

BERGISCHE UNIVERSITÄT
GH WUPPERTAL
INSTITUT FÜR KONSTRUKTIVEN INGENIEURBAU

Baustofftechnologie und Brandschutz

Heft 7

1998

**Zur Komplexität des Verlaufs
von Bränden in Bauwerken
- Sensitivitätsanalyse -**

Detlef Mamrot

HERAUSGEBER: UNIV.-PROF. DR.-ING. W. KLINGSCH

Bergische Universität GH Wuppertal
Baustofftechnologie und Brandschutz
Pauluskirchstraße 7
42285 Wuppertal

Telefon: (0202) 439-4128

Telefax: (0202) 82560

ISBN 3-925795-27-8

**Zur Komplexität des Verlaufs von
Bränden in Bauwerken
- Sensitivitätsanalyse -**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
des Fachbereichs Bauingenieurwesen
der
Bergischen Universität - Gesamthochschule Wuppertal

von
Dipl.-Ing. Detlef Mamrot
Wuppertal

Wuppertal 1997

Dissertation eingereicht am: 01.Juli 1997

Tag der mündlichen Prüfung: 29.Mai 1998

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Klingsch
Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.J. Diederichs

Danksagung

Mein besonderer Dank für die jahrelange Unterstützung und insbesondere für das Heranführen an die Verfahren der brandschutztechnischen Risikoabschätzung gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Klingsch. Außerordentlich wichtig war die engagierte Hilfe im Bereich der Anwendung des Sensitivitätsmodells durch Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Frederic Vester und den Mitarbeitern seiner Studiengruppe für Biologie und Umwelt in München. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. J. Diederichs gehört mein herzlichster Dank für die Übernahme des Koreferats.

Im Rahmen eines Workshops und von Expertenbefragungen haben eine Reihe von Fachleuten unterschiedlichster Disziplinen durch engagierte Diskussionen geholfen, den Grundstock für diese Arbeit zu legen. Insbesondere sind hier mit großer Hochachtung zu nennen:

- Herr Ltd. Branddirektor H.J. Blätte; Vorsitzender des vfdb, Wuppertal;
- Herr Dr.-Ing. W. Dombrowsky, Katastrophenforschungsstelle Kiel;
- Herr Dipl.-Ing. Fenner, Katastrophenforschungsstelle Kiel;
- Herr Dr.-Ing. E. Hagen, Geschäftsführer der Technocon GmbH, Kleve;
- Herr P. Kuschel, Oberbrandmeister, Berufsfeuerwehr Wuppertal;
- Herr Dipl.-Ing. Architekt Nienstedt, Sir Norman Foster, Frankfurt;
- Herr Dipl.-Ing. M. Tavakkol-Khah, Wissensch. Mitarbeiter, Wuppertal;
- Herr Dr.-Ing. J. Wiese, vormals Verband der Schadenversicherer, Köln;
- Herr Dr.-Ing. F.-W. Wittbecker, Leiter des Brandhauses der Bayer-AG, Leverkusen.

Den Mitarbeitern am Lehr- und Forschungsgebiet für Baustofftechnologie und Brandschutz danke ich besonders. Die Herren c.i. Frank Wessel und c.i. Stephan Holl halfen durch vielfache inhaltliche Diskussionen und Anregungen.

Die finanzielle Förderung des Projektes durch die Volkswagen-Stiftung Hannover und vor allem die vertrauensvolle Abwicklung durch Herrn Dr. Plate müssen nachdrücklich hervorgehoben werden.

Wuppertal im Juni 1997

Detlef Mamrot

Zur Komplexität des Verlaufs von Bränden in Bauwerken - Sensitivitätsanalyse -

INHALTSVERZEICHNIS	I	
1	EINLEITUNG	1
1.1	Gegenstand und Zielsetzung	1
1.2	Problemstellung	2
1.2.1	Verfügbare Simulationsmodelle	2
1.2.2	Probleme der Modellbildung	4
1.2.3	Methodische Anforderungen	6
1.3	Angewandte Methode	7
1.4	Gliederung der Arbeit	8
2	KOMPLEXE SYSTEME	10
2.1	Begriffsdefinition „System“	10
2.2	Begriffsdefinition „Komplexität“	17
2.2.1	Vorbemerkung	17
2.2.2	Grundlagen	17
2.2.3	Objektbeitrag zur Komplexität	21
2.2.4	Subjektbeitrag zur Komplexität	24
2.3	Abgrenzung	26
3	KOMPLEXITÄT DES BRANDVERLAUFS	27
3.1	Vorbemerkung	27
3.2	Objektbeitrag	28
3.2.1	Ein Szenario	28
3.2.2	Nicht-lineare Beziehungen und Rechenmodell	30
3.2.3	Strukturänderungen	33
3.3	Subjektbeitrag	33
3.3.1	Forschungsergebnisse	33
3.3.2	Resultierende Einflußgrößen	34
3.4	Fallbeispiel	36
3.5	Zusammenfassung und Ergänzung	41

4	„SENSITIVITÄTSMODELL PROF. VESTER“	43
4.1	Vorbemerkung	43
4.2	Besonderheiten des Modells	44
4.2.1	Realtheoretische und realempirische Modellauffassung	44
4.2.2	Integration numerisch genauer Aussagen	44
4.2.3	Begriffsbildung im Sensitivitätsmodell	45
4.2.4	Beispiel für die Terminologie des Sensitivitätsmodells	45
4.2.5	Möglichkeiten des Erkenntnisgewinns	47
4.2.6	Vorteile des Verfahrens	47
4.3	Die Werkzeuge im Überblick	48
5	SENSITIVITÄTSANALYSE „BRANDVERLAUF“	50
5.1	Vorbemerkung	50
5.2	Untersuchungsgegenstand	51
5.3	Systembeschreibung und -abgrenzung	52
5.3.1	Methodische Vorgaben	52
5.3.2	Systembeschreibung „Brandverlauf“	52
5.4	Variablensatz	53
5.4.1	Methodische Vorgaben	53
5.4.2	Variablensatz „Brandverlauf“	53
5.5	Kriterienmatrix	62
5.5.1	Methodische Vorgaben	62
5.5.2	Anpassung der Kriterienmatrix „Brandverlauf“	62
5.5.3	Auswertung der Kriterienmatrix	64
5.6	Einflußmatrix und Rollenverteilung	65
5.6.1	Vorbemerkung	65
5.6.2	Methodische Vorgaben und ein neues Kontrollverfahren	65
5.6.2.1	Vorbemerkung	65
5.6.2.2	Punktevergabe	66
5.6.2.3	Ein neues Kontrollverfahren	67
5.6.3	Einflußmatrix „Brandverlauf“	69
5.6.4	Musterbildung und erste Interpretation	70
5.6.5	Rollenverteilung	71
5.6.5.1	Methodische Vorgaben	71
5.6.5.2	Rollenverteilung „Brandverlauf“	76

5.6.6	Auswertung der Rollenverteilung und Interpretation der Ergebnisse	77
5.6.6.1	Vorbemerkung	77
5.6.6.2	Gesamtsystem	77
5.6.6.3	Teilbereiche	77
5.6.6.4	Kritische Variablen	78
5.6.6.5	Aktive Variablen	79
5.6.7	Zusammenfassung	79
5.7	Wirkungsgefüge	80
5.7.1	Vorbemerkung	80
5.7.2	Methodische Vorgaben	81
5.7.3	Wirkungsgefüge „Brandverlauf“	81
5.8	Behandlung konkreter Fragestellungen	87
5.8.1	Vorbemerkung	87
5.8.2	Fragestellung „Informationssystem“	87
5.8.2.1	Problemformulierung	87
5.8.2.2	Wirkungsbaum „Qualität verfügbarer Informationen“	88
5.8.2.3	Abschließende Bemerkung	90
5.8.3	Fragestellung „Entrauchung von Tiefgaragen“	90
5.8.3.1	Problemformulierung	90
5.8.3.2	Wirkungsbaumanalyse	92
5.8.3.2.1	Vorbemerkung	92
5.8.3.2.2	Wirkungsbaum „Intensität der Rauchausbreitung“	93
5.8.3.2.3	Wirkungsbaum „Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbau- bauteile“	95
5.8.3.3	Zusammenfassende Bewertung	97
6	SIMULATION	98
6.1	Vorbemerkung	98
6.2	Ähnlichkeiten zum Grundprinzip der „Fuzzy Logic“	98
6.3	Teilszenario als Grundlage für die Simulation	99
6.3.1	Methodische Vorgaben	99
6.3.2	Das Teilszenario zur Simulation „Brandverlauf“	100
6.3.3	Wirkung der Variablen „Streß“	101

