung in ein Bemessungsnomogramm besonders an. In Abb. 62 ist der Entwurf eines solchen Nomogramms dargestellt. Dieses Nomogramm gilt für eine Balkenbreite von 6 cm, die Eingangsgröße ist die Flächenlast der Decke (Eigen- und Verkehrslast). Im ersten Abschnitt des Nomogramms wird, unter Berücksichtigung des gewählten Balkenabstandes, aus der Flächenlast [kN/m<sup>2</sup>] die für die Bemessung erforderliche Gleichstreckenlast [kN/m] gebildet. Im nächsten Abschnitt wird, unter Berücksichtigung der Balkenspannweite, die Bemessung durchgeführt und die erforderliche Höhe ermittelt. Im letzten Abschnitt wird, unter Berücksichtigung der Bauholzkosten [DM/m<sup>3</sup>], der Materialpreis für den laufenden Meter eines Balkens bestimmt. Zur Erstellung der Diagramme mußten die Restriktionen schrittweise nach den unterschiedlichen Variablen aufgelöst werden.

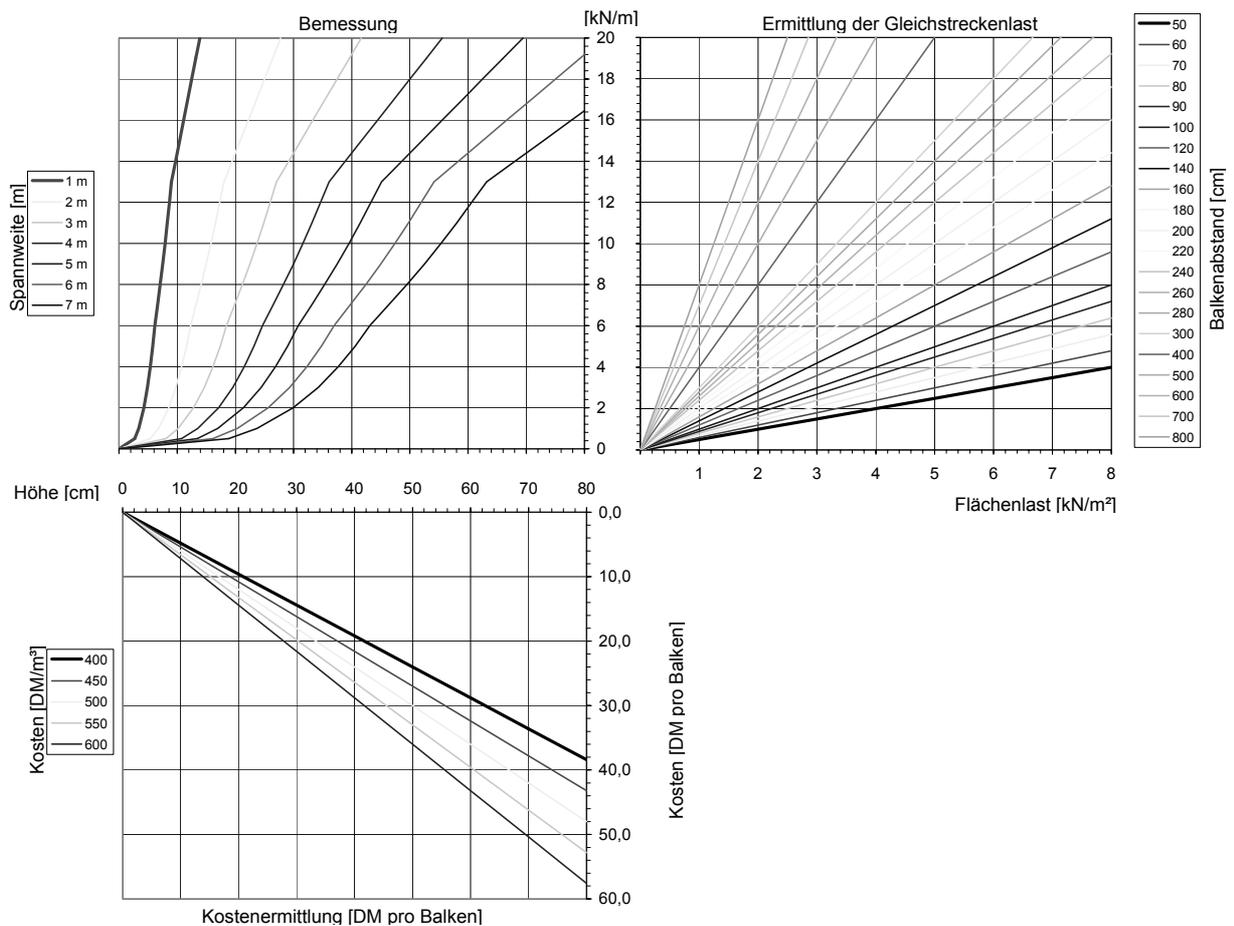


Abb. 62: Ideenskizze eines Bemessungsnomogrammes für einen Holzträger, b = 6 cm

Da gerade bei Holzträgern die Balkenbreite oftmals aus konstruktiven Gründen vorgegeben wird, besteht kein Nachteil darin, daß man mit einer zuvor festgelegten Breite in das Nogramm einsteigen muß.

#### 4.8.6 Optimierung durch Software-Tool OptimaD

Bei der Optimierung einer einlagigen Holzbalkenlage ist das Rastermaß gesucht, bei dem die Gesamtkosten wegen des geringsten Holzverbrauches, unter Berücksichtigung der Beplankungsmaße und damit der Minimierung des Verschnittes, am niedrigsten werden. Da die zu lösende Aufgabe nahezu identisch mit der Optimierung von Dachkonstruktionen ist (siehe Abschnitt 4.6.6), wurde in das bereits vorgestellte Software-Tool OptimaD auch die Optimierung von Holzbalkendecken als einlagiges Balkensystem implementiert. Der Anwender entscheidet in der Begrüßungsmaske, ob er einen Dachstuhl oder eine Holzbalkendecke optimieren wird.

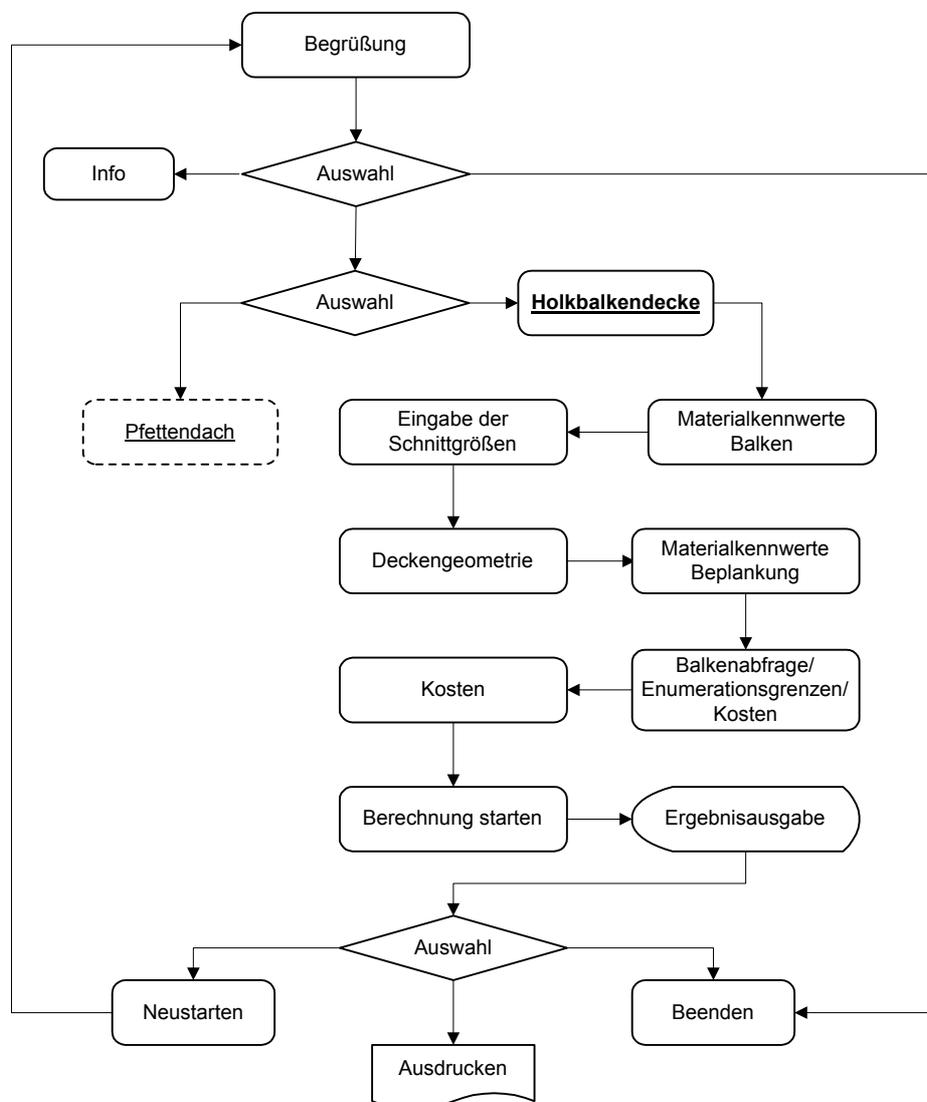


Abb. 63: Allgemeine Programmstruktur der Optimierung einer Holzbalkenlage bei OptimaD

Nachdem sich der Anwender für die Optimierung einer Holzbalkenlage entschieden hat, werden auch hier sequentiell die im folgenden genannten Informationen abgefragt.

#### Erforderliche Eingabeparameter

- Materialgüte der Holzbalken: NH S10 bzw. NH S13
- Schnittgrößen: Feldmoment, Stützmoment, Querkraft, erf. Flächenträgheitsmoment
- Deckenparameter: Deckenlänge, -breite (Spannrichtung), Deckenlast (ständige Lasten und Verkehrslasten)
- Angaben zur Holzwerkstoffbeplankung
  - Maße der HWS-Platte      ➤ E-Modul      ➤ zul. Spannungen
  - Plattendicke      ➤ Anzahl Plattenalternativen      ➤ zul. Durchbiegung
- Optimierungsparameter: Balkenabstand, Balkenhöhe und -breite
  - ↳ Iterationsbereich vom kleinsten bis zum größten Wert sowie zugeh. Schrittweite
- Material- und Fertigungskosten: Balken (Bauholz, lfdm. Abbund)

Da die Optimierung einer Holzbalkenlage ebenfalls im Software-Tool OptimaD umgesetzt wurde, erfolgt auch hier die Ermittlung der kostenoptimalen Konstruktion mit Hilfe einer Enumeration. Da nur wenige diskrete Werte aus dem Lösungsraum überprüft werden müssen, wird hier eine beschränkte Enumeration eingesetzt.

Durch die Beplankung mit einer Holzwerkstoffplatte ist es nicht möglich, den Balkenabstand, innerhalb bestimmter Grenzen, mit einer festgelegten Schrittweite zu variieren. Wie bei der Ausführungsvariante eines Dachstuhles mit Holzwerkstoffplatten und Unterspannbahn, als 2. wasserführende Schicht (siehe Abschnitt 4.6.6), sind auch hier, um den Verschnitt bei der Beplankung zu minimieren, als Balkenabstand nur bestimmte Größen zulässig. Daher wird auch hier der gleiche Algorithmus eingesetzt und somit elf theoretisch mögliche Balkenabstände, durch Dividieren der Plattenlänge mit einem Wert von 2 bis maximal 12, ermittelt.

Bei den auf diese Weise errechneten Balkenabständen wird sequentiell geprüft, ob die vom Anwender vorgegebenen Grenzen (Mindest- und Höchstbalkenabstand) über- bzw. unterschritten werden. Ist dies der Fall, wird die Variante verworfen und der nächstmögliche Balkenabstand gewählt. Bei Einhaltung der vom Anwender vorgegebenen Grenzen wird zunächst der aus dem Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis erforderliche Mindestbalkenquerschnitt ermittelt, bevor die entsprechenden Nachweise für die Beplankung beim aktuellen Balkenabstand geführt werden.

In Abb. 64 kann die Umsetzung des beschriebenen Sachverhaltes in das Software-Tool OptimaD anhand eines Flußdiagramms nochmals nachvollzogen werden.

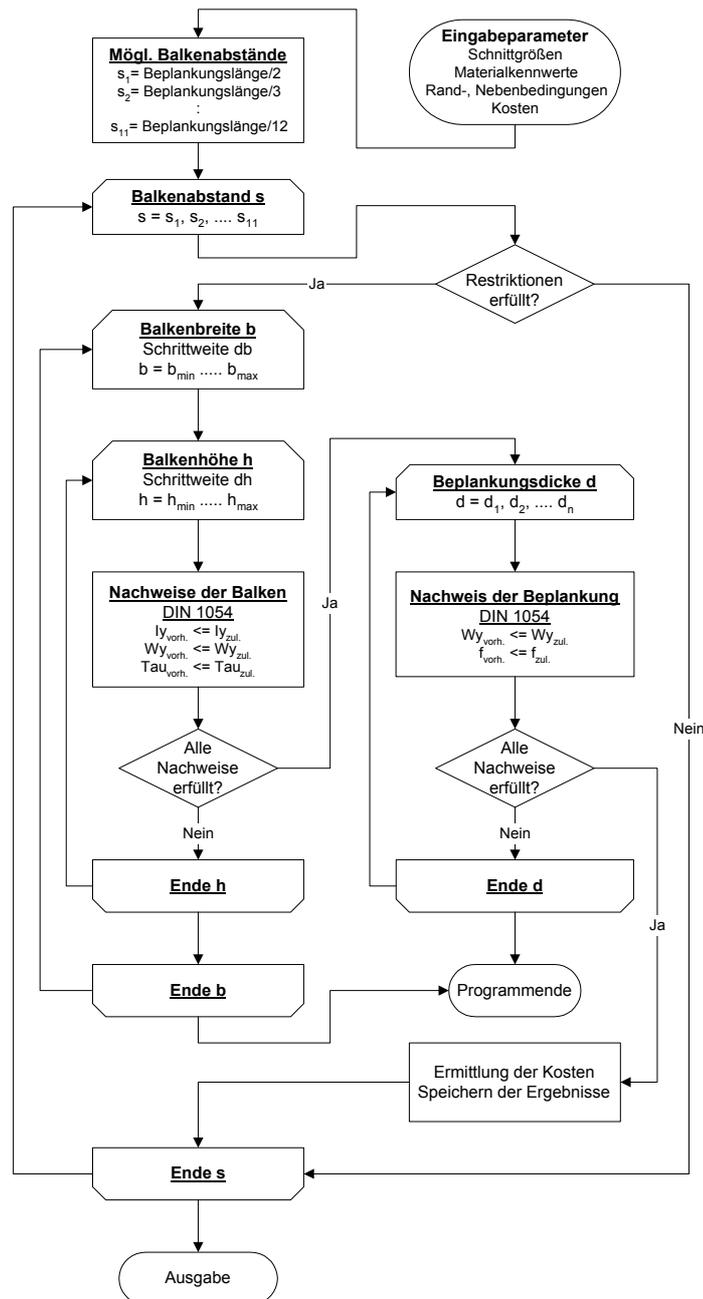


Abb. 64: Flußdiagramm der Optimierungsprozedur bei OptimaD (Holzbalkendecke)

Nach Eingabe der erforderlichen Parameter kann die Berechnung gestartet werden. Hierbei werden für die Holzbalkenlage, analog zu den Optimierungen eines Pfettendaches, alle Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach DIN 1052-1 durchgeführt. Die einzelnen Balken können auch als Durchlaufträger ausgebildet sein (Möglichkeit zur Eingabe eines Stützmomentes gegeben); das statische System ist jedoch zuvor vom Anwender festzulegen. Auf diese Weise lassen sich auch die kostenmäßigen Auswirkungen verschiedener statischer Systeme untersuchen. Wenn auch der größte, zuvor vom Anwender festgelegte Balkenquerschnitt nicht die erforderlichen Nachweise erfüllen kann, wird die Optimierung beendet.

Wurde ein zulässiger Balkenquerschnitt für einen bestimmten Balkenabstand ermittelt, werden anschließend die Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise für die Beplankung geführt. Da mit zunehmender Vergrößerung des Rastermaßes die Belastung der Beplankung

steigt, können materialspezifische Werte von bis zu fünf verschiedenen Plattenstärken, mit den zugehörigen Preisen, ausgewählt bzw. eingegeben werden. Werden die Nachweise nicht eingehalten, wird automatisch der nächstgrößere Plattenquerschnitt gewählt. Können auch bei der größten Plattendicke die Nachweise nicht mehr erbracht werden, ist ein Abbruchkriterium für die Optimierung erreicht.

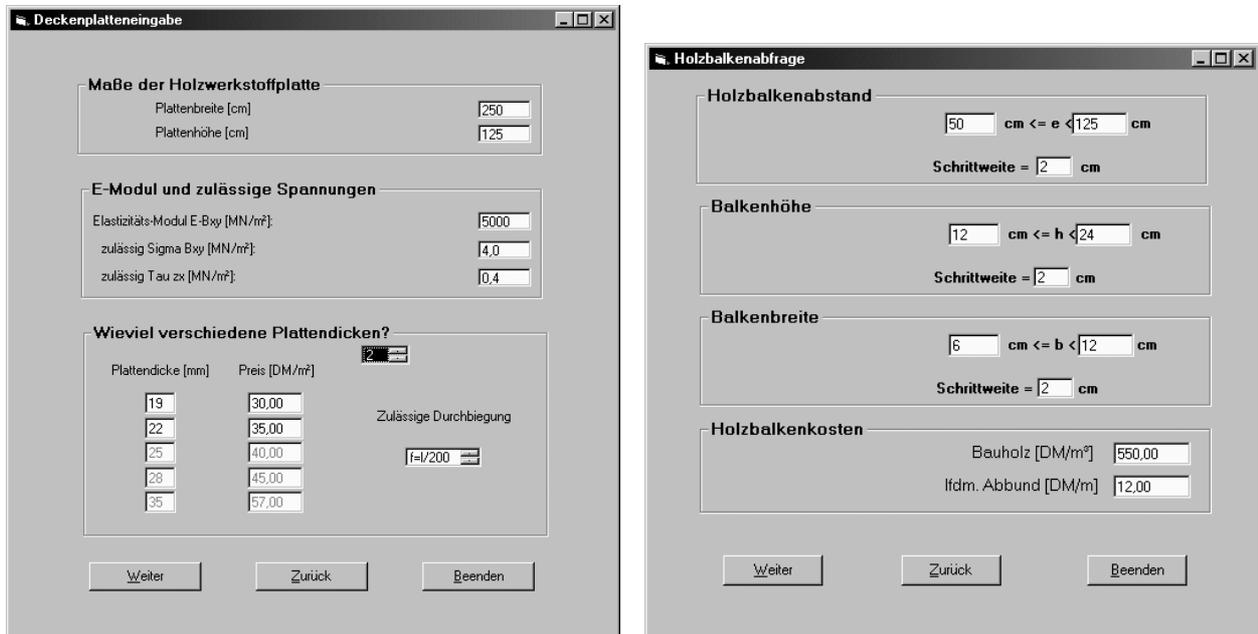


Abb. 65: Eingabemaske für die Eigenschaften der HWS-Platte und der Parameter der Holzbalken

Als Ergebnis der Optimierung werden für die verschiedenen, möglichen Varianten die sich aus den Bauholzkosten und Kosten der Holzwerkstoffplatte ergebenden Gesamtkosten ausgegeben. Bei den Untersuchungen wird auch die Dicke der Holzwerkstoffplatte variiert, da die sich aus einer dickeren Beplankung ergebenden Mehrkosten durch Minderung der Bauholzkosten kompensiert werden können. In Abb. 66 ist das Ergebnis für eine Beplankung mit Sterling OSB-Platten, mit den Abmessungen 2,44 x 1,22 m, dargestellt.

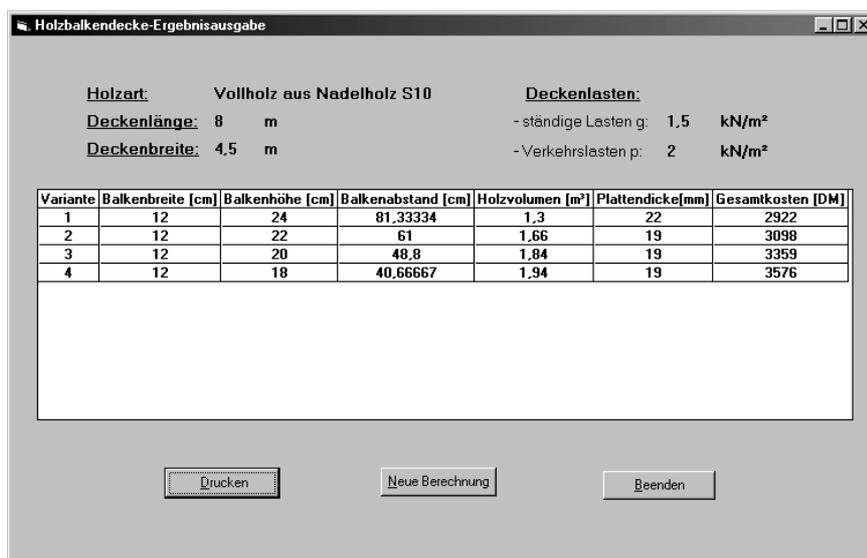


Abb. 66: Ergebnis der Optimierung mit einer Holzwerkstoff-Beplankung

## 4.9 Optimierung von Wärmeschutzmaßnahmen

### 4.9.1 Problemstellung

Die Bedeutung des baulichen Wärmeschutzes hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte erheblich gewandelt und nimmt einen immer größeren Stellenwert ein. Die meisten vor 1973 errichteten Hochbauten unterlagen bezüglich ihrem Energieverbrauch keinerlei Wärmeschutzbestimmungen. Während in den 50er und 60er Jahren Betrachtungen und Berechnungen zum baulichen Wärmeschutz in erster Linie aus hygienischen Gründen (Vermeidung von Schimmelpilzbildung etc.) vorgenommen wurden, rückte, ausgelöst durch die Energiekrise 1973, zunehmend die energetische Komponente des Wärmeschutzes in den Vordergrund. Erst mit dem Inkrafttreten verschiedener Regelwerke, nach der plötzlichen Verteuerung der Preise für fossile Energieträger, versuchte der Gesetzgeber regulierend einzugreifen. Die neueste Verordnung, die Energieeinsparverordnung (EnEV), ist zwar seit März 2001 vom Bundeskabinett verabschiedet, die gesetzliche Einführung ist jedoch erst für Februar 2002 vorgesehen.

Jahr	Rechtsvorschrift	Inhalt
1969	DIN 4108 (Wärmeschutz im Hochbau)	Hygienischer Wärmeschutz
1974	„Ergänzende Bestimmungen“ zur DIN 4108	Baulicher Wärmeschutz
1976	Energieeinspargesetz	Grundlage für alle Rechtsvorschriften mit dem Ziel der Energieeinsparung
1977	1. Wärmeschutzverordnung	Baulicher Wärmeschutz (Beschränkungskonzept)
1982	2. Wärmeschutzverordnung	Baulicher Wärmeschutz (Beschränkungskonzept)
1995	3. Wärmeschutzverordnung	Baulicher Wärmeschutz (Anforderungskonzept)
2002	Energieeinsparverordnung	Baulicher Wärmeschutz

Tab. 8: Entwicklung der Regelwerke zur Beschränkung des Energieverbrauches

Es gibt jedoch noch andere Aspekte, eine Erhöhung des Wärmeschutzes anzustreben. Bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen eine Reihe von Schadstoffen, wie Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Stickoxid, Staub und vor allem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Alleine in Deutschland werden jährlich ca. 858 Mio. t Kohlendioxid produziert, was einer jährlichen Pro-Kopf-Produktion von 8,8 t entspricht [Quelle: Umweltbundesamt]. Da ein weiterhin ungehemmter Ausstoß von CO<sub>2</sub> für eine zunehmende Verschmutzung unserer Atmosphäre sorgt und die Gefahr einer globalen Klimaveränderung birgt, gilt es, die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter drastisch zu verringern. Bereits im Jahre 1990 hat sich daher der Deutsche Bundestag zum Ziel gesetzt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik bis zum Jahre 2005 um 25 % in den alten Bundesländern und um 30 % in den neuen Bundesländern zu reduzieren.

Von der erzeugten Primärenergie in Deutschland sind nur ca. 65 % nutzbar. Davon entfällt rund ein Drittel des Energieverbrauchs auf private Haushalte, davon wiederum 76 % auf die Raumheizung [Angaben des Umweltbundesamtes für das Jahr 1995].

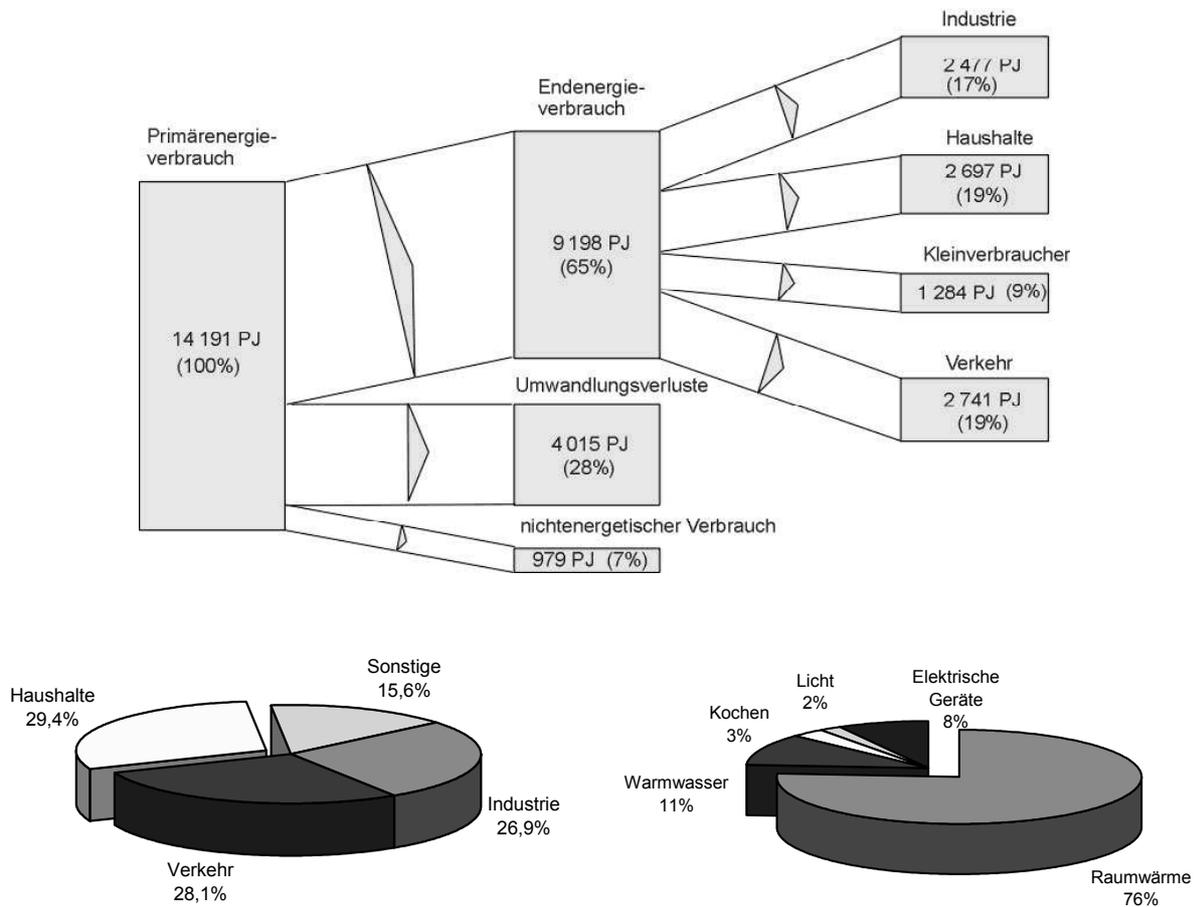


Abb. 67: Primärenergiverbrauch nach Anwendungsbereichen und Energieverbrauch der privaten Haushalte 1995 [Umweltbundesamt]

Aufgrund der in Abb. 67 aufgezeigten Verhältnisse erscheint es sinnvoll, gerade bei den privaten Haushalten die maximal zulässigen Heizwärmebedarfswerte pro m<sup>2</sup> und Jahr durch energiesparende Bautechnik und fortschrittliche Heizungstechnik weiter zu beschränken. Dieses wurde mit der aktuellen Wärmeschutzverordnung (WSchVo) auch erreicht; in der kommenden Energieeinsparverordnung (EnEV) werden die Anforderungen noch weiter verschärft. Die aufgezeigten Zusammenhänge lassen erkennen, wie hoch das Potential ist, mit Hilfe verbesserter Wärmeschutzmaßnahmen bei Wohngebäuden, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern.

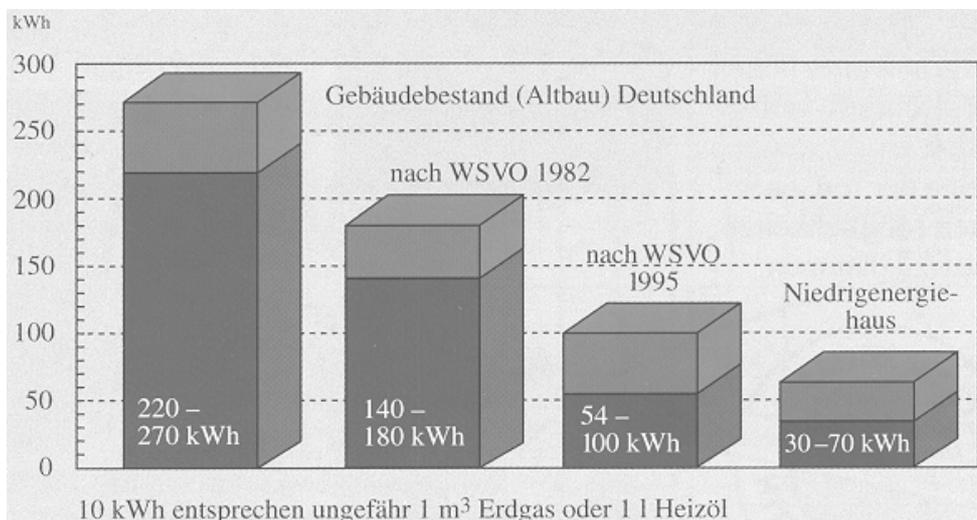


Abb. 68: Heizwärmebedarf von Gebäuden je m<sup>2</sup> und Jahr [Rockwool GmbH]

Der Heizwärmebedarf eines Gebäudes hängt von vielen Faktoren ab. Im privaten Wohnungsbau wird er jedoch wesentlich durch die Transmissionswärmeverluste beeinflusst. Diese Wärmeverluste entstehen aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen dem Inneren des Gebäudes und der Außenluft, durch Wärmeleitung über die wärmetauschende Hüllfläche. Zur wärmetauschenden Hüllfläche gehören alle Bauteilflächen, die den voll- und teilbeheizten Wohnraum zur Außenluft, zum Erdreich, zu angrenzenden Bauteilen oder dauernd ungeheizten Räumen abgrenzen. Die Transmissionswärmeverluste werden hauptsächlich von dem Wärmedurchgangskoeffizienten, dem k-Wert der jeweiligen Bauteilflächen, beeinflusst. Dieser bauteilspezifische Wert gibt an, welche Wärmemenge durch eine Bauteilfläche von  $1 \text{ m}^2$ , bei einem Temperaturgefälle zwischen innen und außen von  $1^\circ \text{ Celsius}$ , pro Zeiteinheit verlorenght. Bei einer Verringerung der k-Werte der Außenbauteile reduzieren sich die Transmissionswärmeverluste entsprechend, d.h. es wird weniger Heizenergie verbraucht. Man muß jedoch beachten, daß die Effektivität von Wärmedämmmaßnahmen mit zunehmender Dämmstoffdicke schnell abnimmt, da der k-Wert eines einschichtigen Bauteils nicht linear mit der Baustoffdicke steigt. Eine Superdämmung impliziert keine Superwirtschaftlichkeit, vielmehr erbringt immer mehr Dämmstoff, jenseits eines spezifischen Optimums, immer weniger Nutzen [Z-Ana].

Um den Wärmeschutznachweis für ein neu zu errichtendes Gebäudes zu erstellen, müssen zunächst die Materialien und Aufbauten der wärmetauschenden Hüllfläche durch den planenden Ingenieur festgelegt werden. Aus der nahezu unendlich großen Anzahl von Ausführungsmöglichkeiten wird daher in der Praxis meist zunächst der zu verwendende Baustoff gewählt (bei Mauerwerk z.B. Ziegel, Kalksandstein etc.) und danach der Aufbau des Bauteils festgelegt (einschaliges oder zweischaliges Mauerwerk, Wärmedämmverbundsystem etc.). Diese verschiedenen Ausführungsvarianten der Gebäudehülle unterscheiden sich nicht nur durch ihre Wärmedurchgangskoeffizienten, die die Transmissionswärmeverluste des Gebäudes entscheidend beeinflussen, sondern auch in ihren Herstellungs- und Folgekosten.

Der planende Ingenieur muß also zunächst, unter Einbeziehung seiner Erfahrung, für die Hüllflächen eines Gebäudes sukzessive die Baustoffe und deren Aufbau bestimmen, damit das zu erstellende Gebäude den Anforderungen der geltenden Wärmeschutzverordnung entspricht. Während die hierdurch für den Bauherrn entstehenden Herstellkosten hinreichend genau abgeschätzt werden können, erfolgt eine langfristige Überprüfung der Wirtschaftlichkeit in der Regel nicht. Dieses sollte jedoch unbedingt erfolgen, da oftmals den erhöhten Mehrkosten in der Herstellung langfristige Heizkosteneinsparungen gegenüber stehen. Auch bei einer nachträglichen Wärmedämmmaßnahme im Bestand sollte stets deren langfristige Wirtschaftlichkeit überprüft werden, da sich auch hier der anfänglich höhere Investitionsaufwand durch die gewünschten Heizkosteneinsparungen schnellstmöglich wieder amortisieren sollte.

Zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit müssen jedoch die einmalig anfallenden Investitionskosten und die jährlich anfallenden Betriebskosten der verschiedenen Konstruktionsvarianten bekannt bzw. zumindest abschätzbar sein. Dies ist für Wohngebäude nicht ganz einfach, da es sich hierbei um relativ langlebige Wirtschaftsgüter, mit Nutzungsdauern von ca. 50 bis über 100 Jahren, handelt. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, daß sich schwer voraussehbare Randbedingungen, wie beispielsweise die Zins- und Heizölpreisentwicklung, maßgeblich auf die Wirtschaftlichkeit einer Wärmedämmmaßnahme auswirken.

Wärmedämmmaßnahmen tragen also nicht nur dazu bei, die Umweltemissionen zu vermindern, sondern können auch oft für den Bauherrn eine gewinnbringende Investition darstellen, wenn sich die einmalig getätigte Investition durch die jährliche Ersparnis bei den Brennstoffkosten kurz- oder mittelfristig wieder amortisiert. Hierbei versteht man unter einer Investition den Einsatz finanzieller Mittel zur Erreichung bestimmter langfristiger Ziele. Es handelt sich dabei also um eine Art Kapitalanlage in der Gegenwart, mit dem Ziel, dem Investor bzw. Bauherrn langfristig Nutzen zu bringen.

Diese Investitionsplanung ist abhängig von verschiedenen Kriterien:

- Höhe der Mehrkosten für den verbesserten Wärmeschutz
- Momentaner Hypotheken- bzw. Kapitalzinssatz
- Energiepreissteigerungsrate etc.

Das Hauptkriterium für eine Optimierung unter monetären Gesichtspunkten ist also, daß sich das in einen erhöhten Wärmeschutz investierte Kapital möglichst schnell wieder amortisieren soll. Der Bauherr kann jedoch ebenso die zuvor genannten Kriterien der Minimierung der Umweltbelastung als wichtiger erachten und dafür auch gerne eine Mehrinvestition, die sich unter Umständen nicht oder nur sehr langsam amortisiert, in Kauf nehmen.

Bei der Umsetzung stellen sich für einen Bauherrn oft die folgenden Fragen:

- Sind Wärmeschutzmaßnahmen, die über geltende Vorschriften hinausgehen, überhaupt sinnvoll?
- Wie verhält es sich mit der Wirtschaftlichkeit bei steigenden / sinkenden Energiepreisen?
- Wo liegen die Grenzen der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Wärmedämmung?
- In welchem Zeitraum haben sich die Maßnahmen voraussichtlich amortisiert?

Eine interdisziplinäre Planung zu Beginn eines anstehenden Neubaus, die konstruktive, gestalterische und bauphysikalische Aspekte betrachtet und unter Berücksichtigung der Gesamtkosten optimiert, wäre erstrebenswert. Daß dies in den wenigsten Fällen geschieht, erscheint um so unverständlicher, weil bei weitaus trivialeren Entscheidungen, wie beispielsweise dem Kauf eines neuen Pkw's etc., neben den reinen Investitionskosten auch die Betriebskosten Berücksichtigung finden. So wird nicht selten einem etwas teureren Kraftwagen aufgrund des geringeren Kraftstoffverbrauchs der Vorzug gegeben, da sich die höheren Investitionskosten durch niedrigere Betriebskosten im Laufe der Zeit wieder amortisieren.

