
Ganzheitliche, modellbasierte Ingenieurmethoden zu hochperformanten Sicherheitsanalysen in Gebäuden

Holistic Model-based Engineering Methods for High Performance Safety Analyses in Buildings

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Puyan Abolghasemzadeh aus Iran

2012 – Darmstadt – D 17



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Bauingenieurwesen und
Geodäsie
Institut für Numerische Methoden und
Informatik im Bauwesen

Ganzheitliche, modellbasierte Ingenieurmethoden zu hochperformanten Sicherheitsanalysen in Gebäuden
Holistic Model-based Engineering Methods for High Performance Safety Analyses in Buildings

Genehmigte Dissertation von Puyan Abolghasemzadeh aus Iran

1. Gutachten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Tag der Einreichung: 30. März 2012

Tag der Prüfung: 6. Juli 2012

Darmstadt – D 17

Berichte des Instituts für Numerische Methoden
und Informatik im Bauwesen

Band 1/2012

Puyan Abolghasemzadeh

**Ganzheitliche, modellbasierte
Ingenieurmethoden zu hochperformanten
Sicherheitsanalysen in Gebäuden**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1304-7

ISSN 1860-9430

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

an alle Andersdenkende

*“Wieso sagt man das Pferd sei ein zahmes Tier,
und die Taube sei schön?
Ich weiß es nicht,
wieso hält man keine Geier in den Käfigen?
was mangelt es an der Kleeblume verglichen mit der roten Rose?
Waschen muß man die Augen!
Ändern muß man den Blick!”
(Sohrab Sepehri)*



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel für die wissenschaftliche Förderung, die stets vorhandene Diskussionsbereitschaft und für die Übernahme des Hauptreferates.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht für die Übernahme des Ko-referates und sein reges Interesse an meiner Arbeit bedanken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen danke ich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die gute Zusammenarbeit und die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre. Besonderes möchte ich mich bei Dr.-Ing. Peter Göbel bedanken, der über die Betreuung meiner Masterarbeit mich motivierte, den Weg der Promotion zu wagen. Des Weiteren danke ich Herrn Dr.-Ing. Armin Wagenknecht. Armin und Peter haben meine ersten wissenschaftlichen Gehversuche begleitet und mir dabei sehr geholfen. Weiterer besonderer Dank geht an Susanne Rohmig, Barbara Kohane, Kai Stübbe, Kristian Schatz, Christian Schwöbel, Uwe Zwinger, Manuel Kitzlinger, Philipa Petkova, Michael Kreger, Matthias Rätzke, Roozbeh Ashoori, Dawit Ghebrehiwet, Amir Moghimi, Lukas Brunert, Steffi Weyand und Robert Irmeler.

Puyan Abolghasemzadeh

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Ansatz	2
1.3	Überblick über diese Arbeit	3
2	Ganzheitliche, modellbasierte Gebäudeplanung mit BIM	5
2.1	Einführung	5
2.2	Building Information Modeling	6
3	Brandschutz	11
3.1	Einführung in den Brandschutz	11
3.2	Kategorien der Brandschutzmaßnahmen	13
1)	Vorbeugende Brandschutzmaßnahmen	14
2)	Organisatorische Brandschutzmaßnahmen	14
3)	Abwehrende Brandschutzmaßnahmen	14
3.3	Schutzziele in der Brandschutzplanung	14
3.4	Ingenieurmethoden zur Brandschutzplanung	15
1)	Brandschutzplanung in der Praxis	15
2)	Schutzziel- und leistungsorientierte Brandschutzplanung	16
3.5	Personensicherheit im Brandschutz	18
3.6	Fazit	20
4	Analyse und Simulation der Brände in Gebäuden	21
4.1	Brandszenarien	21
4.2	Brandmodelle	24
1)	Reale Brandversuche mit physikalischen Modellen	25
2)	Mathematische Modelle	26
4.3	Numerische Strömungsdynamik zur Brandsimulation	29
4.4	Fazit	34
5	Hochperformante numerische Simulation mit Parallel-Computing	35
5.1	Parallel-Computing	35
5.2	Computer-Cluster	36
5.3	Klassifikation von Rechnerarchitekturen	36
1)	SISD (Single Instruction, Single Data)	37
2)	MISD (Multiple Instruction, Single Data)	37
3)	SIMD (Single Instruction, Multiple Data)	37
4)	MIMD (Multiple Instruction, Multiple Data)	37
5.4	Leistungsfähigkeit in Parallel-Computing	38
1)	Speedup	38