6.4	Simulationsmodell	102
6.4.1	Vorbemerkung	102
6.4.2	Bereichseinteilung	102
6.4.3	Tabellenfunktionen zwischen zwei Variablen	103
6.4.3.1	Vorbemerkung	103
6.4.3.2	Wirkung von „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf „Leistungsfähigkeit der Nutzer“	103
6.4.3.3	Tabellenfunktionen	111
6.4.3.3.1	Vorbemerkung	111
6.4.3.3.2	Direkte Variablenbeziehung	112
6.4.3.3.3	Eingangsfaktor	113
6.4.3.3.4	Interne Funktion	114
6.4.4	Übersicht über die verwendeten Funktionen	114
6.5	Simulationsergebnisse	118
6.5.1	Plausibilitätskontrolle des Modellverhaltens	118
6.5.2	Wirkung der Variablen „Leistungsfähigkeit der Nutzer“	124
6.5.3	Einfluß unterschiedlicher Anfangswerte für LdN, QvI und QdR auf die verfügbaren Fluchtzeiten	126
6.5.4	Abschließende Bemerkung	128
7	ZUSAMMENFASSUNG	129
7.1	Ziel und Ergebnis der Arbeit	129
7.2	Einordnung des Verfahrens in die Brandschutzpraxis	130
7.3	Weitere geplante Untersuchungen im Bereich „Brandschutz“	130
7.4	Einsatz des Verfahrens in der Lehre	131
7.5	Schlußbemerkung	131
8	LITERATURVERZEICHNIS	132

ANHÄNGE

1 EINLEITUNG

1.1 Gegenstand und Zielsetzung

Der Brand stellt eine der größten Gefahren bei der Nutzung von Bauwerken dar. Um ihr angemessen begegnen zu können, werden brandschutztechnische Belange seitens des Gesetzgebers bei der Planung von Gebäuden vorwiegend durch die Anforderungen im Rahmen der Bauordnungen der Länder abgedeckt.

Für architektonische und funktionale Innovationen, die insbesondere bei Bauwerken mit stark repräsentativem Charakter häufig angestrebt werden, sind die gesetzlichen Grundlagen jedoch oft nicht flexibel genug, so daß objektorientierte Risikostudien erforderlich werden. Starke Entwicklungstendenzen in Richtung Einzelfalluntersuchung werden allgemein konstatiert [H01]. Die „International Organisation for Standardisation (ISO)“ entwickelt aus diesem Grund ingenieurmäßige Bemessungsverfahren des Brandschutzes [I01], die sich auch bald in deutschen Normenwerken niederschlagen werden.

Risikoabschätzungen für einzelne Objekte bedingen eine Umkehrung der sicherheitstheoretischen Blickrichtung: Wurzeln die gesetzlichen Brandschutzbestimmungen häufig auf empirischer Erkenntnis aus stattgefundenen Brandereignissen, so bedürfen Einzeluntersuchungen einer verstärkten gedanklichen Vorwegnahme möglicher Brandszenarien. Das Vorstellungsvermögen des Brandschutzplaners ist damit ausschlaggebend für erkannte und behobene Risiken.

Eine Möglichkeit, dieses Vorstellungsvermögen zu fördern, liegt in der rechnergestützten Simulation von Bränden. Für das Feuer und seine Interaktion mit dem Bauwerk sind bereits Simulationsprogramme entwickelt worden, deren Nutzen, neben der Ausgabe bemessungsrelevanter Brandparameter, vor allem in der Schaffung eines Verständnisses für die Sensitivität der modellierten Elemente in ihrer Wirkung aufeinander besteht. Das Lernen vollzieht sich beim Anwender der Programme dabei häufig ohne gezielte Analyse jeder einzelnen Wirkungsbeziehung nach dem Prinzip „Learning by doing“.

Ziel vorliegender Arbeit ist es, die vorhandenen Verfahren methodisch zu ergänzen. Untersucht wird der Brandverlauf im Bauwerk aus der Sicht neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse über das Verhalten komplexer Systeme mittels eines Verfahrens der Systemtheorie als für die Brandschutzplanung von Bauwerken neues Instrument.

1.2 Problemstellung

1.2.1 Verfügbare Simulationsmodelle

Das System „Brandereignis“ beinhaltet eine Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Elemente, deren Interdependenzen bisher wissenschaftlich vor allem mittels physikalischer Methoden beschrieben wurden. Stärkste Bemühungen gab es beispielsweise auf dem Gebiet der quantifizierenden Behandlung der physikalischen Phänomene der Brandentstehung und -ausbreitung in ihrem zeitlichen Verlauf oder etwa des Bauwerksverhaltens unter thermischer Beanspruchung. Ein guter Überblick über den Stand des Wissens läßt sich aus den Standardwerken des Brandschutzes gewinnen¹.

Die vorwiegend auf der Interaktion Feuer-Bauwerk aufgebauten vorhandenen Modelle - beispielsweise Zonenmodelle und Feldmodelle - liefern bei der rechnergestützten Simulation Ausgabegrößen, wie Temperaturen, Rauchgasmassen oder optische Rauchdichten, die als Beurteilungsgrundlage für den Gefährdungsgrad von Bauwerksnutzern und damit zur Abschätzung der verfügbaren Evakuierungszeiten genutzt werden. Darüberhinaus dienen sie zur Vorhersage des Versagenszeitpunktes von Bauwerksteilen und zur Prognose des Schadensumfanges potentieller Brandverläufe.

¹ Beispielhaft: a) The SFPE Handbook [T01];
 b) Fire Protection Handbook [F01];
 c) Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics [D01].

Forschungsansätze zielen für diesen Bereich zur Zeit auf die Optimierung der Rechengeschwindigkeit von Programmen auf der Basis von Feldmodellen und die Verbesserung der Datenbasis, insbesondere der Vereinheitlichung anzusetzender Energiefreisetzungsraten in Abhängigkeit von der Brandlast.

Als zweite Modellgruppe existieren Evakuierungsmodelle zur Beschreibung der Flucht von Personen aus Bauwerken [K01]. Entgegen den bisher favorisierten hydraulischen Modellen tendieren neue Ansätze zu einer Einbeziehung individueller Verhaltenscharakteristika in Abhängigkeit von persönlichen Ausgangsdaten und den Einwirkungen aus dem Brandereignis. Die dazu notwendige Kopplung zwischen Brand- und Evakuierungsmodellen ist bisher in Teilbereichen vollzogen worden. So werden Brandgrößen wie CO-Emissionen oder die sich aus der Berechnung der Rauchdichte ergebenden Sichtweiten funktional an die Bewegungsgeschwindigkeiten und die Wahrscheinlichkeiten für die Auswahl von Fluchtwegen gekoppelt [G01; S01]. Vorrangige Richtung für weitergehende Forschungen ist die Verbesserung der Grundlagen für die Modellierung menschlicher Entscheidungsfindungen im Brandfall [G02].