Zielsetzung eines effizienten baulichen Wärmeschutzes sollte es daher sein, eine energetisch, ökologisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung zu ermitteln. Grundlage einer solchen Ermittlung ist die Gegenüberstellung von Nutzen (niedrigerer Energiebedarf) und Aufwand (zusätzliche Kosten). Diese komplexen Zusammenhänge zwischen ökologischen und ökonomischen Parametern erfordern den Einsatz einer geeigneten Planungshilfe.

#### 4.9.2 Finanzmathematische Grundlagen

Die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit von Wärmedämmmaßnahmen bedarf der Kenntnis einiger Grundlagen der Investitionsplanung, die im folgenden kurz dargestellt werden sollen.

Die Verfahren der Investitionsrechnung lassen sich in statische und dynamische Verfahren einteilen. Die Methoden der statischen Verfahren sind zwar relativ einfach anzuwenden, es wird jedoch vernachlässigt, daß die anfallenden Kosten bzw. Erträge meist nicht im gleichen Zeit-

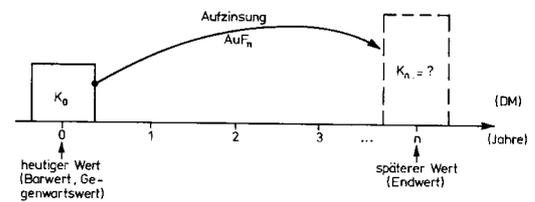
raum, sondern in verschiedenen Perioden anfallen. Deswegen werden im folgenden nur die finanzmathematischen Grundlagen der dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung kurz vorgestellt, da nur diese für die gesamte Lebensdauer einer Investition Wirtschaftlichkeitsaussagen, unter Berücksichtigung der Wertveränderung des Kapitals, machen können. Grundlage der dynamischen Methoden ist die Zinseszinsrechnung.

Einnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten sind ökonomisch nicht gleichwertig. Eine Vergleichbarkeit wird erreicht, indem die zu verschiedenen Zeiten anfallenden Einnahmen auf einen festgelegten Zeitpunkt  $t = 0$  auf- oder abgezinst (diskontiert) werden.

Die folgenden erläuternden Abbildungen sind Schelle [Sche] entnommen.

Aufzinsungsfaktor

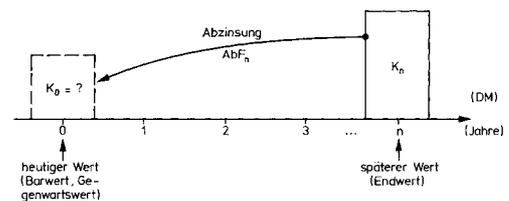
Ein Anfangskapital  $K_0$  vermehrt sich durch die Zinsen und Zinseszinsen auf ein Endkapital  $K_n$ . In der folgenden zugehörigen Formel repräsentiert die Variable  $i$  den Zinssatz (als Dezimalwert) und  $n$  die Anzahl der Jahre, über die das Anfangskapital wegen der Entwicklung der Zinseszinsen auf den Endbetrag  $K_n$  anwächst.



$$K_n = K_0 \times (1 + i)^n$$

Abzinsungsfaktor

Im umgekehrten Fall ist ein Betrag, den man erst in  $n$ -Jahren erhält, zum Zeitpunkt  $t = 0$  entsprechend weniger wert. Der Endbetrag ist bekannt und es stellt sich die Frage, welches Anfangskapital  $K_0$  angelegt werden muß, um in  $n$ -Jahren den Endbetrag  $K_n$  zu erhalten. Das Anfangskapital ist damit der auf den Zeitpunkt  $t = 0$  abgezinste Barwert des künftigen Betrages. Der in der nachfolgenden Formel angegebene Abzinsungsfaktor wird auch Diskontierungsfaktor genannt.

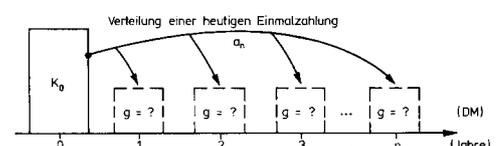


$$K_0 = \frac{K_n}{(1 + i)^n}$$

Annuitätsfaktor

Der Annuitäts- oder Kapitalwiedergewinnungsfaktor gibt den Jahresbetrag an Abschreibungen und Zinsen an, der während  $n$ -Jahren am Ende eines Jahres angesetzt werden muß, um ein Kapital vom Betrag  $K_0$  mit Zinsen und Zinseszinsen wiederzugewinnen.

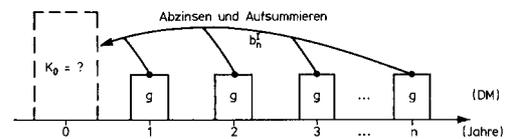
$$g = K_0 \times \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$



## Barwertfaktor

Soll nicht nur eine einzelne künftige Zahlung  $K_n$ , sondern eine Summe von gleich großen regelmäßigen Zahlungen  $g$  bis zum Jahre  $n$  erfolgen, muß der Abzinsungssummenfaktor, auch Barwertfaktor genannt, angewendet werden.

$$K_0 = g \times \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}$$



Ist bereits zum Zeitpunkt  $t = 0$  eine Einnahme zu verzeichnen, ändert sich die Formel wie folgt:

$$K_0 = g + g \times \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}$$

## Kapitalwertmethode

Die hier zugrunde gelegte Kapitalwertmethode diskontiert alle Einnahmen und Ausgaben auf einen gemeinsamen Zeitpunkt  $t = 0$  und macht sie damit vergleichbar mit anderen Investitionsalternativen. Eine Beurteilung einer Investition erfolgt aufgrund des Kapitalwertes. Der Kapitalwert ( $C$ ) ergibt sich aus der Differenz des Barwertes der Einnahmen ( $B_E$ ) und des Barwertes der Ausgaben ( $B_A$ ). Wenn der Kapitalwert positiv ist, kann eine Investition als vorteilhaft angesehen werden, mit zunehmendem Kapitalwert  $C$  wächst der finanzielle Nutzen einer Investition [Keil].

$$C = B_E - B_A$$

### 4.9.3 Bekannte Ansätze zur Bewertung unterschiedlicher Wärmedämmalternativen

Soll der Wärmeschutz eines Gebäudes verbessert werden, entstehen in der Regel höhere Kosten. Diesen stehen jedoch Einsparungen bei den Energiekosten gegenüber. Der Anreiz für einen Bauherrn, Energiesparmaßnahmen zu ergreifen, die über die Anforderungen der Wärmeschutzverordnung (WSchVo) hinausgehen, hängt in der Regel wesentlich vom Nachweis der langfristigen Wirtschaftlichkeit ab. Auch bei nachträglichen Wärmedämmmaßnahmen ist es für den Bauherrn von Interesse, inwieweit sich die Investition in eine veränderte Konstruktion wirtschaftlich auswirkt. Oder mit den Worten von Swyter [Z-Swy] ausgedrückt: „Wärmeschutz kostet Geld, ein erhöhter Wärmeschutz kostet mehr Geld. Ein optimaler Wärmeschutz ist ein solcher, bei dem das Geld, was für einen erhöhten Wärmeschutz aufgewendet wird, nach einer überschaubaren Zahl von Jahren durch die Einsparung an Heizkosten wieder hereinkommt“.

#### 4.9.3.1 Vereinfachtes, statisches Verfahren

Will man nur überschläglich prüfen, ob eine Investition in zusätzliche Wärmedämmmaßnahmen bei einer Fremdfinanzierung rentabel ist, empfiehlt es sich, die Heizkostensparnis mit den Annuitäten zu vergleichen. Dafür muß überprüft werden, wie hoch die jährliche Heizkostensparnis mindestens sein muß, wenn der aufzuwendende Betrag bei einer Verzinsung  $i$  in  $n$ -Jahren wiedergewonnen werden soll.

Beispiel:

Investition: 25.000,- DM

Hypothekenzinssatz  $i$ : 6 %

Hypothekelaufzeit  $a$ : 12 Jahre

$$\text{Annuität } g_{12} = K_0 \times \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = 25.000 \times \frac{0,06 \times (1+0,06)^{12}}{(1+0,06)^{12} - 1} = 0,12 \times 25.000 = 2.982,- \text{ DM/Jahr}$$

Wenn die Heizölsparsnis also mind. 2.982,- DM/Jahr beträgt, ist die Investition rentabel.

Die Formel läßt sich ebenso bei einer eigenfinanzierten Investition anwenden, jedoch muß hier der Kapitalzinssatz sowie eine frei wählbare Laufzeit (z.B. Lebenserwartung der Dämmmaßnahme) eingesetzt werden.

#### 4.9.3.2 Bauteilverfahren

Eine weitere Möglichkeit, dieses Optimierungsproblem zu lösen, stammt aus dem Jahre 1979 und wurde von Swyter [Z-Swy] entwickelt, der entsprechende Forschungsergebnisse des Instituts für Bauforschung in Hannover fortführte. Bei der dargestellten Formel, die sowohl die Energieverteuerung als auch den Einsatz des aufgezinnten Kapitals berücksichtigt, wird jedes Bauteil gesondert betrachtet und auf einen Quadratmeter Fläche bezogen. Dabei wird der Endwert einer  $n$  Jahre laufenden Rente, deren jährliche Beträge den Gegenwert des Wärmeverlustes ausmachen und entsprechend der Ölpreisverteuerung prozentual ansteigen, gleichgesetzt dem  $n$  Jahre aufgezinnten Kapital, das für die Zusatzdämmmaßnahme eingesetzt wurde. Er stellt dabei für die Dauer der Amortisation folgende Formel auf:

$$n = \frac{\log \left[ \frac{\Delta K \times (i - q)}{\Delta Q \times J} + 1 \right]}{\log \frac{i}{q}} \quad [\text{Jahre}]$$

Mehrkosten:  $\Delta K = K_1 - K_2$  [DM/m<sup>2</sup>]

$K_1$  = Erstellungskosten Bauteilalternative A (normaler Wärmeschutz)

$K_2$  = Erstellungskosten Bauteilalternative B (erhöhter Wärmeschutz)

Verringerung des Transmissionswärmeverlustes:  $\Delta Q = \Delta k \times \Delta t / 1000$  [kW/m<sup>2</sup>]

$\Delta k = k_1 - k_2$

$k_1$  = k-Wert Bauteilalternative A (normaler Wärmeschutz)

$k_2$  = k-Wert Bauteilalternative B (erhöhter Wärmeschutz)

$\Delta t = t_i - t_a$

$t_i$  = Raumtemperatur

$t_a$  = mittlere Außentemperatur

Jahreskosten für ein kW:  $J = z \times P \times 1/\eta$  [DM/(axkW)]

$z$  = Heizstunden pro Jahr

$P$  = Preis der Wärmeeinheit

$\eta$  = Wirkungsgrad der Heizanlage

Aufzinsungsfaktor:  $q = 1 + p/100$  [%]

$p$  = Jahreszinssatz

Zinsfaktor zur Verteuerung der Wärmeeinheit:  $i = 1 + s/100$  [%]

$s$  = Energiepreissteigerungsrate

Es ist zu erkennen, daß die Formel genau dann versagt, wenn der Bankzinssatz die gleiche Größe annimmt wie die Teuerungsrate der Energie.

Für diesen Sonderfall  $i = q$  bzw.  $p = s$  ergibt sich:

$$n = \frac{\Delta K \times i}{\Delta Q \times J} \quad [\text{Jahre}]$$

Die oben genannte Formel gilt für den Vergleich verschiedener Bauteilalternativen; man kann beispielsweise zwei verschiedene Wand- oder Dachaufbauten miteinander vergleichen. Das Ergebnis, die Dauer der Amortisation, reagiert äußerst sensibel auf Variation der Parameter  $i$  und  $q$ , also der Energiepreissteigerungsrate und des Jahreszinssatzes. Die Methode ist sehr gut geeignet, um nachträgliche Wärmedämmmaßnahmen an bestehenden Gebäuden bewerten zu können. Steht man beispielsweise vor der Frage, ob sich eine nachträgliche Zusatzdämmung, z.B. in Form eines Wärmedämmverbundsystems, auf einer 24 cm starken Ziegelaußenwand finanziell lohnt, kann dieses Problem mit der vorgestellten Formel schnell gelöst werden. Da das System extrem abhängig von den Eingangsparametern ist, wurde das Ganze in eine Tabellenkalkulation umgesetzt. Dadurch ist es möglich, die Eingangsparameter leicht verändern und in Form einer Sensitivitätsanalyse eine fundierte Entscheidung treffen zu können.

#### 4.9.3.3 Weitere interessante Lösungsansätze

Da ein generell anwendbares Verfahren zur Lösung des aufgezeigten Problems, welches unabhängig von der Art des Optimierungsproblems schnell und sicher arbeitet, nicht existiert, wurde bereits 1980 von Aigner im Rahmen seiner Dissertation [Aig] ein EDV-Programm entwickelt, das mit drei verschiedenen Suchverfahren mit Zufallsstrategien arbeitet:

- Suche mit gleichverteilten Zufallszahlen
- Suche mit exponentiell-verteilten Zufallszahlen
- Suche mit Hilfe der Evolutionsstrategie

Evolutionsstrategien ziehen die Prinzipien der biologischen Evolution zur Optimierung technischer Probleme heran. Die gewählten Verfahren wurden so modifiziert, daß sie auf diskrete Entscheidungsvariablen anwendbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Wirtschaftlichkeitsberechnungen an ölbeheizten Einfamilienhäusern durchgeführt. Die Anforderungen an den Wärmeschutz ergaben sich in dieser Untersuchung an der zur Zeit der Untersuchungen gültigen Wärmeschutzverordnung von 1977. Ziel der Optimierungsaufgabe war es, bei vorgegebenen geometrisch-technischen und ökonomischen Parametern die optimale Variante (Kombination der Außenbauteile) zu finden. In dieser Aufgabe sind die Entscheidungsvariablen die einzelnen Bauteile des Gebäudes (Außenwand, Fenster, Dach und Kellerdecke), die Restriktionen die festgelegten Grenzwerte der Wärmeschutzverordnung. Als Zielgröße wird die für eine Variante erforderliche Investition definiert. Als Ergebnis lieferte die Optimierung die sinnvollste Kombination der Bauteile der wärmetauschenden Hüllfläche mit den zugehörigen benötigten Investitionen und dem Brennstoffbedarf, für einen Zeitraum von 20 Jahren.

Werner [Wer] versucht in seiner Dissertation aus dem Jahr 1978, den durchschnittlichen Heizenergieverbrauch, unter besonderer Berücksichtigung bauphysikalischer Einflüsse, möglichst exakt zu ermitteln, um damit anschließend den Einfluß von geometrischen, nutzungsbedingten und ökonomischen Größen, durch anschließende Parametervariationen, an zwei speziellen Wohnbeispielen zu untersuchen. So wird eine systematische Ordnung und Analyse der bauli-

chen und bauwirtschaftlichen Einflußgrößen auf den Heizenergieverbrauch durchgeführt, um so aus den umfangreichen Parametern die wesentlichen Einflußfaktoren zu bestimmen. Bei den Bauteilen werden jedoch nur 13 Außenwandaufbauten, 3 Dachaufbauten, 3 Aufbauten der Kellerdecke und 3 Fensterarten zueinander in Beziehung gesetzt; die Preise werden nur überschläglich für eine komplette Bauteilgruppe (z.B. Dach) angegeben und stammen aus dem Jahr 1978. Insgesamt zeigt die Arbeit einige interessante Zusammenhänge auf, liefert aber keinen zusammenhängenden und auch noch heute anwendbaren ökonomischen Bemessungsansatz.

Zimmermann [ZimB] erstellt in seiner Dissertation aus dem Jahr 1993 den Prototyp eines wissensbasierten Systems zur Optimierung von Wärmeschutzmaßnahmen. Unter einem wissensbasierten System versteht Zimmermann in diesem Zusammenhang ein Softwaresystem, bei dem das Fachwissen über ein bestimmtes Anwendungsgebiet explizit und unabhängig vom allgemeinen Problemlösungswissen dargestellt wird. Der Vorteil wissensbasierter Systeme liegt für Zimmermann darin begründet, daß diese nicht auf eine geschlossene mathematische Gesamtdarstellung angewiesen sind, trotzdem aber das vorhandene und teilweise unscharfe Expertenwissen nutzen können. Das in Form von Regeln im System dargestellte Wissen kann, unabhängig von der Lösungskomponente, die die Verarbeitung des Fachwissens steuert und zur Ableitung einer Lösung führt, ständig ergänzt werden.

Auch hier zielt die Optimierung auf minimale Gesamtkosten einer Baumaßnahme hin, die sich aus Investitions- und Energiebetriebskosten zusammensetzen. Die Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfes geschieht durch Simulationsrechnungen und ermöglicht eine genauere Berechnung des jährlichen Energieverbrauches, als dies mit der vereinfachten Berechnungsmethode der WSchVo '95, die zum Zeitpunkt der Erstellung der vorgestellten Arbeit nur als Referententwurf vorlag, möglich ist. In den Simulationen führt er genauere Untersuchungen wichtiger Einflußgrößen auf den jährlichen Heizenergiebedarf, wie Raumtemperaturabsenkung, Lüftungsverhalten, Solarenergienutzung und verstärkter Wärmeschutz, durch. Die Verifizierung geschieht anhand zweier Fallbeispiele für verschiedene Haustypen.

Zimmermann weist jedoch explizit darauf hin, daß das implementierte Expertenwissen auf die für die Entwicklung eines Prototypsystems ausreichendes Maß beschränkt ist und auf die Implementierung einer zusätzlichen Wissensakquisitionskomponente verzichtet wurde.

#### 4.9.4 Wichtige Einflußgrößen der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeit der Wärmedämmmaßnahme eines Wohngebäudes steht in direkter Abhängigkeit zur Zins- und Heizölpreisentwicklung, da sämtliche Zahlungsströme in Abhängigkeit der Zeit verzinst werden. Bei einem hohen Darlehenszinssatz und einer nur mäßigen Energieteuerungsrate lohnt sich ein erhöhter Wärmeschutz unter rein ökonomischen Gesichtspunkten nicht. Geht man jedoch von einer hohen Energieverteuerung, bei einem relativ niedrigen Darlehenszinssatz, aus, amortisiert sich das eingesetzte Kapital in absehbarer Zeit.

Bei einer Investitionsentscheidung bis einschließlich 1998 konnte man von einem relativ stabilen Ölpreis ausgehen (Preissteigerungsrate ca. 0,3 %!); auch eine Pressemitteilung der Dresdner Bank vom 16. Dezember 1998 prognostizierte, daß der Ölpreis langfristig stabil bleibt. Eine Verbesserung des vorhandenen Wärmeschutzniveaus bestehender Gebäude oder die Ausführung von Wärmedämmmaßnahmen, die über die Anforderungen der WSchVo '95 hinausgehen,

hätten sich bei den gleichzeitig vorherrschenden sehr niedrigen Bankzinsen unter ökonomischer Zielsetzung nicht ausgezahlt. Steht man jedoch Ende 2000 vor der gleichen Investitionsentscheidung, ist zu erkennen, daß sich die Eingangsvoraussetzungen grundlegend geändert haben. Der Heizölpreis hat sich immens verteuert, die Prognosen der Zinsentwicklung für mittel- bis langfristiges Fremdkapital lassen einen allmählichen Anstieg erwarten.

Damit eine anstehende Investitionsplanung fundiert durchgeführt werden kann, ist es zwingend notwendig, diese maßgebenden Faktoren so exakt wie möglich vorauszubestimmen.

#### 4.9.4.1 Heizölpreissteigerung

Die Heizölpreise richten sich in der Regel stark nach den Rohölpreisen. Die Mineralölpreise in Deutschland werden beispielsweise maßgeblich durch das Preisniveau des Rohölmarktes in Rotterdam bestimmt. Diese Preise orientieren sich wiederum stark an den aktuellen Börsennotierungen in London und New York, die sehr schnell auf politische und wirtschaftliche Veränderungen der Förderländer bzw. der Ölkonzerne reagieren und stark durch spekulative Optionskäufe bestimmt werden. Die Heizölpreise sind somit ständigen Schwankungen unterlegen, und innerhalb weniger Tage können bereits deutliche Preisveränderungen entstehen.

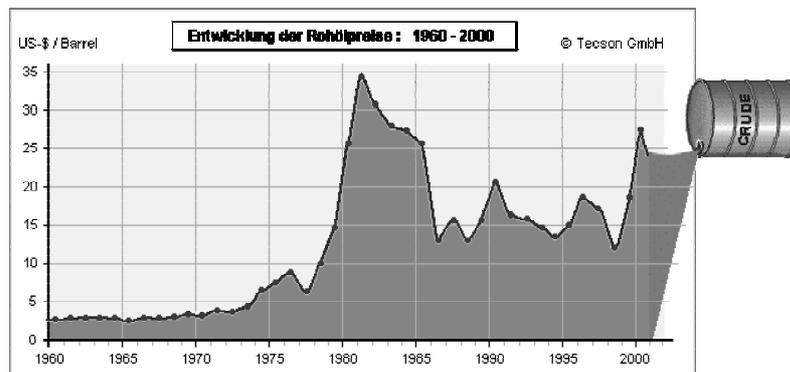


Abb. 69: Rohölpreisentwicklung der letzten 40 Jahre [Quelle: Tecson GmbH]

Insgesamt sind die Heizölpreise im besonderen abhängig von:

- Rohölpreis
- Aktueller Dollarkurs
- Regionaler Wettbewerb
- Weltpolitische Ereignisse
- Mengen- und Preispolitik der Förderländer
- Energie-, Umwelt- und Steuerpolitik
- Nachfragesituation / Lagerbestände

Die Heizölpreisnotierungen stiegen seit Januar 1999 von ca. 35 Pf/Liter auf ca. 90 Pf/Liter im September 2000, was einer prozentualen Erhöhung von ca. 160 % entspricht. Hauptursache für die Heizölpreissteigerungen in diesem Zeitraum war der enorm verteuerte Rohölpreis auf dem Weltmarkt. Gründe für den Rohölpreisanstieg liegen in der konsequenten Verringerung der Rohölfördermengen der OPEC-Staaten (Organisation erdölexportierender Länder) sowie dem starken Dollarkurs gegenüber dem EURO, da Rohöl auf dem Weltmarkt in Dollar gehandelt wird. Der EURO-Kurs sank in der Zeit von Januar 1999 von 1,18 US-Dollar auf 0,85 US-Dollar im Herbst 2000. Zusätzlich kam 1999 noch die Erhöhung der Mineralölsteuer im Rahmen der ökologischen Steuerreform der neuen Bundesregierung dazu, die sich im Jahr 2000 noch weiter erhöhte. Die Drosselung der Fördermengen der OPEC-Staaten, in Verbindung mit einem harten Dollarkurs, führte im Sommer 2000 dann erstmals wieder zu einem Literpreis von über 1,- DM (incl. MwSt.).

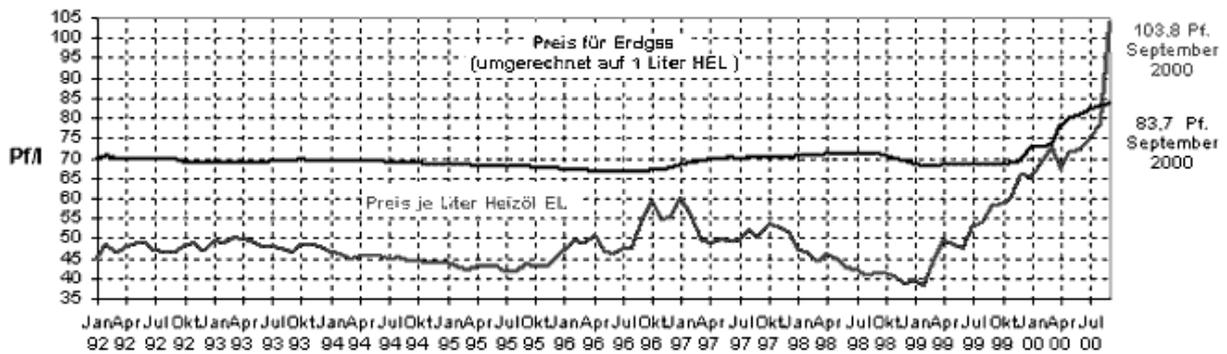


Abb. 70: Heizölpreisentwicklung 1992 bis 2000 (incl. MwSt., Bestellm. 3000l) [Quelle: IWO e.V., Hamburg]

Um eine realistische Abschätzung der zu erwartenden Heizölpreisentwicklung abgeben zu können, wurden die Heizölpreise der letzten 9 Jahre ausgewertet. Bei den verwendeten Heizölpreisen handelt es sich um vom IWO (Institut für wirtschaftliche Ölheizung e.V., Hamburg) gemittelte monatliche Durchschnittspreise, bei einer Bestellmenge von 3000 Litern Heizöl, auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes. Entscheidend für die Abschätzung der Preisentwicklung ist die Wahl des zu betrachtenden Zeitraumes, da sich die Preise gerade im letzten Jahr überproportional entwickelten. Legt man die Heizölpreise der letzten neun Jahre zugrunde, kann aufgrund der vierteljährlich ermittelten Heizölpreise eine lineare Trendlinie in den Untersuchungsraum eingefügt werden.

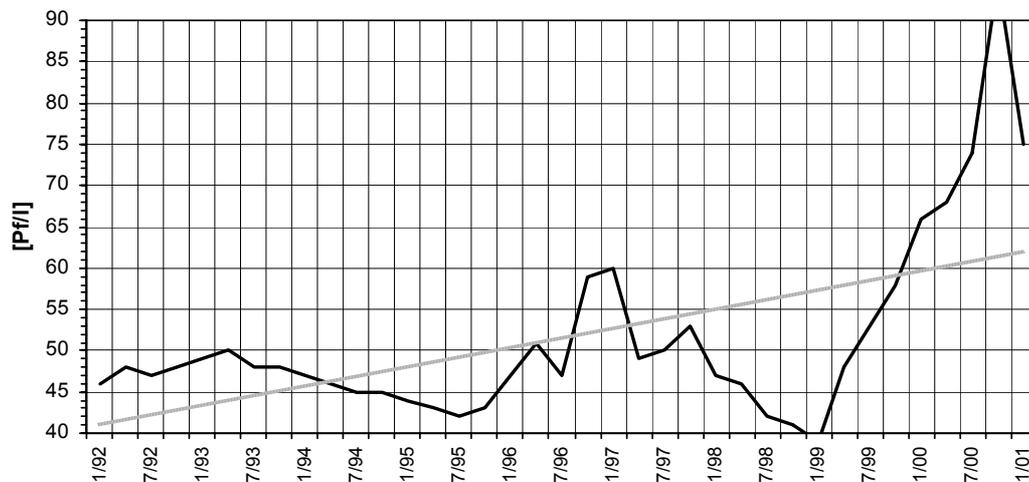


Abb. 71: Heizölpreisentwicklung von Januar 1992 bis Januar 2001 (incl. MwSt.)

Aus der Gleichung dieser Geraden ( $y = 0,5844x + 40,437$ ) läßt sich nun die Preissteigerungsrate bestimmen. Der durch die Trendlinie ausgeglichene Preis für Januar 1992 beträgt 40,4 Pfennig, im Januar 2001 der anhand der Gleichung ermittelte Preis 61,5 Pfennig. Der gesuchte Prozentsatz ergibt sich nun wie folgt:

$$p = \left( \sqrt[9]{\frac{61,5}{40,4}} - 1 \right) \times 100 = 4,8 \%$$

Zu ganz anderen Ergebnissen gelangt man, wenn nur der Zeitraum der vergangenen 5 Jahre berücksichtigt wird. Für diesen kürzeren Zeitraum konnten die exakteren monatlichen Heizölpreise den Untersuchungen zugrunde gelegt werden. Mit der Gleichung der Trendlinie ( $y = 0,5824x + 40,726$ ) läßt sich hier ein Preis von 40,7 Pfennig für Juli 1996 und ein Preis von 75,8 Pfennig für Juli 2001 bestimmen. Die Preissteigerungsrate beträgt:

$$p = \left( \sqrt[5]{\frac{75,8}{40,7}} - 1 \right) \times 100 = 13,2 \%$$

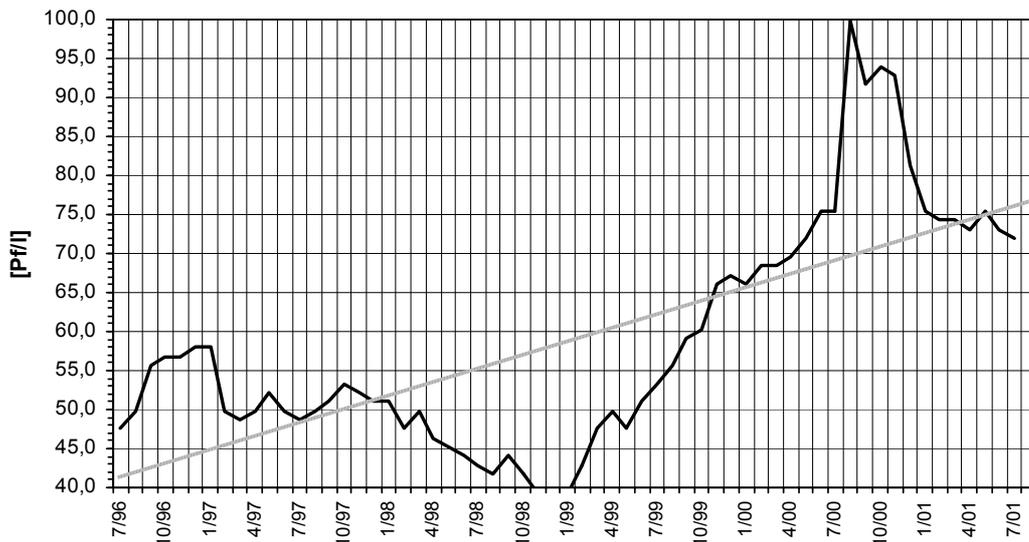


Abb. 72: Heizölpreisentwicklung von Juli 1996 bis Juli 2001 (incl. MwSt.)

Betrachtet man dagegen nur den Zeitraum Juli 1996 bis Juli 2000, erhält man eine Preissteigerungsrate von ca. 7,5 %.

Die zukünftige Preisentwicklung ist kaum zuverlässig vorherzusagen. Die meisten Prognosen gehen aber von einer erheblichen Preiserhöhung für die nächsten Jahre aus, insbesondere wenn man die Reduzierung der Ölfördermenge seitens der OPEC-Staaten und die Steuerpolitik in Deutschland betrachtet. Aufgrund dieser Prognosen und Auswertungen der Heizölpreisentwicklung der letzten Jahre kann eine Heizölpreissteigerungsrate von ca. 6 % als realistisch angesehen werden.

#### 4.9.4.2 Entwicklung der Darlehens-/ Hypothekenzinsen

In der Regel wird im privaten Wohnungsbau nur ein Teil der gesamten Baukosten mit Eigenkapital finanziert, die restlichen Kosten werden beispielsweise in Form einer Hypothek oder eines Darlehens bei einem Kreditinstitut aufgenommen. Bei einer Hypothek handelt es sich um ein Grundpfandrecht, mit dem ein Grundstück zur Sicherung eines Darlehens durch Eintragung in das Grundbuch belastet wird. Dafür wird ein Beleihungswert durch das finanzierende Kreditinstitut festgelegt, der den Wert der Immobilie, unter Berücksichtigung der besonderen Sicherheitsbedürfnisse des Kreditinstitutes, reflektiert. Der Beleihungswert der Immobilie liegt ca. 10 -15 % unter den Baukosten (bei Neubau) bzw. dem Kaufpreis (bei Kauf), der Darlehensbetrag beträgt in der Regel 60 % des Beleihungswertes. Da bei einem Darlehen die Sicherheiten

nicht in dieser Form vorliegen, sind die Konditionen meist etwas schlechter; der Hypothekenzinssatz wird in der Regel mit 0,5 bis 1,0 % beaufschlagt.

Die Hypothek bzw. das Darlehen wird in einem zuvor festgelegten Zeitraum (im Wohnungsbau üblicherweise 5 bis 20 Jahre) mit einem durch den Kapitalmarkt bestimmten Zinssatz und einer entsprechenden Tilgung zurückgezahlt. Nach diesem Zeitpunkt ist die Schuld beglichen und es fallen keine weiteren Kosten an. Die erforderlichen Rückzahlungen richten sich nach der Höhe des Kredites, dem vereinbarten Zinssatz und Rückzahlungszeitraum.

In Abb. 73 ist die Zinsentwicklung für Baugeld der letzten 20 Jahre dargestellt. Es handelt sich hier um die gemittelten Zinssätze verschiedener Banken bei einer 10-jährigen Zinsbindung [Quelle: www.wowi.de].

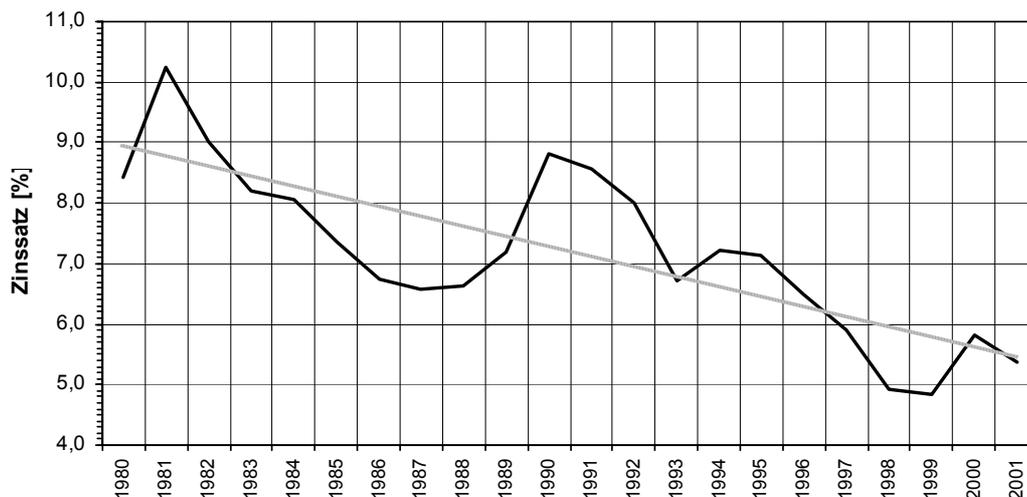


Abb. 73: Gemittelte Zinsentwicklung für mittelfristiges Fremdkapital (10 Jahre Bindung)

Verdeutlicht durch die eingefügte Trendlinie läßt sich leicht erkennen, daß eine rückläufige Entwicklungstendenz besteht. Diese wird sich jedoch nicht in dieser Form fortsetzen, wie aus intensiven Recherchen und einem Gespräch bei einem Kreditinstitut im Sommer 2001 hervorgeht. Während kurzfristige Prognosen eine weitere leichte Verringerung erwarten lassen, gehen mittel- bis langfristige Prognosen jedoch von einer wieder leicht steigenden Zinsentwicklung aus [Quelle: www.wowi.de]. Berücksichtigt man auch hier die Prognosen und die Trenduntersuchungen, erscheint ein Zinssatz von 6 % äußerst realistisch.

#### 4.9.4.3 Entwicklung der Kapitalzinsen

Wenn zusätzliche Wärmedämmmaßnahmen mit Eigenkapital finanziert werden sollen, entgehen dem Bauherren Zinserträge, die er auf dem Kapitalmarkt hätte erwirtschaften können. Da der Kapitalzins in direkter Abhängigkeit zum Darlehenszins steht, steigt und fällt er mit diesem. Der Kapitalzins ist stets niedriger als der Darlehenszins, da durch diese Zinsspanne ein gewisser Ertrag für die Banken garantiert ist. Deswegen ist der auf dem Kapitalmarkt zu erzielende Zinssatz um ca. 1,0 bis 1,5 % unter dem Darlehenszinssatz; daher werden hier 4,5 % angesetzt. Unberücksichtigt bleiben spekulative Geschäfte.

#### 4.9.5 Ansatz zur Optimierung der Gesamtwärmeschutzmaßnahme

Bei der Errichtung eines Gebäudes spielen sowohl Ausgaben zur Herstellung als auch zum Betrieb und zur Unterhaltung, über den Nutzungszeitraum, eine entscheidende Rolle. Nach Vergleich der Investitions- sowie Betriebskosten verschiedener Ausführungsalternativen der Hüllflächen miteinander, unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraumes, kann abschließend die ökonomisch sinnvollste Variante bestimmt werden.

Zur Durchführung dieser Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist es unnötig, sämtliche entstehenden Investitionen zu betrachten. Es müssen vielmehr ausschließlich die Kosten betrachtet werden, die direkt von einer Verbesserung des Wärmeschutzes abhängen. Werner [Wer] versteht darunter alle Kosten, die direkt oder indirekt durch Wärmedämmmaßnahmen beeinflusst, also „thermisch tangiert“ werden. Dabei wird unterschieden zwischen den einmalig anfallenden Investitionskosten und den jährlich anfallenden Betriebskosten. Die hier definierten Investitionskosten sind also keinesfalls mit den Bauerstellungskosten gleichzusetzen; sie ersparen jedoch beim Vergleich der Gesamtkosten die Betrachtung nichtrelevanter Kostenanteile.