2)	Effizienz	38
3)	Amdahlsches Gesetz	39
5.5	Message Passing Interface	39
5.6	Fazit	40
6	Analyse und Simulation der Entfluchtung bei Bränden in Gebäuden	41
6.1	Entfluchtung	42
1)	Brandentdeckungsdauer (dt_{Det})	43
2)	Alarmierungsdauer (dt_{Alarm})	43
3)	Vor-Bewegungszeit oder Verzögerungsdauer (dt_{pre})	43
4)	Bewegungsdauer (dt_{Move})	44
5)	Entfluchtungsdauer (dt_{Egress})	44
6.2	Evakuierung	45
6.3	Entfluchtungsanalyse	46
1)	Deterministische Verfahren	46
2)	Ingenieurmäßige Verfahren	46
6.4	Entfluchtungsszenarien	48
6.5	Fluchtverhalten von Menschen in Gefahrensituationen	49
1)	Individuelle Verhaltenseigenschaften eines Menschen in Gefahrensituation	51
2)	Gruppenverhalten in Gefahr	56
3)	Panikverhalten	58
6.6	Einfluss von Gebäudeeigenschaften auf die Entfluchtung	59
1)	Alarmsysteme	60
2)	Anordnung der Fluchtwege	60
3)	Visueller Überblick	60
4)	Aufmerksamkeitsfokus	60
5)	Räumungsübungen in einem Gebäude	61
6)	Wiederholte Fehlalarme	61
6.7	Einfluss von Umgebungsbedingungen im Brandfall auf die Menschen	61
6.8	Computermodelle zur Entfluchtungsanalyse	65
1)	Strömungs- und Partikelmodelle	68
2)	Matrizenmodelle	70
3)	Emergente Modelle	71
4)	Netzwerkmodelle	71
6.9	Gegenüberstellung von Computerprogrammen zur mikroskopischen Entfluchtungs- simulation	73
6.10	Fazit	78
7	Konzept für eine ganzheitliche, modellbasierte Umgebung zu hochperformanten Sicherheitsanalysen in Gebäuden	81
7.1	Ansatz zur ganzheitlichen, modellbasierten Gebäudeplanung für Brand- und Ent- fluchtungssimulationen	82
7.2	Konzeption eines Computer-Clusters für hochperformante, numerische Brandsim- ulationen	89
7.3	Konzeption einer Szenarien-Datenbank für die Bereitstellung der Ergebnisse von numerischen Brandsimulationen	90

7.4	Ansatz zur numerischen Brandsimulationen in „Quasi-Echtzeit“	92
7.5	Ansatz zur modellbasierten, umgebungssensitiven und verhaltensabhängigen mikroskopischen Entfluchtungsanalyse	96
1)	Integration der Entfluchtungsanalyse in das digitale Gebäudemodell	96
2)	Integration der numerischen Brandsimulation in die Entfluchtungsanalyse	96
3)	Berücksichtigung der individuellen Eigenschaften der Menschen bei der Auswahl des sichersten Fluchtweges im Gebäude	97
4)	Permanente Ermittlung und Auswertung der potentiellen Fluchtwege in jedem Bewegungsschritt des Gebäudenutzers	98
5)	Modellbasierter, umgebungssensitiver und verhaltensabhängiger Entscheidungsalgorithmus zur Wegfindung eines Gebäudenutzers im Brandfall	98
7.6	Datenübertragungen zwischen einzelnen Softwaremodulen	100
8	Entwurf und Implementierung der Softwareumgebung MEnSA	103
8.1	Hardware-Architektur von MEnSA	103
1)	BIM.NODE	104
2)	FIRE.HPC.NODE	105
3)	DB.NODE	105
4)	LIVE.NODE	106
8.2	Software-Architektur von MEnSA	107
8.3	MEnSA.BIM	109
1)	Auswahl eines BIM-Programms	109
2)	Erweiterung des Gebäudemodells zur Ermöglichung der modellbasierten Sicherheitsanalysen	111
8.4	MEnSA.FIRE	114
1)	Auswahl eines numerischen Brandsimulationsprogramms	115
2)	Dreidimensionale Raum-Diskretisierung	118
3)	Generierung der Brandquellen	119
4)	Generierung der Hindernisse und Öffnungen	120
5)	Äquivalente Brennflächen in Räumen für die Modellierung der Brandausbreitung	120
6)	Steuerung der Türen und Fenster im Brandmodell	122
7)	Virtuelles Sensor-Netz zur Aufnahme der Temperatur und der Sichtweite	123
8.5	MEnSA.DB	126
8.6	MEnSA.LIVE	129
8.7	MEnSA.EGRESS	136
8.8	MEnSA.TRANSMISSIONS	146
1)	Ermittlung der Objekte aus dem erweiterten Gebäudemodell in der BIM-Umgebung	147
2)	Datenaustausch mit dem Simulationscluster	147
3)	Speichern und Abfragen der Simulationsergebnisse in die und aus der Szenarien-Datenbank	150