Keines der bekannten Simulationsmodelle bezieht alle für eine umfassende Risikoanalyse relevanten Teilbereiche ausreichend ein. Das menschliche Verhalten ist in die Brand-Bauwerk-Modelle nicht eingebunden, das Feuer und das thermisch bedingte Bauwerksverhalten kaum in die Evakuierungsmodelle. Eine derartige Erfassung der Wirkungszusammenhänge zeichnet deshalb trotz großem Detaillierungsgrad ein unvollständiges Bild vom Verlauf von Bränden in Bauwerken. Reale Einflüsse sind vielfältiger. So entfaltet beispielsweise eine durch Brandwirkung geminderte körperliche Leistungsfähigkeit der Brandopfer ihre Wirkung nicht nur auf ihre Fluchtgeschwindigkeit, wie es in den Evakuierungsmodellen berücksichtigt wird, sondern u.a. ebenso auf eine verschlechterte Möglichkeit der Informationsaufnahme und Informationsbeschaffung, eine geringere Verfügbarkeit risikomindernder Maßnahmen (Löschen, Lüften, Verschließen oder Aufbrechen von Türen) oder auf die zusätzliche Belastung der Feuerwehr mit ansonsten nicht notwendigen Rettungsaktionen.

1.2.2 Probleme der Modellbildung

Eine wesentliche Ursache für die Unvollständigkeit bestehender Simulationsmodelle ist, daß die zu koppelnden Elemente aus den Teilbereichen „Feuer-Bauwerk, menschliches Verhalten, Feuerwehr“ unterschiedlichen wissenschaftlichen Fachdisziplinen angehören. Wissenschaft und Forschung sind stark disziplinär ausgerichtet, so daß häufig keine deterministische Beschreibung der zwischen den Elementen unterschiedlicher Bereiche existierenden Relationen gegeben werden kann.

Das letztgenannte Problem und der gleichzeitige wissenschaftliche Anspruch an Detailgenauigkeit führen dazu, daß die verwendeten Elemente vorwiegend nur einer Fachdisziplin entstammen und ihre Auswahl sich häufig nach der Möglichkeit der wissenschaftlich detaillierten Beschreibung ihrer Interdependenzen richtet. Reale Systeme orientieren sich jedoch nicht an den durch die Fachdisziplinen vorgegebenen Grenzen. Modelle, die Wirkungsbeziehungen wegen dieses Zusammenhangs außer acht lassen, sind für die Darstellung realer Abläufe wegen ihrer Strukturgenauigkeit nur sehr begrenzt einsetzbar, denn die Realitätsnähe der abgebildeten Struktur ist für die Verhaltens-echtheit des Modells eines komplexen Systems von deutlich größerer Relevanz als die Genauigkeit der Beschreibung der Wirkungsbeziehungen zwischen den untersuchten Elementen [V01, S.45].

Die Abbildung von Modellen im Computer zur Simulation realer Abläufe dient einerseits der Einzelbetrachtung der zeitlichen Entwicklung einer untersuchten Variablen und andererseits der Erlangung von Kenntnissen bezüglich ihrer Sensitivität, d.h. der Stärke und Richtung ihres Einflusses im System. Da das Verhalten eines Simulationsmodells jedoch wesentlich geprägt wird durch die Auswahl der Elemente und der zu berücksichtigenden Wirkungsbeziehungen beim Modellbildungsprozeß, wäre es vorteilhaft, bereits beim Aufbau des Modells die Sensitivität der Elemente zu kennen und ihre problemadäquate Auswahl anhand dieser Kenntnisse durchzuführen.

Einige Stimmen sollen im folgenden die Einschätzung von Experten zu weiteren Schwierigkeiten der Modellbildung bei der Darstellung von Bränden verdeutlichen.

Dombrowsky bemerkt zur Quantifizierbarkeit von Brandverläufen [D02, S.4]:

"Weder lassen sich alle beteiligten Einflußgrößen (auf das Verhalten von Menschen bei Bränden [D.M.]) identifizieren, noch alle tatsächlichen Wirkungen quantifizieren. (...) Oftmals erst ergeben sich Brände aus diesen hinterrücks ablaufenden Kollisionen der geplanten und gewollten Effekte mit den ungeplanten und ungewollten Nebeneffekten."

Zur Notwendigkeit einer allgemeinen Theorie des Katastrophalen heißt es an anderer Stelle [D03, S.65]:

„Das Problem besteht vielmehr darin, daß jede neue Katastrophe deswegen als solche erscheint, weil Abläufe und Effekte auftreten, die angeblich niemand vorhersehen konnte und die deswegen so radikal überraschen. Tatsächlich aber sind Abläufe und Effekte nur dann nicht absehbar, wenn eine allgemeine Theorie des Katastrophalen fehlt und die Einzelphänomene ganz zwangsläufig monolithisch im Raum stehen. Worum es zu gehen hätte, wäre aber, nicht immer neuen Einzelphänomenen hinterherzueilen, sondern nach den Strukturbedingungen zu suchen, aus denen sie sich hinreichend genau deduzieren lassen.“

Alan Beard [I01, WG1 N15, 10/90] äußert sich sinngemäß zur Determinierbarkeit wie folgt:

Es ist unrealistisch anzunehmen, daß es ein deterministisches Wissen über zukünftige Ereignisse in Bezug auf Feuer-Risiken gibt.

In einem Diskussionsbeitrag von R. Frei [S02, S.117] bemerkt dieser zu den Möglichkeiten bisheriger Risikoanalysen:

„Aus meiner Praxis: Einer der letzten größeren Chemieunfälle in Basel. Wenn wir den vorher berechnet hätten, wären wir auch auf so kleine Wahrscheinlichkeiten gekommen, da hätten wir gesagt, das kann nie passieren. Die Realität war aber, daß nicht weniger als 7 voneinander unabhängige Ereignisse gleichzeitig eingetreten sind. Sie hätten vorher Risikoanalysen machen können, (...), wir hätten dieses Ereignis, das nun tatsächlich stattgefunden hat, nie herausgefunden.“

Der Mathematiker H.-J. Lüthi fordert für Risikosysteme den verstärkten „Einbezug der Fantasie zur Ermittlung eigentlicher Schadensszenarien“ [S02, S.121]. Weiterhin sei das „Denken ans Udenkbare“

„(...) ein außerhalb des Formalen ablaufender Prozeß, wozu wir weniger analytische, sondern kreativitätserweiternde Techniken benötigen.“.

1.2.3 Methodische Anforderungen

Zusammenfassend ergeben sich die methodischen Anforderungen an ein Verfahren zur Modellierung des Brandes in Bauwerken wie folgt:

- Die Sensitivität der Elemente sollte vor der Bildung eines Simulationsmodells bekannt sein.
- Die für das Systemverhalten wesentliche Struktur muß zu ermitteln sein, ohne daß zunächst eine detaillierte Quantifizierung erforderlich ist.
- Die Methode zum Aufstellen des Systemmodells muß eine interdisziplinäre Sichtweise unterstützen.
- Für konkrete Fragestellungen muß die Möglichkeit einer hinreichend genauen Deduktion gegeben sein.
- Die angewendete Methode muß geeignet sein, die „Fantasie“ in Bezug auf sonst nicht denkbare Zusammenhänge zu lenken.

Darüberhinaus sollten - wenn die große Komplexität des Brandgeschehens dazu führt, daß ein genaues deterministisches Wissen über mögliche Verhaltensweisen des Systems nicht zu erlangen ist - die Untersuchungsergebnisse am Modell doch die Randbedingungen angeben, unter denen das reale System einer gewollten Entwicklung geneigt ist.

1.3 Angewandte Methode

Ein Verfahren, das obigen Ansprüchen gerecht wird, ist das Sensitivitätsmodell Prof. Vester (SM) [V02]. Die Methode wurde zunächst als Planungsinstrument für den Bereich des Städtebaus entwickelt, in den letzten Jahren aber zur Erschließung auch andersartiger Systeme modifiziert¹. Grundlegend ist die Prämisse, daß zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens komplexer Systeme nicht die große Anzahl und die absolute Genauigkeit der verwendeten Daten die maßgebenden Faktoren sind, sondern daß die Art und Größe der Vernetzung der Elemente eines Systems meist einen weitaus größeren Einfluß auf das Systemverhalten haben.