#### **Investitionskosten**

##### Kosten der Gebäudehülle (KG)

Die Kosten der Gebäudehülle (KG) beinhalten die Erstellungskosten der Bauteile (Material- und Lohnkosten) der wärmetauschenden Hüllfläche des Gebäudes; alle übrigen Bauteile, wie beispielsweise Innenwände, bleiben unberücksichtigt. Auch werden solche Kosten, die unabhängig von der gewählten Variante entstehen, wie beispielsweise die reine Dacheindeckung (bestehend aus Lattung und Dachsteinen), nicht bei den Kosten der Gebäudehülle berücksichtigt. Wird für das entstehende Gebäude eine Lüftungsanlage mit eingeplant, kann das zum Teil erhebliche Auswirkung auf den Jahres-Heizwärmebedarf haben. Auch diese Kosten müssen daher den Kosten der Gebäudehülle zugerechnet werden.

$$KG = K_{\text{Fenster}} + K_{\text{Außenwand}} + K_{\text{Dach}} + K_{\text{Bodenplatte}} + K_{xx} + K_{\text{Lüftungsanlage}}$$

KG	= Kosten der Gebäudehülle	[DM]
$K_{\text{Fenster}}$	= Kosten der Fenster	[DM]
$K_{\text{Außenwand}}$	= Kosten der Außenwände	[DM]
$K_{\text{Dach}}$	= Kosten des Daches	[DM]
$K_{xx}$	= Kosten weiterer Bauteile der wärmetauschenden Hüllfläche	[DM]
$K_{\text{Lüftungsanlage}}$	= Kosten der Lüftungsanlage	[DM]

##### Kosten der Gebäudehülle eigenfinanziert (EF)

Wird Eigenkapital in eine (zusätzliche) Wärmedämmmaßnahme investiert, ist das Kapital gebunden und es können keine Zinsgewinne erwirtschaftet werden. In der folgenden Formel wird dieser „Zinsverlust“ berücksichtigt:

$$EF = KG \times (1+i_k)^n$$

EF	= Kosten der Eigenfinanzierung	[DM]
KG	= Kosten der Gebäudehülle	[DM]
$i_k$	= Kapitalzinssatz	[-]
n	= Laufzeit	[a]

Kosten der Gebäudehülle fremdfinanziert (FF)

Muß zur Realisierung einer (zusätzlichen) Wärmedämmmaßnahme Fremdkapital aufgenommen werden, sind für diese Hypothek entsprechende Zinsen zu entrichten. Bei einer festgesetzten Hypothekenlaufzeit von  $n_H$ -Jahren ergeben sich jährlich gleichbleibende Annuitäten, die sowohl den Zinsanteil als auch die Tilgung des Kapitals berücksichtigen. Die Annuitäten summieren sich über die  $n_H$ - Jahre auf, bis die Hypothek an die Bank zurückbezahlt ist. Von diesem Zeitpunkt an entstehen keine weiteren Kosten.

$$FF = KG \times n \times \frac{i_H \times (1 + i_H)^{n_H}}{(1 + i_H)^{n_H} - 1}$$

FF	= Kosten der Fremdfinanzierung	[DM]
KG	= Kosten der Gebäudehülle	[DM]
$i_H$	= Hypothekenzinssatz	[-]
$n_H$	= Hypothekenlaufzeit	[a]
n	= Laufzeit	[a]

**Betriebskosten**Unterhaltungskosten (UK)

Nach DIN 18960-Baunutzungskosten von Hochbauten beinhalten die Bauunterhaltungskosten die „Gesamtheit der Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes von Gebäuden und dazugehörenden Anlagen“.

Die Kosten für die Bauunterhaltung der Mehrinvestition können näherungsweise mit einem jährlichen Prozentsatz multipliziert und die dadurch entstehenden Annuitäten bei Bedarf entsprechend berücksichtigt werden.

$$UK = MK \times u \times \frac{(1 + i)^n - 1}{i \times (1 + i)^n}$$

UK	= Unterhaltungskosten	[DM]
MK	= Mehrkosten der Gebäudehülle	[DM]
i	= Kapitalzinssatz	[-]
u	= Unterhaltungskostensatz	[-]
n	= Laufzeit	[a]

Die Kosten für die Wartung und Inspektion der Heizungsanlage werden vernachlässigt, da sie nahezu unabhängig vom Wärmebedarf sind [Aig].

Heizkosten (HK)

Zur Berücksichtigung der Heizkosten werden die Brennstoffkosten in Abhängigkeit einer frei wählbaren, jährlich konstanten Energiepreissteigerung ermittelt und auf den Zeitpunkt  $t = 0$  diskontiert.

$$HK = H_0 \times \frac{1+p}{1+i} \times \frac{1 - \left(\frac{1+p}{1+i}\right)^n}{1 - \frac{1+p}{1+i}}$$

HK	= Heizkosten	[DM]
H <sub>0</sub>	= jährliche Heizölkosten	[DM]
i	= Kapitalzinssatz	[-]
p	= Heizölkostensteigerung	[-]
n	= Laufzeit	[a]

Es ist darauf zu achten, daß die Formel für den Fall versagt, wenn der Kapitalzinssatz und die Heizölkostensteigerung identisch sind! Daher sind die Prozentsätze immer mit einer mindestens minimalen Abweichung voneinander anzusetzen. In die Formel ist der Kapitalzinssatz zu übernehmen, da die Heizölkosten in der Regel eigenfinanziert sind.

### Staatliche Fördermittel (SF)

Seit dem 01.01.1996 gelten die neuen Regelungen des Eigenheimzulagengesetzes (EigZulG), welches die Zahlung fester Eigenheimzulagen, unabhängig von der persönlichen Steuerlast, vorsieht. Zusätzlich lassen sich die Zulagen erhöhen, wenn ein besonderes ökologisches Engagement beim Bau oder Kauf eines Neubaus noch bis Ende 2002 nachgewiesen werden kann. Ist der Niedrigenergiehausstandard erfüllt (vorhandener Jahres-Heizwärmebedarf 25 % niedriger als die Anforderungen der WSVO), erhält man acht Jahre lang jährlich 400,- DM vom Staat an zusätzlichen Fördermitteln, die ebenfalls auf einen gemeinsamen Zeitpunkt diskontiert werden.

$$F = F_0 \times \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n}$$

F	= Summe der Förderung	[DM]
F <sub>0</sub>	= Grundbetrag der Förderung	[DM]
i	= Kapitalzinssatz	[-]
n	= Laufzeit	[a]

### Hilfsenergiekosten

Durch verbesserte Wärmedämmmaßnahmen ergeben sich nur sehr geringe Einsparungen bei den Kosten für die elektrische Hilfsenergie zum Betrieb der Umwälzpumpe und des Brenners (in der Größenordnung von 20 - 70 kWh/a [Aig, 1980]). Daher werden die Kosten für die elektrische Hilfsenergie vernachlässigt.

### Heizungsanlage

Ein verbesserter Wärmeschutz hat zwangsläufig einen geringeren Jahres-Heizwärmebedarf zur Folge, was sich wiederum auf die Dimensionierung der Heizungsanlage auswirkt. Man muß allerdings davon ausgehen, daß die Anzahl der Heizkörper und die Länge der Heizungsrohrlei-

tungen konstant bleiben, lediglich der Heizkessel könnte niedriger dimensioniert werden. Aus diesem Grund wird eine eventuelle Ersparnis beim Kauf des Heizkessels vernachlässigt, da der mathematische Aufwand bei weitem den möglichen Fehler überwiegen würde [Aig, 1980].

### Kostenberechnung

Die aufgeführten Kosten der zu untersuchenden Alternativen summieren sich, in Abhängigkeit einer zuvor bestimmten Laufzeit, jeweils zu den Optimierungsgesamtkosten ( $K_{OPT.}$ ):

$$K_{OPT} = EF + UK + HK - F \quad (\text{eigenfinanziert})$$

$$K_{OPT} = FF + UK + HK - F \quad (\text{fremdfinanziert})$$

Durch einen abschließenden Vergleich der Optimierungsgesamtkosten kann von den untersuchten Varianten die im betrachteten Zeitraum ökonomisch sinnvollste ausgewählt werden.

Oftmals sollen jedoch nur zwei Alternativen miteinander verglichen werden. So ist es beispielsweise bei zusätzlichen Wärmedämmmaßnahmen bestehender Gebäude von entscheidender Bedeutung, ob und wann sich die entstehenden Zusatzkosten amortisieren. Dafür werden die Investitions- und Betriebskosten verschiedener geplanter Ausführungsvarianten mit den bestehenden Betriebskosten verglichen. Ebenso stellt sich für einen Bauherren oftmals die Frage, ob es sich wirtschaftlich auszahlt, in Wärmedämmmaßnahmen, die über die Anforderungen der WSchVo hinausgehen, zu investieren. Die durch die zusätzliche Dämmmaßnahme erzielten Einsparungen, bedingt durch die Reduzierung der Brennstoffkosten, müssen in beiden Fällen, bei rein ökonomischer Zielsetzung, im Laufe der Jahre die eingangs getätigten Investitionen übersteigen.

Wenn also nur zwei Alternativen miteinander verglichen werden sollen, müssen in die zuvor genannten Formeln anstelle der Kosten der Gebäudehülle  $KG$  die erforderlichen Mehrkosten  $MK$  eingesetzt werden.

### Planungshilfe

Um die zuvor gewonnenen Erkenntnisse besser und schneller umsetzen zu können, wurde ein entsprechendes Formblatt in einer Tabellenkalkulation (MS-Excel) entwickelt. Für genauere Untersuchungen sind stets zwei Ausführungsalternativen miteinander zu vergleichen. Notwendig dafür sind, je Alternative, die folgenden Angaben:

- Kosten der Gebäudehülle [DM]
- Kosten der Lüftungsanlage [DM]
- Jahresheizwärmebedarf [kWh/m<sup>2</sup>a]

Des Weiteren sind die nachfolgenden Eingaben zu tätigen:

- Laufzeit der Optimierung [a]
- Heizölpreis [DM/l]
- Heizölpreissteigerung [%]
- Eigen- oder Fremdkapital [E/F]
- Kapitalzinssatz [%]
- Hypothekenzinssatz [%]
- Laufzeit der Hypothek [a]
- Unterhaltungskostensatz [%]
- Nutzfläche (0,32\*V) [m<sup>2</sup>]
- zul. Jahresheizwärmebedarf [kWh/m<sup>2</sup>a]
- Heizölverbrauch pro kWh [l/kWh]
- Förderungsbetrag [DM/a]
- max. Förderungsdauer [a]

Mit Hilfe der Tabellenkalkulation werden anschließend über die eingegebene Laufzeit die Einsparungen (Heizkostensparnis, evtl. staatliche Förderung) von den Mehraufwendungen (Mehrkosten, Zinsverlust bei Eigenfinanzierung bzw. Zinsanteil der Hypothek bei Fremdfinanzierung, Unterhaltungskosten) subtrahiert. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung und die graphische Aufbereitung des Amortisationszeitpunktes sind in Abb. 74 dargestellt.

	Alternative A	Alternative B
Kosten der Gebäudehülle [DM]	114918,00	120251,00
Kosten der Lüftungsanlage [DM]		
Jahresheizwärmebedarf [kWh/m²a]	83,21	62,51

Laufzeit der Optimierung [a]	20
Heizölpreis [DM/l]	0,76
Heizölpreissteigerung [%]	6 ok!
Eigen- oder Fremdkapital [E/F]	f
Kapitalzinssatz [%]	4,5 ok!
Hypothekenzinssatz [%]	6,0
Laufzeit der Hypothek [a]	10
Unterhaltungskostensatz [%]	0,0
Nutzfläche (0,32*V) [m²]	212,4
zul. Jahresheizwärmebedarf [kWh/m²a]	83,7
Heizölverbrauch pro kWh [l/kWh]	0,1
Förderungsbetrag [DM/a]	400
max. Förderungsdauer [a]	8

Mehrkosten Alternative B [DM]	5333,00
Zinsverlust [DM]	0,00
Zinsanteil Hypothek [DM]	1912,84
Unterhaltungskosten [DM]	0,00

jährl. Heizölkostensparnis [DM]	334,15
Heizölkostensparnis [DM]	7787,97
staatliche Förderung [DM]	2638,35

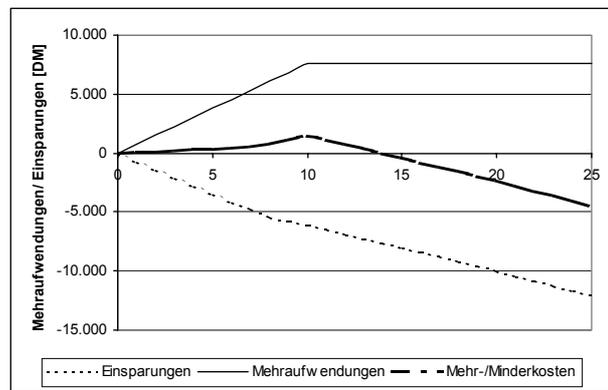


Abb. 74: Ergebnis der Variantenuntersuchung und graphische Darstellung

Ebenso ist es aber auch möglich, die während der Laufzeit entstehenden Kosten zu beobachten. Im linken Teil der Abb. 75 sind die in Abb. 74 aufgezeigten Gegebenheiten dargestellt. Die rechte Abbildung geht von einer Verteuerung um weitere 10.000,- DM bei der optimierten Variante aus.

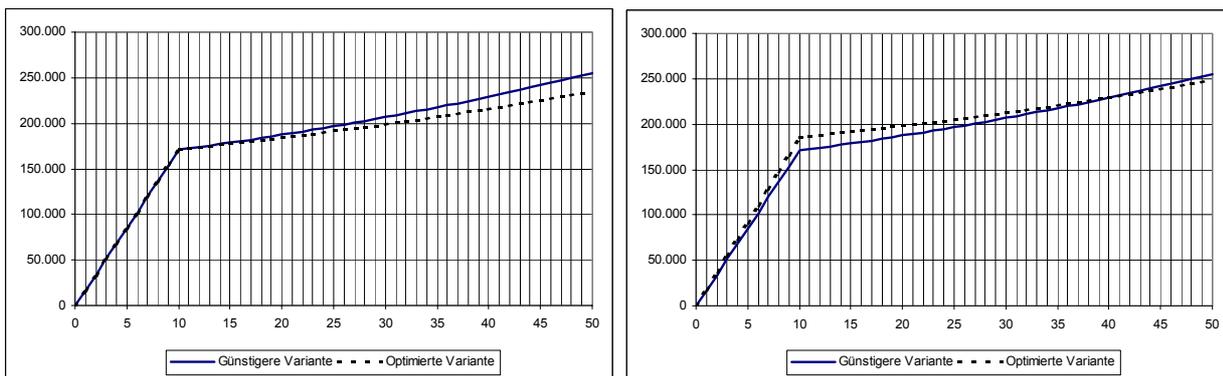


Abb. 75: Graphische Darstellung der aufsummierten Kosten beider Varianten

#### 4.9.6 Vorstellung des Software-Tools OptimaW

Mit der in einer Tabellenkalkulation umgesetzten Planungshilfe können schnell und unkompliziert zwei verschiedene Varianten miteinander verglichen werden. Der Jahres-Heizwärmebedarf jeder dieser Varianten beruht auf exakt festgelegten Bauteilaufbauten für das Dach, die Wände,

Bodenplatte, Fenster etc.. Damit ergeben sich, bereits bei nur je 3 möglichen Aufbauten für Dach, Wand, Bodenplatte und Fenster,  $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  Kombinationsmöglichkeiten! Um diese Fülle von Ausführungsvarianten überhaupt miteinander vergleichen zu können, bedarf es eines EDV-gestützten Instrumentes. Deshalb wurde das Software-Tool OptimaW als Planungshilfe zur energiebewußten Gebäudeplanung, unter Einsatz der vollständigen Enumeration, entwickelt, welches aus der Fülle von Kombinationsmöglichkeiten die unter ökonomischen Gesichtspunkten optimale auszuwählen vermag.

Folgende Anforderungen wurden an das Tool gestellt:

- Möglichkeit zur Anbindung einer externen Datenbank mit den gängigsten Konstruktionsaufbauten für Außen- und Kellerwände, Dächer, Fenster, Decken und Bodenplatten
- Wärmebedarfsberechnung und Ermittlung des Brennstoffbedarfs, unter Berücksichtigung der aktuellen Vorschriften, nach Eingabe der geplanten Hüllflächen
- Wirtschaftlichkeitsberechnung bei unterschiedlichen Ausführungsvarianten und damit die Ermittlung der Summe der Mehraufwendungen, die Berechnung des Energieeinsparpotentials und der Zeitpunkt der Amortisation
- Auswahl der für das jeweilige Gebäude kostenoptimalen Ausführungsvariante

Das Tool OptimaW eignet sich, in der momentan aktuellen Version 2.0, für die Optimierung von neu zu errichtenden Gebäuden mit normaler Innentemperatur. Es berücksichtigt die Anforderungen der Wärmeschutzverordnung WSchVo 1995 (Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden) und der DIN 4108 (Wärmeschutz im Hochbau). Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Anforderungen der kommenden Energieeinsparverordnung EnEV, mit einer speziellen Version des Tools, zu berücksichtigen.

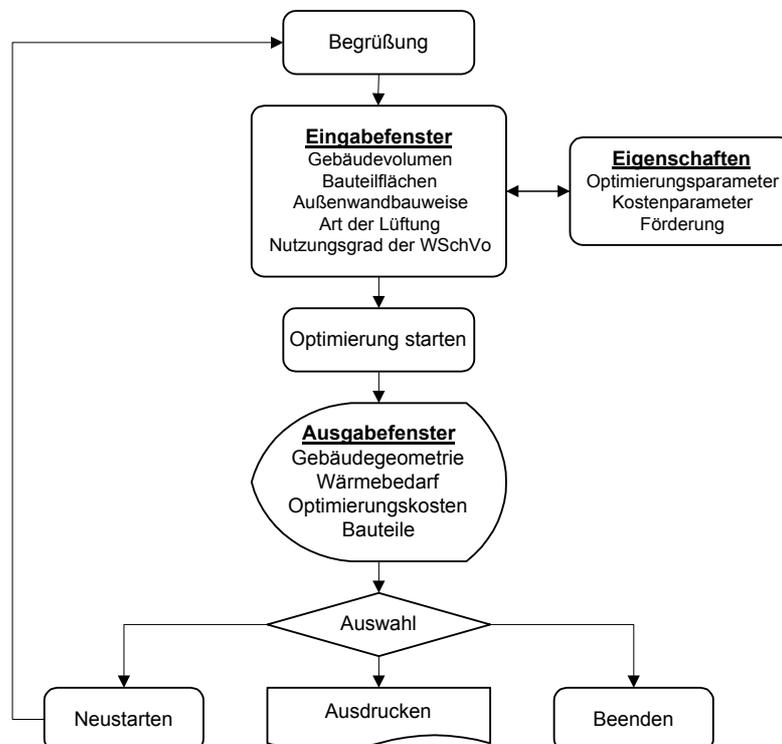


Abb. 76: Allgemeine Programmstruktur von OptimaW

Um einen Optimierungslauf zu starten, sind in der Eingabemaske von OptimaW die nachfolgend aufgeführten Parameter erforderlich:

- Gebäudevolumen [m<sup>3</sup>]
- Flächengrößen [m<sup>2</sup>] von Dach, Außenwand, Bodenplatte, Haustür, Wand gegen Erdreich, Decke gegen Außenluft, Fenster (Nord, Süd, Ost, West), angrenzende Bauteile, Decke gegen unbeheizten Keller
- Gewünschter Nutzungsgrad der WSVO '95 [%]
- Außenwandbauweise (Holz, Ziegel, Betonblock, Kalksandstein, Leichtbeton, Porenbeton)
- Lüftungsanlage (natürliche Lüftung, Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung, mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ohne Wärmepumpe bzw. mit Wärmepumpe)

Im Anschluß daran sind die besonderen Eigenschaften des Optimierungslaufes anzupassen:

- Laufzeit der Optimierung [Jahre]
- Kostenparameter (Heizölpreis [DM/Liter], Heizölpreissteigerung [%], Kapitalzinssatz [%], Unterhaltungskostensatz [%], Hypothekenzinssatz [%] und Hypothekenlaufzeit [a])
- Anzahl der aufzulistenden optimalen Lösungen [1 - 100]
- Art der Finanzierung (Eigen- oder Fremdfinanzierung)
- Laufzeit [a] und Betrag [DM] einer eventuellen staatlichen Förderung

Als zugrunde liegende Optimierungsmethode kommt auch hier die vollständige Enumeration zur Anwendung; es werden alle zulässigen Lösungsvarianten ermittelt und einander gegenübergestellt. Programmtechnisch wurde die Optimierungsprozedur wieder anhand mehrerer ineinander verschachtelter Schleifen realisiert. In Abb. 77 ist dieser Vorgang exemplarisch durch vier Schleifen für Fensterarten, Außenwand-, Dach- und Bodenplattenaufbauten dargestellt, im Software-Tool OptimaW sind dagegen 9 verschachtelte Schleifen vorhanden. In Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Gebäude müssen jedoch nicht immer alle Schleifen abgearbeitet werden, da beispielsweise kein Keller oder keine Decke gegen Außenluft vorhanden sein kann.

Zur Erfüllung der gestellten Aufgabe liest das Programm sukzessive Konstruktionsaufbauten aus einer Datenbank ein und führt anschließend eine Wärmebedarfsberechnung, unter Beachtung der Bestimmungen der WSchVo bzw. der EnEV, durch. Wird der zulässige Jahresheizwärmebedarf mit den gewählten Konstruktionsaufbauten überschritten, werden sukzessive die verschiedenen Schleifen durchlaufen (in Abb. 77 also zunächst die innerste Schleife der Konstruktionsarten der Bodenplatten, dann der Dachaufbauten etc.).

Kann der zulässige Jahresheizwärmebedarf jedoch von der vorliegenden Bauteilkombination eingehalten werden, ermittelt das Programm den Brennstoffbedarf und die sich bei den Eingangsparametern ergebenden Laufzeitkosten der Variante. Auf diese Weise werden nacheinander alle möglichen Bauteilkombinationen untersucht und, wenn die Bedingungen des Wärmeschutznachweises erfüllt sind, die über eine frei zu wählende Laufzeit entstehenden Kosten ermittelt. In einem Sortieralgorithmus werden die möglichen Kombinationen nach den entstehenden Laufzeitkosten sortiert. Die Bauteilkombination mit den geringsten Gesamtkosten, in dem gewählten Betrachtungszeitraum, gilt als die ökonomisch sinnvollste. In einem weiteren Sortieralgorithmus wird diejenige Kombination ermittelt, die bei den geringsten Kosten den zulässigen Jahresheizwärmebedarf gerade so unterschreitet. Diese Variante wird für die Ermittlung des Amortisationszeitpunktes beim Vergleich der optimalen mit der billigsten Alternative benötigt.

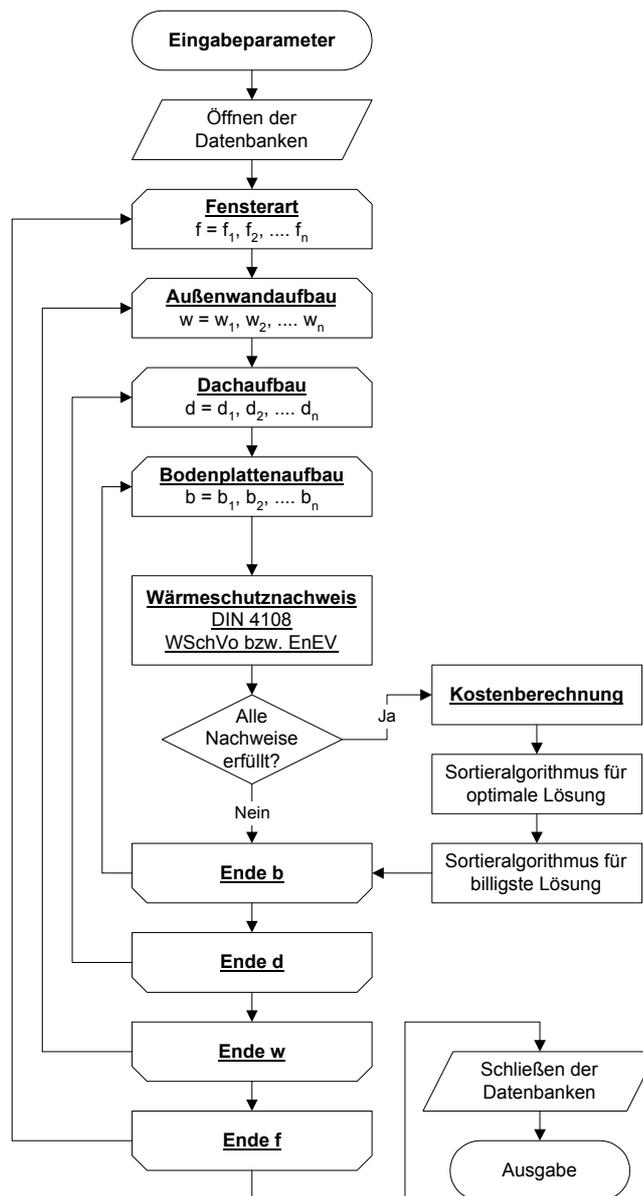


Abb. 77: Flußdiagramm der Optimierungsprozedur von OptimaW (bei 4 Bauteilgruppen)

Die Konstruktionsdatenbank wurde im gängigen MS-Access-Format erstellt und enthält bereits eine sehr große Anzahl an verbreiteten Bauteilaufbauten. Diese können allerdings jederzeit vom Anwender bearbeitet, ergänzt oder gelöscht und somit die Datenbank den eigenen Bedürfnissen angepaßt werden. Die für die Optimierung notwendige Datenbank enthält jeweils nur eine Laufnummer, die Kurzbezeichnung des Aufbaues, sowie den k-Wert und die Kosten der Fläche pro m<sup>2</sup>. Wegen des besseren Überblicks für den Anwender wurde diese Datenbank mit einer Tabelle (im MS-Excel-Format) erweitert. Hier finden sich zusätzlich erläuternde Angaben, wie beispielsweise die für die einzelnen Schichten des Aufbaues verwendeten Materialien etc.. Die Abb. 78 zeigt einen Ausschnitt der erläuternden Tabelle zur Datenbank.

Nummer	Kurzbezeichnung	Wärmedurchgangskoeffizient	Wärmedurchlaßwiderstand	Wärmeübergangswiderstand (innen)	Konstruktionskosten	Material 1	Schichtdicke 1	Wärmeleitfähigkeit <sub>1</sub>	Material 2	Schichtdicke 2	Wärmeleitfähigkeit <sub>2</sub>	Material 3	Schichtdicke 3	Wärmeleitfähigkeit <sub>3</sub>	Wärmeübergangswiderstand (außen)
Nr.	Name	$k_w$	1/L	1/a <sub>innen</sub>	Preis	m <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>	k <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	s <sub>2</sub>	k <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	s <sub>3</sub>	k <sub>3</sub>	1/a <sub>außen</sub>
		W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> K/W	m <sup>2</sup> K/W	DM/m <sup>2</sup>		m	W/(mK)		m	W/(mK)		m	W/(mK)	m <sup>2</sup> K/W
Mauerwerk (einschalig)															
1	1Hiz1_1	0,93	0,91	0,13	308,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.4	0,490	0,58	Kalkzementputz	0,020	0,870	0,04
2	1Hiz1_2	0,56	1,60	0,13	328,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.4	0,490	0,58	Wärmedämmputz	0,050	0,070	0,04
3	1Hiz1_3	0,47	1,96	0,13	339,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.4	0,490	0,58	Wärmedämmputz	0,075	0,070	0,04
4	1Hiz2_1	1,46	0,52	0,13	232,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 20/1.8	0,365	0,81	Kalkzementputz	0,020	0,870	0,04
5	1Hiz2_2	0,73	1,21	0,13	251,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 20/1.8	0,365	0,81	Wärmedämmputz	0,050	0,070	0,04
6	1Hiz2_3	0,58	1,56	0,13	263,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 20/1.8	0,365	0,81	Wärmedämmputz	0,075	0,070	0,04
7	1Hiz3_1	1,16	0,70	0,13	234,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.4	0,365	0,58	Kalkzementputz	0,020	0,870	0,04
8	1Hiz3_2	0,64	1,39	0,13	253,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.4	0,365	0,58	Wärmedämmputz	0,050	0,070	0,04
9	1Hiz3_3	0,52	1,74	0,13	264,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.4	0,365	0,58	Wärmedämmputz	0,075	0,070	0,04
10	1Hiz4_1	0,96	0,88	0,13	236,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.0	0,365	0,45	Kalkzementputz	0,020	0,870	0,04
11	1Hiz4_2	0,58	1,57	0,13	255,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.0	0,365	0,45	Wärmedämmputz	0,050	0,070	0,04
12	1Hiz4_3	0,48	1,93	0,13	266,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/1.0	0,365	0,45	Wärmedämmputz	0,075	0,070	0,04
13	1Hiz5_1	0,57	1,59	0,13	240,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/0.9	0,365	0,24	Kalkzementputz	0,020	0,870	0,04
14	1Hiz5_2	0,41	2,28	0,13	259,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/0.9	0,365	0,24	Wärmedämmputz	0,050	0,070	0,04
15	1Hiz5_3	0,36	2,64	0,13	270,-	Gipsputz	0,015	0,35	Hlz 12/0.9	0,365	0,24	Wärmedämmputz	0,075	0,070	0,04

Abb. 78: Auszug aus der erstellten Konstruktionsdatenbank

Die derzeitige Konstruktionsdatenbank enthält die in Tab. 9 aufgezeigte Art und Anzahl der vorhandenen Aufbauten.

Außenwand aus Mauerwerk	einschalig	einschalig mit Wärmedämmverbundsystem	zweischalig mit Zwischendämmung
Leichtbeton	3	33	24
Kalksandstein	3	55	48
Ziegelstein	39	143	112
Porenbeton	6	22	16
Betonblock	15	44	32
Außenwand in Holzbauweise	mit Zwischendämmung	mit Zwischendämmung und Vorsatzschale	
	15	15	
Kellermauerwerk	einschalig	einschalig mit Perimeterd.	
	8	8	
Wand gegen angrenzende Bauteile	einschalig	einschalig mit WDVS	
	13	143	
Dach	Warmdach mit Zwischendämmung	Warmdach mit Zwischen- und Unterdämmung	
	112	32	
Bodenplatte	69		
Kellerdecke	115		
Decke gg. Außenluft	115		
Fenster	6		

Tab. 9: Art und Anzahl der vorhandenen Datenbankeinträge

Die Anzahl der möglichen Ausführungsvarianten ist aufgrund der Größe der Datenbank so umfangreich, daß die Überprüfung auf Zulässigkeit einen relativ langen Zeitraum in Anspruch nehmen kann. Beim Fallbeispiel eines Gebäudes mit einer Ziegelaußenwand, nichtunterkellert, ergeben sich, mittels der Standardaufbauten der zuvor beschriebenen Datenbank, bereits 17,5 Millionen Kombinationsmöglichkeiten (294 (Ziegel) × 144 (Dach) × 69 (Bodenplatte) × 6 (Fenster)). Selbst ein Personalcomputer mit einem 1000 MHz-Prozessor benötigt für 140.000 Kombinationen ca. eine Minute Rechenzeit. Daher ist es auf alle Fälle ratsam, die Datenbanken den

eigenen Bedürfnisse anzupassen und solche Aufbauten zu entfernen, die mit Sicherheit nicht zur Anwendung kommen. In den verschiedenen Bereichen der Datenbank sind beispielsweise Konstruktionen vorhanden, die den gleichen k-Wert, aber unterschiedliche Kosten aufweisen. Je nach Erfordernis können die teureren Bauteile entfernt und der Berechnungsablauf dadurch beschleunigt werden. Außerdem ist durch den Tragwerksplaner in der Regel die Deckenstärke oder auch die Stärke der Bodenplatte vorgegeben. Deshalb sollten die Bauteilvarianten aus der jeweiligen Datenbank entfernt werden, die nicht der Vorgabe für den entsprechenden Optimierungslauf entsprechen. Erreicht wird dadurch eine relativ schnelle Ermittlung des optimalen Ergebnisses.

Die eigentliche Optimierung mit OptimaW stellt sich für den Anwender so dar, daß in der Eingabemaske die bereits beschriebenen Parameter eingetragen werden müssen. Ergänzend hierzu sind in einer separaten Maske anschließend die besonderen Eigenschaften des Optimierungslaufes anzupassen.

Abb. 79: Haupteingabemaske von OptimaW

Abb. 80: Eingabe der Eigenschaften

Nachdem die entsprechenden Eingaben getätigt wurden, kann der Optimierungslauf gestartet werden. Wie bereits erwähnt, steht die Dauer der Optimierung in direktem Zusammenhang mit der Größe der Datenbank. Erfolgt jedoch eine Anpassung der Datenbank, die binnen kürzester Zeit realisiert werden kann, ist der Optimierungslauf innerhalb weniger Minuten beendet. Die Ausgabe der optimalen Lösungen mit den zugehörigen Bauteilaufbauten und den sonstigen Daten erfolgt nach der Optimierung in einem Ausgabefenster. Hier werden auch der Aufbau und die Kosten der günstigsten Variante, die gerade noch die Anforderungen der WSchVo bzw. E-nEV erfüllt, angezeigt. Von den untersuchten Varianten wird diejenige mit den geringsten Laufzeitkosten als optimales Ergebnis ausgewählt. Die Laufzeitkosten sind die sich aus den Konstruktionskosten und den gewählten Optimierungsparametern, am Ende der gewählten Optimie-

rungslaufzeit, ergebenden Kosten. Die Gesamtkosten der optimierten Gebäudehülle können mit den Gesamtkosten der günstigsten Variante in einem Diagramm graphisch dargestellt und ausgedruckt werden. Aus diesem Diagramm läßt sich der Amortisationszeitpunkt feststellen.

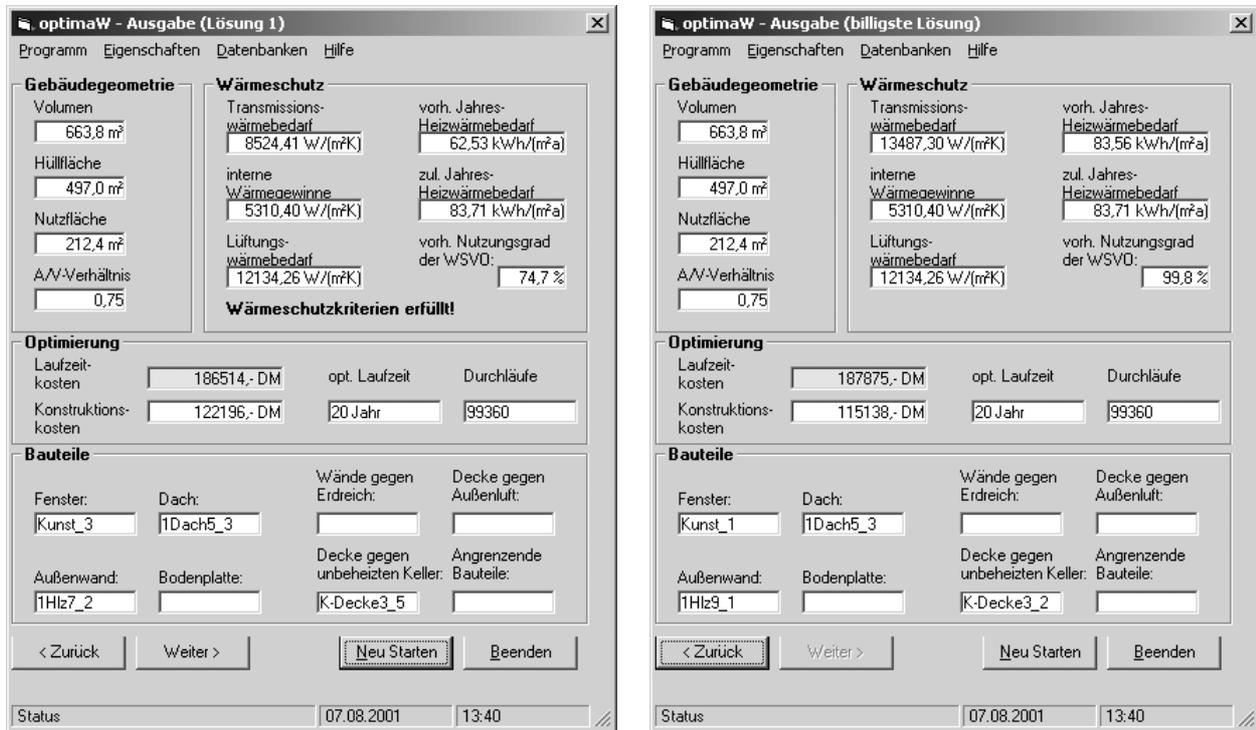


Abb. 81: Ergebnisausgaben der Optimierung; links optimierte, rechts günstigste Lösung

#### 4.9.7 Optimierung durch Software-Tool OptimaW

##### Anwendungsbeispiel

Zur weiteren Verifizierung wurden abschließend, in enger Zusammenarbeit mit einem Ingenieurbüro, an einigen Wärmeschutznachweisen existierender Gebäude nachträglich mit den entwickelten Planungshilfen Variantenuntersuchungen durchgeführt. Am Beispiel des in Abb. 82 dargestellten Einfamilienwohnhauses, in Massivbauweise, aus dem Jahr 1995 sollen die Ergebnisse exemplarisch aufgezeigt werden.