9 Anwendungsszenarien	153
9.1 Anwendungsszenarien zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von MEnSA	153
1) Aufbau des Simulationsclusters	153
2) Brandszenarien	155
9.2 Anwendungsszenario zur numerischen Brandsimulation in „Quasi-Echtzeit“ mit MEnSA.LIVE	159
9.3 Anwendungsszenarien zur Verifikation der mikroskopischen Entfluchtungsanalyse mit MEnSA.EGRESS	162
10 Zusammenfassung und Ausblick	169
10.1 Zusammenfassung	169
10.2 Ausblick	171
Abkürzungsverzeichnis	173
Glossar	175
Anhänge	i
Anhang A Simuliertes Beispielszenario mit unterschiedlichen Entfluchtungssimulatoren	i
Anhang B Simulationsbeispiel zur Überprüfung des FDS+Evac	iii
Anhang C Exemplarische Codeauszüge von MEnSA.FIRE	iv
Anhang D Exemplarische Codeauszüge von MEnSA.TRANSMISSIONS	vii
Anhang E Python-Hilfsskript zur Überführung der Simulationsergebnisse in die Datenbank	x

Abbildungsverzeichnis

2.1	Ein CAD-Programm aus den 90er Jahren als digitales Reißbrett	6
2.2	Schematische Darstellung der Datenverwaltung in einem BIM-System	7
2.3	Objekthierarchie für die Klasse Brandquelle nach IFC2x Edition3	9
3.1	Aufgabenbereiche der Brandschutzplanung	12
3.2	Schematische Darstellung vom herkömmlichen Ansatz bei der Brandschutzplanung in der Praxis	16
3.3	Ablaufschritte eines schutzziel- und leistungsorientierten Brandschutzkonzeptes	18
4.1	Typischer Brandverlauf für ein Brandszenario mit einem nicht kontrollierten Brandherd in einem geschlossenen Raum	22
4.2	Das Feuerdreieck, das die erforderlichen Voraussetzungen für die Brandentstehung darstellt	22
4.3	Typische Phasen der Wärmefreisetzungsrate bei einer Brandentwicklung	24
4.4	Brandofen zu realen Brandversuchen	26
4.5	Schematische Darstellung eines Zonenmodells	28
4.6	Diskretisierung eines Brandraumes und die Abbildung der Temperaturverteilung (oben) sowie Rauchausbreitung (unten) in einem Feld-Modell	29
4.7	Ansatz zur CFD-basierten Brandsimulationen	33
6.1	Einflussfaktoren auf die Entfluchtung und Evakuierung von Menschen aus einem Gebäude im Brandfall	41
6.2	Zeitabschnitte bei einer Entfluchtung	43
6.3	Ablauf eines Evakuierungseinsatzes	45
6.4	Ansätze zum Flächenbedarf	54
6.5	Vorgeschlagene Altersverteilung	55
6.6	Stressmodell für gefährdete Menschen in einem Brandfall	59
6.7	Räumungsübung in einer Schule in Baden-Württemberg	61
6.8	Sichtbarkeit des Ausgangschildes im Zusammenhang mit dem Extinktionskoeffizienten für den nichtreizenden bzw. den reizenden Rauch	63
6.9	Bewegungsgeschwindigkeit einer Person im Zusammenhang mit dem Extinktionskoeffizienten für den nichtreizenden bzw. den reizenden Rauch	64
6.10	Einfluss der Rauchdichte auf die Geschwindigkeit der Agenten	64
6.11	Die erforderlichen Schritte für eine Entfluchtungsmodellierung	66
6.12	Erforderliche Charakteristiken für ein Computermodell zur Entfluchtungsanalyse	66
6.13	Strömungsdynamischer Ansatz zur Entfluchtungssimulation mit dem Simulationsprogramm „FDS+Evac“	69
6.14	Matrizenansatz zur Entfluchtungssimulation mit dem Simulationsprogramm PedGo	70
6.15	Emergente Modelle zur Abbildung der Massenbewegungen	71
6.16	Netzwerkgenerierung durch Raum-Tür-Raum Methode	72
6.17	Die Corner Graph-Methode und die Lösung für die konkaven Räume	72
6.18	Straight Skeleton zur Generierung der Wegegraphen	73
6.19	Drei verschiedene Routenarten für eine Entfluchtung	76