Nach Vester [V01, S.33ff] kann ab einer bestimmten Größe der verwendeten Datenmenge auch eine noch so deutliche quantitative oder qualitative Erweiterung der verfügbaren Daten in komplexen Systemen nicht zum besseren Erkennen des Zusammenhangs der Elemente beitragen.

Dahingegen kann bei reduziertem Datenumfang und weniger detailliertem Informationsgehalt die Erfassung aller für die Betrachtung der strukturellen Eigenarten des Gesamtsystems notwendigen Elemente häufig gewährleistet werden. Die Darstellung verliert dadurch zwar an Schärfe, ist jedoch realitätsnäher als eine Untersuchung, die zwar genau ist, jedoch wegen beschränkter Kapazitäten nicht alle für das Systemverhalten wesentlichen Elemente und Wechselwirkungen enthält.

H.-P. Dürr erklärt dazu [D04, S.63]:

"(...), daß Exaktheit und Relevanz in einem gewissen Sinne unverträglich seien. (...) Wenn ich auf Exaktheit schaue, dann muß ich versuchen, gewisse Teile aus dem Gesamten herauszulösen, denn nur das Isolierte kann ich exakt erfassen. (...).

¹ Beispielsweise für die Optimierung einer Fluggastkabine eines schweizerischen Luftverkehrsunternehmens [S03, S.10] oder der Untersuchung der Entwicklungsmöglichkeiten der deutschen Automobilindustrie [V03].

Das Isolierte habe ich sozusagen im Griff und kann es dann auch sehr exakt beschreiben. Relevanz aber hat mit der Einbettung des Teiles im Ganzen zu tun, also mit der Verbindung zur Umgebung. Wenn ich relevant sein will, muß ich auf lokale Exaktheit verzichten. (...). Da ist es sogar schädlich, wenn ich mich auf ein Detail konzentriere."

Durch die Anwendung des Sensitivitätsmodells (SM) bietet sich erstmalig die Chance, die oben aufgeführten Probleme der Modellbildung zu lösen und zu einem für die Brandschutzplanung praktikablen und umfassenden Instrument zu gelangen, das die Vielfalt potentieller Geschehnisse während eines Brandes begreifbar macht und die Entwicklung eines Gefühls für die Sensitivität einzelner Sicherheitsmaßnahmen beim Brandschutzplaner unterstützt.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die Sinnhaftigkeit des Lösungsansatzes mittels Anwendung des gewählten Verfahrens für komplexe Systeme anderer Aufgabenstellungen ist wiederholt beschrieben worden [P01], so daß dies als Stand des Wissens vorausgesetzt werden kann und nicht gesondert begründet werden muß.

Vorliegende Arbeit weist deshalb folgenden logischen Aufbau auf:

These A: Brandverläufe in Bauwerken werden stark von unvorhersehbaren Ereignissen beeinflusst. Das Systemverhalten läßt sich bisher deshalb nicht ausreichend deduzieren und prognostizieren.

Beleg A: Kapitel 1: Expertenmeinungen aus einer Vielzahl von Zitaten.

These B: Der Brand in Bauwerken stellt ein komplexes System dar. Die unter These A angesprochenen Verhaltensweisen sind auf die Systemeigenschaft der „Komplexität“ zurückzuführen.

Beleg B: Kapitel 2: Definition der Begriffe „System“ und „Komplexität“ und Eigenarten der Verhaltensweise komplexer Systeme;
Kapitel 3: Verdeutlichung der prinzipiellen Übereinstimmung der Aussagen nach Beleg A mit den bisherigen Belegen für These B für das System „Brandverlauf“.

These C: Das System „Brandverlauf“ läßt sich als komplexes System mit dem SM nutzbringend untersuchen und liefert neue Ansatzpunkte für die Brandschutzforschung.

Beleg C: Kapitel 4: Expertenaussagen über das SM;
Kapitel 5: Sensitivitätsanalyse „Brandverlauf“;
Kapitel 6: Modellbildung, Parametervariationen und Simulationenläufe;
Kapitel 7: Aussagen zur Eignung des SM im Bereich der Brandschutzplanung.

2 KOMPLEXE SYSTEME

2.1 Begriffsdefinition „System“

Die Definition des Systembegriffs wird auf mengentheoretischer Grundlage dargestellt, um die häufig bei verbalen Ausführungen verwendeten Begriffe einzuführen. Im folgenden wird die Darstellung von Ropohl [R01] aufgegriffen und übernommen. Wegen der Stringenz der Ausführungen sind dabei auch im geringen Umfang Definitionen beibehalten worden, die keinen direkten Bezug zur späteren Darstellung haben (Definitionen 5 und 6). Wesentliche Begriffe sind: Supersystem, System, Subsystem, Input, Output, Relation, Struktur, Systemumgebung, Kopplung und Rückkopplung.

Ropohl unterscheidet, entsprechend der Darstellung auf der nächsten Seite, drei grundlegende Systemkonzepte, das strukturele, das funktionale und das hierarchische Konzept und versucht, diese in seinem Ansatz zu integrieren. Die Integration erfolgt, indem die Abhängigkeit des im funktionalen Konzept entwickelten Systems zu gleichartigen Systemen derselben Ebene eingeführt wird (Strukturierung). Die Anbindung des hierarchischen Konzeptes kann dann durch die Mikro- und Makroskopierung der oben beschriebenen Systeme auf unter- und übergeordnete Ebenen erfolgen.

Die Methode des SM gründet zunächst auf dem strukturalen Konzept zur Erfassung der Komplexität des betrachteten Systems, integriert jedoch mittels der Werkzeuge der „Teilszenarien“ und der „Simulation“ Möglichkeiten entsprechend der oben aufgeführten funktionalen Methodik. Nachdem das Systemmodell zunächst ganzheitlich entsprechend dem strukturalen Ansatz aufgestellt wird, können einzelne Fragestellungen behandelt und entsprechend dem funktionalen Ansatz mit der Realität abgeglichen werden. Das hierarchische Prinzip kann durch die Schaffung von Systemen unterschiedlicher Aggregationsebenen und gemeinsamer Verwendung von Kopplungsvariablen zwischen diesen Ebenen berücksichtigt werden. Die Grundlagen der „Systemtheorie der Technik“ stimmen damit mit der Vorgehensweise im SM in wesentlichen Punkten überein.

Das funktionale Systemkonzept wird häufig angewendet, um die Fragestellung nach der Verhaltensweise eines Systems bei bestimmten Umgebungsbedingungen zu untersuchen, also die Fragestellung "Was macht das System?" zu beantworten. Ein Modell kann dann funktional aufgebaut werden, wenn ein Abgleich mit realen Verläufen möglich ist, der Output also für definierte Fälle gut bekannt ist. Schwierig ist der Nachweis der Zulässigkeit der dann folgenden Induktion.

Das strukturele Systemkonzept richtet sein Interesse auf das Sein eines Systems, also auf die Fragestellung "Was ist das System?". Betrachtet werden verstärkt die Interdependenzen zwischen den Systemelementen. Die Vorgehensweise bei der Modellbildung entsprechend diesem Ansatz ist deduktiv.

Das hierarchische Systemkonzept versucht, durch eine Gliederung des Systems in über- und untergeordnete Systeme einen Erkenntnisgewinn über den betrachteten Gegenstand zu erreichen.