Abb. 82: West- und Südansicht des untersuchten Gebäudes

Mittels der erstellten Datenbank wurden die dem realen Bauvorhaben entsprechenden Bauteil-aufbauten mit den zugehörigen Kosten und k-Werten zusammengestellt. Es ergaben sich für die wärmetauschende Hüllfläche Kosten von 118.049,- DM (siehe Tab. 10). Das angesetzte Gebäudevolumen beträgt 663,8 m<sup>3</sup>. Mit den verwendeten Baumaterialien für die wärmetauschende Hüllfläche werden die Anforderungen der WSchVo gerade so erfüllt (0,6 % unter dem zulässigen Jahresheizwärmebedarf).

Bauteil	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Kurz-Bez.	Aufbau	k-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Einzelpreis [DM/m <sup>2</sup> ]	Gesamtpreis [DM]
Außenwand	189,80	1Hlz5_1	1,5 cm Gipsputz 36,5 cm Hlz 12/0.9, WLG 0,24 2 cm Kalkzementputz	0,57	240,-	45.552,00
Dach	162,15	1Dach5_3	1,5 cm Gipskartonplatte 18 cm Mineralfaserplatten/ Sparren 1,9 cm DWD-Platten	0,25	168,-	27.241,20
Kellerdecke	109,38	K-Decke3_14	5 cm Zementestrich 5 cm PUR-Hartschaum 18 cm Beton	0,41	183,-	20.016,54
Fenster	33,53	Kunst_3	Kunststoffrahmen Wärmeschutzverglasung, g = 0,7	1,10	640,-	21.459,20
Haustür	2,10	1Haust1	Holztür	1,50	1800,-	3.780,00
						118.048,94

Tab. 10: Bestand

Nachdem die Bauteildatenbank an das bestehende Gebäude angepasst wurde (z.B. Dicke der Kellerdecke 18 cm, Kunststoffenster), blieben 40 verschiedene Aufbauten für das Dach, 36 für die Wand, 23 für die Kellerdecke und 3 Fensterarten übrig. Die sich daraus ergebenden 99.360 Alternativen wurden von OptimaW in weniger als einer Minute verglichen. Die ermittelten Aufbauten und die sich daraus ergebenden Kosten der optimierten Lösung finden sich in Tab. 11 und die der billigsten Alternative entsprechenden Werte in Tab. 12.

Bauteil	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Kurz-Bez.	Aufbau	k-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Einzelpreis [DM/m <sup>2</sup> ]	Gesamtpreis [DM]
Außenwand	189,80	1Hlz7_2	1,5 cm Gipsputz 36,5 cm Hlz 12/0.8, WLG 0,15 5 cm Wärmedämmputz	0,30	263,-	49.917,40
Dach	162,15	1Dach5_3	wie Bestand	0,25	168,-	27.241,20
Kellerdecke	109,38	K-Decke3_5	5 cm Zementestrich 10 cm PUR-Hartschaum 18 cm Beton	0,30	181,-	19.797,78
Fenster	33,53	Kunst_3	Kunststoffrahmen Wärmeschutzverglasung, g = 0,7	1,10	640,-	21.459,20
Haustür	2,10	1Haust1	Holztür	1,50	1800,-	3.780,00
						122.195,58

Tab. 11: Optimierte Lösung

Bauteil	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Kurz-Bez.	Aufbau	k-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Einzelpreis [DM/m <sup>2</sup> ]	Gesamtpreis [DM]
Außenwand	189,80	1Hlz9_1	1,5 cm Gipsputz 36,5 cm Hlz 12/0.8, WLG 0,18 2 cm Kalkzementputz	0,44	242,-	45.931,60
Dach	162,15	1Dach5_3	wie Bestand	0,25	168,-	27.241,20
Kellerdecke	109,38	K-Decke3_2	5 cm Zementestrich 5 cm Polyst.-Hartschaum, WLG 035 18 cm Beton	0,53	171,-	18.703,98
Fenster	33,53	Kunst_1	Kunststoffrahmen Wärmeschutzverglasung, g = 0,65	1,6	581,-	19480,93
Haustür	2,10	1Haust1	Holztür	1,50	1800,-	3.780,00
						115.137,71

Tab. 12: Kostengünstigste Lösung

Durch einfache bauliche Maßnahmen (zusätzlicher Wärmedämmputz der Außenwände, Erhöhung der Dämmschichtdicken der Kellerdecke) kann der vorhandene Jahresheizwärmebedarf soweit gesenkt werden, daß er 25,3 % unterhalb des für das Gebäude maximal zulässigen Wertes liegt und der Niedrigenergiehaus-Standard sogar erfüllt wird. Dadurch wird zum einen eine erhebliche Heizkostensparnis erreicht, zum anderen erhält der Bauherr 8 Jahre lang einen staatlichen Zuschuß von 400,- DM pro Jahr. Durch diesen optimierten Aufbau ergeben sich aber jetzt Kosten von 122.196,- DM für die wärmetauschende Hüllfläche, d.h. es entstehen Mehrkosten von 4.147,- DM. Legt man nun, aufbauend auf Kapitel 4.9.4, eine Heizölpreissteigerungsrate von 6 %, einen Kapitalzinssatz von 4,5 % sowie zur Fremdfinanzierung einen Darlehenszins von ebenfalls 6 %, bei einer 10jährigen Laufzeit, zugrunde, kann man erkennen, daß hier vom ersten Jahr an die aus der Annuität resultierenden Mehrkosten in Höhe von ca. 565,- DM/Jahr durch die Einsparungen (333,82 DM/Jahr) sowie staatliche Förderung (400,- DM/Jahr) übertroffen werden. Betrachtet man dagegen die sich im Laufe der Jahre ergebenden Gesamtkosten, ist zu erkennen, daß bereits im achten Jahr die aufaddierten Gesamtkosten der optimierten Variante günstiger sind, als die der vorhandenen Ausführung. Aber auch im direkten Vergleich zwischen der billigsten und der optimierten Variante ergibt sich, bei einem Kostenunterschied von nun 7.058,- DM, eine Amortisation des eingesetzten Kapitals nach ca. 18 Jahren.

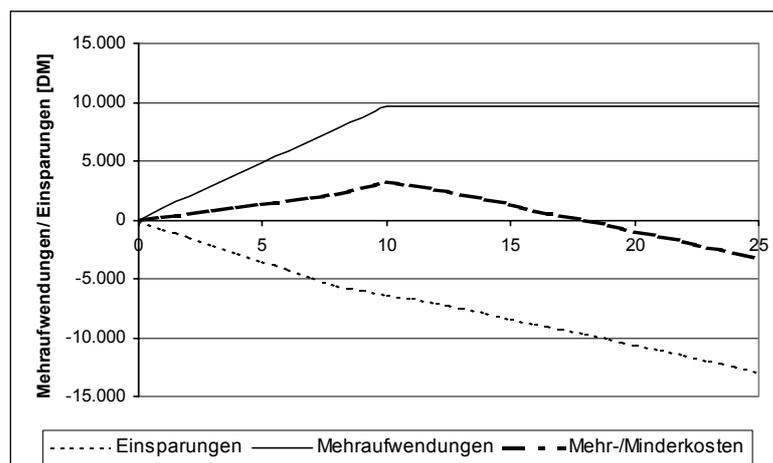


Abb. 83: Graphische Darstellung des Amortisationszeitpunktes zwischen billigster und optimierter Variante

Durch Variation der Eingangsparameter ist es auch möglich, äußerst optimistische bzw. pessimistische Veränderungen der maßgebenden Einflußgrößen auf den Amortisationszeitpunkt zu untersuchen.

#### 4.10 Aussichtsreiche, weitere Anwendungsgebiete

In den vorherigen Abschnitten des Kapitels 4 konnten einige Anwendungsmöglichkeiten für den Einsatz von Operations Research-Methoden aufgezeigt werden. Darüber hinaus bietet gerade die Tragwerksplanung eine Fülle weiterer Einsatzmöglichkeiten, wie beispielsweise die Optimierung von Fundamenten, Stützen, Deckensystemen etc.. Global gesehen ergeben sich weiterhin vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Tragwerksplanung, wie exemplarisch das folgende Beispiel der Planung einer Schrägseilbrücke aufzeigt. Mit der Höhe des Pylons steigen dessen Herstellungskosten, die Seilkräfte werden jedoch geringer. Umgekehrt werden die Seilkräfte und damit die erforderlichen Stahlquerschnitte um so größer, je niedriger der Pylon ausgeführt

wird. Das Ziel der Optimierung der Planung sollte die Wahl der ökonomisch sinnvollsten Ausbildung, unter Beachtung der äußeren Restriktionen, sein.

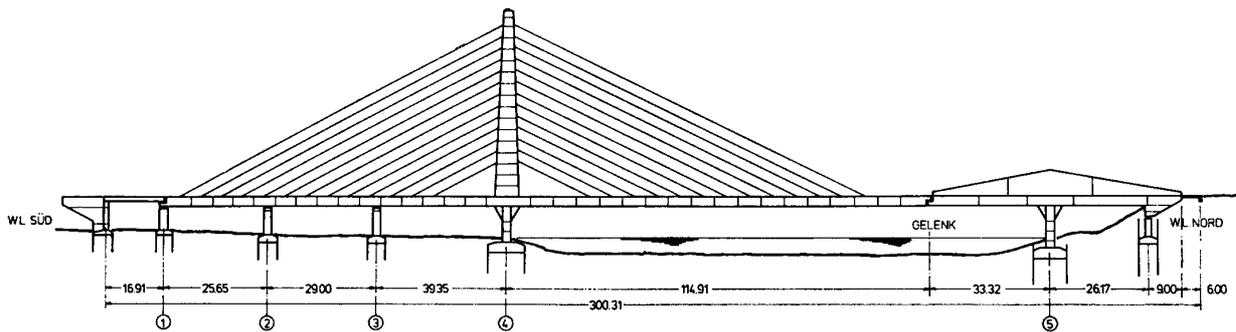


Abb. 84: Schrägseilbrücke, exemplarisch

Im Rahmen einer mathematischen Optimierung sollten auch solche Bereiche zusätzlich hinterfragt werden, die für den Anwender als allgemein unumstößlich gelten. So wurden von Lesniak [Les], bereits im Jahr 1970, die Querschnitte der auch noch heute gültigen IPE-Reihe auf Optimalität hin genauer untersucht. Die Zielfunktion bestand darin, bei einem Minimum an Material die bestmöglichen statischen Eigenschaften zu erzielen. Die Nebenbedingungen waren zum einen walzentechnische Anforderungen, zum anderen sollten mindestens die statischen Werte der gültigen IPE-Reihe erreicht, besser noch überschritten werden.

Eine Grundforderung der Walztechnologie bezüglich einer einheitlichen Abkühlungsdauer setzt ein bestimmtes Verhältnis der Querschnittsflächen von Flanschen und Stegen in gewissen Grenzen voraus. Um nun die Grenzen dieser Verhältnisse zu finden, wurden gewalzte I-Träger-Reihen verschiedener europäischer Länder genauer untersucht und die entsprechenden Verhältnisse sowie Mindeststegdicken bestimmt. Von den fünf Abmessungen des IPE-Trägerquerschnittes wurden die Flanschdicke  $t$ , Flanschbreite  $s$  sowie Stegdicke  $g$  als Entscheidungsvariablen gewählt und die Querschnittshöhe  $h$  sowie der Ausrundungshalbmesser  $r$  als gegeben vorausgesetzt. Die nachfolgende Optimierung lieferte als Ergebnis, daß alle existierenden Querschnitte, außer IPE-80, noch in der Ausführung verbessert werden könnten. So lassen sich bei einer Gewichtsersparnis von bis zu 4,8 %, bei einem IPE-160, immer noch minimale Verbesserungen der statischen Eigenschaften erzielen.

Im Rahmen einer durchgeführten Optimierung muß allerdings stets darauf geachtet werden, daß nicht nur die Einzelbauteile für sich optimiert werden, sondern daß das Gesamtsystem unter einer bestimmten Zielsetzung optimiert wird. So kann beispielsweise ein gewichtsoptimierter Längsträger einer Eisenbahnbrücke infolge seiner großen Bauhöhe einen sehr hohen Gesamtstahlverbrauch nach sich ziehen [Les]. Ebenfalls muß darauf geachtet werden, daß alle relevanten Nachweise in der Optimierung berücksichtigt werden. Neben dem Nachweis der Standsicherheit müssen die Bauteile gegebenenfalls noch weiteren Anforderungen genügen, wie beispielsweise dem Schallschutz, Brandschutz oder ergänzenden Anforderungen bezüglich der Gebrauchstauglichkeit (z.B. Schwingungsnachweis) etc..

Abschließend mit diesem Kapitel kann festgestellt werden, daß in nahezu allen Bereichen der Tragwerksplanung noch weitreichende Optimierungsreserven vorhanden sind, die durch den Einsatz von Methoden der mathematischen Optimierung mobilisiert werden können.

## **5 Einsatz von Operations Research-Methoden in der Arbeitsvorbereitung**

### **5.1 Einführung**

Die Aufgaben und Anforderungen des Bauwesens lassen sich grundsätzlich in die drei Betätigungsbereiche Bauplanung (Entwurf, Berechnung, Konstruktion), Baubetrieb (Organisation, Kosten, Verfahren) und Bauwerksunterhaltung einteilen. Im Kapitel 4 wurden bereits die Anwendungsmöglichkeiten für Methoden des Operations Research bei der Bauplanung von Bauwerken genauer untersucht. Es konnte anhand einiger ausgewählter Beispiele aufgezeigt werden, daß gerade in diesem Bereich mathematische Methoden zur Entscheidungsfindung mit sehr guten Ergebnissen eingesetzt werden können. Es sind jedoch noch unzählige weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Methoden der mathematischen Optimierung, gerade in der Tragwerksplanung, denkbar, deren Realisierung und Umsetzung weitere Forschungsaktivitäten in diesem Bereich rechtfertigen würden. In diesem Kapitel soll nun untersucht werden, ob die Methoden des Operations Research mit ebenso großem Erfolg auch in dem Bereich des Baubetriebes eingesetzt werden können.

Die Baubetriebslehre befaßt sich insbesondere mit den Teilgebieten Baubetriebstechnik (Arbeitstechnologie), Baubetriebswirtschaft, Baubetriebsführung, Baurecht und Bauvertragswesen sowie Projektmanagement. Der Bereich der Baubetriebstechnik läßt sich in die beiden Bereiche Verfahrenstechnik und Ablaufplanung unterteilen. Im Rahmen der hier durchzuführenden Forschungen bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten mathematischer Methoden soll die Ablaufplanung, insbesondere die Arbeitsvorbereitung, als Teilbereich der Baubetriebstechnik genauer untersucht werden. Das soll keineswegs bedeuten, daß die übrigen Bereiche weniger erfolgversprechend für die Anwendung mathematischer Methoden zur Optimierung sind. So existierten gerade für den Bereich der Baubetriebswirtschaft eine große Zahl an Veröffentlichungen, in denen eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt wird. Daß gerade hier eine so große Fülle von Einsatzmöglichkeiten gegeben ist, liegt sicherlich auch darin begründet, daß die Erforschung und Anwendung der Methoden des Operations Research gerade bei den Wirtschaftswissenschaftlern am weitesten fortgeschritten ist und die Betriebswirtschaftslehre ein Teilbereich der Wirtschaftswissenschaften darstellt.

Im Rahmen der folgenden Untersuchungen soll daher festgestellt werden, ob bereits Lösungsansätze des Operations Research in der Arbeitsvorbereitung von Baumaßnahmen angewendet werden und in welchen zusätzlichen Bereichen sie noch sinnvolle Anwendung finden könnten.

### **5.2 Die Arbeitsvorbereitung von Baumaßnahmen**

Bei der Ausführung eines Bauvorhabens sind vom Bauleiter in der Regel kurzfristig tiefgreifende Entscheidungen zu treffen. Für die Vorbereitung solcher Entscheidungen, das Sammeln und Sortieren notwendiger Informationen sowie den darauf aufbauenden Vergleich der verschiedenen Alternativen ist während der Bauausführung meist die dafür notwendige Zeit nicht vorhanden [BöNe]. Aus diesem Grund ist es wichtig, daß die wesentlichen Entscheidungen bereits vor Baubeginn, im Rahmen der Arbeitsvorbereitung, geklärt werden.

Damit der Begriff Arbeitsvorbereitung im folgenden gleichermaßen verstanden wird, bedarf es zunächst einer genauen Begriffsdefinition. Daher werden nachfolgend wieder eine Reihe verschiedener Definitionen aufgeführt.

Brüssel [Brs]

Die Arbeitsvorbereitung hat sicherzustellen, daß geeignete Arbeitskräfte, Baugeräte und Baustoffe, in erforderlicher Qualität und ausreichender Menge, zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort sind.

Franz [FrSch1]

Die Arbeitsvorbereitung umfaßt alle vorbereitenden Maßnahmen vor Beginn der Bauarbeiten, in der Werkstatt und auf der Baustelle mit dem Ziel der optimalen technischen und wirtschaftlichen Erstellung eines Bauwerkes im vorgesehenen Zeitraum. Die Arbeitsvorbereitung dient aber auch der Kontrolle und Steuerung des Fertigungsprozesses während der Durchführung der Baumaßnahme. Aus ihrer Arbeit resultieren letztendlich auch wichtige Erkenntnisse für Planung und Durchführung zukünftiger Baumaßnahmen.

Drees/ Spranz [DrSp]

Unter Arbeitsvorbereitung, oft auch als Fertigungsplanung bezeichnet, sind alle vorbereitenden Maßnahmen zu verstehen, die zu einer Bauausführung mit den geringstmöglichen Kosten unter den gegebenen Umständen führen. Es ist das Ziel der Arbeitsvorbereitung, den zeitlichen Ablauf der Bauausführung, unter Berücksichtigung der notwendigen Reihenfolge der einzelnen Arbeitsvorgänge, festzulegen.

Böttcher (in Anlehnung an REFA)[Boe]

Arbeitsvorbereitung besteht im systematischen Suchen und Festlegen von Zielen (Zielplanung) sowie im Vorbereiten von Aufgaben (Aufgabenplanung), deren Durchführung zum Erreichen der Ziele erforderlich ist.

Zusammengefaßt handelt es sich also bei der Arbeitsvorbereitung um die Vorausplanung des Bauablaufes sowie der Steuerung und Kontrolle der Bauproduktion mit dem Ziel der optimalen technischen und wirtschaftlichen Erstellung eines Bauwerkes im vorgesehenen Zeitraum.

		Aufgaben	Zweck
Planung	Zielplanung	Arbeitskalkulation Fertigungsverfahren Terminplanung	wirtschaftliche, organisatorische, humane Ziele festlegen
	Aufgabenplanung	Mittelplanung	Personal, Betriebsmittel, Material und Informationen optimieren
		Ablaufplanung	Fertigungsverfahren Baustelleneinrichtung Terminplanung

Tab. 13: Die Teilgebiete der Arbeitsvorbereitung [Boe]

Die Arbeitsvorbereitung, als Steuerung des Bauprozesses, muß aus der Hektik des Baustellenbetriebes herausgenommen und in das technische Büro verlegt werden, wo der eigentliche

Bauprozess dann ingenieurmäßig aufbereitet wird, um das Improvisieren auf der Baustelle weitgehend zu reduzieren [Küh].

Die Arbeitsvorbereitung einer Bauunternehmung ist in der Regel in vier Phasen eines Projektes tätig [FrSch1]:

1. Bei der Kalkulation, in der Phase der Angebotsbearbeitung
2. Nach Auftragsvergabe, aber noch vor Baubeginn
3. Während der Bauphase, zur Unterstützung der Bauleitung
4. Nach Beendigung der Baumaßnahme

Die im Sinne der Optimierung wichtigsten Punkte der Arbeitsvorbereitung in der Phase 2 sind:

- Auswahl der optimalen / wirtschaftlichsten Bauverfahren
- Planung der Baustelleneinrichtung
- Ablauf- und Terminplanung (Planung des Bauablaufes)
- Bedarfsplanung der Produktionsfaktoren

Der Prozess der Arbeitsvorbereitung zur Erstellung eines Bauwerkes stellt sich in der Regel wie folgt dar: Nach der Prüfung der Auftragsunterlagen erfolgt die Festlegung eines geeigneten Bauverfahrens. Die Planung der Baustellenorganisation, die Auswahl und Planung der Baustelleneinrichtungselemente sowie der Produktionsmittel erfolgt anschließend, in Verbindung mit dem zuvor festgelegten Bauverfahren. Parallel dazu wird die Terminplanung der Baustelle festgelegt und die Ablaufplanung detailliert. Alles dies geschieht unter Beachtung festgelegter Ziele, die in Form von Fertigstellungsterminen, vorhandenen Kapazitäten und weiteren Randbedingungen gegeben sind. Auch während der Bauphase sollte immer wieder kontrolliert werden, ob die angestrebten Ziele zu erreichen sind; nötigenfalls sind erforderliche Verbesserungen durchzuführen.

Mit anderen Worten ausgedrückt:

„Erst wenn die Voraussetzungen für einen störungsfreien Bauablauf gegeben sind, sollte die Bauausführung veranlaßt werden“ [AAWB].

### **5.3 Auswahl optimaler Bauverfahren**

Durch den Bauvertrag mit dem Bauherrn sind für die Bauunternehmung die Art des Bauwerkes (die technische Bauaufgabe) und die Randbedingungen für die Bauausführung (Baugelände, Bauzeit, Materialien, Bauweise etc.) vorgegeben. Eine der wichtigsten Aufgaben der Bauunternehmung im Zuge der Arbeitsvorbereitung besteht nun darin, vor Baubeginn die optimalen Bauverfahren für die Fertigung des Bauwerkes zu ermitteln. Das gewählte Bauverfahren legt fest, wie ein Bauwerk hergestellt wird und gibt damit eine dynamische, ablauforientierte Beschreibung des Fertigungsprozesses (z.B. Betonierverfahren mit Krantransport oder mit Betonpumpe etc.). Da die Bauweise in der Regel vorgegeben ist, allenfalls im Zuge eines Wettbewerbes durch einen Sondervorschlag oder im Rahmen einer funktionalen Ausschreibung die Möglichkeit besteht, diese zu ändern, können in der Arbeitsvorbereitung daher meist nur noch die Bauverfahren variiert werden. Unter Bauverfahren ist dabei die Kombination von Arbeitskräften, Betriebsmitteln und Baustoffen zu verstehen, durch die, unter Beachtung einer Arbeitsanwei-

sung (Ausführungspläne), das Bauwerk erstellt wird. Ein Bauwerk kann mit verschiedenen Bauverfahren hergestellt werden.

Sollen nun verschiedene Verfahren miteinander verglichen werden, um die optimale Methode festzulegen, so müssen die unterschiedlichen Eigenschaften der zu vergleichenden Verfahren ermittelt und beurteilt werden. Dieser Vorgang wird Verfahrenvergleich genannt. Unter den vorherrschenden Randbedingungen wird sich im allgemeinen nur ein Verfahren als besonders wirtschaftlich herausstellen [DrSp]. Welches Bauverfahren letztendlich einzusetzen ist, hängt von einer methodisch durchgeführten Vergleichsrechnung ab.

Zur Verfahrensauswahl kommen folgende Methoden zur Anwendung [FrSch3]:

### 1. Absoluter Kostenvergleich

Differenzenvergleich

↳ Gegenüberstellung der Kosten der Verfahren

### 2. Quantitativer Verfahrenvergleich

Grenzkostenvergleich

↳ Ermittlung der "Nutzenschwelle"; "Break-even-point"

Kalkulatorische  
Verfahrenvergleiche

### 3. Nutzwertanalyse

Bewertung der Verfahren hinsichtlich eines definierten Zielsystems

↳ Bewertung sowohl von quantitativen Zielen, als auch von subjektiven Kriterien möglich

### 4. Darstellung von Merkmalsprofilen

Graphisches Verfahren zur Verfahrensauswahl

↳ Ein Verfahren, ähnlich der Nutzwertanalyse, bei dem auch Kriterien aufgestellt werden und eine Verfahrensbeurteilung bezüglich der Kriterien erfolgt. Diese Bewertungen werden dann graphisch aufgetragen und die Merkmalsprofile verglichen

Eine Gewichtung der Kriterien erfolgt nicht, auch nicht die Berechnung eines Gesamtnutzwertes

### 5. Wertanalyse

Methodisches Vorgehen zur Findung neuer, verbesserter Produkte

Die verschiedenen Methoden der Verfahrensauswahl sind gut erforscht und in zahlreichen Lehrbüchern dokumentiert. Sie werden daher an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

## 5.4 Planung der Baustelleneinrichtung

### 5.4.1 Problemstellung

Der Standort der Baustelleneinrichtungselemente und die Entscheidung über die einzusetzenden Produktionsfaktoren hat auf den späteren Bauablauf einen maßgeblichen Einfluß. Das Ziel einer Baustelleneinrichtungsplanung besteht nun darin, unter den gegebenen Randbedingungen den optimalen Standort der einzelnen Elemente zueinander sowie zum Gebäude und dadurch die kostengünstigste Lösung für den Bauablauf zu finden. Auf diese gewählte Baustellen-

einrichtungsplanung müssen die Produktionsfaktoren abgestimmt werden. Dazu ist im allgemeinen für jedes maßgebende Element die Untersuchung mehrerer Varianten notwendig.

Auch hier soll zunächst der Begriff der Baustelleneinrichtung durch verschiedene Definitionen dargestellt werden.

#### Meyran [Z-Mey1]

Unter Baustelleneinrichtung(splanung) versteht man die produktiven und unproduktiven Mittel, die zur Herstellung von Bauprodukten, zur Erstellung von Bauwerken und zur Herbeiführung von bautypischen Zuständen auf der Baustelle installiert werden.

#### Brüssel [Brs]

Die Baustelleneinrichtungsplanung ist Bestandteil der Arbeitsvorbereitung und besteht im wesentlichen aus einer Materialflußgestaltung und damit aus der Ermittlung der optimalen Einrichtungsteile für die Bauausführung und deren räumlicher Zuordnung auf der Baustelle.

#### Schmidt [Schm]

Die Baustelleneinrichtungsplanung legt die räumliche Anordnung der für das Errichten des Bauwerkes nötigen Fertigungseinrichtungen (stationäre Maschinen, Fertigungs- und Lagerflächen, Baustraßen etc.) fest.

Zusammenfassend kann der Begriff der Baustelleneinrichtungsplanung mit der folgenden Definition nach Franz [FrSch1] umfassend geklärt werden:

„Die Baustelleneinrichtungsplanung ist ein wichtiger Bestandteil der Arbeitsvorbereitung mit der Aufgabe, die Elemente der Baustelleneinrichtung zu dimensionieren und so zueinander und zum Bauwerk zu ordnen, daß ein optimaler Bauablauf entsteht.“

Nachdem aus der Ablaufplanung die Daten der Produktion, die erforderlichen Ressourcen und die jeweilige Einsatzzeit bekannt sind, muß abschließend die Baustelleneinrichtungsplanung festgelegt werden. Als Bindeglied zwischen Planung und Ausführung hat sie den reibungslosen Ablauf der Arbeiten zu gewährleisten. Sie muß einen ungestörten Bauablauf, die materialflußgerechte Anordnung der einzelnen Elemente mit minimalen Transportentfernungen und die Einhaltung der vorgeschriebenen Emissionen gewährleisten [Bau].

In Abhängigkeit der anstehenden Baumaßnahme (Hochbau, Tiefbau) und Bauweise sind bestimmte Großgeräte für einen reibungslosen Ablauf erforderlich. Diese Großgeräte sind gemäß der Bauwerks- und Baustellengeometrie, der Leistungsanforderungen und Terminvorgaben zu bestimmen (z.B. Krandimensionierung). Darüber hinaus müssen die weiteren Elemente der Baustelleneinrichtung, wie Ver- und Entsorgungsleitungen, Lager- und Werkplätze, Baustraßen und Unterkünfte, dimensioniert werden [BöNe]. Die räumliche Anordnung geschieht nach der fertigungsgerechten Lagefolge und dem optimalen Materialfluß; alle Transporte sollten mit minimalen Transportentfernungen möglich sein.

Die Wahl und Anordnung der Baustelleneinrichtungselemente resultieren bislang aus dem Erfahrungsschatz des zuständigen Bauleiters, da die erforderlichen Untersuchungen wegen der Komplexität der Einflußgrößen nicht algorithmisch lösbar sind und in der Regel einen erheblichen Aufwand verursachen. Da für jede Bauaufgabe, im Gegensatz zur stationären Industrie, die Produktionsstätte stets neu errichtet werden muß, ist es von besonderer Wichtigkeit, die

Baustelleneinrichtung, die einen entscheidenden Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit hat, besonders sorgfältig zu koordinieren und zu konzipieren. Bei üblichen Bauobjekten liegen die Kosten der Vorhaltung der Baustelleneinrichtung bei 3 - 10 % der Herstellungskosten [Z-Mey1], [Z-Len2]. Einsparungen, wie beispielsweise durch einen im Weltvergleich hohen innovativen Stand in der Turmdrehkrantechnik, ausgerüstet mit einer mikroprozessorgesteuerten Regelungstechnik, werden oftmals durch eine dagegen altertümlich anmutende Baustellen-Layoutplanung zu nichte gemacht. Ein optimiertes Baustellen-Layout bildet dagegen die Grundvoraussetzung für die Optimierung des gesamten Bauprozesses [Z-Len2].

#### 5.4.2 Veröffentlichte Lösungsansätze

Um das Problem der Baustelleneinrichtung zu lösen, wurden in der Vergangenheit bereits verschiedene Ansätze entwickelt. So schlägt Russow [Rus, 1988] als Ergebnis einer vom Bundesminister für Wirtschaft geförderten Arbeit vor, aus Pappe oder durchsichtiger Folie Grundrißmodelle von Baustelleneinrichtungselementen, wie Kranen, Containern etc., herzustellen, die dann auf einem „Leerplan“ der Baustelle, der nur die Grundstücksgrenzen und den Umriß des Gebäudes sowie des Arbeitsraumes enthält, verschoben werden. Diese Grundrißmodelle werden dann solange verschoben, bis eine weitgehend optimale Zuordnung gefunden ist; diese wird dann anschließend fixiert. Dieser Vorschlag sollte die bisherige Vorgehensweise ablösen, mit Bleistift, Zirkel und Lineal, durch mehrfaches Probieren und Radieren, die optimale Lösung zu finden. Durch die Verbreitung von CAD sollte jedoch mittlerweile auch diese Methode ad acta gelegt werden, da es bei weitem einfacher ist, am Computer verschiedene Alternativen auszuprobieren [Z-KoSe]. Auch bei dieser Methode sollte jedem Anwender jedoch bewußt sein, daß nicht sichergestellt ist, die optimale Lösung gefunden zu haben; man hat lediglich eine mehr oder weniger gute Lösung erreicht. Eine Befragung mehrerer, zum Teil großer Bauunternehmen, hat gezeigt, daß sich an der beschriebenen Vorgehensweise in den letzten Jahren nichts geändert hat [Z-Len2].

Aus diesem Grund wurden schon seit geraumer Zeit Methoden gesucht und erarbeitet, die mit festgelegten Algorithmen die gestellte Aufgabe lösen sollen.

#### **Ganzzahliges lineares Modell mit diskreter Raumaufteilung und optimaler Lösung**

Meyran [Z-Mey1] entwickelte im Rahmen seiner Dissertation 1981 ein Verfahren zur Verbesserung des Baustellenlayouts, das auf Methoden des Operations Research beruht und die räumliche Zuordnung der Baustelleneinrichtung numerisch, auf Basis der Baukostenminimierung, behandelt. Voraussetzung dafür ist, daß für jedes Bauvorhaben die geeignetsten Betriebskapazitäten vom Bauhof oder eines externen Zulieferers zur Verfügung stehen.

Um den hohen Rechenaufwand bei der Anwendung von exakten Verfahren zu verringern, wurden folgende Modellannahmen getroffen:

- Reduzierung des Bauraumes auf eine Baufläche (es werden nur horizontale Entfernungen berücksichtigt)
- Bauwerk und Baustelleneinrichtungselemente werden auf mehrere Massen- bzw. Flächenschwerpunkte reduziert
- Die Beziehungen zwischen den Baustelleneinrichtungselementen werden vernachlässigt

- Der Raum für die Baustelleneinrichtung wird in eine möglichst große Anzahl von diskreten Punkten aufgeteilt, wobei jeder Punkt als möglicher Standort der Baustelleneinrichtungselemente gelten kann.

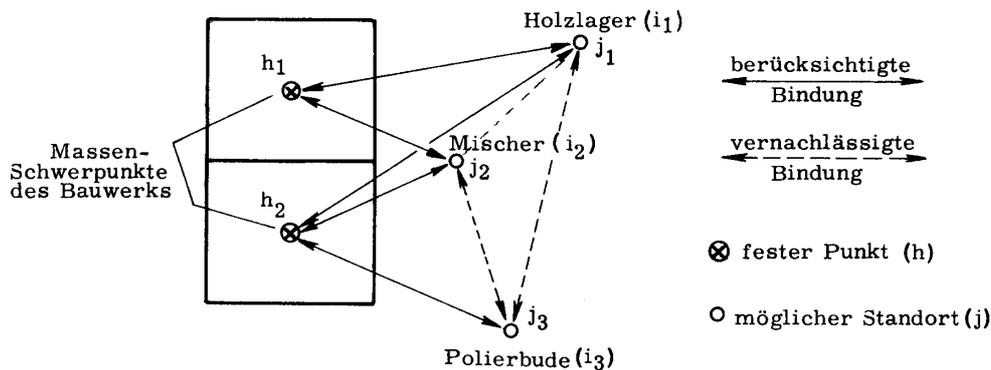


Abb. 85: Modellannahmen der ganzzahligen linearen Methode [Z-Mey1]

Nach weiteren umfangreichen Vorarbeiten, wie beispielsweise der Ermittlung der Matrix der Weglängen  $h/j$  und der entfernungsabhängigen Kosten der Baustelleneinrichtungselemente zwischen den einzelnen Punkten  $h/j$ , erfolgt die Lösung mit Hilfe der ungarischen Methode, nachdem die Zielfunktion auf ein allgemeines Zuordnungsmodell, bei gleichbleibenden Nebenbedingungen, umgeformt wurde. Durch Variation der Zuordnungen wird versucht, ein Minimum an standortabhängigen Kosten zu erreichen.

Bei diesem Verfahren wird kein endgültiges Baustellenlayout erzeugt, da anschließend die endgültigen Abmessungen der Baustelleneinrichtungselemente sowie die Planung der Baustraße noch vom Nutzer durchzuführen sind. Da die erzielten Ergebnisse in den meisten Fällen als nicht ausreichend anzusehen sind, wurde vom Verfasser zusätzlich das nachfolgende Verfahren entwickelt.

### Heuristisches Modell mit kontinuierlicher Raumverteilung und suboptimaler Lösung

Ebenfalls im Rahmen seiner Dissertation entwickelte Meyran [Z-Mey2], unter gleichen Voraussetzungen, dann 1982 ein weiteres Verfahren zur Verbesserung des Baustellenlayouts. Wie bei der linearen Behandlung beschränkt sich Meyran auch hier auf ein zweidimensionales Problem, verwendet jedoch ein heuristisches Kombinationsverfahren, bestehend aus einem Eröffnungs- und einem Verbesserungsverfahren. Das Eröffnungsverfahren dient dazu, ein zulässiges „Anfangslayout“ zu konstruieren, das mit Hilfe des Verbesserungsverfahrens sukzessive optimiert wird. Wie alle heuristischen Methoden führt auch dieses Verfahren in der Regel nur zu einer suboptimalen Lösung.

Die Modellannahmen sind mit dem ganzzahligen linearen Modell weitgehend identisch, die realen Abmessungen der Baustelleneinrichtungselemente können nun jedoch berücksichtigt werden. Im Raster werden dann die Grundstücksgrenzen, die Ein- und Ausfahrt, das Bauwerk mit seiner Fläche und seinen Massenschwerpunkten, die Kranzone und weitere belegte Bereiche (durch Bäume etc.) markiert. Da bei diesem Verfahren nun auch Beziehungen zwischen den einzelnen Baustelleneinrichtungselementen berücksichtigt werden, ist das Problem mittels linearer Zuordnungsoptimierung nicht mehr lösbar. Daher wird ein heuristischer Ansatz gewählt.

Bei dem Eröffnungsverfahren umlaufen die einzelnen Baustelleneinrichtungselemente, auf Rasterquadrate umgerechnete Flächen, den Bauwerksrand in zwei Umläufen mit einer großen Schrittweite; nach dem ersten Umlauf wird das Baustelleneinrichtungselement um 90° gedreht. Bereiche mit niedrigen Zielfunktionswerten werden in weiteren Umläufen mit niedrigerer Schrittweite genauer untersucht. Da die Elemente nacheinander platziert werden, entscheidet die Platzierungsreihenfolge über die Qualität des erzeugten Baustellenlayouts.