7.1	Vorgänge beim herkömmlichen Ansatz zur Brandsimulation	83
7.2	Vorgänge beim herkömmlichen Ansatz zur Entfluchtungssimulation	85
7.3	Vorgänge im neuen modellbasierten Ansatz zu Brand- und Entfluchtungsanalysen	88
7.4	Selbstständiger Simulationscluster zur numerischen Brandsimulation	90
7.5	Bereitstellung der Ergebnisse der numerischen Brandsimulationen durch eine Szenarien-Datenbank	92
7.6	Erkundung und Entscheidungsfindung bei einem Feuerwehreinsatz	93
7.7	Konzeption der numerischen Brandsimulation in „Quasi-Echtzeit“	95
7.8	Integration der numerischen Brandsimulation in die Entfluchtungsanalyse	97
7.9	Konzeption der modellbasierten, umgebungssensitiven und verhaltensabhängigen mikroskopischen Entfluchtungsanalyse	100
8.1	Verteilte Systemarchitektur von MEnSA.DISTRIBUTED mit vier Rechnerknoten und einem Computer-Cluster für numerische Brandsimulationen	104
8.2	Tablet-PC mit dem speziellen Softwaremodul zur Abschätzung des Brandzustandes sowie zur Prognose der Brandentwicklung	106
8.3	Aufbau von MEnSA auf der Software-Ebene als eine Middleware mit dafür vorgesehen Softwaremodulen	108
8.4	Verteilung der Softwaremodule in MEnSA auf verschiedenen Hardwareknoten . .	108
8.5	Der Aufbau von Autodesk Revit	111
8.6	UML-Klassendiagramm des erweiterten Gebäudemodells in Autodesk Revit	112
8.7	Definition einer neuen Klasse für ein brennendes Reisegepäckstück als Brandquelle im BIM-Programm Revit	113
8.8	Eigenschaften eines neuen Gebäudenutzers im BIM-Programm Revit	114
8.9	Klassendiagramm des Softwaremodules MEnSA.FIRE	117
8.10	Unterschiedliche dreidimensionale Raum-Diskretisierung in MEnSA.FIRE	118
8.11	Definition der Gitternetze in MEnSA.FIRE	119
8.12	Dreidimensionale Brandquelle in FDS	119
8.13	Simulationseinstellungen in MEnSA.FIRE	120
8.14	Simulationseinstellungen in MEnSA.FIRE	121
8.15	Automatisch generierte äquivalente Brennoflächen und ihre Wärmesensoren durch MEnSA.FIRE zur Realisierung der Brandausbreitung während der Simulation . . .	122
8.16	Simulationseinstellungen in MEnSA.FIRE	122
8.17	Vorgesehene Wärmesensoren im Brandmodell, um das Verhalten der Türen und Fenster im Brand zu simulieren	123
8.18	Simulationseinstellungen in MEnSA.FIRE	124
8.19	Virtuelles Sensor-Netz zur Aufnahme der Temperatur und Sichtweite	124
8.20	Schnittdarstellung für Temperaturausbreitung in Smokeview	125
8.21	Steuerung der Simulation in MEnSA.FIRE	125
8.22	Entity-Relationship-Model für die Szenarien-Datenbank in MEnSA.DB	128
8.23	Relationales Datenmodell für die Szenarien-Datenbank in MEnSA.DB	128
8.24	Schematische Darstellung der Umsetzung vom neuen Ansatz zur numerischen Brandsimulation in „Quasi-Echtzeit“	130
8.25	Zuordnung eines virtuellen Sensors zu jeder Einsatzkraft	132
8.26	Vorgänge zum Finden des ähnlichsten, vorberechneten, numerischen Brandszenarios	133