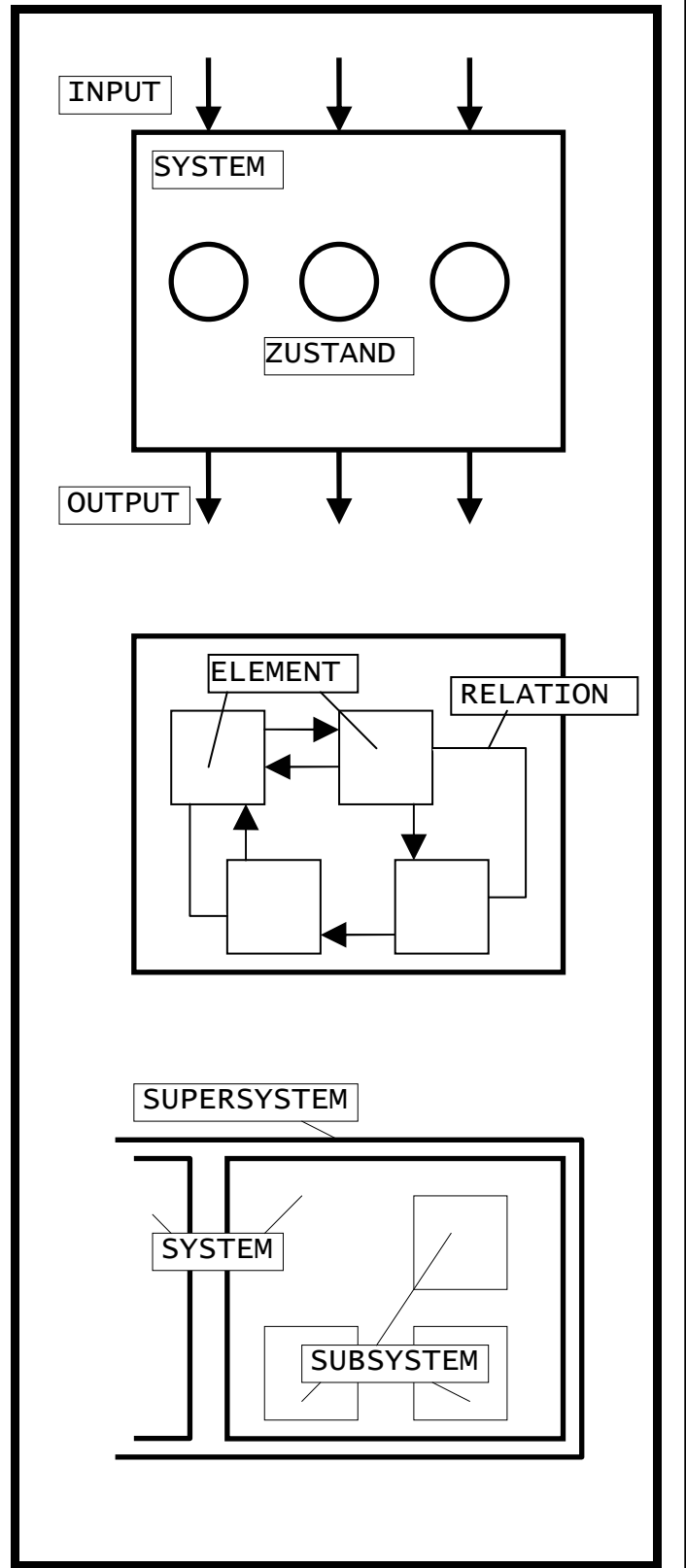


Abb. 2.1 Systemkonzepte nach Ropohl [R01]

Die folgenden mengentheoretischen Definitionen (Df.) sind aus [R01, S. 57ff] entnommen. Die verbalen Erläuterungen entstammen sinngemäß ebenfalls dieser Quelle.

Df. 1: Es sei α eine Menge von Attributen A_i ,
 φ eine Menge von Funktionen F_j ,
 σ eine Menge von Subsystemen S'_k ,
 und π eine Menge von Relationen P_m ,

(bzw. eine Struktur), dann heißt das Quadrupel dieser Menge ein **System S**.

$$S = (\alpha, \varphi, \sigma, \pi)$$

mit $\alpha = \{A_i\}$; $\varphi = \{F_j\}$; $\sigma = \{S'_k\}$; $\pi = \{P_m\}$
 und $i \in I$; $j \in J$; $k \in K$; $m \in M$; $(I, J, K, M \subset n)$

n ist die Menge der natürlichen Zahlen.

Die ersten beiden Stellen des Quadrupels S (α, φ) beziehen sich auf äußere, die letzten beiden (σ, π) auf innere Bestandteile des Systems.

Df.2: Ein **Attribut** A_i ist eine nicht-leere Menge von **Eigenschaftsausprägungen** a_{in} .

$$A_i = \{a_{in}\} \quad \text{mit } i \in I \text{ und } n \in N; (I, N \subset n)$$

Die Attribute eines Systems sind somit als Eigenschaften oder Merkmale zu interpretieren, die sich einem System zusprechen lassen. Diese Eigenschaften weisen eine oder mehrere qualitative oder quantitative Eigenschaftsausprägungen auf, die diskreter oder kontinuierlicher Natur sein können.

Df.3: Es seien $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ paarweise disjunkte Teilmengen der Attributenmenge α , und es sei α_g eine beliebige Attributenmenge, die nicht dem System S zugehört:

$$\alpha_x \cap \alpha_y = \emptyset; \alpha_y \cap \alpha_z = \emptyset; \alpha_z \cap \alpha_x = \emptyset$$

$$\alpha_x \cup \alpha_y \cup \alpha_z = \alpha; \alpha_g \notin S, \text{ dann hei\u00dft}$$

ein Attribut $A_{xi} \in \alpha_x$, das in Relationen des Typs $\alpha_g \times \alpha_x$ als Nachglied auftritt, ein **Input**,

ein Attribut $A_{yi} \in \alpha_y$, das in Relationen des Typs $\alpha_g \times \alpha_y$ als Vorglied auftritt, ein **Output**, und

ein Zustand $A_{zi} \in \alpha_z$, das in keiner derartigen Relation auftritt, ein **Zustand** des Systems S.

Input und Output stellen somit die Verbindung zur Umgebung eines Systems her, wogegen der Zustand nur auf das Systeminnere bezogen bleibt.

Df. 4: Eine **Funktion** F_j ist eine echte Teilmenge des kartesischen Produktes zwischen Attributen A_i .

$$F_j \subset A_i \times A_i; i \in I$$

Damit ist eine Funktion definiert als Beziehung zwischen zwei Attributen innerhalb des Systems. Im Gegensatz zum mathematischen Funktionsbegriff sind hier auch mehrdeutige Abbildungen m\u00f6glich, was in der Mathematik dem Begriff der „Relation“ entspricht.

Df. 5: Insbesondere heißt eine Funktion

zwischen Inputs	A_{xi}	Inputfunktion	F_{xj} ,
zwischen Outputs	A_{yi}	Outputfunktion	F_{yj} und
zwischen Zuständen	A_{zi}	Zustandsfunktion	F_{zj} .

$$F_{xj} \subset A_{xi} \times A_{xi}; F_{yj} \subset A_{yi} \times A_{yi}; F_{zj} \subset A_{zi} \times A_{zi}$$

Df. 6: Desweiteren heißt eine Funktion zwischen

Inputs und Zuständen	Überföhrungsfunktion	$F_{Üj}$,
Inputs und Outputs	Ergebnisfunktion	F_{Ej}
Zuständen und Outputs	Markierungsfunktion	F_{Mj} .

$$F_{Üj}: A_{xi} \rightarrow A_{zi}, F_{Ej}: A_{xi} \rightarrow A_{yi}, F_{Mj}: A_{zi} \rightarrow A_{yi}$$

Die Notation der letzten Zeile ist im Vergleich zur Zitationsstelle in obige Form geändert worden. Dies geschah, in Absprache mit deren Verfasser, zugunsten einer besseren Lesbarkeit.

Df. 7: Ein **Subsystem** S'_k ist ein System gemäß Df. 1.

$$S'_k = (\alpha', \varphi', \sigma', \pi')$$

Ropohl trägt mit dieser Definition einem "Grundaxiom der Systemtheorie" Rechnung, welches besagt, daß jedes Ding unserer Anschauung oder unseres Denkens als System begriffen werden kann, mithin also auch die Bestandteile eines Systems. Gleichzeitig wird die Einbeziehung des hierarchischen Systemkonzeptes vorbereitet.

Df. 8: Es sei $A'_{ki} \in \alpha'_k$ ein Attribut des Subsystems S'_k . Dann heißt eine echte Teilmenge des kartesischen Produkts zwischen k Attributen von k Subsystemen eine k -stellige **Relation** P_m .

$$P_m \subset A'_{ki} \times A'_{ki} \text{ mit je einem } i \text{ für jedes } k$$

Die Menge π der Relationen heißt auch **Struktur** des Systems S .