Das Verbesserungsverfahren basiert auf der Vertauschung der einzelnen Baustelleneinrichtungselemente und auf dem im Eröffnungsverfahren erzeugten Anfangslayout. Durch dieses Vertauschen wird versucht, den Wert der Zielfunktion weiter zu senken, wobei jedoch auch eine teilweise Überlappung der einzelnen Baustelleneinrichtungselemente zulässig ist.

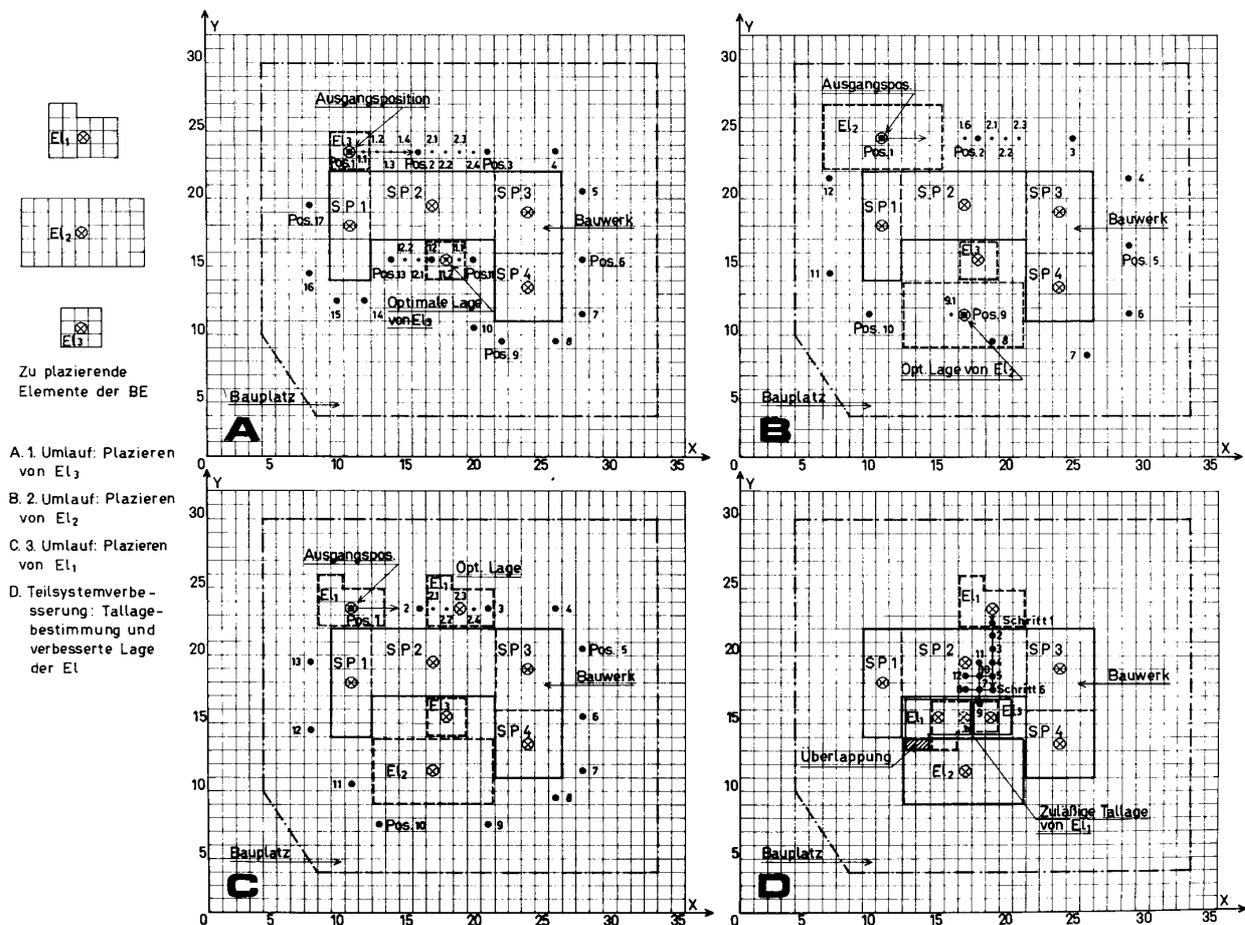


Abb. 86: Beispiel zum heuristischen Lösungsverfahren

### Hybrides Modell (Expertensystem und mathematischer Optimierungsalgorithmus)

Das von Kunibert Lennerts [Z-Len1], [Z-Len2] in der Zeitspanne von 1992-1999 entwickelte objektorientierte System ESBE übernimmt die Planung der Baustelleneinrichtung für Hochbaustellen in Abhängigkeit der jeweiligen Bauperiode. Durch eine hybride Komponente, bestehend aus einem Expertensystem und einem mathematischen Optimierungsalgorithmus, werden die für das jeweilige Bauobjekt ma besten geeigneten Baustelleneinrichtungselemente bestimmt und deren Dimensionierung sowie bestmögliche räumliche Zuordnung festgelegt. Während die Positionierung des Krans durch ein Operations Research-Verfahren optimiert wird, resultiert die Pla-

zierung der Baustelleneinrichtungselemente auf der wissensbasierten Komponente. Die benötigten Daten werden von einer Datenbank geliefert, die Interaktion mit dem Anwender geschieht durch eine dreidimensionale Visualisierungskomponente.

Bei dem mathematischen Optimierungsalgorithmus handelt es sich um eine Operations Research-Optimierungskomponente, unter Verwendung eines heuristischen Ansatzes, zur Lösung kombinatorischer Probleme (hier eines fünfdimensionalen Zuordnungsproblems).

Bei der wissensbasierten Komponente handelt es sich um ein Expertensystem. Expertensysteme nutzen das vorhandene Wissen aus der Literatur und insbesondere das Wissen von „Experten“, wie in diesem Fall Arbeitsvorbereitern oder Bauleitern. Grundlage eines gut funktionierenden Expertensystems ist also eine in die Tiefe gehende Literaturrecherche sowie eine umfangreiche Wissensakquisition bei Experten. Resultierend aus diesem Wissen werden dann verschiedene Regeln aufgestellt. Diese Regeln können imperativen Charakter haben (Verbots-, Gebotsregeln, wie „müssen“, „dürfen nicht“ etc.) oder aber es handelt sich um Empfehlungsregeln („sollen“, „sollen nicht“, „können“ etc.). Zu beachten ist bei der Bewertung, daß es sich bei den Empfehlungsregeln um aus Erfahrung und Intuition gewonnenes und damit „unsicheres“ Wissen handelt. Die wissensbasierte Komponente hat jedoch folgende Vorteile:

- Modulare Strukturierung des Wissens ist möglich
- Der Lösungsraum wird durch die Verarbeitung des Wissens eingeschränkt
- Die Experten werden weniger mit belanglosen Standardkonfigurationen beschäftigt
- Das Wissen der Experten ist im System abgelegt und steht jederzeit allen zur Verfügung

Die dreidimensionale Visualisierungskomponente dient im wesentlichen einer höheren Benutzerakzeptanz durch eine räumliche Darstellung sowie der Möglichkeit zur graphischen Simulation. Des weiteren ist es ein einfaches Interaktionsmittel für den Anwender zur Eingabe der benötigten Werte.

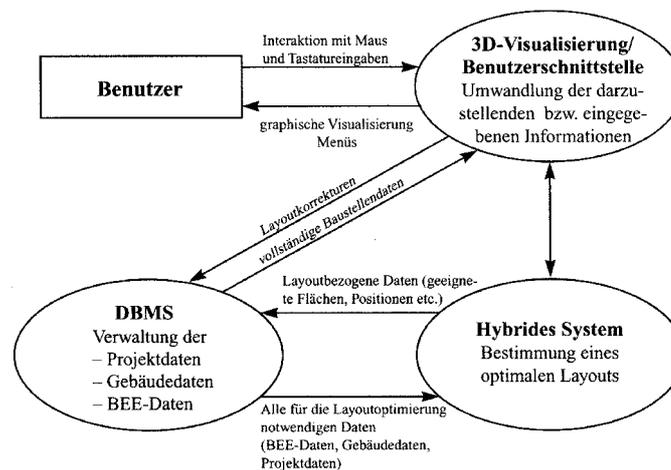


Abb. 87: Datenflußdiagramm der relevanten Teilsysteme von ESBE [Z-Len2]

### Wegzeitenbasiertes Modell

Blecken [Z-Ble2] stellt in seiner Veröffentlichung von 1984 ein leicht umsetzbares Planungsverfahren vor, welches, auf Zeitstudien beruhend, den Entwurf einer optimalen Baustelleneinrichtungsplanung ermöglichen soll. Das Verfahren basiert ausschließlich darauf, die Wegzeiten und dadurch die Wegkosten durch eine optimale Zuordnung der Baustelleneinrichtungselemente

zum Bauwerk zu minimieren. Die Wegzeiten und die daraus resultierenden Kosten entstehen bei einer Hochbaustelle größtenteils aus den Transportzeiten des Kranes und den Fußwegen der Arbeitskräfte. Als Ergebnis einer Studie, bei der Wegzeitmessungen zwischen dem zu erstellenden Bauwerk und den Baustelleneinrichtungselementen durchgeführt wurden, hat sich gezeigt, daß bei einer klassischen Hochbaustelle ca. 5 bis 9 % der Gesamtarbeitszeit als Fußwegzeiten zwischen der Produktionsstätte (Bauwerk) und den Baustelleneinrichtungselementen anfallen. Eine weitere Studie zeigte auf, daß sogar 25 bis 35 % der Grundzeit auf Weganteile entfallen, die die Arbeitskräfte weiter als zwei bis drei Meter von den Produktionsstätten fortführt. Die Weg- und Transportzeiten zwischen den einzelnen Baustelleneinrichtungselementen können vernachlässigt werden.

Das folgende Beispiel eines deplazierten Magazins verdeutlicht die Tragweite des aufgezeigten Sachverhaltes:

- ML APSL: 60 DM, 30 AK, 20 m Mehrlänge (ursprüngliche Entfernung: 30 m)
- Wegzeit zum Magazin: 1,2 % der Gesamtarbeitszeit, Reduktionsfaktor: 0,8
- Kein Krantransport erforderlich !

↳  $(50/30 - 1) \times 0,8 \times 0,012 \times 30 \text{ AK} \times 169 \text{ Std.} \times 60 \text{ DM/Std.} = \underline{1.946,88 \text{ DM/Monat}}$

Für jedes Baustelleneinrichtungselement können so standortbezogene Kosten ermittelt werden, die sich aus der Summe der Kosten für Krantransport und Fußwege zusammensetzen; sie werden als „beeinflußbare Kosten“ bezeichnet. Für die Arbeitsvorbereitung ist es jedoch erforderlich, die Kosten je Flächeneinheit zu ermitteln, um die optimale Lage und Größe der Baustelleneinrichtungselemente bestimmen zu können. Dafür werden die „beeinflußbaren Kosten“ durch den Flächenbedarf der einzelnen Baustelleneinrichtungselemente dividiert.

Ein weiteres Beispiel verdeutlicht, wie der Kosteneinfluß je Flächeneinheit ermittelt wird und dadurch die Platzierung der Baustelleneinrichtungselemente nach einer Bewertung auf dem Baugrundstück erfolgen kann.

Kalkulierte Stunden: 110.400 [Std.]  
 Fußwegzeiten (7 %): 7.728 [Std.]  
 Mittellohn APSL: 29,- [DM]  
 Kran + Kranführer: 89,- [DM]  
 Wegzeitanteile: ↳ gemäß der Ergebnisse der Studie

Nr.	BEE	Weg [%]	Weg [h]	Weg [DM]	Kran [h]	Kran [DM]	Kosten [DM]	Fl.bedarf	DM/ Fl.	Priorität
1.	Büro	4,2	325	9425			9425	50	188,5	6
2.	Unterkunft	21,7	1677	48633			48633	180	270,18	5
3.	Waschg./WC	19,3	1492	43268			43268	40	1081,7	3
4.	Magazin, Kant.	21,5	1662	48198			48198	30	1606,6	1
5.	Holz, Schalung	7,6	587	17023	801	71289	88312	280	315,4	4
6.	Bewehrung	2,8	216	6264	350	31150	37414	370	101,12	10
7.	Fertigteile	3	232	6728	318	28302	35030	250	140,12	8
8.	Mauerwerk	3	231	6699	106	9434	16133	150	107,55	9
9.	Betonabnahme	3	232	6728	782	69598	76326	50	1526,52	2
10.	Sonstiges	13,9	1074	31146			31146	180	173,33	7
	<b>Summe</b>	100	7728	224112	2357	209773	433885	1580		

Tab. 14: Tabellarische Berechnung Wegzeiten/-kosten und Prioritätszuordnung

Bei diesem Verfahren wird kein echtes Layout der Baustelleneinrichtung erzeugt. Vielmehr erfolgt die Anordnung der Baustelleneinrichtungselemente zum Bauwerk nach den ermittelten Prioritäten, unter Beachtung der baustellenspezifischen Bedingungen und den Aspekten der Arbeitssicherheit sowie dem Erfahrungsschatz des Planers.

#### 5.4.3 Überleitung zu einem neuen Lösungsansatz

Im Gegensatz zu Prozessen der stationären Industrie haben Bauprozesse in der Regel ein stochastisches Verhalten, so daß eine Optimierung mit deterministischen Werten oftmals nicht den gewünschten Erfolg bringt. Bauprozesse unterliegen einer Fülle von Störungen, wie beispielsweise Witterungs- und Natureinflüsse, Gelände- und Baugrundverhältnisse, Störungen und Schwankungen im Fertigungsablauf etc., die bei der Modellierung zu berücksichtigen sind. Hinzu kommen bei jedem Bauprojekt eine Veränderung der räumlichen Zuordnung der Produktionsstätten und eine Variation der Art und Weise der Materialversorgung.

Eine der wenigen Operations Research-Methoden, bei denen auch stochastische Ansätze berücksichtigt werden können, ist die Simulation. Unter Zuhilfenahme der Simulation können alle erdenklichen Bauprozesse nachgebildet und untersucht werden. Die Untersuchung eines Prozesses und die anschließende Umsetzung in ein Simulationsmodell sind jedoch sehr zeitaufwendig und scheiden aus diesem Grund für den Großteil der potentiellen Anwender (i.a. in der Arbeitsvorbereitung) aus. Da es sich bei Bauobjekten jeweils um Unikate handelt, müßte in den meisten Fällen daher auch immer wieder ein neues Simulationsmodell erstellt werden.

Obwohl die Simulation ein geeignetes Hilfsmittel zur Optimierung der verschiedenen Probleme darstellt, ist sie aufgrund der oftmals langwierigen Datenerfassung und der stets aufwendigen Umsetzung in ein Simulationsmodell in den meisten Fällen nicht wirtschaftlich einsetzbar. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß der Einsatz von Simulationen zur Optimierung von Bauprozessen nahezu ausschließlich auf die forschenden Hochschulen beschränkt bleibt.

Es ist jedoch möglich, Simulationsmodelle zu erstellen, die universell für verschiedene Teilbereiche des Bauwesens eingesetzt werden können. So wird in den folgenden Abschnitten ein Simulationsmodell zur Optimierung von Montageabläufen, im Zuge der Baustelleneinrichtungsplanung, vorgestellt. Für eine beliebige Fertigteilstaube können mit diesem Modell verschiedene Alternativen untersucht und anschließend die optimale Ausführungsvariante ausgewählt werden. Erforderlich ist für den Anwender jeweils nur eine entsprechende Eingabedatei, die mit einem herkömmlichen Editor erstellt werden kann.

Eine Möglichkeit zur Umsetzung bieten die Methoden der netzbasierten Simulation, die Petri-Netze. Die Grundlagen der Petri-Netz-Theorie wurden von Carl Adam Petri bereits im Jahre 1962, aufbauend auf den Grundlagen der Graphentheorie, bei der deutschen Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung geschaffen und später dann weltweit weiterentwickelt. Ein besonderer Vorteil der Methode liegt darin, daß zum einen die statische Struktur durch die graphische Darstellung besonders anschaulich wird, zum anderen das dynamische Verhalten durch implementierte Prozeßsteuerungsregeln in einer Simulation, während der Datenelemente durch das Netz geleitet und auf ihrem Weg entsprechend verändert werden, besonders gut abgebildet werden kann. Dadurch besitzt eine netzbasierte Simulation, im Vergleich zu anderen

Methoden, stets einen gewissen Zeitvorteil, denn die Darstellung der Abhängigkeiten untereinander sowie das zur anschließenden Simulation notwendige Modell sind identisch.

Petri-Netze sind gerichtete Graphen. Unter einem Graph versteht man eine Menge von Punkten (Knoten), die untereinander durch Linien (Kanten) verbunden sind; gerichtete Graphen zeigen zusätzlich die Richtung der Verbindung zwischen den Knoten an.

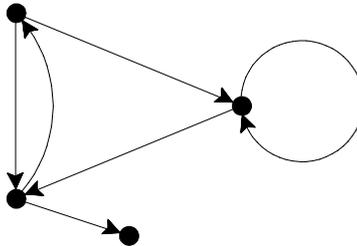


Abb. 88: Gerichteter Graph mit 4 Ecken und 6 Kanten

Bei einem Petri-Netz besteht ein Graph aus zwei verschiedenen Klassen von Knoten, die man in Ereignisse (aktive Knoten) und Zustände (passive Knoten) gliedert. Zustände stehen für die momentane Lage eines Systems, die Übergänge werden durch die Ereignisse ausgelöst. Die gerichteten Kanten verbinden immer ein Ereignis mit einem Zustand (oder umgekehrt), aber niemals Ereignisse oder Zustände untereinander. Außerdem kann ein Petri-Netz, im Unterschied zur allgemeinen Graphentheorie, keine isolierten Knoten besitzen. Schleifen, die im selben Punkt enden, sind ebenfalls unzulässig. Zeichentechnisch werden die Zustände durch Kreise, die Ereignisse durch Rechtecke und die Kanten durch Pfeile gekennzeichnet.

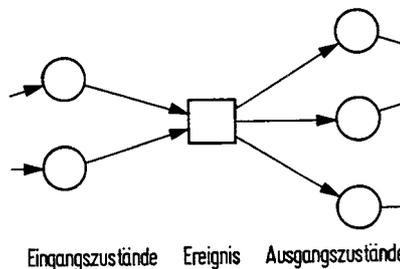


Abb. 89: Petri-Netz ohne Markierung

Im allgemeinen ist ein bestimmter Zustand stets dafür verantwortlich, daß ein nachfolgendes Ereignis überhaupt eintreten kann und als Ergebnis ein neuer Zustand realisiert wird. Ein LKW kann beispielsweise leer oder beladen sein, der Übergang geschieht sozusagen durch das Ereignis „Bagger belädt LKW“. Ist der Eingangszustand „LKW leer“ nicht vorhanden, kann eine Beladung durch den Bagger nicht erfolgen. Ein Ereignis muß also einen oder mehrere bestimmte Vorgängerzustände besitzen, um überhaupt realisiert zu werden. Im Petri-Netz wird dieses Vorhandensein angezeigt, indem der Vorgängerzustand mit einer Marke (Token) belegt wird. Tritt das Ereignis ein, wird diese Marke von dem Eingangszustand entfernt und an den Ausgangszustand weitergereicht. Ereignisse verändern also die Markenbelegungen der Zustände nach fest vorgegebenen Regeln.

Im Laufe der letzten Jahre wurden die Petri-Netze stetig weiterentwickelt und ergänzt. Mittlerweile gibt es eine ganze Reihe verschiedener Petri-Netz-Klassen:

- Statische Netze  $\hookrightarrow$  Netze ohne Marken
  - KI-Netze (Netze aus Kanälen und Instanzen)
- Qualitativ dynamische Netze  $\hookrightarrow$  Netze mit Marken
  - BE-Netze (Netze aus Bedingungen und Ereignissen)
  - ST-Netze (Netze aus Stellen und Transitionen)
  - PrT-Netze (Netze aus Prädikaten und Transitionen)
    - farbige Petri-Netze
    - höhere Petri-Netze
  - EPK's (Ereignisgesteuerte Prozeßketten (Boolesche Netze))
- Quantitativ dynamische Netze  $\hookrightarrow$  zeitbewertete Petri-Netze

Mit Petri-Netzen können Prozeßplanungs- und Prozeßsteuerungsprobleme im Bauwesen mit Hilfe der EDV abgebildet und simuliert werden. Insbesondere die Prädikat-Transitions-Netze sind zur Simulation von Bauabläufen gut geeignet, da sie eine möglichst einfache und anschauliche Darstellungsweise besitzen. Überdies ist es nur in dieser Netzklasse möglich, den Marken (Token) mehrere, unterscheidbare Informationen zuzuweisen.

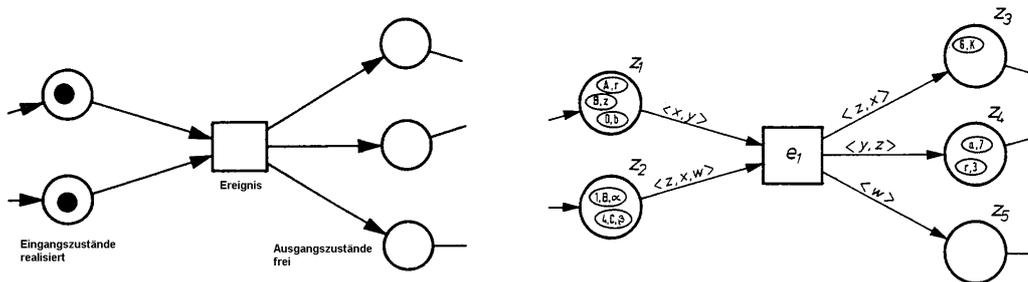


Abb. 90: Vergleich eines BE-Netzes mit einem PrT-Netz

Der Beweis, daß Petri-Netze erfolgreich zur Lösung baubetrieblicher Probleme eingesetzt werden können, wurde bereits 1989 durch die Dissertation von Franz erbracht [Fra]. Hierfür mußte zuerst eine Reihe von Modifizierungen an der Klasse der PrT-Netze (Berücksichtigung der Simulationszeit und stochastischer Einflüsse, Definition der Prozeduren der Markenauswahl etc.) vorgenommen werden. Anschließend konnten dann verschiedene komplexe Arbeitskettens, wie Bagger-LKW bei einer Erdbewegung oder LKW-Kran-Kolonnen beim Einbau einer Ortbetondecke, aufbereitet und mit Hilfe der netzbasierten Simulation optimiert werden. Weiterhin wurde der Produktionsablauf in einem Betonstahl-Biegebetrieb analysiert, in ein Simulationsmodell übersetzt und anschließend optimiert.

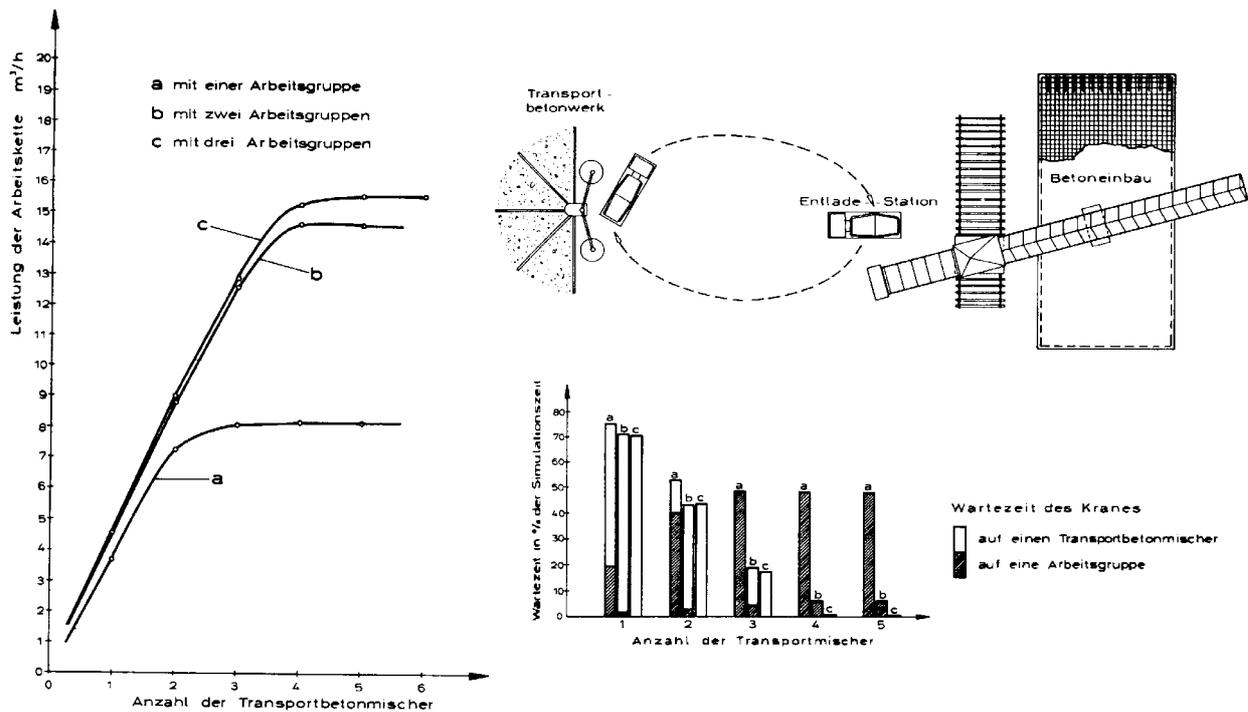


Abb. 91: Simulationsergebnisse beim Produktionsprozeß „Betoneinbau einer Decke“ [Fra]

Auch bei Forschungsarbeiten der TU Dresden wurden bereits Anwendungsmöglichkeiten von Petri-Netzen im Bauwesen untersucht und erfolgreich zur Simulation komplexer Bauvorhaben eingesetzt [Z-Kan], [Z-KJK]. So konnte für den Erdaushub der Baumaßnahmen im Bereich des Potsdamer und Leipziger Platzes in Berlin ein Petri-Netz-gestütztes, allgemeingültiges Prognoseverfahren entwickelt werden. Dafür wurde der Ist-Ablauf eines Baufeldes zeitlich und mengenmäßig nachvollzogen und darauf aufbauend, durch ein Simulationsmodell, eine zeitliche Prognose für die bodenlogistischen Aufgaben eines weiteren Baufeldes erstellt.

#### 5.4.4 Lösungsansatz durch netzbasierte Simulation

Wie aus den Erläuterungen im vorherigen Abschnitt bereits ersichtlich wurde, sind netzbasierte Methoden besonders gut geeignet, um die komplexen Zusammenhänge bei Bauprozessen abzubilden und zu optimieren. Daher wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [Scho] ein Simulationsmodell, basierend auf der Theorie der Petri-Netze, entwickelt, mit dem für ein beliebiges Bauvorhaben die Baustelleneinrichtung für die Montage von Fertigteilen abgebildet werden kann. Die Elemente, die in der Simulation erfaßt und optimiert werden können, sind Kran, Transport-LKW, Entladeplatz und Kolonnenanzahl. Die Ergebnisse der Simulation am Modell lassen sich dann später ohne Probleme auf den Bauablauf übertragen.

Mit dem Simulationsmodell können verschiedene Verhältnisse der Baustelleneinrichtung simuliert werden, z.B. Auswahl des einzusetzenden Krans (Krananzahl, Standorte, feststehender bzw. fahrbarer Kran, Auslegerlänge, kranspezifische Daten etc.), LKW-Anzahl zur reibungslosen Versorgung der Baustelle in Abhängigkeit der Entfernung zum Fertigteilwerk, Anzahl der einzusetzenden Arbeitskräfte und optimale Anordnung der Entladeplätze. Während der Simulation werden die Aktivitäten in Listen zur späteren Auswertung abgelegt (z.B. komplettes Kranspiel mit Anzahl der Kranfahrten, Schwenkwinkel, Hubbewegungen etc., LKW-Fahrten, Beladezeiten, Beschäftigungsgrad der eingesetzten Kolonnen etc.).

Selbstverständlich können in der Realität nicht genau die in der Simulation ermittelten Werte erzielt werden, es lassen sich auf diese Weise aber kurzfristig Engpässe in einer Arbeitskette lokalisieren. Störzeiten durch unvorhergesehene Einflüsse werden durch stochastische Parameter erfaßt.

5.4.4.1 Geometrische Beziehungen einer Kranfahrt (Kran mit Katzausleger)

Um das reale System einer Baustelle als Modell darstellen zu können, muß ein globales Koordinatensystem (x,y) in den Baustelleneinrichtungsplan eingefügt werden. In Abb. 92 sind die geometrischen Beziehungen während einer Kranfahrt dargestellt.

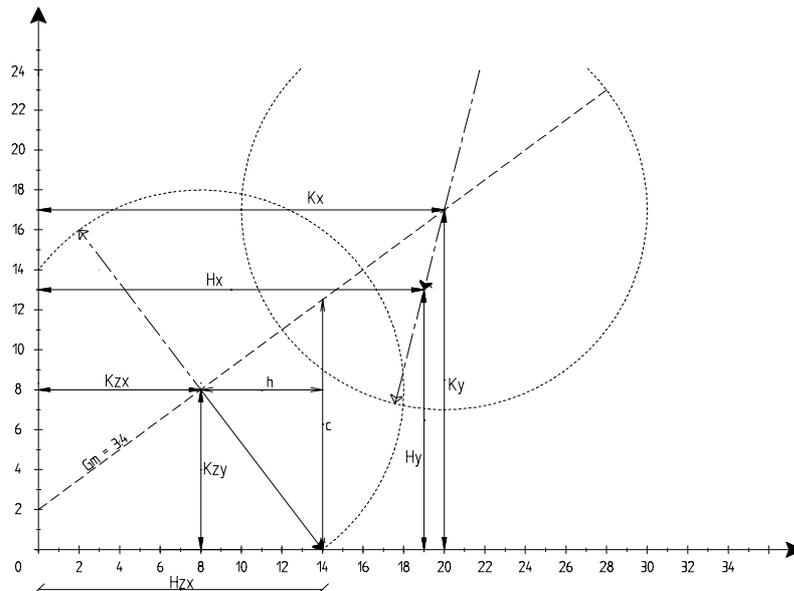


Abb. 92: Geometrische Beziehungen einer Kranfahrt

Die aktuellen Basiskoordinaten des **Krans** werden mit **K<sub>x</sub>** und **K<sub>y</sub>** bezeichnet. Zu den aktuellen Basiskoordinaten gehören die aktuellen **Hakenkoordinaten**, die mit **H<sub>x</sub>**, **H<sub>y</sub>** und **H<sub>z</sub>** bezeichnet werden. Die nächsten bekannten Größen sind die **Hakenzielkoordinaten**, die mit **H<sub>z<sub>x</sub></sub>**, **H<sub>z<sub>y</sub></sub>** und **H<sub>z<sub>z</sub></sub>** bezeichnet werden.

Die Steigung des Gleises im globalen Koordinatensystem wird mit **G<sub>m</sub>** bezeichnet, der Schnittpunkt des **Gleises** mit der y- Achse mit **G<sub>y</sub>**.

$$G_m = \frac{K_y - G_y}{K_x}$$

Die punktiert angedeuteten Kreise in Abb. 92 und die auf sie hinweisenden hellen Pfeile deuten den max. Auslegerradius **r** des Krans an, die dunklen Pfeile den Hakenstandort. Aus dieser Geometrie lassen sich nun die **Kranzielkoordinaten** **K<sub>z<sub>x</sub></sub>** und **K<sub>z<sub>y</sub></sub>** bei einer notwendig werden- den Fahrt ermitteln.

$$K_{z_y} = G_y + (K_{z_x} \times G_m)$$

$$K_{z_x} = H_{z_x} - h$$

$$h = c \times \frac{1}{2} \sin (2 \times \arctan(G_m))$$

$$c = G_y - H_{z_y} + (H_{z_x} \times G_m)$$

Bei einer anstehenden Transportaufgabe muß zuerst festgestellt werden, ob eine **Kranfahrt** überhaupt nötig ist oder ob der Kran sein Ziel nur durch Schwenken erreichen kann. Dies ist abhängig von den Kranbasiskoordinaten, den Kranzielkoordinaten und der max. Reichweite  $r$  des vorhandenen Krans. Im Programm wird die direkte Entfernung zwischen Kranbasis und Hakenziel ermittelt und mit der max. Reichweite verglichen.

$$Krf = \sqrt{(Hz_x - K_x)^2 + (Hz_y - K_y)^2}$$

Ist die Variable  $Krf \leq r$ , ist eine Kranfahrt nicht notwendig. Ist dagegen  $Krf > r$ , muß eine Kranfahrt durchgeführt werden.

Die **Katzfahrstrecke  $Kf$**  ist die Differenz zwischen **Startauslage  $Sa$**  und **Zielauslage  $Za$**  des Kranhakens. Für die reine Katzfahrstrecke ist nur der absolute Wert der Differenz dieser beiden Variablen von Bedeutung.

$$Kf = |Sa - Za|$$

$$Sa = \sqrt{(H_x^2 - (2H_x \times K_x) + K_x^2) + (H_y^2 - (2H_y \times K_y) + K_y^2)}$$

$$Za = \sqrt{(Hz_x^2 - (2Hz_x \times Kz_x) + Kz_x^2) + (Hz_y^2 - (2Hz_y \times Kz_y) + Kz_y^2)}$$

Die **Fahrstrecke  $Fs$** , die vom Kran zurückgelegt werden muß, wird nun aus den Basis- und Zielkoordinaten des Krans ermittelt.

$$Fs = \sqrt{(K_x - Kz_x)^2 + (K_y - Kz_y)^2}$$

Der Schwenkwinkel des Krans ist der Unterschied zwischen dem **Startwinkel  $Ws$** , gegeben durch Kranbasis- und Hakenbasiskoordinaten und dem **Zielwinkel  $Wz$** , der durch die Kranziel- und Hakenzielkoordinaten gekennzeichnet ist. Für den eigentlichen Schwenkvorgang ist es nun entscheidend, in welchem Quadranten sich der Ausleger befindet (Kranbasis immer als Nullpunkt betrachtet!). Insgesamt ergeben sich 16 Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Quadranten, bestimmt durch Start- und Zielauslage. Durch Vereinfachung und Gleichheit bleiben letztendlich nur acht übrig, die im folgende Bild aufgezeigt sind. Ist der so ermittelte Winkel nun größer als  $180^\circ$ , schwenkt der Kran dagegen in die andere Richtung.

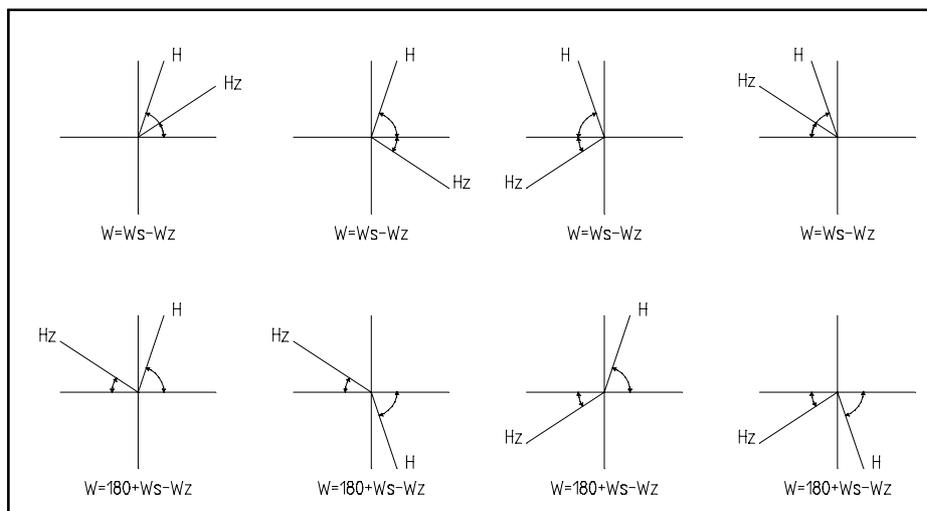


Abb. 93: Kombinationen der Start- und Zielauslage und ihrer Winkel

$$W = |W_s - W_z| \text{ bzw. } |180 + W_s - W_z|$$

$$W_s = \frac{K_y - H_y}{K_x - H_x}$$

$$W_z = \frac{Kz_y - Hz_y}{Kz_x - Hz_x}$$

Unter der Voraussetzung, daß sich die z-Ebene in der Fundamentoberkante des Krans befindet, ergibt sich für den Hebe- oder Senkvorgang:  $HS = Hz_z - H_z$ . Ist die Variable  $HS < 0$ , handelt es sich um einen Senkvorgang.

Weiterhin ist zu beachten, daß beim Schwenken des Krans der mit der Zeit an Höhe gewinnende Rohbau beachtet werden muß, um eine Kollision des Hakens mit angeschlagenem Fertigteil und dem Gebäude zu verhindern. Dadurch, daß die Hebebewegung vor allen anderen Bewegungen durchgeführt wird, kann dies verhindert werden. Anschließend folgt eine eventuell nötig werdende Fahrbewegung des Krans und zum Schluß parallel die beiden Tätigkeiten Schwenken und Katzfahren. Nach der Montage des Fertigteils erfolgt zuerst die Rückfahrt, dann Schwenken und Katzfahren parallel und abschließend dann die Senkbewegung.