8.27	Überschneidung der erfassten Temperaturverläufe von drei Feuerwehmännern (FWM) mit den vorberechneten Werten für ihnen naheliegende virtuelle Sensoren aus einem dem realen Fall nicht ähnlichen Brandszenario	134
8.28	Ermittlung des schmalsten Zeitfensters (Polygons) bei mehreren Überschneidungspunkten für jeden Feuerwehmann	134
8.29	Überschneidung der erfassten Temperaturverläufe von drei Feuerwehmännern (FWM) mit den vorberechneten Werten für ihnen naheliegende virtuelle Sensoren aus einem dem realen Fall ähnlichen Brandszenario	135
8.30	Klassendiagramm des Softwaremodules MEnSA.LIVE	136
8.31	Modellbasierter, umgebungssensitiver und verhaltensabhängiger Entscheidungsalgorithmus zur Wegfindung eines Gebäudenutzers im Brandfall	138
8.32	Bestimmung des „nächsten virtuellen Sensors“ zum potentiellen „nächsten Schritt“ für die Abfrage der Umgebungsdaten	139
8.33	Datenbankabfrage für die lokale Temperatur und Sichtweite für ein bestimmtes Zeitfenster	140
8.34	Klassendiagramm des Softwaremodules MEnSA.EGRESS	143
8.35	Eingabemaske des Softwaremodules MEnSA.EGRESS für die modellbasierte, umgebungssensitive und verhaltensabhängige mikroskopische Entfluchtungsanalyse	144
8.36	Protokollierung einer exemplarischen Entfluchtungsanalyse	145
8.37	Verschiedene Datenübertragungen zwischen den einzelnen Softwaremodulen . .	147
8.38	Datenübertragung zwischen BIM.NODE und FIRE.HPC.NODE und entfernte Steuerung der Brandsimulation auf dem Simulationscluster	149
8.39	Anwendung des Hilfsskriptes zur automatischen Datenübertragung der Simulationsergebnisse vom Simulationscluster in die Szenarien-Datenbank	151
8.40	Arbeitsschritte des Hilfsskriptes	151
9.1	Aufgebauter Simulationscluster FIRE.HPC.NODE für die Testversuche	155
9.2	Eine Brandquelle im Freien (Szenario 1)	156
9.3	Brandszenario für einen Bibliotheksraum (Szenario 2)	156
9.4	Brandszenario mit mehreren Räumen (Szenario 3)	157
9.5	Simulationseinstellungen für das dritte Anwendungsszenario	158
9.6	Simulationsdauer für verschiedene Testversuche	158
9.7	Speedup für verschiedene Testversuche	158
9.8	Effizienz für verschiedene Testversuche	159
9.9	Angenommener Brand im 2.OG eines Hochschulgebäude der TU Darmstadt . . .	160
9.10	Eingabe der ermittelten Daten aus dem brennenden Gebäude	161
9.11	Darstellung der Ergebnisse des Suchverfahrens	161
9.12	Detaillierte Ergebnisse des Suchverfahrens	162
9.13	Wegfindung ohne Gefahrenquelle	163
9.14	Passieren eines 40 [m] langen Korridors (3D-Ansicht in Autodesk Revit)	164
9.15	Berücksichtigung der Reaktionszeit Entfluchtung	164
9.16	Einfluss von Rauch und Temperatur auf die Wegfindung	165
9.17	Aufgezeichnetes Protokoll im Test 4	165
9.18	Auswahl des kürzesten Weges für den permanenten Gebäudenutzer	166
9.19	Auswahl des sichersten Weges für den temporären Gebäudenutzer	166
9.20	Einfluss der Rauchdichte bzw. Sichtweite auf die Bewegungsgeschwindigkeit der Agenten in MEnSA.EGRESS	167