Die Funktion beschreibt Beziehungen zwischen mehreren Attributen ein und desselben Systems bzw. Subsystems, während die Relation den Bezug zwischen je einem Attribut verschiedener Subsysteme herstellt.

Df. 9: Es seien A'_{1y} der Output eines Subsystems S'_1 und A'_{2x} der Input eines Subsystems S'_2 . Dann heißt die zweistellige Identitätsrelation zwischen A'_{1y} und A'_{2x} **Kopplung** P_{k12} .

$$P_{k12} \subset A'_{1y} \times A'_{2x} \text{ mit } a'_{2xn} = a'_{1yn} \text{ für alle } n$$

Die Kopplung stellt somit die besondere Form der zweistelligen Relation dar. Der unter Definition 8 eingeführte Begriff der „Struktur“ wird im allgemeinen auch dann verwendet, wenn die Wirkung zwischen den Subsystemen über Kopplungen dargestellt werden.

Df. 10: Es sei β eine nicht-leere Menge, welche die Menge $\sigma \subseteq \beta$ der Subsysteme als Teilmenge enthält. Dann heißt die Differenzmenge zwischen dieser Menge β und der Menge σ der Subsysteme **Umgebung** γ .

$$\gamma = \beta/\sigma$$

Df. 11: Es sei σ^+ eine Systemmenge, die das System $S \in \sigma^+$ als Element enthält. Dann heißt das gemäß (Df.1) gebildete Quadrupel, das σ^+ enthält, **Supersystem** S^+ zum System S .

$$S^+ = (\alpha^+, \varphi^+, \sigma^+, \pi^+) \text{ mit } S \in \sigma^+$$

Ropohl führt den Begriff der **Rückkopplung** in Fortführung der gezeigten Mengendarstellung wie folgt ein:

„Besteht zwischen zwei Systemen S'_1 und S'_2 neben einer Kopplung P_{k12} auch eine Kopplung P_{k21} und existieren Ergebnisfunktionen

$$F'_{E1}: A'_{1x} \rightarrow A'_{1y} \quad \text{und} \quad F'_{E2}: A'_{2x} \rightarrow A'_{2y}$$

so liegt eine Rückkopplung vor.“

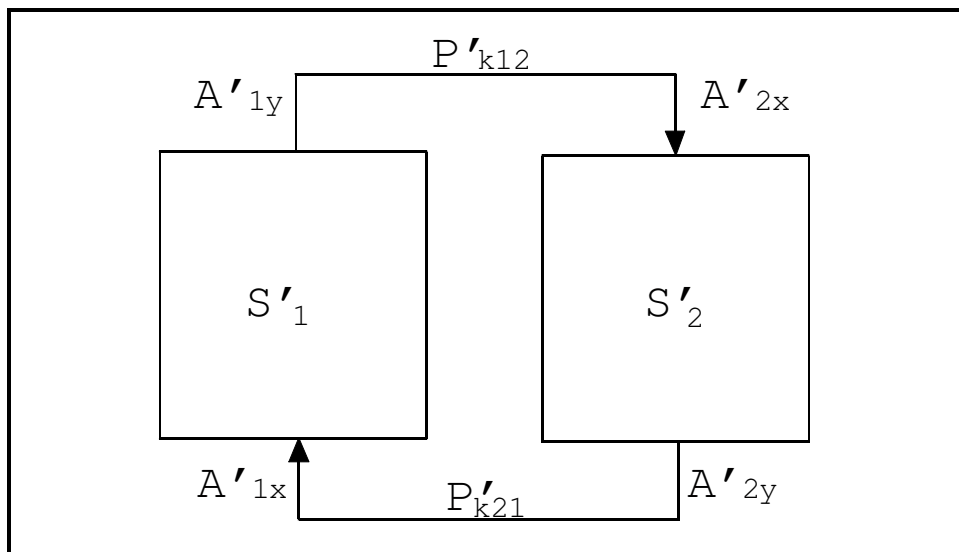


Abb. 2.2 Rückkopplung

Sind die Kopplungen P_k beide gleichgerichtet - eine Steigerung (Senkung) von S_1 bewirkt eine Steigerung (Senkung) von S_2 und umgekehrt - so liegt eine positive Rückkopplung vor, ansonsten eine negative. Positive Rückkopplungen führen zu einem exponentiellen Wachsen oder Sinken der Merkmalsausprägungen der Subsysteme, negative zu einer Annäherung an einen oder einer Schwingung um einen konstanten Wert.

2.2 Begriffsdefinition „Komplexität“

2.2.1 Vorbemerkung

Eine Voraussetzung für die sinnvolle Anwendung des SM ist, daß es sich beim Untersuchungsgegenstand um ein *komplexes* System handelt. Um im Kapitel 3 eine Einschätzung diesbezüglich vornehmen zu können, wird im folgenden der Begriff soweit wie nötig präzisiert und prägende Einflußfaktoren werden aufgezeigt.

2.2.2 Grundlagen

Auf wissenschaftlicher Ebene gab es in der Vergangenheit Bemühungen, den Begriff der „Komplexität“ als objektives, deterministisches Maß für die Vielfalt möglicher Verhaltensweisen von Systemen einzuführen [M01, S.185]. Umgangssprachlich kennzeichnet die Äußerung, eine „Angelegenheit sei zu komplex“ hingegen eine gewisse Ohnmacht gegenüber der Vielfalt möglicher Verhaltensformen. Der Begriff bezieht hier individuelle Schwächen des Betrachters bei der Analyse des Systemverhaltens ein und ist subjektiv. Im folgenden wird gezeigt, daß „Komplexität“ beide Aspekte beinhaltet und aus ihnen erklärt werden kann.

Zur Beschreibung der Komplexität eines Systems häufig verwendete Begriffe sind:

- **Varietät:** Anzahl der Subsysteme (SS);
- **Vernetzungsgrad:** Anzahl Kopplungen/Varietät;
- **Linearität:** Funktionale Ausprägung der Kopplungen.

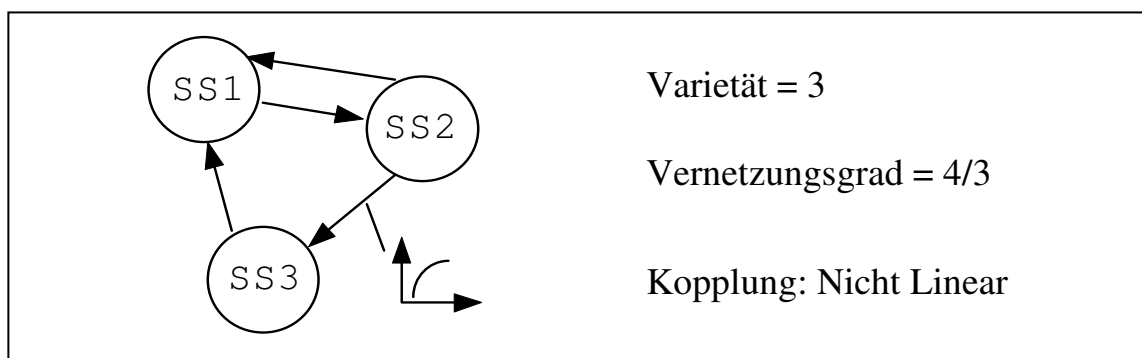


Abb. 2.3: Begriffe zur Beschreibung der Komplexität eines Systems

Unter "Varietät" wird in der Literatur häufig die "Anzahl der unterscheidbaren Zustände eines Systems" verstanden. [M01, S.186; P02]. Die Varietät könnte dann als Maßeinheit der Komplexität gelten. Ashby [A01, S.98] schildert jedoch die, unter sonst eingehaltenen ceteris-paribus-Bedingungen, aus einer genaueren Fokussierung einzelner Merkmalsausprägungen folgende Vergrößerung der Anzahl unterscheidbarer Systemzustände. Damit ist diese Begriffsdeutung nur dann sinnvoll, wenn die Lage der Betrachtungsebene zum Vergleich verschiedener Systeme bezüglich ihrer Komplexität festgelegt wird. Die Beschreibung der Notwendigkeit einer derartigen Festlegung findet sich auch bei Gell-Mann [G03, S.74], der darauf hinweist, daß eine Übereinkunft in der verwendeten Terminologie und ein gleicher Verständnishorizont bei allen die Komplexität eines Systems beurteilenden Personen notwendig sei.