Das Programm wurde speziell für einen Kran mit Katzausleger entwickelt, kann jedoch auch leicht an andere Kranarten, z.B. Kran mit Verstellausleger oder Mobilkran, angepaßt werden. Dadurch, daß beim Mobilkran die Möglichkeit der Fahrbewegung während des Fertigteiltransportes entfällt, sind die mathematischen Beziehungen hierfür stark vereinfacht. Beachtet werden muß, daß die Auslage des Hakens durch Kippen des Verstellauslegers beim Kran bzw. des hydraulischen Auslegers beim Mobilkran, erreicht wird, wodurch sich aber gleichzeitig die z-Koordinate des Hakens ändert. Beim Mobilkran muß weiterhin berücksichtigt werden, daß der Ausleger in der Länge hydraulisch verändert werden kann, was sich ebenfalls auf die Hakenauslage und die z-Koordinate des Hakens auswirkt. Generell sind jedoch auch diese Kranarten in einem gesonderten Modell darstellbar.

#### 5.4.5 Das realisierte Petri-Netz-Modell

Bei komplexen Systemen ist es ungünstig, das Netz eines Modells mit allen Einzelheiten in einer Ebene zu entwerfen. Es bietet sich vielmehr eine Strukturierung in Basisnetz und tiefer verschachtelte Unternetze an, da anhand dieser Baumstruktur die Übersichtlichkeit und Lesbarkeit des Netzes entscheidend verbessert werden kann. Mit zunehmender hierarchischer Strukturierung leidet jedoch wieder die globale Erfassbarkeit. Die Zielsetzung des hier erarbeiteten Netzes ist darauf ausgerichtet, daß es in seiner gesamten Struktur schnell erfassbar sein sollte. Aus diesem Grund wird der Vorgang der Fertigteilmontage auf nur fünf Netze verteilt. Aus dem stark vereinfachten Basisnetz führen zwei Module in tiefere Ebenen. Modul 1 behandelt die Fahrt vom und zum Fertigteilwerk und den gesamten Beladevorgang. Modul 2, das durch weitere integrierte Module ergänzt wird, beinhaltet die kompletten Kranaktivitäten auf der Baustelle.

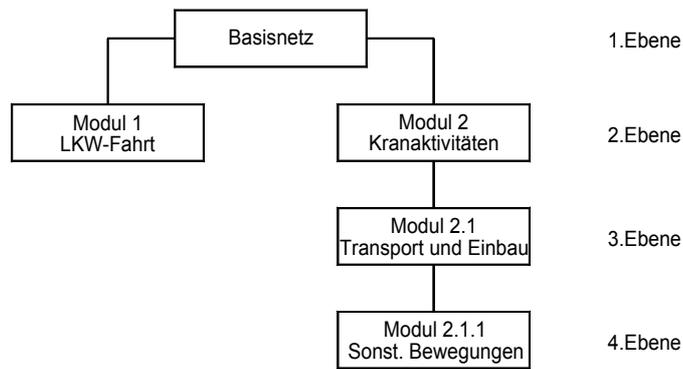


Abb. 94: Struktur der Netzhierarchie

Die reduzierte Netzstruktur konnte aber nur durch aufwendige Variablenzuweisungen und Berechnungen innerhalb der Transitionen erreicht werden. Hier sollen jedoch nur die groben Zusammenhänge und Abläufe dargestellt werden. Im folgenden werden daher die Abläufe in den verschiedenen Netzebenen kurz erläutert.

Basisnetz (Ebene 1)

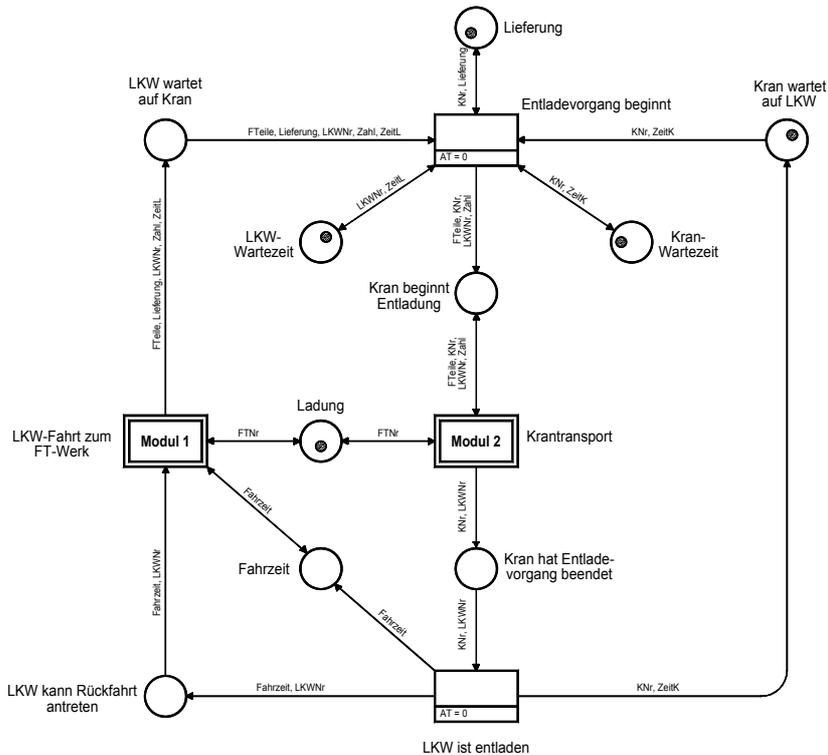


Abb. 95: Netzstruktur des Basisnetzes

Die Montage kann erst beginnen, wenn ein mit Fertigteilen beladener LKW auf der Baustelle ankommt und ein Kran frei ist. Die Wartezeiten, die eventuell ein LKW auf einen Kran bzw. ein Kran auf einen LKW hat, werden in Listen zur späteren Auswertung abgelegt. Der eigentliche Entladevorgang und Krantransport ist in Modul 2 abgebildet. Ist der Entladevorgang beendet, muß der LKW zurück in das Fertigteilwerk fahren, um neue Fertigteile zu laden (in Modul 1 dargestellt), der Kran ist sofort wieder bereit, einen weiteren, eventuell bereits wartenden LKW zu entladen. Die Fahrzeit Baustelle-Fertigteilwerk wird der realen Entfernung angepaßt, stochastische Einflüsse können berücksichtigt werden.



Das Fertigteil, welches an oberster Stelle der LKW-Ladefliste steht, wird als erstes am Kranhaken angeschlagen. Zur Modellierung von Krantransport und Einbau dient das Modul 2.1. Nachdem das Fertigteil eingebaut wurde, wird die Spielzeit, die der Kran für dieses Teil hatte, zur statistischen Auswertung in eine Liste aufgenommen. Anhand der Ladefliste wird nun überprüft, ob der LKW noch weitere Fertigteile geladen hat. Ist dies der Fall, wird das nächste Fertigteil angeschlagen. Wenn nicht, ist der Entladevorgang beendet, und der LKW kann die Rückfahrt zum Fertigteilwerk antreten.

**Modul 2.1: Transport und Einbau (Ebene 3)**

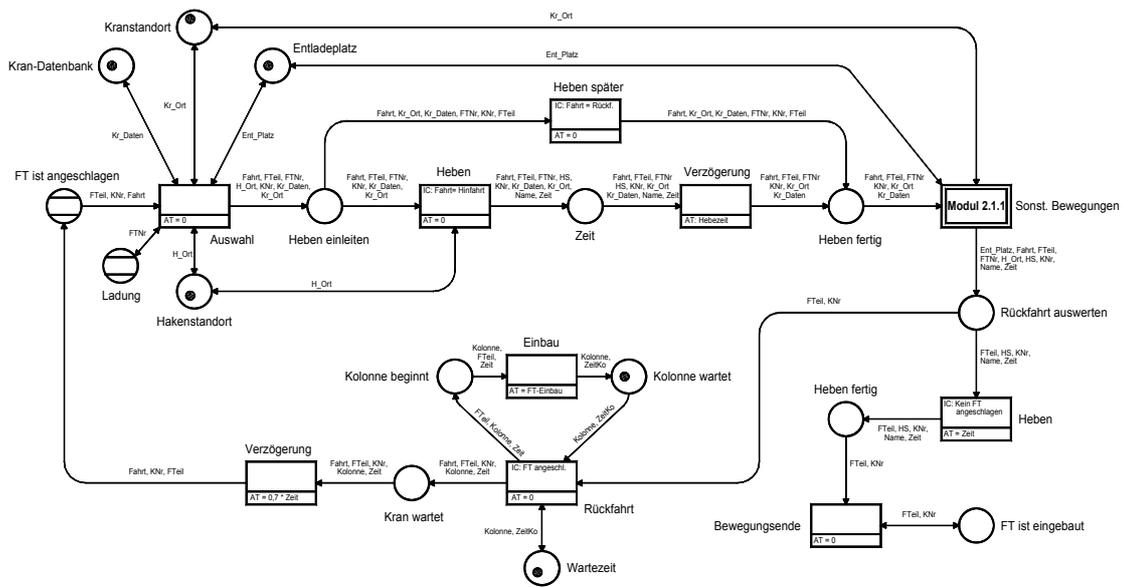


Abb. 98: Netzstruktur des Moduls 2.1: Transport und Einbau

Ein bestimmtes Fertigteil ist am Kran angeschlagen. Aus den umgebenden Stellen werden nun die für den entsprechenden Kran bzw. für das entsprechende Fertigteil gültigen Wertelisten eingelesen. In diesen Wertelisten sind, beispielsweise für den Kran, die folgenden Parameter abgelegt: Krannummer, Kranradius, Schnittpunkt des Gleises mit der y-Achse, Steigung des Gleises im x,y- Koordinatensystem, Endpunkte des Gleises, Kranfahr-, Katzfahr-, Hebe-, Senkgeschwindigkeit.

Bei der Hinfahrt zum Ort der Montage wird nun zuerst das Fertigteil auf die Zielkoordinaten angehoben. In Modul 2.1.1 werden auf der Ebene 4 die Fahr- und sonstigen Bewegungen modelliert. Nachdem das Fertigteil so seine Zielkoordinaten erreicht hat, wird es von einer Kolonne eingebaut. Der Kran wird nicht für die komplette Montagezeit benötigt, so daß er schon etwas früher (hier 70 % der Montagezeit) die Rückfahrt antreten kann. Hierfür wird das Modul 2.1 teilweise erneut in einer Schleife durchlaufen, und der Kran bewegt sich wieder zu den Ausgangskordinaten des Entladeplatzes zurück. Nachdem dies geschehen ist, wird der Haken, als letzte Bewegung, wieder auf das Niveau des Entladeplatzes gesenkt und das Modul verlassen.



### Beispiel 1: Fiktive Baustelle

In Zusammenarbeit mit einem Betonfertigteilerhersteller wurde, als typisches Optimierungsbeispiel, ein Gebäude von 50 m Länge und 56 m Breite, mit einem in der Mitte des Gebäudes angeordneten Kern, entworfen. Die Anzahl der Fertigteile, Stützen, Unterzüge und  $\pi$ -Platten beträgt 148 pro Geschöß. Die Parameter der Fertigteile (Abmessungen, Gewicht und Montagezeiten) wurden in einer Liste festgelegt und später, bei der Simulation berücksichtigt. Die Simulation wurde in dieser Phase an nur einem Geschöß durchgeführt, da die ermittelten Simulationsergebnisse auf jedes weitere, gleichartige Geschöß weitgehend übertragbar sind (es ändern sich nur die Zeiten des Hebe- bzw. Senkvorgangs).

Zwei unabhängige Alternativen wurden untersucht:

- Alternative 1: Ein Kran mit 35 [m] Auslegerlänge, ortsfest im Kern des Gebäudes positioniert.
- Alternative 2: Zwei fahrbare Krane, parallel zur längeren Seite des Gebäudes angeordnet; das Gleis ist jeweils im Abstand von 8 m zum Gebäude verlegt.

Die spezifischen Daten der Krane sind in einer Liste festgelegt und werden vom Programm berücksichtigt. Die Bauteile werden in der späteren Einbaureihenfolge numeriert. Zuerst werden die Stützen eingebaut, daraufhin die Unterzüge und zum Schluß die  $\pi$ -Platten. Bei Einsatz von zwei Kranen sind zwei Ladelisten erforderlich, so daß den Kranen auch nur die Bauteile zugeordnet werden, deren Zielkoordinaten sie erreichen können und die sie einbauen sollen.

Bei der Durchführung der Simulation spielt die Simulationszeit eine entscheidende Rolle. Einige Transitionen besitzen Aktivierungszeiten, die verstreichen müssen, bevor die Transition schalten kann. Beispielsweise wird die Transition „LKW auf Baustelle angekommen“ so lange verzögert, bis die im Prädikat „Fahrzeit“ angegebene Zeitdauer verstrichen ist. Stochastische Einflüsse, wie Gleich- oder Gaußverteilung, können bei der Angabe der Aktivierungszeiten berücksichtigt werden.

Folgende maßgebende Parameter wurden jeweils in den Simulationsexperimenten untersucht:

- Standort und Anzahl der einzusetzenden Krane
- Anzahl der vorhandenen LKW, abhängig von der Entfernung Fertigteilwerk zur Baustelle und der eingesetzten Krananzahl
- Standort des Entladeplatzes, um die Kranspielzeiten zu minimieren
- Anzahl der einzusetzenden Kolonnen

Durch die Simulation erhält man so die bestmögliche Kombination der Produktionsfaktoren und kann anschließend zwischen den verschiedenen Alternativen, z.B. dem Einsatz von einem oder mehreren Kranen, entscheiden. Um die Kosten zu erfassen, werden bei der Auswertung der Simulationsexperimente auch die unterschiedlichen Bereitstellungskosten der Baustelleneinrichtungselemente berücksichtigt.

Die Entscheidung, ob das Ergebnis einer Simulation eine Verbesserung darstellt, ist jedoch immer abhängig von dem vorgegebenen Ziel: Soll das Bauvorhaben kostenmäßig möglichst günstig oder zeitmäßig möglichst schnell erstellt werden?

Exemplarisch werden im folgenden die Simulationsergebnisse der Alternative 2 vorgestellt. Bei dieser Alternative werden zwei fahrbare Krane eingesetzt; die Gleislänge beträgt 23 m (siehe Abb. 100). Es sollen hier die optimalen Parameter der LKW-Anzahl und verschiedene Varianten der möglichen Standorte des Entladeplatzes untersucht werden. Die Anzahl der Kolonnen wur-

de nicht mehr untersucht, da die Auswertung der Simulation mit einem Kran gezeigt hatte, daß mehr als eine Kolonne pro Kran nicht wirtschaftlich ist.

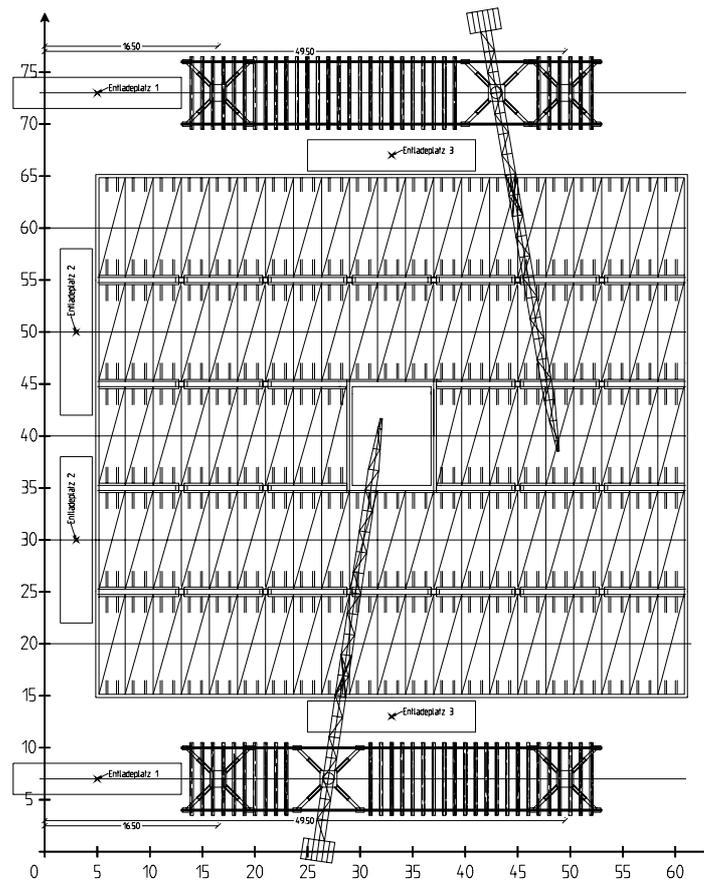


Abb. 100: Simulationsmodell mit zwei Kranen

Bei einer vorgegebenen Fahrzeit von 20 min zum Fertigteilwerk läßt sich mit einer Steigerung auf über 6 LKW keine kürzere Bauzeit mehr realisieren, dagegen steigen ausschließlich die durchschnittlichen Wartezeiten stark an.

Als nächstes wurde die Lage des optimalen Entladeplatzes untersucht. Es zeigte sich in den Simulationen, daß die Entladeplätze 1 und 3, in bezug auf die Montagedauer, nahezu gleichwertige Ergebnisse liefern, wohingegen Entladeplatz 2 die Montagedauer geringfügig erhöht. Vergleicht man dazu parallel aber auch die Anzahl der getätigten Kranfahrten, ist zu erkennen, daß Entladeplatzvariante 2 mit annähernd 100 Kranfahrten, im Gegensatz zu 15 bei Entladeplatz 3, die schlechteste Wahl sein würde.

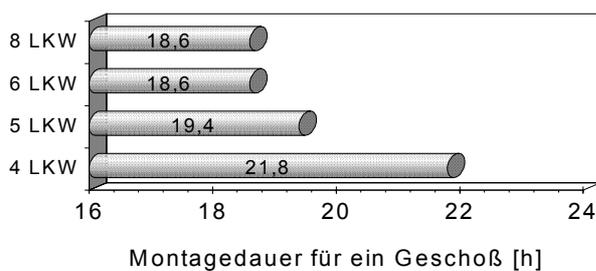


Abb. 101: Variante mit 2 Kolonnen, Entladeplatz 3, LKW variabel

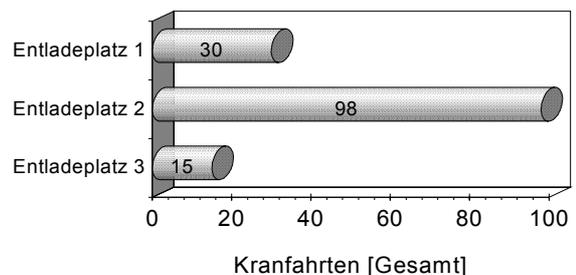


Abb. 102: Variante mit 6 LKW, 3 Kolonnen, Entladeplatz variabel

Zur wirtschaftlichen Bewertung wurde in Tab. 15 die Montagedauer [h] mit den entstehenden Kosten [DM] verknüpft. Da sich die Simulation immer nur auf ein Geschoß bezieht, müssen die Kosten anschließend mit der Geschoßanzahl multipliziert werden.

Baustelleneinrichtungselemente	Variation	Montage-dauer [h]	Kosten [DM]
2 Kolonnen, Entladeplatz 3	4 LKW	21,8	36.188,-
	5 LKW	19,4	35.114,-
	6 LKW	18,6	36.456,-
3 Kolonnen, Entladeplatz 3	6 LKW	16,6	37.184,-

Tab. 15: Kosten der Variationen bei Einsatz von zwei Kranen

Als Ergebnis der Simulation wird in einer Ausgabedatei zusätzlich eine Liste aller Kranspielzeiten angelegt. Anhand dieser Werte läßt sich leichter und schneller, als mit den herkömmlichen Methoden, die durchschnittliche Spielzeit des Krans ermitteln. Hier können auch schnellstens die durchschnittlichen Spielzeiten für bestimmte Fertigteilgruppen, wie Stützen, Unterzüge etc., bestimmt werden.

### Beispiel 2: Südharzgalerie Nordhausen

Um das erstellte Simulationsmodell weiter zu verifizieren, wurden zusätzliche Untersuchungen an einem realen Bauvorhaben durchgeführt [D-JoDe]. Untersucht wurden zwei unterschiedliche Hauptvarianten:

- Hauptvariante A: Die Baustelle ist vom Fertigteilwerk aus in einer Zeit von 20 min zu erreichen
- Hauptvariante B: Die Baustelle ist vom Fertigteilwerk aus in einer Zeit von 180 min zu erreichen

Mit diesen grundlegend unterschiedlichen Ansätzen für die Fahrzeit wurden anschließend wieder diverse Alternativen, bezüglich der optimalen Anzahl von LKW, des optimalen Entladeplatzes und der optimale Kolonnenanzahl für den Einbau der Fertigteile, untersucht. Überprüft wurde weiterhin, ob für diese Baumaßnahme ein oder zwei Krane eingesetzt werden sollten; hier werden jedoch nur die Ergebnisse beim Einsatz eines Kranes vorgestellt.

Der Grundriß der Baustelle (2. OG), der Standort des gewählten Entladeplatzes und des Kranes sind in Abb. 103 dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation wurden anschließend wieder mit realen Kostenansätzen verknüpft.

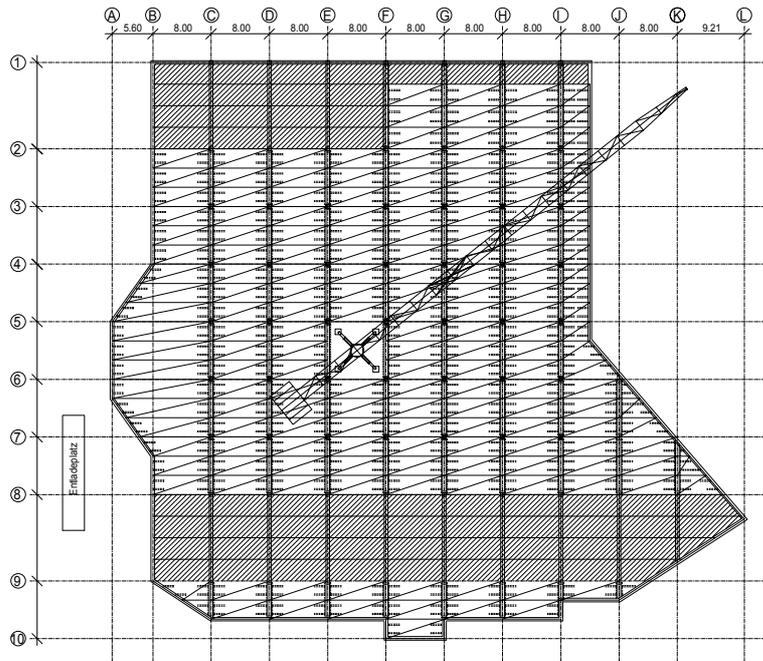


Abb. 103: Grundriss 2. OG und Baustelleneinrichtungselemente

**Hauptvariante A**

Fünf der untersuchten Varianten sollen hier vorgestellt werden. Die Anzahl der eingesetzten Produktionsmittel und die zugehörigen Ergebnisse können Abb. 104 und Abb. 105 entnommen werden. Es wird von Variante zu Variante jeweils nur die Anzahl eines Produktionsmittels verändert, während die übrigen Produktionsmittel konstant gehalten werden.

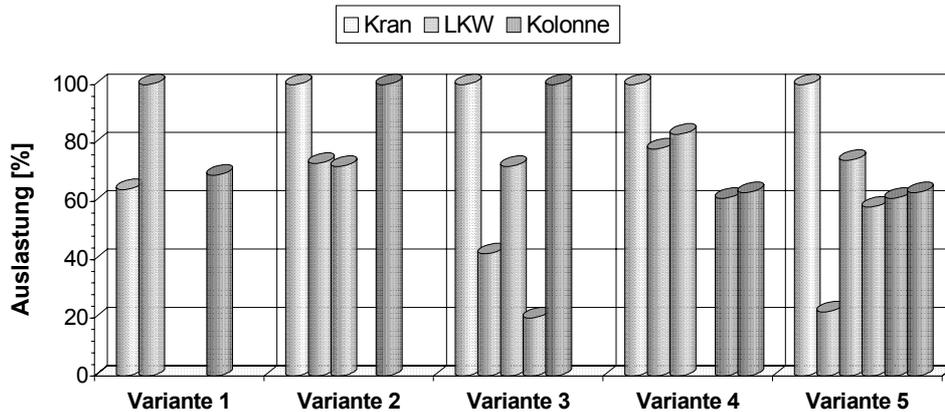


Abb. 104: Auslastungsgrad der 5 Produktionsfaktoren

In Variante 2 gelingt es, durch den Einsatz von zwei LKW, sowohl die Leistungsfähigkeit des Krans als auch der Kolonne in etwa auszulasten. Eine Steigerung auf 3 LKW oder mehr bringt keine weitere Bauzeitverbesserung, sondern erhöht lediglich die Kosten. Durch den Einsatz einer zusätzlichen Kolonne, bei Variante 4, wird eine Auslastung der Arbeitskräfte von ca. 62 % erreicht. Die Fertigungsdauer sinkt, gegenüber der Variante 2, um 22 %, die Kosten steigen hingegen nur um 4 %.

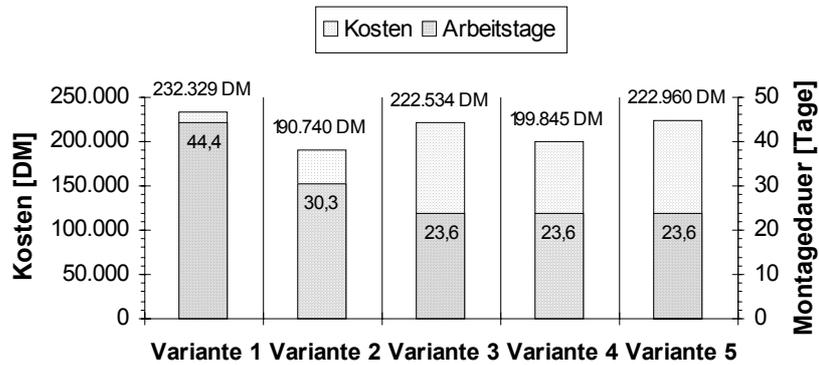


Abb. 105: Kosten und Fertigungsdauer der fünf Varianten

Unter rein monetärer Zielsetzung sollte die Variante 2, mit zwei LKW und einer Einbaukolonne, gewählt werden. Sollte jedoch die Optimierung der Fertigungszeit das gesetzte Ziel sein, empfiehlt sich Variante 4, bei der sich die Montagedauer, bei nur minimalen Mehrkosten, erheblich verringert.

### Hauptvariante B

Bei diesem Modell wurden sieben Varianten untersucht. Die Anzahl der eingesetzten Produktionsmittel und die zugehörigen Ergebnisse sind in Abb. 106 ersichtlich. Es wird auch hier von Variante zu Variante jeweils nur die Anzahl eines Produktionsmittels verändert.

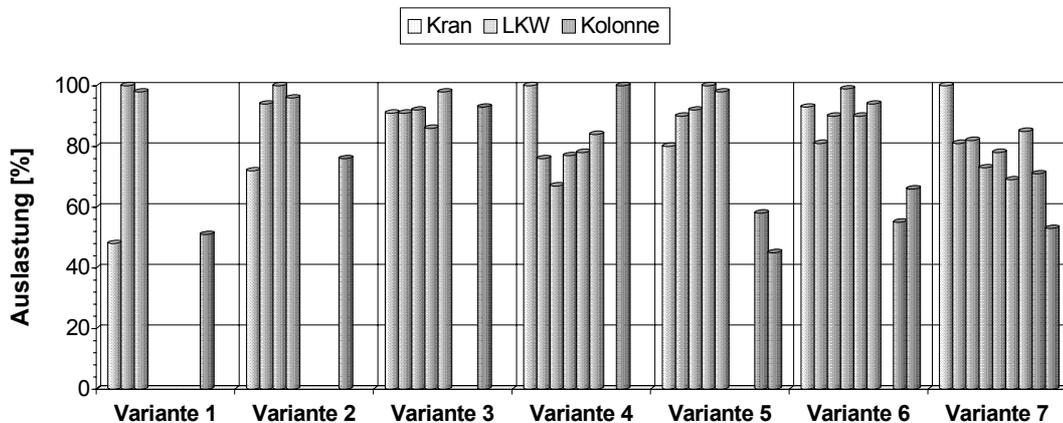


Abb. 106: Auslastungsgrad der sieben Produktionsfaktoren

Variante 3 zeigt auf, daß mindestens vier LKW eingesetzt werden müssen, um sowohl den Kran als auch die Kolonne zu ca. 90 % auszulasten. Die Auslastung der Produktionsmittel ist hier nahezu ideal, da sie gleichmäßig (> 90 %) ausgelastet sind. Bei den untersuchten Varianten 4 und 5 kann zwar die Montagedauer verringert werden, aber die Herstellungskosten steigen überproportional. Variante 6 liefert hingegen, durch den Einsatz eines zusätzlichen LKWs und einer zusätzlichen Kolonne, im Vergleich zu Variante 3 nochmals eine Verkürzung der Montagezeit. Die Montagedauer kann hier um ca. 22 % gesenkt werden, wobei die Kosten nur um ca. 8 % steigen. Durch Einsatz eines weiteren LKWs (Variante 7) kann die Montagedauer, gegen-

über Variante 6, nochmals leicht verringert werden (ca. 2 %), die Kosten steigen aber um weitere 7 %.

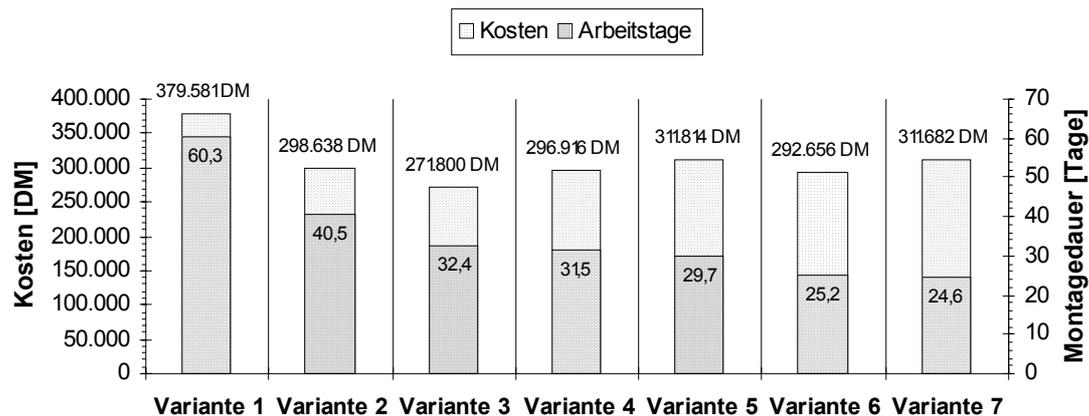


Abb. 107: Kosten und Fertigungsdauer der 7 Varianten

Bei rein ökonomischer Zielsetzung ergibt sich aus Variante 3 das optimale Ergebnis; bei Optimierung der Montagedauer liefert Variante 6 das beste Ergebnis.

#### 5.4.7 Ausblick

Es hat sich gezeigt, daß die Methode der Simulation sehr gut geeignet ist, Probleme der Baustelleneinrichtung zu lösen. So läßt sich die Kombination der gewählten Produktionsmittel in ihrer Auswirkung auf eine gesetzte Zielfunktion genauestens untersuchen. Im Verlauf einer Simulation ist es aber auch möglich, daß Ergebnisse erzielt werden, die von vornherein nicht abschätzbar waren. So zeigt sich beispielsweise bei der Auswertung der Simulationsergebnisse, daß in Beispiel 1 die Anordnung des Entladeplatzes, bei der Variante mit zwei Kranen, nur minimalen Einfluß auf die Gesamtdauer der Baumaßnahme hat. Intuitiv hätte man wohl angenommen, daß der etwas abseits gelegene Entladeplatz 2 die Gesamtdauer erheblich vergrößern würde. Aber erst in der Simulation zeigte sich, daß der Kran bei dieser Variante insgesamt 98 Fahrten durchführen muß (im Gegensatz zu 15 bei Variante 3 bzw. 30 bei Variante 1).

Der wohl schwerwiegendste Nachteil des Einsatzes der Simulation zur Optimierung von Bauprozessen liegt, wie bereits erwähnt, in der oftmals langwierigen Datenerfassung und der stets aufwendigen Umsetzung in ein Simulationsmodell, denn hierdurch ist in den meisten Fällen die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß verschiedene Simulationssoftware-Tools (z.B. PACE) mittlerweile die Möglichkeit bieten, die erstellten Modelle zu „vergießen“. Somit könnten beispielsweise an Hochschulen Simulationsmodelle, im Rahmen von Forschungsvorhaben oder über Drittmittel finanzierte Industrieforschung, für festgelegte Bauprozesse erstellt werden. Aus diesen kann ein eigenständiges EDV-Tool erstellt werden, das unabhängig von dem verwendeten Simulator lauffähig ist. Der Anwender hätte dann die Möglichkeit, durch eine Anpassung der Eingabedatei die verschiedenen Alternativen zu simulieren und auszuwerten. Er hat jedoch nicht die Möglichkeit, das erstellte Simulationsmodell zu verändern (ist in den meisten Fällen auch überhaupt nicht notwendig). Durch ein so erstelltes Tool könnten auch Simulationen effektiv in der Arbeitsvorbereitung von Bauprozessen eingesetzt werden.

Mittlerweile ist eine nahezu unüberschaubare Menge verschiedener Petri-Netz-Tools auf dem Markt vorhanden; viele kommerzielle Produkte, aber auch eine sehr große Menge von Tools, die kostenlos für Forschung und Lehre oder sogar als Freeware erhältlich sind. Zur Analyse dieser Vielfalt wurden in der Vergangenheit bereits mehrere vergleichende Studien erstellt und vorzugsweise im Internet veröffentlicht. Es hat sich jedoch herausgestellt, daß oftmals allein die im Internet zur Verfügung gestellten Angaben in die Bewertung eingingen, d.h. die von den Programmentwicklern in den jeweiligen Homepages veröffentlichten Eigenschaften wurden ungeprüft übernommen! Wegen dieser Problematik wurden in einer eigenen, vergleichenden Untersuchung [FrShzL] im Frühjahr 1999 die zuvor angesprochenen Tool-Auflistungen aus dem Internet genauer untersucht und anhand eines zuvor festgelegten Kriterienkataloges (Freeware bzw. frei für Forschung und Lehre, Windows Betriebssystem, zeitbewertete Petrinetze, graphischen Editor zur Eingabe) eine Vorauswahl getroffen. Ausgehend von 98 Petri-Netz-Tools, erfüllten nur 10 Programme, zum Zeitpunkt der Untersuchung, die zuvor genannten Kriterien. Die Programme wurden anschließend an einem vereinfachten Beispiel eines Bauablaufes getestet.

Die Testergebnisse fielen ernüchternd aus: Größtenteils waren die aufgeführten Programmfunktionen entweder nicht implementiert oder, schlicht ausgedrückt, nicht funktionsfähig. Lediglich ein Tool (Visual SimNet 1.37) erfüllte weitgehend die gestellten Anforderungen und stellte die meisten Optionen zur Verfügung. Für professionelle Anwendungen erscheint es ratsam, aufgrund der gewonnenen Erfahrungen aus dieser Untersuchung, auf kommerzielle Tools zurückzugreifen, die meist wesentlich ausgereifter und sicherer in der Anwendung sind.

Als eine der wenigen Hochschulen in Deutschland beschäftigt sich die Universität Gh Kassel intensiv mit den Einsatzmöglichkeiten der Simulation im Bauwesen. So werden momentan die Einsatzmöglichkeiten der Simulation bei der Optimierung der Betonwerksteinproduktion, der optimierten Planung von Abbundzentren oder der Optimierung allgemeiner Bauprozesse in verschiedenen Arbeiten genauer untersucht. Die bereits vorliegenden Ergebnisse abgeschlossener Forschungen ([Fra], [Scho]) lassen hier für die Zukunft weitreichende Erfolge erwarten.

## 5.5 Weitere Einsatzmöglichkeiten in der Arbeitsvorbereitung

### 5.5.1 Problemstellung

In der Arbeitsvorbereitung von Bauprozessen tauchen eine Reihe von Problemen auf, die hervorragend für eine mathematische Optimierung geeignet sind. Neben den bereits in diesem Kapitel vorgestellten Anwendungsbereichen gibt es darüber hinaus eine große Zahl von Problemen, die relativ gut erforscht sind. Geeignete Lösungsalgorithmen für diese Probleme wurden bereits vielfach in entsprechenden Lehrbüchern publiziert ([DoDr], [HiLi], [JuZi], [MüMe], [Sel], [Sta], [TLS], [Vaj], [ZimW] etc.). Auch für auf diese Methoden aufbauende spezielle Einsatzgebiete aus dem Bauwesen existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen ([Z-GLT], [Z-LaMa], [Z-Mai], [Z-Pee], [Z-Sta]). Dennoch ist die Kenntnis dieser Lösungsalgorithmen bei den planenden Ingenieuren im Bauwesen oftmals nicht vorhanden. Auch kann häufig eine Optimierung nicht vorgenommen werden, da entweder der zugrunde liegende Algorithmus dem Ingenieur gänzlich unbekannt ist oder für die Lösung keine entsprechende Softwareunterstützung vorliegt und damit der Optimierungsprozeß insgesamt zu zeitaufwendig wird.

