

**Lehrstuhl für Statik  
der Technischen Universität München**

# **Ermittlung optimierter Stabwerkmodelle auf Basis des Kraftflusses als Anwendung plattformunabhängiger Prozesskopplung**

**Alexander Hörmann**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Ernst Rank

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. Gerhard H. Müller

Die Dissertation wurde am 21.11.2005 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 13.01.2006 angenommen.



Schriftenreihe des Lehrstuhls für Statik TU München

Band 6

**Alexander Hörmann**

**Ermittlung optimierter Stabwerkmodelle  
auf Basis des Kraftflusses als Anwendung  
plattformunabhängiger Prozesskopplung**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7090-2

ISSN 1860-1022

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

# **Ermittlung optimierter Stabwerkmodelle auf Basis des Kraftflusses als Anwendung plattformunabhängiger Prozesskopplung**

## **Zusammenfassung**

Die Arbeit beschreibt eine Methode zur automatisierten Generierung optimierter Stabwerkmodelle für scheibenartige Systeme, mit Hilfe der Kraftflussberechnung auf Basis einer linear-elastischen Spannungsermittlung.

Das Problem der Kompatibilität zwischen der kontinuierlichen Scheibe und dem beschreibenden, diskontinuierlichen Stabwerkmodell konnte durch die Minimierung der Differenzarbeit gelöst werden. Durch die damit verbundene Anpassung der Steifigkeitsverhältnisse kann auch der Kraftzustand der Scheibe durch das Stabwerk beschrieben werden.

Die Visualisierung des Kraftflusses dient damit nicht nur dem besseren Verständnis vom Tragverhalten komplexer, insbesondere statisch unbestimmter Systeme, sondern auch als Basis für eine wirtschaftliche Bemessung.

Die Umsetzung des Konzepts erfordert die Kombination unterschiedlicher Anwendungen. Die Verwendung von ausgereiften Softwarekomponenten ist eine effektive Methode, hohe Qualität bei geringer Entwicklungszeit zu gewährleisten. Das steigert nicht nur die Produktivität, sondern verringert insbesondere die zeitliche Verzögerung, bis Forschungsergebnisse Anwendung in der Praxis finden.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein Konzept für ein Softwaresystem erläutert, das eine effektive Kopplung von Prozessen in einem verteilten System ermöglicht. Unter Verwendung einer verallgemeinerten Kommunikationsschnittstelle werden bestehende Softwaremodule gekapselt und auf Basis eines Client-Server-Modells Daten untereinander ausgetauscht.

Die System- und Rechnerunabhängige Kopplung einer adaptiven Visualisierungsumgebung mit geeigneten Berechnungsmodulen ermöglicht die Umsetzung der beschriebenen Kraftflussberechnung.

Durch den zusätzlichen Einsatz eines Workflow-Management-Systems werden geeignete Module und Objekte, die auf beliebigen Rechnern verteilt sein können, zur Laufzeit miteinander verknüpft und gesteuert. Damit steht der schnellen Entwicklung von Spezialsoftware unter Verwendung ausgereifter Komponenten zur Lösung individueller Probleme nichts mehr im Wege.

## **Determination of optimized strut and tie models based on force flow as an application of platform independent remote process interfacing**

### **Abstract**

This thesis describes a new method for an automated determination of optimised strut and tie models. This is done by the determination of the force flow of plates based on a linear elastic calculation of stresses.

The problem of compatibility of deformation of a continuous plate and a strut and tie model could be answered by minimizing the strain energy of the differences of displacements. With the adapted truss stiffnesses the distribution of forces of the plate can be described as well.

The visualisation of force flow not only provides a better understanding of complex statically indetermined systems, but also is a basis for economic reinforcement.

The application of this concept needs a combination of different tools. Reuse of sophisticated software components is an effective way to ensure high quality and short developmental periods. This leads to higher efficiency and reduces the gap between research and the actual application in practice.

The second part of this thesis describes a general and effective concept for a software system, which allows processes within a distributed system to be linked. Using a general communication interface, existing software modules can be encapsulated, and data can be exchanged based on a client server model.

The open system interconnection of an adaptive visualisation tool and appropriate calculation modules enables the implementation of the above described method.

Additionally, a workflow management system can link and control appropriate modules and objects distributed on a computer network in runtime. This enables a rapid development of special software, consisting of sophisticated components, to solve customized problems.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner sechsjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Statik der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger für seine Unterstützung und fachliche Kompetenz sowie die wissenschaftliche Freiheit, die er mir für meine Forschungstätigkeit einräumte. Das von ihm geschaffene Umfeld bildete eine ideale Grundlage für diese Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Müller danke ich herzlich für die Übernahme des Koreferats. Sein aufrichtiges Interesse an meiner Arbeit hat mich sehr gefreut. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ernst Rank möchte ich für die bereitwillige Übernahme der Leitung der Prüfungskommission danken.

Bei meinen Kollegen am Lehrstuhl für Statik möchte ich mich für die offene und angenehme Atmosphäre bedanken, die nicht nur durch fachliche Diskussionen und zahlreiche gemeinsame Aktivitäten geprägt war, sondern aus der sich auch Freundschaften entwickelt haben. Ganz besonders meinem langjährigen Zimmerkollegen Fernaf Daoud danke ich für die äußerst angenehme Zusammenarbeit, seine Hilfsbereitschaft und die anregenden Gespräche, an die ich immer gerne zurückdenken werde.

An dieser Stelle danke ich meiner lieben Mutter Amalie Hörmann für ihre aufopfernde Unterstützung ganz besonders. Zum Gedenken an meinen leider viel zu früh verstorbenen Vater widme ich Ihm diese Arbeit.