Im folgenden wird „Varietät“ - wie oben angegeben - als Anzahl der Subsysteme definiert. Nach Ropohl [R01, S.71] bildet die Varietät entsprechend dieser Festlegung ein Maß für die Kompliziertheit eines Systems, nicht für dessen Komplexität. Mit der Angabe der Kompliziertheit ist im Gegensatz zum Begriffsinhalt von „Komplexität“ noch keine Aussage über das Systemverhalten getroffen.

Gell-Mann [G03, S.94] bezieht das beobachtende System in seinen Begriff der „effektiven Komplexität“ mit ein. Er definiert wie folgt:

"Die effektive Komplexität bezieht sich (...) auf die Beschreibung der Regelmäßigkeiten eines Systems durch ein komplexes adaptives System, das das andere beobachtet."

Weiter heißt es [G03, S.99f]:

"Da ein komplexes adaptives System zwischen Regelmäßigkeiten und Zufälligkeiten unterscheidet, ermöglicht es, Komplexität als die Länge des Schemas zu definieren, mit dem ein komplexes adaptives System

die Merkmale eines ankommenden Datenstroms beschreibt und vorhersagt. Diese Daten beziehen sich im allgemeinen auf die Funktionsweise eines anderen Systems, das das komplexe adaptive System beobachtet."

Das Bilden eines beschreibenden Schemas geschieht nicht durch die Analyse einzelner getrennter Elemente, sondern durch das Erkennen nicht-zufälliger Bestandteile eines Datenstroms (Mustererkennung) durch ein beobachtendes adaptives komplexes System, wie beispielsweise den Menschen.

Diese Aussage ist in zweierlei Hinsicht für die vorliegende Arbeit von Interesse. Zum einen baut das Sensitivitätsmodell auf den Prozeß der Mustererkennung durch den Modellanwender auf [V02, S.3f] - womit der Modellanwender selbst zum beobachtenden System wird - zum anderen ist für den hier untersuchten Gegenstand der Mensch im Brandereignis ein derartiges Subsystem.

„Komplexität“ entsteht im Zusammenspiel von Informationsangebot durch das betrachtete System und den Möglichkeiten der Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Betrachter. Die Komplexität einer Brandsituation hängt damit entscheidend von den Fähigkeiten der Opfer ab. Dies wird weiter unten noch gezeigt.

Ein Bezug ergibt sich zu der Arbeit Ashbys [A01], der feststellt, daß Schwierigkeiten bei der Steuerung von komplexen Systemen immer dann auftreten, wenn das lenkende System weniger komplex ist, als das zu lenkende. Ashby vergleicht die Komplexität des beobachtenden und des beobachteten Systems miteinander, Gell-Mann leitet Komplexität aus dem Zusammenspiel von Beobachter und dem Objekt der Beobachtung her.

Unter Zugrundelegung der zu Beginn dieses Abschnitts eingeführten Begriffe und der geschilderten Begriffsdeutung von Gell-Mann kann von folgenden Aussagen ausgegangen werden:

a) Die Komplexität eines Systems wächst mit abnehmender Eindeutigkeit der angebotenen Muster in den Ausgabegrößen, also der Zunahme der Unregelmäßigkeiten im Datenstrom¹. Die Einflüsse auf die Eindeutigkeit werden weiter unten noch näher dargestellt. Abnehmende Eindeutigkeit ergibt sich vor allem bei:

- zunehmender Varietät;
- zunehmendem Vernetzungsgrad;
- zunehmenden Anteil nicht-linearer Relationen.

Daraus folgend:

- Geschwindigkeit der Veränderungen im Datenstrom (Dynamik).

b) Die Komplexität eines Systems steigt mit abnehmender Fähigkeit zur Mustererkennung und Schemabildung durch den Betrachter. Einflüsse darauf haben:

- individuelle analytische Fähigkeiten;
- vorhandene Assoziationsschemata (Erfahrung).

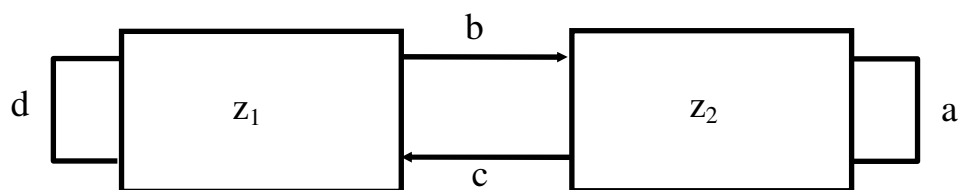
Der Punkt a) wird im folgenden als Objektbeitrag zur Komplexität, der Punkt b) als Subjektbeitrag bezeichnet. Aussagen zum Einfluß der Dynamik auf den Subjektbeitrag für das System „Brandverlauf“ finden sich auf S. 34ff dieser Arbeit.

Die Untersuchung des Objektbeitrages als Träger der Komplexität wird durch die Natur- und Ingenieurwissenschaften favorisiert (vgl. bspw. die Darstellung von Bossel [B01], die Favorisierung des Menschen als beobachtendes und steuerndes System erfolgte vor allem durch Psychologen und Soziologen (vgl. bspw. Dörner [D05]). Der Begriff der „Komplexität“ erklärt sich nach Gell-Mann unter Einbeziehung beider Sichtweisen.

¹ vgl. auch Gell-Mann „Algorithmischer Informationsgehalt“ [G01, S.75 ff]

2.2.3 Objektbeitrag zur Komplexität

Bossel [B01, S.140ff] zeigt für das unten dargestellte lineare System mit zwei Zustandsgrößen die Verhaltensmöglichkeiten »Knoten, Sattel, Wirbel und Strudel« jeweils als Quelle oder Senke anhand der Zustandsebenen auf (vgl. Abb.2.5). Diese Verhaltensformen finden sich auch bei linearen Systemen höherer Ordnung wieder, wobei sich stabile Systeme dieser Art immer in Richtung des einzigen Gleichgewichtspunktes entwickeln [B01, S. 149].



$$z_{i,t+1} = z_{i,t} + z_i'$$

$$z_2' = a \cdot z_{2,t} + b \cdot z_{1,t}$$

$$z_1' = c \cdot z_{2,t} + d \cdot z_{1,t}$$

Koeffizienten:

$$A = [a,b,c,d]$$

Abb. 2..4: Lineares System mit zwei Zustandsgrößen

Starken Einfluß auf die Eindeutigkeit des Verhaltens linearer Systeme haben vor allem Strukturänderungen. So ändert sich die Richtung der Entwicklung im oben aufgeführten Beispiel vom stabilen Strudel ($A = [0,1,-1,-1]$) zum instabilen Strudel ($A = [0,1,-1,1]$) bei einer Umkehrung der Wirkungsrichtung der Kopplung $[d]$ von $[-1]$ auf $[+1]$ und zu einem stabilen Wirbel ($A = [0,1,-1,0]$) bei Wegfall der Beziehung $[d]$.

Die Interpretierbarkeit durch den Systembeobachter kann im zeitlichen Verlauf auch bei linearen Systemen äußerst schwierig sein. Darauf wird unter Punkt 2.2.4 Bezug genommen.