Im folgenden sind einige dieser typischen Probleme, die insbesondere in der Arbeitsvorbereitung auftreten, zusammengestellt worden.

#### Mischungsprobleme

Mischungsprobleme treten auf, wenn Ausgangsstoffe mit unterschiedlichen Mengen an Bestandteilen oder unterschiedlichen Eigenschaften zu einem Endprodukt zusammengestellt werden sollen, welches bestimmte Mengen an eben diesen Bestandteilen oder Eigenschaften aufweisen soll. Das Endprodukt ist in den meisten Fällen, unter monetärer Zielsetzung, durch Beachtung einer Reihe einschränkender Restriktionen zusammenzustellen. Mischungsprobleme sind im großen Maße in stationären Fertigungsstätten zu finden.

Es handelt sich bei Mischungsproblemen um die wirtschaftlich und / oder technisch optimale Zusammensetzung (Mischungsverhältnis) verschiedener Komponenten.

#### Zuschnittprobleme (Verschnittminimierung)

Das Ziel der Lösung von Zuschnittproblemen ist die geeignete Anordnung aus- oder abzuschneidender Teile aus einem gegebenen Material mit definierten Abmessungen, wobei ein Minimum an Verschnitt anfallen soll. Das vorhandene "Rohmaterial" ist derart in verschiedene Längen bzw. Flächen zu zerschneiden, daß der Verschnitt minimiert wird. Man unterteilt weiter in eindimensionale (z.B. Bewehrungsseisen) und zweidimensionale (z.B. Baustahlmatten) Zuschnittprobleme; denkbar sind auch dreidimensionale Probleme.

Im Zuge einer mathematischen Lösung kann entweder der absolute Verschnitt minimiert werden (dafür muß eventuell mehr als die momentan benötigte Menge erzeugt und gelagert werden) oder der Verschnitt wird bei fest vorgegebener Menge minimiert.

Zuschnittprobleme treten in verschiedenen Produktionsprozessen auf; auch Verpackungsprobleme gehören zur Gruppe der Zuschnittprobleme.

### Transportprobleme

Beim klassischen Transportproblem geht es darum, eine beschränkte Menge eines Gutes von einer bestimmten Anzahl von Anbietern zu einer gewissen Anzahl von Nachfragern so zu transportieren, daß die entstehenden Transportkosten minimal werden. Transportprobleme behandeln demnach die Aufstellung eines optimalen Transportplanes.

### Zuordnungsprobleme

Das Zuordnungsproblem bildet ein Sonderproblem des Transportproblems. Beim Zuordnungsproblem werden, im Gegensatz zum Transportproblem, alle Angebots- und Bedarfsmengen gleich 1 gesetzt; des weiteren muß die Zahl der „Anbieter“ gleich der Zahl der „Nachfrager“ sein. Es geht darum, je ein Element einer Menge je einem Element einer anderen Menge zuzuordnen. Hierbei ist zu beachten, daß die Elemente eine unterschiedliche Eignung haben. Die Zuordnung ist nun so vorzunehmen, daß die Gesamteffizienz am größten wird. Dieses Problem tritt beispielsweise auf, wenn eine bestimmte Anzahl von Kandidaten bestmöglich einer identischen Anzahl offener Stellen zugeordnet werden soll.

### Produktionsprobleme

Bei Produktionsproblemen geht es darum, unter Beachtung einschränkender Restriktionen, ein optimales Produktionsprogramm für einen Betrieb oder Teilbetrieb zu finden. Als Zielsetzung wird meist die Maximierung des Gewinns oder die Minimierung entstehender Kosten definiert. Einschränkende Bedingungen über Kapazitäten von Anlagen, Lieferungen von Rohstoffen, Absatz der Produkte und vieles mehr beschränken die Produktion (wieviel, was, wie, wann, wo, womit soll produziert werden?).

Produktionsprobleme haben gerade im Alltag von Bauunternehmungen einen hohen Stellenwert [Z-Sel].

### Zuweisungsprobleme (Verteilungsprobleme)

Zuweisungsprobleme sind Probleme, bei denen verfügbare Einsatzstoffe (Rohmaterialien, Arbeitskräfte etc.) verschiedenen Verbrauchern (Maschinen, Projekten etc.) zugewiesen werden müssen. Die Zuweisung der Einsatzstoffe zu einem Verbraucher soll meist unter dem Gesichtspunkt der minimalen Kosten oder des maximalen Gewinns durchgeführt werden.

### Rundreiseprobleme (Traveling-Salesman-Probleme)

Bei dieser Problemstellung ist von einem bestimmten Ort aus eine Rundreise durch bestimmte andere Orte zurück zum Ausgangspunkt festzulegen. Gesucht ist die unter einer definierten Zielsetzung (geringste Länge, kürzeste Reisezeit etc.) optimale Route, wobei jeder Ort nur einmal aufgesucht werden darf. Dieses Problem erlangt beispielsweise bei der Tourenplanung besondere Bedeutung.

### 5.5.2 Optimierung durch Software-Tool OptimaAV V1.1

Alle im vorherigen Abschnitt beschriebenen Probleme, mit Ausnahme des Rundreiseproblems, haben eine gemeinsame Verbindung: Sie sind ausnahmslos durch den Einsatz der linearen Optimierung lösbar. So wurde auch die Anwendung des Simplex-Algorithmus auf Probleme dieser Art in einer Vielzahl von Veröffentlichungen bereits behandelt.

Eine relativ gute Verbreitung und Präsenz in der Fachliteratur führt jedoch keineswegs zu einer verstärkten Anwendung dieser Lösungsverfahren, da die wenigsten Bauingenieure während des Studiums mit Operations Research-Methoden im allgemeinen und dem Simplex-Algorithmus im besonderen vertraut gemacht werden. Aus diesem Grund wurde das Software-Tool OptimaAV entwickelt, da auf diese Weise für die zuvor angesprochenen Probleme der Arbeitsvorbereitung eine optimierte Lösung gefunden werden kann, ohne daß der Anwender mit dem Verfahren des Simplex-Algorithmus vertraut sein muß.

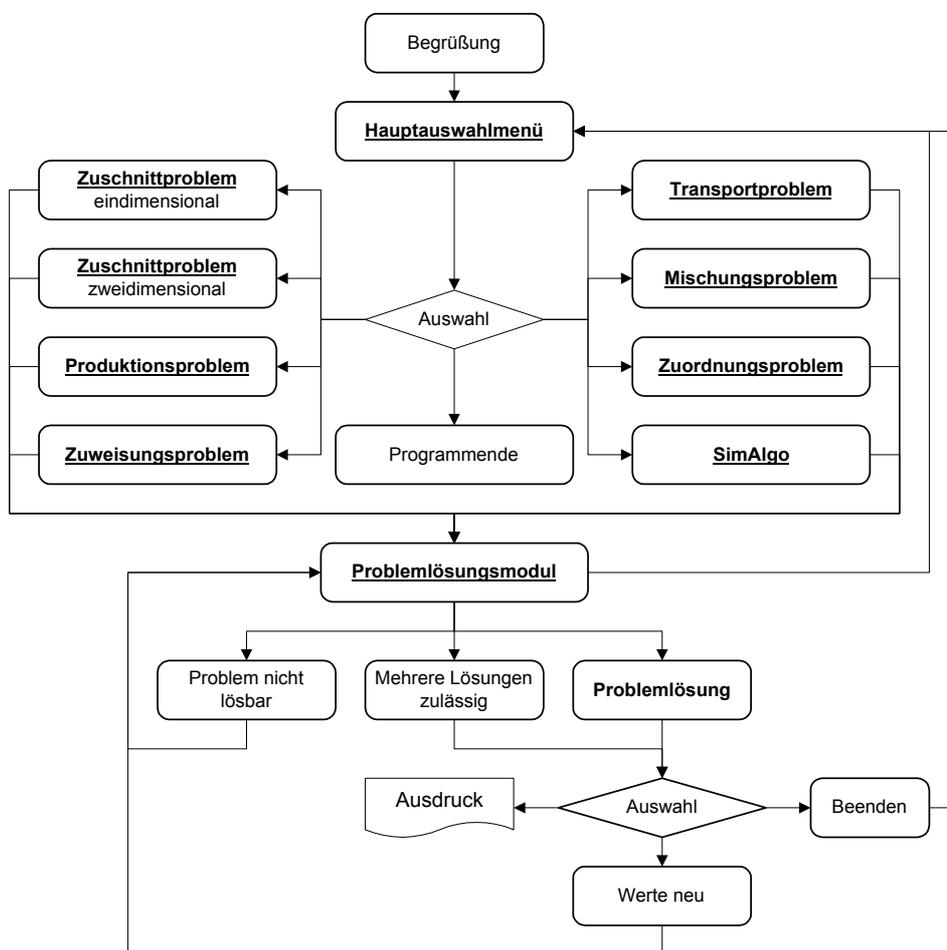


Abb. 108: Allgemeine Programmstruktur von OptimaAV

Die eigentliche Optimierung geschieht bei allen Problemarten mit einem auf der Simplex-Methode basierenden Lösungsalgorithmus. Um für den Anwender die Benutzung so einfach wie möglich zu gestalten, wurden für die verschiedenen Problemarten jeweils spezielle Eingabemasken entwickelt. Die allgemeine Programmstruktur, die für alle Problemarten Gültigkeit besitzt, wird aus Abb. 108 ersichtlich.

Für jede zu optimierende Problematik ist jedoch ein spezielles Lösungsmodul erforderlich. Aber auch diese verschiedenen Module besitzen eine problemunabhängige, übergeordnete Struktur. Diese übergeordnete Struktur sowie die problemspezifischen Anpassungen sind in Abb. 109 dargestellt.

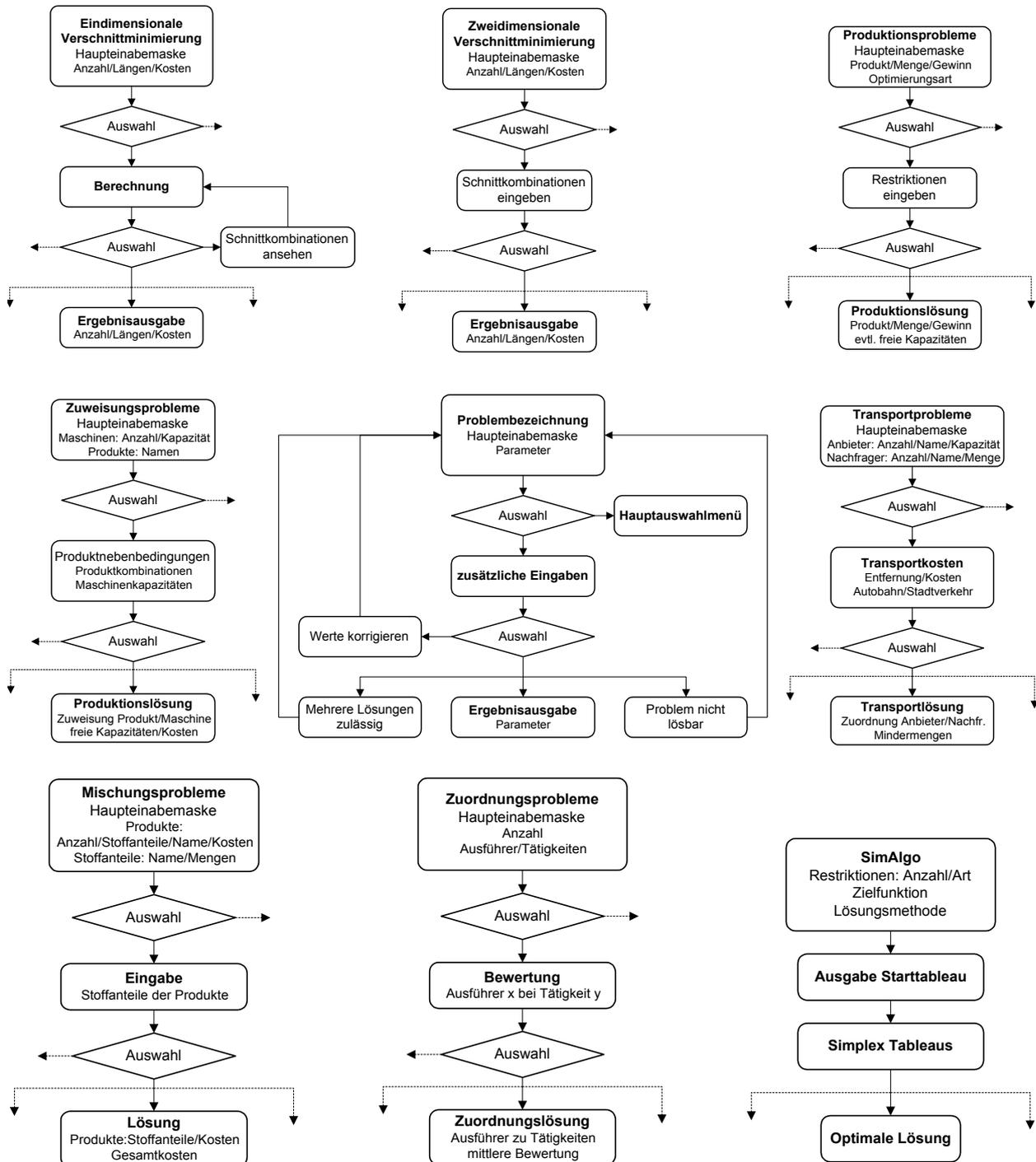


Abb. 109: Übergeordnete Lösungsstruktur (Problemlösungsmodul, mitte) und problemspezifische Lösungsstrukturen

In dem Begrüßungsbildschirm von OptimaAV kann der Anwender zwischen den verschiedenen Problemfeldern, die zusätzlich in einem separaten Fensterbereich kurz definiert werden, auswählen. Die Behandlung der unterschiedlichen Probleme wird im folgenden näher erläutert.

### Eindimensionale Zuschnittprobleme

Nachdem die Anzahl der benötigten unterschiedlichen Stäbe, deren Länge und Menge sowie die Gesamtlänge der ungeteilten Stäbe eingegeben wurde, werden zunächst automatisch alle möglichen Schnittkombinationen ermittelt und daraus sodann die optimalen Kombinationen ausgewählt.

### Zweidimensionale Zuschnittprobleme

Nachdem die Anzahl der benötigten unterschiedlichen Elemente, deren Länge, Breite und Menge sowie die Gesamtlänge und -breite der ungeteilten Elemente eingegeben wurde, müssen die möglichen Schnittkombinationen manuell ermittelt werden, bevor daraus die optimalen Kombinationen gefunden werden können.

### Produktionsprobleme

Nachdem die Anzahl der Produkte, deren Namen, deren Gewinn bzw. Kosten sowie die Art der Optimierung (kostenminimal oder ergebnismaximal) gewählt wurden, müssen die produktionsabhängigen Nebenbedingungen eingegeben werden, bevor das bestmögliche Produktionsprogramm ermittelt wird.

### Zuweisungsprobleme

Nachdem die Anzahl der Maschinen, deren Namen, deren maximale freien Kapazitäten und die Produktnamen eingegeben wurden, müssen anschließend die möglichen Kombinationen der einzelnen Produkte eingegeben werden, bevor die optimale Zuweisung erfolgt.

### Transportprobleme

Nachdem die Anzahl der Anbieter, deren Namen und Angebotsmenge sowie gegebenenfalls deren Kosten eingegeben wurden, muß dieses in gleicher Weise mit den Nachfragern geschehen. Danach müssen die Kosten pro km und die Entfernungen zwischen den einzelnen Standorten eingegeben werden, bevor die kostenoptimale Transportzuordnung erfolgt.

### Mischungsprobleme

Nachdem die Anzahl der Ausgangsprodukte, deren Namen und Kosten eingegeben wurden, müssen die Stoffanteile und deren Mengenanteile im Endprodukt eingegeben werden; auch vordefinierte Stoffanteile, wie etwa fertige Sieblinien, können ausgewählt werden. Danach wird die Zusammensetzung der Ausgangsprodukte eingegeben, bevor die Ausgabe der besten Mischungskombination erfolgt.

### Zuordnungsprobleme

Nachdem die Anzahl der zuzuordnenden Tätigkeiten ausgewählt wurde, sind die Elemente (Arbeiter, Maschinen etc.) und Tätigkeiten zu benennen. Danach erfolgt die Bewertung der einzelnen Beziehungen, bevor die optimale Zuordnung durch das Programm ausgegeben wird.

### Optimierung von Leitungsnetzen

Da sich auch Leitungsnetze mit Hilfe des Simplex-Algorithmus optimieren lassen, ist eine entsprechende Schaltfläche bereits im Hauptauswahlmenü vorhanden. Diese ist jedoch noch gesperrt, da der implementierte Algorithmus noch nicht tadellos funktioniert.

### Allgemeine lineare Optimierungsprobleme (Simplex-Algorithmus)

Hier kann direkt ein allgemeines lineares Optimierungsproblem mit Hilfe des Simplex-Algorithmus gelöst werden.

In Abb. 110 ist exemplarisch die Haupteingabemaske sowie die Maske mit den automatisch ermittelten Schnittkombinationen beim Problem der eindimensionalen Verschnittminimierung dargestellt.

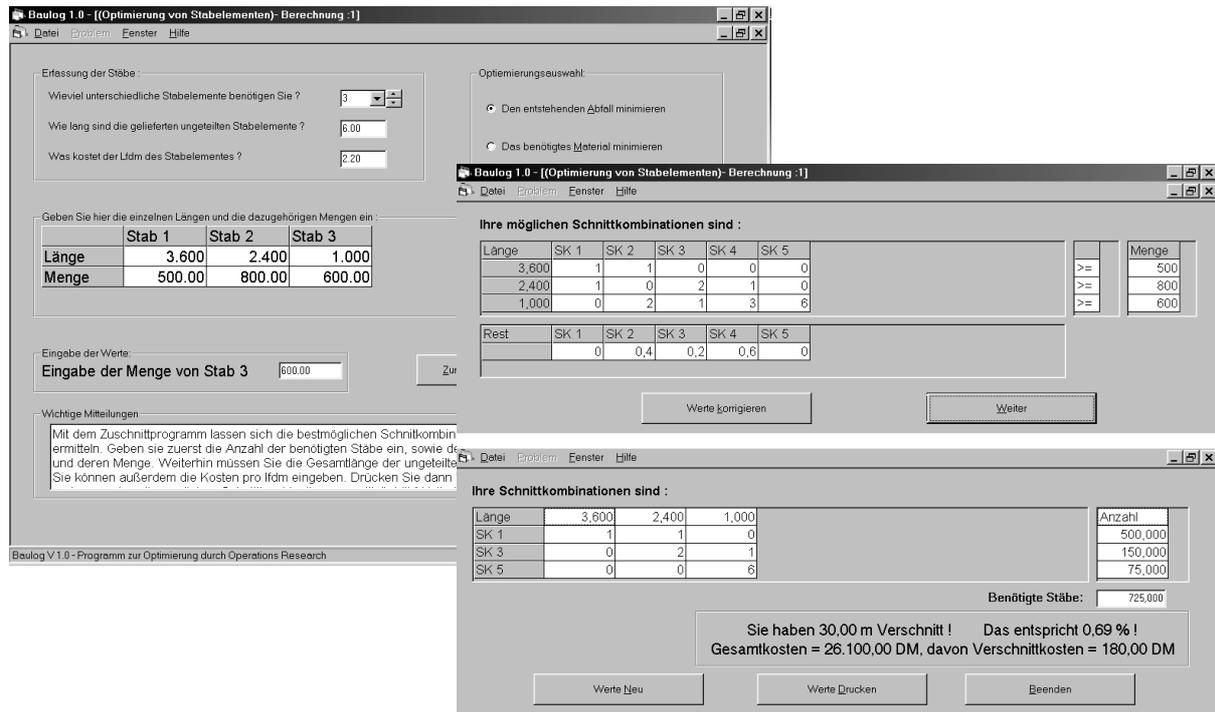


Abb. 110: Eingabemaske, mögliche Schnittkombinationen und Ausgabemaske zur Optimierung von Stabelementen

### 5.5.3 Optimierung des Rundreiseproblems durch Software-Tool OptimaX

OptimaX bietet ebenfalls die Möglichkeit, unterschiedliche Probleme mittels der vollständigen Enumeration optimal zu lösen. Dafür werden sämtliche zulässigen Lösungen ermittelt und anschließend aus den so gefundenen die optimale ausgewählt.

Grundsätzlich können mit OptimaX zwei verschiedene Problemtypen bearbeitet werden:

- Rundreiseprobleme (klassisches **Travelling-Salesman-Problem**)
- Frei formulierbare Probleme (Problemtyp „Optimieren einer **Zielfunktion**“)

Mit dem Programmteil TSP (**Travelling-Salesman-Problem**) des Software-Tools OptimaX lassen sich Rundreiseprobleme bis maximal 12 Stationen lösen, da bereits bei 12 Stationen die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten  $(12-1)! = 39,9$  Millionen beträgt. Für die Berechnung eines Rundreiseproblems mit 9 Orten benötigt OptimaX, bei einem 1 Ghz-Prozessor, ca. 26 Sekunden. Der Programmteil OZF soll hier nicht näher vertieft werden.

Eine Besonderheit des Software-Tools OptimaX besteht darin, daß das Programm in einigen Routinen auf Excel-Applikationen zurückgreift. Es ist daher zwingend erforderlich, daß Microsoft Excel in einer Version ab Office 95 installiert sein muß. MS-Excel muß jedoch nicht separat gestartet werden, der Zugriff bleibt für den Anwender im verborgenen.

Während der Eingabe der einzelnen Stationsnamen (optional, Bezeichnung wird ansonsten automatisch festgelegt), wird die Stationsmatrix aufgebaut und ständig aktualisiert. Zur Information wird die Anzahl der sich ergebenden Blätter angezeigt. Sobald alle Stationen eingegeben

wurden, müssen anschließend die Entfernungen in die Matrix eingetragen werden. Nach Wahl der Option „Symmetrische Matrix“ ist lediglich eine Hälfte der Matrix auszufüllen (Länge des Hin- und Rückweges sind identisch). Anschließend werden der Start- und Zielort aus der Liste der bisher eingegebenen Stationen ausgewählt, wobei Start- und Zielort nicht identisch sein müssen. Nach dem Start der Optimierung (Maximieren bzw. Minimieren) werden die optimalen Lösungen in ihrer Optimierungsreihenfolge im unteren Anzeigefeld aufgezeigt (siehe Abb. 112). Die optimalen Ergebnisse können, optional zusammen mit der Problemstellung, anschließend ausgedruckt werden. Eingegebene Probleme können gespeichert und später, bei Bedarf, wieder geladen werden.

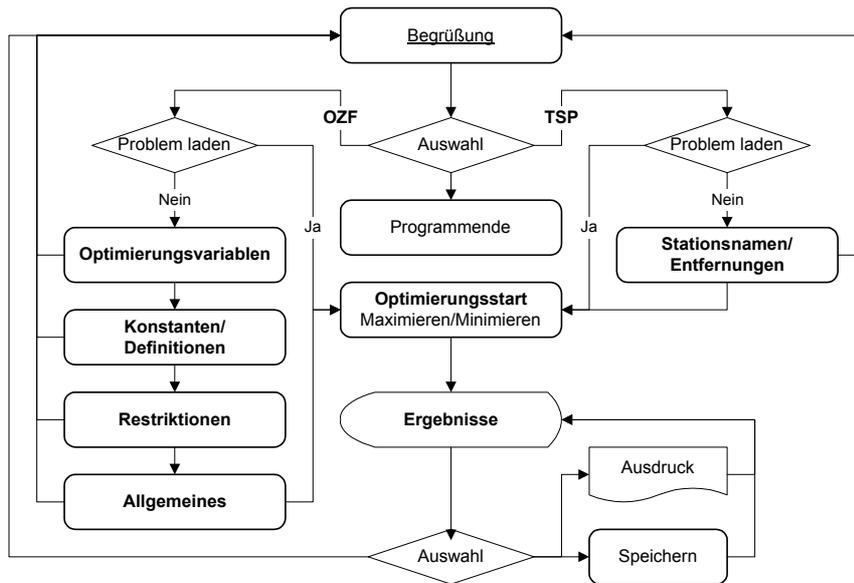


Abb. 111: Allgemeine Programmstruktur von Optimax

Travelling-Salesman-Problem > C:\Eigene Dateien\Projekte\Projekt IV\Optimax\Beispiele\Baustellenanfahrt.TSP

Optimierungseinheit: Kilometer    Anzahl Blätter: 24     Symmetrische Matrix

\ nach von\	Bauhof	Baustelle 1	Baustelle 2	Baustelle 3	Baustelle 4
Bauhof	XXXXXXXX	36	48	76	34
Baustelle 1	36	XXXXXXXX	42	111	70
Baustelle 2	48	42	XXXXXXXX	118	73
Baustelle 3	76	111	118	XXXXXXXX	45
Baustelle 4	34	70	73	45	XXXXXXXX

Von 7 nach 2 10 Kilometer

Optimale Routen (minimiert)

- Bauhof - Baustelle 3 - Baustelle 4 - Baustelle 2 - Baustelle 1 - Bauhof : 272 Kilometer
- Bauhof - Baustelle 1 - Baustelle 2 - Baustelle 4 - Baustelle 3 - Bauhof : 272 Kilometer
- Bauhof - Baustelle 4 - Baustelle 3 - Baustelle 2 - Baustelle 1 - Bauhof : 275 Kilometer
- Bauhof - Baustelle 1 - Baustelle 2 - Baustelle 3 - Baustelle 4 - Bauhof : 275 Kilometer
- Bauhof - Baustelle 4 - Baustelle 3 - Baustelle 1 - Baustelle 2 - Bauhof : 280 Kilometer

Abb. 112: Haupteingabemaske bei TSP

## 5.6 Aussichtsreiche weitere Anwendungsgebiete

Die Ablauf- und Terminplanung, ein weiterer wesentlicher Teilbereich der Arbeitsvorbereitung, wurde ebenfalls im Rahmen dieser Dissertation untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß derzeit in der Praxis nahezu ausschließlich Netzpläne mit festen Vorgangsdauern verwendet und dabei stochastische Gesichtspunkte außer acht gelassen werden, obwohl gerade Bauprojekte mit Störungen, Risiken und Unsicherheiten belegt sind, die für den Baustellenablauf von besonderer Bedeutung sind. Daher wurde ein Verbesserungsansatz auf Grundlage von Fuzzy-Methoden entwickelt. In Kombination mit den Regeln der Netzplantechnik, ergibt sich hiermit ein neues Instrument, wodurch Unschärfen, Risiken und Störungen bereits in der Ablaufplanung aufgezeigt und der mathematischen Berechenbarkeit zugänglich gemacht werden können.

Damit diese theoretischen Ansätze effektiver umgesetzt werden können, wurde im Rahmen der Forschung das Software-Tool Stochprojekt entwickelt. Dieses ermöglicht, mit unscharfem, durch umgangssprachliche Beschreibungen charakterisiertem, Prozeßwissen mathematisch umzugehen. Mit dem Tool Stochprojekt können die mit der Projektplanungssoftware „MS-Project“ erstellten deterministischen Bauablaufplanungen dahingehend erweitert werden, daß auch stochastische Einflüsse Berücksichtigung finden. Nach dem Erstellen einer Bauablaufplanung mit MS-Project, kann die entsprechende Datei in Stochproject eingelesen werden. Hierdurch können nun für jeden Vorgang beliebig viele unscharfe Ereignisse, die zu einer Verkürzung oder Verzögerung des Ablaufes führen, formuliert und hinsichtlich ihrer Dauer und der zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit in den Kategorien „hoch“, „eher hoch“, „eher niedrig“ und „niedrig“ eingeordnet werden. Anschließend wird die Dauer der einzelnen Vorgänge, auf Grundlage der zuvor angegebenen unscharfen Ereignisse, durch die Software neu ermittelt. Dieses überarbeitete Projekt kann dann abschließend wieder in MS-Project importiert werden.

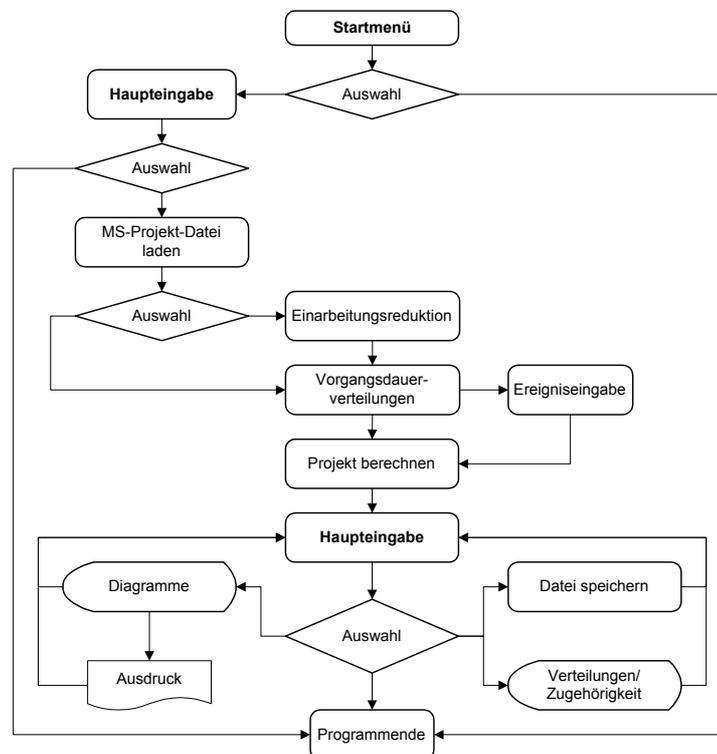


Abb. 113: Allgemeine Programmstruktur von Stochprojekt

In der nur begrenzt zur Verfügung gestandenen Zeit für diese Forschungsmaßnahmen konnte der weitreichende Themenkomplex der Baulogistik bislang nur eingeschränkt untersucht werden. Es hat sich jedoch gezeigt, daß gerade im Bereich der Baulogistik die Wettbewerbsfähigkeit von Bauunternehmungen noch erheblich gesteigert werden könnte, da Verbesserungsmöglichkeiten bislang nahezu unbeachtet geblieben sind [Zig]. Aufgabe der Baulogistik ist die Versorgung der Baustellen durch Planen, Ausführen und Kontrollieren von Materialbewegungen mit dem richtigen Material, in der richtigen Qualität und Quantität, zur richtigen Zeit am richtigen Ort sowie zu minimalen Kosten [Zig].

Das Bauwesen weist insgesamt viele verschiedene, logistische Anforderungen und Problemstellungen auf. Daher sollte es in verschiedene Teilgebiete aufgegliedert werden. Der Überbegriff der Baulogistik läßt sich weiter unterteilen in Baustellenlogistik, Baustofflogistik und Logistik in Fertigteilwerken.

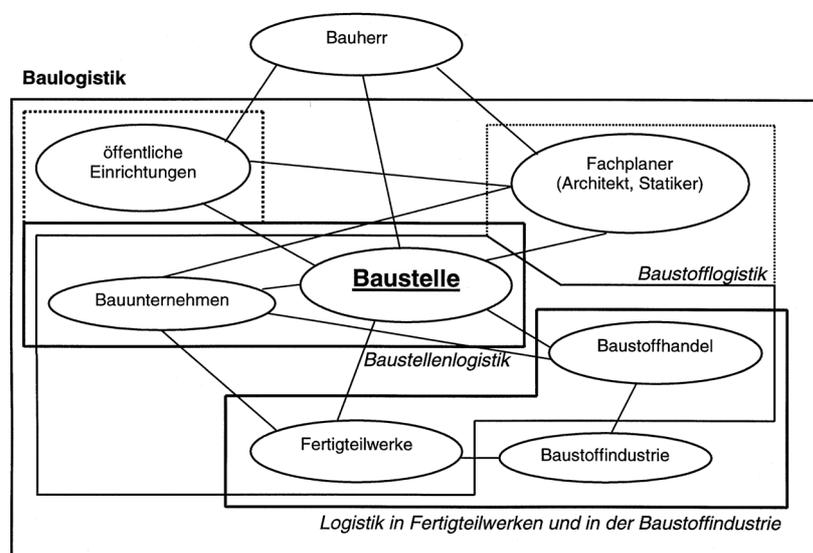


Abb. 114: Logistische Beziehungen im Zusammenhang mit der Baustelle [D-ThBe]

In jedem dieser drei Bereiche können wiederum Probleme entstehen, die im Zusammenhang mit den Teilbereichen Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik stehen und damit unterschiedliche logistische Anforderungen aufweisen. Da diese verschiedenartigen Zielsetzungen in der Regel mehrere Abteilungen einer Unternehmung berühren, sollte ein bereichsübergreifendes Logistikkonzept erstellt werden, das eine optimierte Gesamtlösung liefert. Auch bei der Umsetzung von Logistikkonzepten ist durch die Methoden des Operations Research eine hervorragende Unterstützung in der Durchführung sichergestellt. Auch hier geht es letztendlich darum, mit Hilfe des Logistikkonzeptes den optimalen wirtschaftlichen Nutzen für das Unternehmen zu erzielen. So konnten im Rahmen der Forschung bereits für eine Vielzahl logistischer Probleme passende Optimierungsalgorithmen aus dem Bereich des Operations Research gefunden werden. Viele dieser Methoden haben sich mittlerweile mehr oder weniger etabliert (Netzplantechnik zur Optimierung des Bauablaufes, Nutzwertanalyse zur Unterstützung der Bauverfahrensauswahl etc.), aber auch für eine ganze Reihe weiterer Probleme bieten die Methoden der mathematischen Optimierung das Rüstzeug, die gestellten Aufgaben effektiv zu lösen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben die eingangs aufgestellte These gefestigt, daß die Methoden des Operations Research hervorragend dafür prädestiniert sind, geeignete Problemgruppen sowohl in der Planung als auch Ausführung von Bauwerken einer optimalen Lösung zuzuführen. Obwohl die Einsatzmöglichkeiten der mathematischen Optimierung gerade in den 70er und 80er Jahren besonders intensiv untersucht wurden, sind zahlreiche erfolgversprechende Lösungsansätze nicht weiter verfolgt worden. Nur wenige interessante Ansätze wurden in der Praxis umgesetzt. Bedingt durch die enorm gestiegene Rechnerleistung und Verbreitung von Personalcomputern bieten sich gerade heute Lösungsansätze aus dem Bereich des Operations Research mehr denn je an. Es wäre daher sinnvoll, die Anwendung von Operations Research-Methoden in bezug auf das Bauwesen weiter zu untersuchen, um sie, nach Anpassung der entsprechenden Algorithmen, auch hier endlich verstärkt einsetzen zu können.

Durch diese Dissertation wurde gezeigt, daß unter Berücksichtigung rein wirtschaftlicher Gesichtspunkte, bei Beton-, Stahl- und Holzbiegeträgern (Unterzüge), Holzbalkendecken, Pfettendächern und Wärmedämmmaßnahmen erhebliche Einsparungen realisiert werden können. Auch in der Arbeitsvorbereitung von Baumaßnahmen, insbesondere bei der Baustelleneinrichtungsplanung, ist dies gelungen.

Die durchgeführten Untersuchungen erfolgten ausschließlich im Bereich der Konstruktions- und Fertigungstechnik. Es wurden keine vertiefenden Recherchen in den Bereichen Wasserbau, Verkehrs- und Abfalltechnik durchgeführt, obwohl auch hier aussichtsreiche Artikel recherchiert werden konnten. Hinsichtlich der Verwendung von mathematischen Optimierungsmethoden in der Planung und Ausführung von Bauwerken wurden umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt, die sich in erster Linie auf Literatur aus dem deutschsprachigen Raum konzentrierten. Die näheren Untersuchungen der Anwendungsmöglichkeiten des Operations Research erfolgten sowohl in der Tragwerksplanung als auch in der Arbeitsvorbereitung, wodurch sich der zur Verfügung gestandene zeitliche Rahmen immens verengte. Daher konnten aus Zeitgründen noch nicht einmal alle aussichtsreichen Ansätze der gesichteten Literatur weiter vertieft werden.

Aus diesen Gründen wäre es ratsam, die Forschungen im Bereich der erfolgversprechenden Ansätze fortzuführen und zusätzlich die Literaturrecherche auf den englischsprachigen Raum auszudehnen. Die Verwendung von Lösungsalgorithmen sollte auch nicht auf die verbreiteten Operations Research-Methoden beschränkt bleiben, vielmehr sollten verstärkt „neuere“ Verfahren, z.B. Fuzzy Logic, Evolutionsstrategien etc., in bezug auf ihre Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen hin untersucht werden.

Die Untersuchungen bezüglich der Einsatzmöglichkeiten von Operations Research-Methoden in der Tragwerksplanung haben gezeigt, daß gerade im Bereich des Wohnungsbaus noch ein sehr großes Einsparungspotential vorhanden ist. Aufgrund der sehr großen Zahl von Ausführungsmöglichkeiten ist es gerade in der Tragwerksplanung unumgänglich, sich solcher Hilfsmittel zu bedienen, strebt man eine ökonomisch optimale Gebäudeplanung an. Jedoch wies Lesniak [Les] bereits im Jahr 1970 darauf hin, daß es nicht genügt, nur die Kosten oder den Mate-

rialverbrauch zu minimieren, sondern daß unbedingt die Kosten für das gesamte Bauwerk betrachtet werden müssen. So kann beispielsweise ein gewichtsoptimierter Längsträger einer Eisenbahnbrücke, infolge seiner großen Bauhöhe, einen sehr hohen Gesamtstahlverbrauch nach sich ziehen.