A.1	Beispielszenario für eine Entfluchtungsanalyse simuliert mit dem Programm „FDS+Evac“	i
A.2	Beispielszenario für eine Entfluchtungsanalyse simuliert mit dem Programm Simulex	i
A.3	Beispielszenario für eine Entfluchtungsanalyse simuliert mit dem Programm „PedGo“	ii
A.4	Beispielszenario für eine Entfluchtungsanalyse simuliert mit dem Programm „MASSEgress“	ii
A.5	Beispielszenario für eine Entfluchtungsanalyse simuliert mit dem Programm „BuildingEXODUS“	ii
B.1	Simulationsbeispiel zur Überprüfung des umgebungssensitiven Verhaltens mit dem Simulationsprogramm „FDS+Evac“	iii
C.1	Ermittlung aller Räume und deren Begrenzungsrahmen aus Gebäudemodell durch Revit-API und Generierung der 3D Gitternetze für FDS	iv
C.2	Dreidimensionale Gitternetze (Meshes) für jeden Raum im FDS	iv
C.3	Definition einer dreidimensionalen Brandquelle im FDS	iv
C.4	Ermittlung aller Türen und deren Begrenzungsrahmen im Gebäudemodell durch Revit-API	v
C.5	Definition einer Wand und einer Öffnung im FDS	v
C.6	Eine exemplarische potentielle Brennfläche mit dazugehörigem Wärmesensor im FDS	v
C.7	Wärmesensoren für die Steuerung eines Fensters im FDS	vi
C.8	Ein exemplarischer Sensor im FDS zur Speicherung der lokalen Simulationsergebnisse für die Sichtweite	vi
D.1	Datenübertragung zwischen BIM.NODE und FIRE.HPC.NODE und entfernte Steuerung der Brandsimulation auf dem Simulationscluster	vii
D.2	PSFTP-Befehle in „psftpSendFDS.src“ zum Hochladen verschiedener Dateien auf FIRE.HPC.NODE	vii
D.3	PSFTP-Befehle in „psftpSendFDS.src“ zum Hochladen verschiedener Dateien auf FIRE.HPC.NODE	vii
D.4	Datenübertragung zwischen FIRE.HPC.NODE und BIM.NODE	viii
D.5	PSFTP-Befehle in „psftpGetFDS.scr“ zum Herunterladen der Simulationsergebnisse aus FIRE.HPC.NODE	viii

Tabellenverzeichnis

2.1	Statistik über die Wirtschaftlichkeit des BIM-Einsatzes in großen Bauprojekten . .	8
5.1	Klassifikation von Rechnerarchitekturen	36
6.1	Kapazitäten und Geschwindigkeiten für eine Bahnstationsanlage	47
6.2	Zeittafel zu verschiedenen Abschnitten eines Brandes in einem Nachtclub basiert auf der Analyse von Fernsehberichterstattungen	49
6.3	Bewegungsgeschwindigkeit für verschiedene Menschentypen	52
6.4	Flächenbedarf für verschiedene Menschen	54
6.5	Flächenbedarf für die Bewegung einer Person in Gefahr	55
6.6	Durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit eines Menschen mit Behinderung oder Hilfsgräten	56
6.7	Beurteilungsgrößen und Anhaltswerte für quantitative Schutzziele	65
6.8	Gegenüberstellung von Computerprogrammen zur Entfluchtungssimulation . . .	74
8.1	Annahmewerte für die Eigenschaften der Gebäudenutzertypen im BIM	114
8.2	Vorschlagswerte für die Wärmefreisetzungsrate in Bezug auf die Raumnutzung .	121
8.3	Annahmewerte in MENSA.FIRE	124
8.4	Transaktionszeiten verschiedener Abfrage-Technologien für einen Suchvorgang aus einem Musterbeispiel	127