Der größte Dank gebührt meiner Lebensgefährtin Sabine Steininger für ihr liebevolles Verständnis und ihre grenzenlose Geduld. Sie hat mir die nötige Kraft und Motivation gegeben und damit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung . . . . .	2
1.3	Überblick . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Kontinuumsmechanik . . . . .	5
2.1.1	Kinematik . . . . .	5
2.1.2	Spannungen und Gleichgewicht . . . . .	6
2.1.3	Materialgesetze . . . . .	7
2.1.4	Energieprinzipien . . . . .	8
2.2	Die Finite-Elemente-Methode . . . . .	9
2.2.1	Allgemeine Einführung . . . . .	10
2.2.2	Der ebene Spannungszustand . . . . .	10
2.2.3	Diskretisierung mit Hilfe des isoparametrischen Konzepts	12
2.3	FEM und objektorientierte Programmierung . . . . .	15
2.4	Mixed Language Programming (MLP) . . . . .	17
2.5	Das Konzept der Software-Kapselung . . . . .	18

<b>3</b>	<b>Methoden zur Erzeugung von Stabwerkmodellen</b>	<b>21</b>
3.1	Stabwerkmodelle als Bemessungshilfe für Stahlbetontragwerke	21
3.2	Vom Kraftfluss zum Stabwerkmodell . . . . .	24
3.3	Bestehende Ansätze zur Stabwerk–Modellfindung . . . . .	27
3.3.1	Modellfindung von Hand . . . . .	27
3.3.2	Modellierung anhand vorgefertigter Muster . . . . .	29
3.3.3	Modellfindung mit Hilfe der Lastpfadmethode . . . . .	30
3.3.4	Modellierung aus Trajektorienfeldern . . . . .	30
3.3.5	Modellierung anhand von Differentialgleichungen . . . . .	32
3.3.6	Michell–Strukturen . . . . .	33
3.4	Methode zur automatischen Generierung optimierter Stabwerkmodelle . . . . .	34
3.4.1	Hauptspannungstrajektorien . . . . .	34
3.4.2	Kraftflusspfade . . . . .	37
3.4.3	Berechnungsablauf . . . . .	38
3.4.4	Ein Algorithmus zur Ermittlung von Trajektorien (ALFIT)	39
3.4.5	Zur Spannungsermittlung an beliebigen Punkten . . . . .	46
3.4.6	Abbruchkriterien für Trajektorien . . . . .	50
3.4.7	Bestimmung von sekundären Kraftflusspfaden . . . . .	52
3.4.8	Bestimmung der Stabwerksgeometrie . . . . .	57
3.4.9	Berechnung des Stabwerkes . . . . .	60
3.4.10	Einhaltung der Kompatibilität . . . . .	61

---

<b>4 Flexible Kopplung entfernter Prozesse</b>	<b>69</b>
4.1 Stand der Technik . . . . .	69
4.2 Aufgabenstellung . . . . .	71
4.3 Rechnernetze . . . . .	73
4.3.1 Begriffe . . . . .	74
4.3.2 Netzwerk-Topologien . . . . .	74
4.3.3 Zur organisatorischen Abdeckung von Netzwerken . . .	75
4.3.4 Anforderungen an Netzwerke . . . . .	76
4.3.5 Beispiele für Netzwerke . . . . .	76
4.4 Grundlagen einer Prozesskopplung . . . . .	77
4.4.1 Prozess und Operation . . . . .	77
4.4.2 Konkurrierende Prozesse . . . . .	77
4.5 Netzwerk Software . . . . .	80
4.5.1 Ein Client-Server-Modell . . . . .	80
4.5.2 Nachrichtenorientierte Kommunikation mit Sockets . . .	81
4.5.3 Das ISO/OSI-Referenzmodell . . . . .	81
4.5.4 Netzwerkprotokolle . . . . .	83
4.5.5 Das TCP/IP-Modell . . . . .	85
4.5.6 Die TCP/IP-Verbindung . . . . .	86
4.5.7 Weitere Ansätze zur Kommunikation in verteilten Systemen . . . . .	92
4.5.8 Bekannte Anwendungen von Netzwerk Software . . . .	94
4.6 Ein Konzept zur Kopplung verteilter Anwendungen . . . . .	95
4.7 Das Workflow-Management-System . . . . .	99

---

<b>5</b>	<b>Prozesssteuerung und Visualisierung</b>	<b>103</b>
5.1	Beschreibung von AVS/Express . . . . .	104
5.2	Die Anwendung zur Erzeugung optimierter Stabwerkmodelle .	107
5.3	Ablauf und Steuerung einer Kraftflussberechnung . . . . .	110
5.4	AVS/Express als Workflow-Management-System . . . . .	114
5.5	Andere Visualisierungstools . . . . .	116
<b>6</b>	<b>Numerische Beispiele</b>	<b>119</b>
6.1	Hinweise zur Modellierung . . . . .	120
6.2	Scheibe auf zwei Stützen . . . . .	125
6.3	Scheibe auf drei Stützen . . . . .	131
6.4	Punktgelagerte Scheibe unter Einzellasten . . . . .	137
6.5	Qualitative Beispiele . . . . .	140
6.5.1	Kragscheibe unter Gleichlast bzw. Einzellast . . . . .	140
6.5.2	Scheibe mit punktuellen Lagern und Einzellast . . . . .	143
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>147</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>A</b>	<b>Client-Server</b>	<b>157</b>
A.1	Server . . . . .	157
A.2	Client . . . . .	160
A.3	Bibliotheksfunktionen . . . . .	164
<b>B</b>	<b>Mixed Language Programming</b>	<b>167</b>