Eine Verbesserung der Konstruktion in wirtschaftlicher Hinsicht ist in den meisten Fällen für den Tragwerksplaner nicht lukrativ, da der mit der Optimierung verbundene Mehraufwand nur in seltenen Fällen vergütet wird. Da man dem Entwurf eines Bauwerks nur bedingt eine Optimierung hinsichtlich der Kosten ansehen kann und das Einsparungspotential in einer Ausschreibung deshalb oft nicht berücksichtigt wird, wirkt es sich daher nicht oder nur sehr gering auf die späteren Baukosten aus. Hier sollte zukünftig ein System eingeführt werden, das den Mehraufwand dem sich um eine Kostenreduzierung bemühenden Tragwerksplaner honoriert. So sollte verstärkt von dem wünschenswerten Ansatz Gebrauch gemacht werden, dem Tragwerksplaner einen zuvor vereinbarten Prozentsatz der insgesamt erzielten Einsparungen zu gewähren. Ebenso sollte weiter die Bildung von Bauteams forciert werden (siehe auch Kapitel 1.2). Diese Integration der Tragwerksplanung in den Entwurfsprozeß bedeutet die frühzeitige Beschäftigung mit der tragenden Struktur.

Da die Kosten eine bedeutende Entscheidungsvariable darstellen, ist es wünschenswert, über Kostentransparenz, hinsichtlich der verschiedenen Möglichkeiten der Tragwerksausführung zu verfügen und sich einen Überblick über kostenoptimale Ausführungsmöglichkeiten zu verschaffen. Um zu kostenoptimalen Konstruktionen zu gelangen, sollte der gesamte Planungs- und Vergabeprozess eines Bauprojektes als „integrierter Prozeß“ verstanden und durchgeführt werden. Wird eine frühe Zusammenarbeit zwischen allen beteiligten Planern und dem ausführenden Unternehmer erreicht, so können von Beginn an, mit individuellen Kostenansätzen des Unternehmers, kostenoptimale Lösungen angestrebt werden. Zur Bewertung der verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten und als Diskussionsgrundlage für die Beteiligten sollten dann mathematische Optimierungsalgorithmen aus dem Bereich des Operations Research eingesetzt werden.

Die entwickelten Software-Tools können auch nach Einführung der neuen europäischen Währung EURO [€] weiterhin verwendet werden, da keine Preise fest in die Programme implementiert wurden. Bei der Verwendung ab dem Jahr 2002 wird lediglich die ab diesem Zeitpunkt falsche Währung [DM] im Ausdruck aufgeführt. Dieses Manko soll jedoch in absehbarer Zeit durch eine Überarbeitung des Quellcodes behoben werden. In der Bauteildatenbank für das Tool OptimaW müssen dagegen alle angegebenen Preise vom Anwender durch den offiziellen Umrechnungsfaktor ( $1 \text{ EUR} = 1,95583 \text{ DM}$ ) dividiert werden. Diese Arbeit kann jedoch, weitgehend automatisiert, mit Hilfe einer Tabellenkalkulation durchgeführt werden; die neu berechneten Preise können abschließend in die Datenbank importiert werden

Bei allen Entscheidungen langfristiger Natur darf man sich nicht mit nur einer auf Schätzung basierenden Lösung zufrieden geben. Die Methoden des Operations Research stellen die benötigten mathematischen Algorithmen zur Lösung der vorgenannten Probleme sowohl in der Tragwerksplanung als auch in der Arbeitsvorbereitung zur Verfügung. Durch Operations Research ist es möglich, unter Beachtung aller einschränkenden Bedingungen, aus einer unüber-

schaubaren Menge zulässiger Lösungen die optimale Lösung zu finden. Daher sollte ein derartiges Verfahren ein fester Bestandteil der täglichen Ingenieurpraxis sein.

Diese Arbeit soll mit einem Zitat von Seeling [Se] schließen:

„Optimismus (für eine größere Anwendungsbreite) ist alleine schon deshalb angebracht, weil es keine gleichwertigen Alternativen zum Operations Research gibt“.

## 7 Literaturverzeichnis

### 7.1 Monographien

- [AAWB] Arbeitskreis für Arbeitskunde der Wirtschaftsvereinigung Bauindustrie e.V. Nordrhein Westfalen: Der Ingenieur im Baubetrieb, Wibau-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1979
- [Aig] H. Aigner: Lösung von Optimierungsproblemen im Bauwesen mit Hilfe von Zufallsstrategien, Promotion an der Fakultät für Architektur der TU München, 1980
- [ARH] Arbeitszeit Richtwerte Hochbau, Zeittechnik-Verlag GmbH, Neu-Isenburg, 1982
- [AUM] Edition AUM GmbH: sirAdos - Baudaten für Kostenplanung und Ausschreibung, Dachau 1998
- [Bau] H. Bauer: Baubetrieb 2 - Bauablauf, Kosten, Störungen, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1994
- [BöNe] P. Böttcher, H. Neuenhagen: Baustelleneinrichtung, Bauverlag, Wiesbaden-Berlin, 1997
- [BBKO] E. Bubner, B. Baier, R. Koenen, J. Oelbermann: Minimalkonstruktionen - Beiträge zum Symposium Minimalkonstruktionen der Universität Gh Essen, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1977
- [BeEb] M. Becker, M. Ebner: Planen und Entscheiden mit Operations Research, 4. Auflage, Heyne Verlag, München 1986
- [BFHH] W. Brennecke, H. Folkerts, F. Haferland, F. Hart: Dachatlas-Geneigte Dächer, Institut für internationale Architektur-Dokumentationen, München, 1975
- [Böt] P. Böttcher: Rechnergestützte Arbeitsvorbereitung in Baubetrieben, Dissertation im Fachgebiet Fertigungstechnik, Universität Gh Kassel, 1994
- [Brs] W. Brüssel: Baubetrieb von A - Z, 1. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [Bre] W. Brennecke: Dachtragwerke – optimierte Konstruktionen für geneigte Dächer, Dissertation an der Fakultät für Architektur, Universität Karlsruhe, 1977
- [BSS] H. Baier, C. Seeßelberg, B. Specht: Optimierung in der Strukturmechanik, 1. Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig-Wiesbaden, 1994
- [CoWe] L. Collatz, W. Wetterling: Optimierungsaufgaben, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1971
- [Dan] G.B. Dantzig: Lineare Programmierung und Erweiterungen, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1966

- [Die] K. Dierks: Elektronische Datenverarbeitung in der Architektur, Schriftenreihe „Entwerfen und Konstruieren“, 1. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1979
- [DoDr] W. Domschke, A. Drexl: Einführung in Operations Research, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1995
- [DüKle] W. Dürr, K. Kleibohm: Operations Research - Lineare Modelle und ihre Anwendung, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München-Wien, 1992
- [DiHo] N.S. Dimitrov, H.F. Hoyer: Optimierung der Tragwerke, Forschungsbericht 8 aus dem Institut für Tragkonstruktionen und konstrukt. Entwerfen, Universität Stuttgart, 1982
- [DrSp] G. Drees, D. Spranz: Handbuch der Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1976
- [Eil] T. Ellinger: Operations Research - Eine Einführung, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1985
- [Fig] K. Figel: Optimieren beim Konstruieren, 1. Auflage, Verlag Carl Hanser, München-Wien, 1988
- [FKNW2] O. Frick, Knöll, F. Neumann, U. Weinbrenner: Baukonstruktionslehre Teil 2, 29. Auflage, B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1993
- [Fra] V. Franz: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen, Dissertation im Fachgebiet Fertigungstechnik, Universität Gh Kassel, 1989
- [FrSch1] V. Franz, H. Schopbach: Arbeitstechnologie I - Grundlagen des Baubetriebes, Vorlesungsskript des FG Arbeitstechnologie, Universität Gh Kassel, 2. Auflage, 2000
- [FrSch3] V. Franz, H. Schopbach: Arbeitstechnologie III - Verfahrensauswahl und Grundlagen industrieller Fertigung im Baubetrieb, Vorlesungsskript des FG Arbeitstechnologie, Universität Gh Kassel, 2. Auflage, 1998
- [FrSch5] V. Franz, H. Schopbach: Arbeitstechnologie V - Fertigungssteuerung / Takt- und Fließverfahren in der Arbeitstechnologie, Vorlesungsskript des FG Arbeitstechnologie, Universität Gh Kassel, 1. Auflage, 1997
- [FrSch6] V. Franz, H. Schopbach: Arbeitstechnologie VI - Grundlagen der Optimierung, Vorlesungsskript des FG Arbeitstechnologie, Universität Gh Kassel, 2. Auflage, 2000
- [FrSch7] V. Franz, H. Schopbach: Arbeitstechnologie VII - Simulationstechnik, Vorlesungsskript des FG Arbeitstechnologie, Universität Gh Kassel, 1. Auflage, 1998
- [GeWa] P. Gessner, H. Wacker: Dynamische Optimierung; Einführung - Modelle - Computerprogramme, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1972

- [HH231] Holzbau Handbuch, Reihe 2: Tragwerksplanung, Teil 3: Dachbauteile, Folge 1: Berechnungsgrundlagen Schalung und Lattung, Informationsdienst Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz, Düsseldorf, 1993
- [HH232] Holzbau Handbuch, Reihe 2: Tragwerksplanung, Teil 3: Dachbauteile, Folge 2: Hausdächer, Informationsdienst Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz, Düsseldorf, 1993
- [Har] D. Hartmann: Zur Systematik und Methodik in der Tragwerksoptimierung, Habilitationsschrift der Abt. Bauwesen an der Universität Dortmund, 1978
- [Hari] R. Harich: Bemessung von Raumfachwerken bezüglich ihrer Grenztragfähigkeit mit Hilfe der mathematischen Optimierung, Dissertation, TH Karlsruhe, 1989
- [HiLi] F.S. Hillier, G.J. Lieberman: Operations Research - Einführung, 4. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München- Wien, 1988
- [Hup] P. Hupfer: Optimierung von Baukonstruktionen, 1. Auflage, B. G. Teubner Verlag, Berlin, 1970
- [Jun] D. Jungnickel: Graphen, Netzwerke und Algorithmen, 2. Auflage, BI Wissenschaftsverlag, Mannheim-Wien-Zürich, 1990
- [JuZi] W. Jurecka, H.-J. Zimmermann: Operations Research im Bauwesen, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1972
- [Kasa] Kalksandstein - Kostenbewußtes Bauen, Tagungshandbuch zur Vortragsreihe, 1997
- [KdT] Kammer der Technik: Technische Beispiele zur rechnergestützten Optimierung, Broschüre, 1973
- [Keil] W. Keil: Investitionsplanung in der Bauindustrie, Vorlesungsunterlagen zur Unternehmensplanung, FG Baubetriebswirtschaft, Universität Gh Kassel, 1995
- [Küh] G. Kühn: Handbuch Baubetrieb - Organisation, Betrieb, Maschinen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [Law] M. Lawo: Optimierung im konstruktiven Ingenieurbau, 1. Auflage, Vieweg-Verlag Braunschweig, 1987
- [Les] Z. Lesniak: Methoden der Optimierung von Konstruktionen unter Benutzung von Rechenautomaten, 1. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München-Düsseldorf, 1970
- [Lip] W. Lipp: Ein Verfahren zur optimalen Dimensionierung allgemeiner Fachwerkstrukturen und ebener Rahmentragwerke, Mitteilung Nr. 76-12 des Institutes für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1976

- [MüMe] H. Müller-Merbach: Operations Research-Methoden und Modelle der Optimalplanung, 3. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 1973
- [MüWa] H. Müller, H.-D. Walther: Automatisierte Projektierung, 2. Lehrbrief, Tragwerksoptimierung, Technische Universität Dresden, Sektion Bauingenieurwesen, 1979
- [Pap] M. Papageorgiou: Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung, 2. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München-Wien, 1996
- [Pit] G. Pittioni: Optimierung von Konstruktionsabmessungen unter Heranziehung eines mathematischen Verfahrens, Dissertation, TU München, 1977
- [Plü] K. Plümecke: Preisermittlung für Bauarbeiten, 24. Auflage, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1995
- [Rei] O. Reichert: Netzplantechnik, Vieweg Verlag, Braunschweig-Wiesbaden, 1994
- [Rih] G. Richter: Optimierung tragender Bauelemente, Dissertation, TH Karl-Marx-Stadt, 1974
- [RoWi] B. Rosenstengel, U. Winand: Petri-Netze - Eine anwendungsorientierte Einführung, 2. Auflage, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig-Wiesbaden, 1984
- [Rus] M. Russow: Gut geplant = besser verdient - Arbeitsvorbereitung im kleinen und mittleren Baubetrieb, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1988
- [Sas] H. Sassenberg: Zur Optimierung im Ingenieurbau am Beispiel aussteifender Bauteile hoher Gebäude, Dissertation im FB Konstr. Ingenieurbau der TH Darmstadt, 1984
- [Sasm] L. Sasmita: Ganzheitliche Optimierungsstrategie zur Lösung technischer Entwurfsaufgaben am Beispiel von Stabtragwerken, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 4: Bauingenieurwesen, Nr. 91, 1989
- [Sche] H. Schelle: Wirtschaftlichkeitsrechnungen für die Angebotsbewertung im Bauwesen, 1. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1992
- [Schm] H.T. Schmidt: Grundlagen der Baubetriebslehre, 2. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1980
- [Sel] R. Seeling: Systemtechnik und Optimalplanung, 2. Auflage, Selbstverlag, RWTH Aachen, 1986
- [Sel1] R. Seeling: Operations Research für Bauingenieure; Teil 1: Methoden der Sicherheitssituation, Selbstverlag, RWTH Aachen, 1975
- [Sel2] R. Seeling: Operations Research für Bauingenieure; Teil 2: Methoden der Risikosituation, Selbstverlag, RWTH Aachen, 1975

- [Sta] P. Stahlknecht: Operations Research, 2. überarbeitete Auflage, Verlag Friedrich Vieweg + Sohn, Braunschweig, 1970
- [Tau] M. Tauber: Zur Optimierung weitgespannter Geschoßdecken - Vergleich verschiedener Deckensysteme in konstruktiver und wirtschaftlicher Hinsicht, Dissertation, TH Darmstadt, 1986
- [Tha] P. Thanh: Optimierung von Stahlbetontragwerken - Ein Beitrag zur Anwendung der Optimierung im Bauwesen, Dissertation, TH Leipzig, 1985
- [TLS] J. Terno, R. Lindemann, G. Scheithauer: Zuschnittprobleme und ihre praktische Lösung, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1987
- [Ull] P. Ullmann: Ein Beitrag zur Optimierung von Stabwerken, Dissertation, TH Leipzig, 1973
- [Vaj] S. Vajda: Lineare Programmierung - Beispiele, Verlag industrielle Organisation, Zürich, 1960
- [Wei] F. Weinberg, M. Rössler, H.J. Lüthi, W. Altherr, T.M. Liebling, C.A. Zehnder, M. Füllemann: Operations Research im öffentlichen Dienst, Tagungsband, 1976
- [Wern] G. Werner, Holzbau Teil 2: Dach- und Hallentragwerke, 4. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 1993
- [Wer] H. Werner: Bauphysikalische Einflüsse auf den Heizenergieverbrauch, 1. Auflage, Erich Schmidt Verlag, Darmstadt, 1980
- [Wir] U. Wirth: Die Anwendung der dynamischen Optimierung beim Entwurf ebener Fachwerkstrukturen, Dissertation, TH Leipzig, 1985
- [Zho] M. Zhou: Beiträge zur Tragwerksoptimierung, Forschungsbericht Nr. 75 aus dem Fachbereich Bauwesen der Universität Gesamthochschule Essen, 1997
- [Zig] F.W. Ziegler: Methoden zum Verbessern der Logistik in mittelständischen Hochbauunternehmen, Dissertation, Bergische Universität Gh Wuppertal, 1997
- [ZimB] B. Zimmermann: Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur optimierten Auswahl von Wärmeschutzmaßnahmen für Wohngebäude im Hinblick auf den Energieverbrauch und die Gesamtkosten, Dissertation, RWTH Aachen, 1993
- [ZimW] W. Zimmermann: Operations Research - Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung, 5. Auflage, Oldenbourg Verlag, München-Wien, 1990

## 7.2 Verwendete Normen und Tabellenbücher

- DIN 276: Kosten im Hochbau
- DIN 1045: Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- DIN 1052-1: Holzbauwerke; Berechnung und Ausführung
- DIN 1055-1/3/4/5: Lastannahmen für Bauten
- DIN 4074: Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit
- DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau
- DIN 18800-1: Stahlbauten; Bemessung und Konstruktion
- DIN 18960: Baunutzungskosten von Hochbauten
- DIN 68365: Bauholz für Zimmerarbeiten
- DIN V ENV 1992-1 Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken
- WSchVo: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden  
(Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV), 1994
- EnEV: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik  
bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung-EnEV), Referentenentwurf, 1999
- VOB: Verdingungsordnung für Bauleistungen, Teil A - C, Ausgabe 1992,  
Ergänzungsband 1996, Beuth Verlag, Berlin-Köln, 1996
- M. Hoffmann, Kremer: Zahlentafeln für den Baubetrieb, 5. Auflage, BG Teubner Verlag,  
Stuttgart-Leipzig, 1999
- Holzbauwerke: Eine ausführliche Erläuterung zu DIN 1052 Teil 1 bis 3 der Ausgabe 1996,  
2. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich, 1997
- K.-J. Schneider: Bautabellen für Ingenieure, 12. Auflage, Werner-Verlag,  
Düsseldorf, 1996
- R. Wendehorst, H. Muth: Bautechnische Zahlentafeln, 25. Auflage, B.G. Teubner-Verlag,  
Stuttgart, 1991
- G. Lohmeyer: Stahlbetonbau, 3. Auflage, B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1983
- Leistungskalkulationen für das Bauhaupt- und Baunebengewerbe, REWI-Verlag,  
Waltenhofen, 2000

### 7.3 Zeitschriftenveröffentlichungen

- [Z-Ana] C. Anadere: Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen, Deutsche Bau-Zeitschrift, Heft 6, 1985
- [Z-Ble1] U. Blecken: Kostenoptimierung von Deckentragsystemen im Stahlbetonbau, Bauwirtschaft Heft 50, Dezember 1979
- [Z-Ble2] U. Blecken: Optimierung der Baustelleneinrichtung, BMT 3, März 1984
- [Z-BIGr] U. Blecken, F. Großmann: Statisch-konstruktive Optimierung der Gründung von Geschoßbauten, BMT 9, September 1983
- [Z-DaSH] Datenzentrale Schleswig Holstein, DZ- Direkt, 1998 (4/98)
- [Z-Dim] N. Dimitrov: Optimierung von Holztragwerken nach verschiedenen Nebenbedingungen, deutsche bauzeitung, Heft 7, 1978
- [Z-FrSch] V. Franz, H. Schopbach: Optimierung von Montageabläufen im Zuge der Baustelleneinrichtung - Simulation mit Petri- Netzen, BW Bauwirtschaft, Heft 5 und 6, 52. Jahrgang, 1998
- [Z-FrShL] V. Franz, H. Schopbach, S. zur Linde: Vergleichende Untersuchung verschiedener nicht kommerzieller Petri-Netz-Tools auf ihre Anwendungsmöglichkeiten zur Simulation im Bauwesen, Petri Net Newsletter 58, Gesellschaft für Informatik e.V., Mai 2000
- [Z-Füh] W. Führer: Optimierung von Balkenlagenanordnungen, bauen mit Holz, Heft 7, 1977
- [Z-GoLe] J. Golinski, Z. K. Lesniak: Optimales Entwerfen von Konstruktionen mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode, Bautechnik, September 1966
- [Z-GLT] H.J. Graetz, J. Lippert, B. Thomas: Das Reihenfolgeproblem beim Bau einer Talsperre, Bauingenieur 46, 1971
- [Z-HoOe] Hornung, R. K., Oesterle, E.: Grundlagen, Gleichungen und Kennwerte für die genaue Ermittlung der Betonstahlmengen von einachsigen gespannten Massivplattendecken auf Unterzügen, Beton- und Stahlbetonbau 12, 1978
- [Z-Hub] J. Huber: Die Optimierung von Betontragwerken nach dem Kostenkriterium, Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, 11. Jg., Heft 1, 1968
- [Z-HuUn] P. Hupfer, C. Untermann: Zur Anwendung der linearen Optimierung bei der Entwicklung einer Wohnungsbaureihe, Wiss. Zeitschrift der Hochschule f Bau., Weimar, 1983
- [Z-Kan] A. Kantelberg: Modellierung und Simulation von Bauprozessen auf der Basis gefärbter, stochastischer Petri-Netze, Wiss. Zeitschrift der TU Dresden, 43. Jg., Heft 5, 1994

- [Z-KJK] K. Kämpfe, R. Jarzombek, A. Kantelberg: Prognose von Bauabläufen - optimale Gestaltung von Maschinenkomplexen, BMT Baumaschine und Bautechnik , Heft 6, 1995
- [Z-KoSe] H. Kohl, U. Seifert : Arbeitsvorbereitung der Bauausführung mit dem PC, BMT 5, Oktober 1988
- [Z-LaMa] S. Lambropoulos, N. Manolopoulos: Ein integrierter rechnergestützter Algorithmus für die Kostenermittlung von Erdbauarbeiten, BMT 2, April 1990
- [Z-Len1] K. Lennerts: Expertensystem zur Optimierung der Baustelleneinrichtung, BMT 6, Dezember 1992
- [Z-Len2] K. Lennerts: Entwicklung eines hybriden: objektorientierten Systems zur optimierten Baustelleneinrichtungsplanung, Bautechnik 76: Heft 3 und 4, 1999
- [Z-Mai] B. Maidl: Optimierung des Bauablaufs beim Pipelinebau, Bauingenieur 44, Heft 5, 1969
- [Z-Mey1] G. Meyran: Die Baustelleneinrichtung als Zuordnungsproblem, BMT 6, Juni 1981
- [Z-Mey2] G. Meyran: Ein heuristisches Verfahren zur Planung einer Baustelleneinrichtung, Bauingenieur 57, 1982
- [Z-Neu] K. Neuweiler: Kostengünstiges Bauen, Vortrag bei der Tagung „Marktsegment des kostengünstigen Wohnungsbaues“ der Bau-Akademie Biberach, Fachverband Bau Württemberg e.V., Stuttgart, 1998
- [Z-OOA] K. Oswald, R. Oswald, R. Abel: Kostengünstiges Bauen durch die Anwendung ausländischer Bauweisen, Kurzfassung des Forschungsberichtes der Arbeitsgemeinschaft Bauforschung, BMBau, 1998
- [Z-Pee] S. Peer: Anwendung des dynamischen Programmierens bei fertigungsorientierter Bauablaufplanung, Bauingenieur 61, 1986
- [Z-Sel] R. Seeling: Operations Research im Baubetrieb, Bauingenieur 53, 1978
- [Z-Sta] P. Stahlknecht: Die Kohlen müssen stimmen, Der Volkswirt 11, März 1970
- [Z-Swy] H.H. Swyter: Probleme bei der Optimierung des Wärmeschutzes, Bundesbaublatt, Heft 12, 1979
- [Z-Thi] G. Thierauf: Optimale Bemessung und Optimierung im konstruktiven Ingenieurbau, Bauingenieur 64, 1989
- [Z-Thl] O. Thiel: Optimierung von Deckenkonstruktionen, Bauakademie DDR, 1978

[Z-Wei] D. Weitendorf: Funktionelle Optimierung ein- und mehrgeschossiger Mehrzweckgebäude, Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Bau., Weimar, 1977

#### **7.4 Weiterführende Zeitschriftenveröffentlichungen**

- D. Armon: Netzpläne mit stochastischen Dauern für die Praxis der Betriebsplanung, VDI-Zeitung 116, Nr. 13, 1974
- I. Diadovski: Ermittlung der Reihenfolge bei dem Bau von Kläranlagen mit Hilfe von Operations Research, Wasser und Boden, Heft 5, 1979
- H. Eschenauer, P.U. Post, M. Bremicker: Einsatz der Optimierungsprozedur SAPOP zur Auslegung von Bauteilkomponenten, Bauingenieur 63, 1988
- F. Ferscha: Querschnittsoptimierung biegesteifer: geschweißter Stahltragwerke, Stahlbau, Heft 10, 1987
- V. Franz: Steuerung und Kontrolle des Ablaufes der Ausführungsplanung durch Petri-Netze, Projekt Management, Heft 1, 1997
- V. Franz, M. Enkelmann: Simulation optimiert Pflastersteinproduktion, BFT Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 9, 1998
- K. Gertis: Kosten für die Verbesserung des Wärmeschutzes von Gebäuden/ Kosten-Nutzen-Analysen, Der Baubetriebsberater, Heft 31, 1978
- E. Hampe: Exakte Tragwerksberechnung - Faszination oder Illusion, Bauingenieur 66, 1991
- K. Hellmich: Evolutionsstrategie bei der Kostenminimierung von Schwergewichtsmauern, Bauingenieur 64, 1989
- L. Hempel, F. Werner: Zur Optimierung von Stahltragwerken in CAD-Systemen, Bauplanung-Bautechnik, 41. Jg., Heft 5, Mai 1987
- A. Hilbert, U. Bankhofer: OR-Verfahren in Produktion und Logistik, OR News, März 1998
- J. Huber: Wirtschaftlichere Betontragwerke durch Optimierung, Schweizerische Bauzeitung, 90. Jg., Heft 40, Okt. 1972
- C. Jarsky: Zur stochastischen Modellierung und Optimierung von Bauprozessen, Bauplanung-Bautechnik, 40. Jg., Heft 6, Juni 1986
- M.H. Kessel, D. Gnutzmann: ESYFEB – Expertensystem zur wissensbasierten Tragwerksplanung im Fertighausbau, Bauingenieur 68, 1993
- H. Körner: Beitrag zum Problem der Einarbeitung, Bauingenieur 57, 1982
- H. Körner: Zur Optimierung von Fließprozessen im Bauwesen, Bauingenieur 60, 1985

- W. Krüger: Dämmdicken- Optimierung mit Hilfe dynamischer Kalküle, Heizung, Lüftung, Klima-, Haustechnik, Nr. 9, 1981
- S. Krug: Bewertung von Bausystemen - Beitrag zur Nutzwertanalyse, Bauingenieur 47, 1972
- G. Kühn: Was ist die Systemtechnik: und was nutzt sie dem Bauingenieur?, BMT 5, Mai 1983
- U. Kutschbach: Fertigungsgerechtes Konstruieren im monolithischen Beton- und Stahlbetonbau (Konstr. Optimierung), Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Bauw., Leipzig, Heft 1 1976
- H. Lessmann, J. Mühlögger, M. Oberguggenberger: Netzplantechnik mit unscharfen Methoden, Bauingenieur 69, 1994
- H. Lessmann, A. Rieser, M. Gehri: Logistik in der Bauwirtschaft, Bauingenieur 69, 1994
- H. Naumann: Investieren Sie in die Zukunft des Bauens, Baugewerbe 7, 1997
- H.J. Neumann: Die Auswirkungen menschlicher Fehler und Irrtümer auf die Bauwerkszuverlässigkeit, Bauingenieur 55, 1980
- A.L. Nikiforiadis: Mathematische Methoden für die Ermittlung optimaler Reihenfolgen in Beton-Fertigteilverken, BFT, Heft 3, 1991
- E. Petzschmann: Bestimmung wirtschaftlicher Maschinenkombinationen im Erdbau unter Anwendung der EDV, Baumaschine und Bautechnik:, 21. Jg., Heft 3, März 1974
- G. Rehm, R. Eligehausen u.a.: Rationalisierung der Bewehrungstechnik, Bauingenieur 57, 1982
- S. Röhling, U. Kutschbach: Zur konstruktiven Optimierung von Bauteilen im monolithischen Stahlbetonbau, Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Bauw., Leipzig, Heft 3, 1976
- M. Rössler: Operations Research Methoden bei der Unternehmensfinanzierung, Industrielle Organisation 41, Heft 4, 1972
- F. Rudolf: Auswahl optimaler Dachbinder unter Anwendung der dynamischen Optimierung, Wiss. Zeitschrift der Hochschule Leipzig, Heft 3, 1971
- F. Rudolf: Automatengestützte Optimierung von Tragwerken, Bauplanung- Bautechnik, 35. Jg., Heft 5, Mai 1981
- S. Rudolph, B. Kröplin: Über die Natur des Bewertungsproblems von Konstruktionen, Bauingenieur 73, Mai 1998
- H. Schlick: Die Anwendung der Fuzzy Set Theory zur Entscheidungsfindung und Prozeßsteuerung im Bauingenieurwesen, BMT 5, Mai 1985
- H. Schlick: Vorhersagen und Planen mit unscharfen Methoden, BMT 4, August, 1988
- A. Schutte: Zur Optimierung der Bemessung verleimter Parallelträger aus Brettschichtholz, Bauingenieur 51, 1976
- L. Schweiger: Ein schnellrechnendes Verfahren zur optimalen Biegebemessung von beliebig geformten Stahlbetonquerschnitten, Bauingenieur 51, 1976

- R. Seeling: Warum Netzpläne stochastisch ausgewertet werden müssen,  
Bauingenieur 52, 1977
- R. Seeling: Denken Sie log(ist)isch, Baumarkt, September 1982
- K.B. Steinkuhl, K.D. Portmann: Anwendung der dynamischen Optimierung bei Bau-  
konstruktionen und beim Entwurf von Bauelementen, VDI-Zeitung 116, Nr. 13, Sept. 1974
- G. Thierauf: Traglastberechnung und -bemessung von Stockwerkrahmen mit Hilfe der  
linearen Programmierung, Der Stahlbau, Heft 1, 1975
- H. Werner, K. Gertis: Zur Wahl von Kalkulationsmethoden bei der Ermittlung der  
Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen, BMT 2, 1979
- H. Werner: Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Wärmedämm-Maßnahmen,  
Bauphysik, Heft 5, 1980
- M. Winkelmann: Realistische Bauablaufplanung durch Berücksichtigung stochastischer  
Einflüsse, Bauplanung-Bautechnik, 37. Jg., Heft 10, 1983
- G. Xiong: Schätzung der zeitlichen Änderungen der Baustellenabläufe mit  
Fuzzy-Methoden bei bekannten Störeinflüssen, Bautechnik 72, Heft 10, 1972

## 7.5 Im Zuge des Forschungsvorhabens entstandene Diplom- und Projektarbeiten

### Grundlagen

- [D-DiLo] D. Lohne: Der Einsatz linearer und nichtlinearer Optimierungsverfahren im Bauwesen, Diplom I 1998
- [D-FrMi] F. Michl: Anwendungsmöglichkeiten der Graphen- und Warteschlangentheorie sowie dynamischer, ganzzahliger und kombinatorischer Optimierungsmethoden im Bauwesen, Diplom I 1998
- [D-SzLi] S. zur Linde: Entwicklung eines EDV-gestützten Werkzeuges zur Analyse linearer Optimierungsprobleme im Bauwesen, Diplom II 1999

### Ansätze zur Kostensenkung im Wohnungsbau

- [D-KeWi] K. Wiegand: Analysierung von Kostensenkungsmaßnahmen im Wohnungsbau, Diplom I 1998
- [D-AnLo] A. Lotze: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Kellerbau bei Einfamilienhäusern, Diplom I 1998
- [D-MaHä] M. Hänsel: Konstruktions- und Kostenvergleich zwischen Holzrahmen-, Massiv- und Mischbauweise am Beispiel einer Reihenhaussiedlung, Diplom I 1999
- [D-DSch] D. Schedel: Operations Research- Methoden in der Gebäudeplanung, Projekt II 2000

### Optimierung der Gebäudekonstruktion

- [D-ChOs] C. Oster: Optimierung von Baukonstruktionen durch Einsatz von Operations Research-Methoden, Diplom I 1999
- [D-CoBi] C. Bieker: Optimierung in der Konstruktion durch Operations Research Methoden, Diplom II 1999
- [D-DaSh] D. Scholz: Energiebewußte Gebäudeplanung durch Einsatz von Operations Research Methoden, Diplom I 1999
- [D-KaSh] K. Schilde: Entwicklung eines EDV-Tools zur Optimierung von Unterzügen durch vollständige Enumeration, Projekt IV 1999
- [D-ChSo] C. Sommerfeld: Entwicklung von Excel-Formblättern für den Standsicherheitsnachweis bei Massiv- und Holzrahmenbaugebäuden, Projekt III 1999
- [D-ShWa] D. Schedel, W. A. Osmanzada: Vergleich und Bewertung verschiedener Deckenaufbauten, Projekt III 2000
- [D-MTvL] M. Thiele v. Lingen: Entwicklung eines EDV-gestützten Werkzeuges zur Kostenoptimierung von Dachtragwerken und Holzbalkenlagen, Diplom I 2000

- [D-JeUt] J. H. Utsch: Kostenoptimierung von Baukonstruktionen im Zuge der Bemessung unter besonderer Berücksichtigung von Operations Research- Methoden, Diplom II 2000
- [D-JuSt] J. Stein: Einsparungspotential im Wohnungsbau durch den Einsatz geeigneter Optimierungsmethoden, Diplom I 2000
- [D-RüDi] R. Dietrich: Analyse des Einsparungspotentials im Wohnungsbau durch den Einsatz geeigneter Optimierungsmethoden, Diplom I 2001
- [D-FrSh] F. Schüler: EDV-gestützte Optimierung von Wärmedämmmaßnahmen, Projekt IV, 2001

### Optimierung in der Arbeitsvorbereitung

- [D-AnSe] Annett Sebastian: Bauablaufplanung und Dokumentation für ein Doppelhaus in Holzrahmenbauweise mit dem Ziel der größtmöglichen Bauzeitminimierung, Diplom I 1998
- [D-PaSi] P. Simon: Optimierung der Baustelleneinrichtung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Operations Research Methoden, Diplom I 1999
- [D-GuKu] G. Kuhlmann: Erweiterung eines Projektmanagementprogrammes zur Unterstützung nicht deterministischer Bauablaufplanungen, Diplom II 2000
- [D-AnLo2] A. Lotze: Unterstützung der Arbeitsvorbereitung durch Erweiterung eines EDV-Tools zur Lösung linearer Probleme, Diplom II 2000
- [D-BeBö] T. Behnisch, T. Böttner: Software-Tool Optimax zur Unterstützung der vollständigen Enumeration, Projekt IV 2000
- [D-RiSh] R. Schneider: Berücksichtigung stochastischer Einflüsse bei der Bauablaufplanung eines realen Bauvorhabens, Projekt IV 2000
- [D-ThBe] T. Behnisch: Operations Research Methoden in der Bauleistik, Diplom I 1999

### Simulation

- [D-HoSh] H. Schopbach: Simulation einer Fertigteilmontage mit PrT-Netzen, Diplom II 1994
- [D-JoDe] J. Dedeker: Simulation von Montageabläufen im Betonfertigteilmontagebau, Diplom II 1995
- [D-OIPf] O. Pflüger: Optimierung der Montageabläufe mittels Netz-basierter Simulationsmodelle; Vergleich verschiedener Modellansätze, Diplom II 1998
- [D-SzLi2] S. zur Linde: Vergleich verschiedener Petri-Netz-Tools bzgl. der Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen, Projekt IV 1999
- [D-ReBü] R. Bücherl: Steuerung des Planlaufes bei ausführungsbegleitender Planung am Beispiel des UFA-Palastes in Kassel, Diplom II 1999

# **Schriftenreihe Bauwirtschaft der Universität Kassel**

Herausgeber: Institut für Bauwirtschaft

---

**I - Forschung**

**II - Lehre**

**III - Tagungen und Berichte**

**Im Institut für Bauwirtschaft sind bisher die folgenden Publikationen erschienen:**

<b>Pietschmann, Peter (1999)</b> Bauwerksentwicklung unter Einsatz einer IT-vernetzten Kooperation	19,00 €
<b>Hoffmann, Friedrich H. (2000)</b> Ungenutzte Potentiale in der Ablauf- und Fertigungsplanung im Betonbau	19,00 €
<b>Fricke, Jörg (2001):</b> Leistungsbild und Kalkulation des Generalunternehmers unter besonderer Berücksichtigung des GU-Zuschlages	19,00 €
<b>Perspektiven am Beginn des neuen Millenniums</b> Tagungsband zum wissenschaftlichen Symposium Bauwirtschaft 2000	15,00 €

Seit dem Wintersemester 1998/99 besteht an der Universität Kassel das Institut für Bauwirtschaft (IBW), das als interdisziplinäre wissenschaftliche Betriebseinheit von den Fachbereichen Architektur und Bauingenieurwesen getragen wird. Die Ausrichtung der Universität Kassel in Lehre und Forschung auf die Bedürfnisse der Praxis und die Anforderungen der Berufsfelder im Bauwesen erfordern eine enge Zusammenarbeit von Architekten, Bauingenieuren und Wirtschaftswissenschaftlern. Diesen Erfordernissen entspricht die Zielsetzung des IBW.

Weitere Informationen: [www.ibw-kassel.de](http://www.ibw-kassel.de)