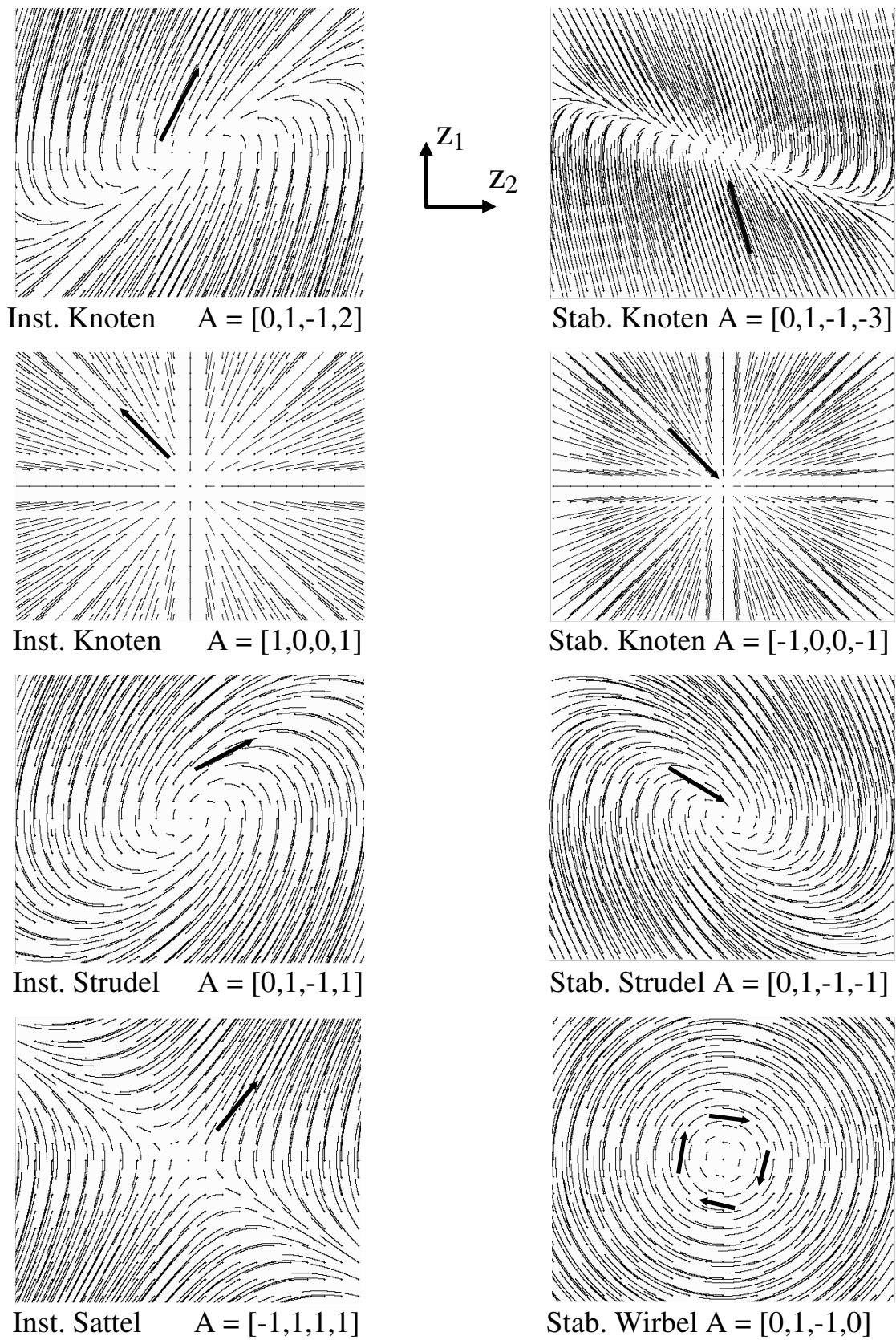


Abb. 2.5: Verhaltensformen des linearen Systems mit zwei Zustandsgrößen

Der Einfluß der Varietät und des Vernetzungsgrades ist im Bereich nicht-linearer Systeme von hohem Belang. Hohe Varietät und hoher Vernetzungsgrad sind dabei eine notwendige, jedoch keine hinreichende Voraussetzung für einen hohen Objektbeitrag zur Komplexität. Einen deutlichen Einfluß hat die Nicht-Linearität der funktionalen Beziehungen.

Nicht-lineare Systeme können im Gegensatz zu linearen Systemen mehrere Gleichgewichtspunkte oder Attraktoren in der Zustandsebene bzw. im Zustandsraum aufweisen. Ihr Verhalten ist stark abhängig vom Ausgangszustand der Zustandsgrößen.

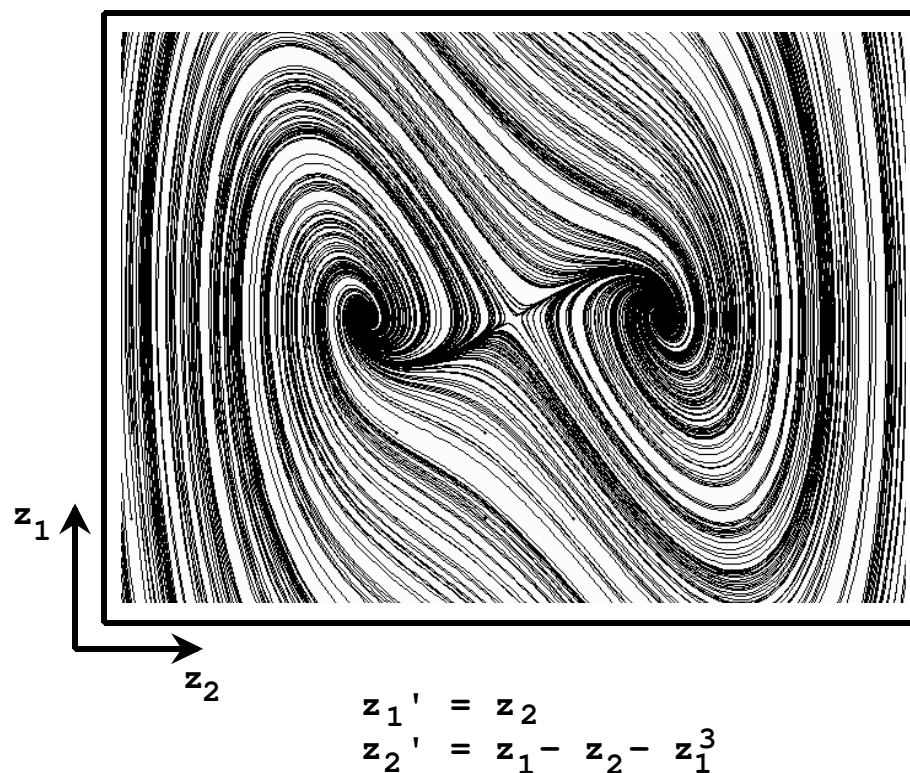


Abb. 2.6: System mit zwei Zustandsgrößen und nicht-linearem Term

Die Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft das Zustandsbild eines Systems 2. Ordnung (Relaxations-Schwingkreis) im Bereich des Nullpunktes mit nicht-linearem Zusatzterm (nach [B01]). Man erkennt zwei stabile Strudel, in denen sich die Zustandsgrößen z_1, z_2 in Abhängigkeit von ihrer Ausgangslage fangen können. Für eine Änderung der Entwicklungsrichtung bedarf es dabei in einigen Bereichen nur einer geringfügig veränderten Ausgangsposition.

Wichtige Voraussetzung für einen hohen Objektbeitrag zur Komplexität sind somit zusammenfassend Strukturänderungen sowie die Anzahl der nicht-linearen Relationen zwischen den Subsystemen, die durch hohe Varietät und einen hohen Vernetzungsgrad begünstigt werden.

2.2.4 Subjektbeitrag zur Komplexität

Der Datenstrom eines Systems wird dann schwierig zu interpretieren, wenn der Betrachter entweder aufgrund sensorischer Probleme nicht alle zur Interpretation notwendigen Daten lückenlos aufnehmen kann (mangelhafte Informationsaufnahme), nicht weiß, welche Informationen wichtig sind (mangelhaftes Selektionsvermögen) oder nicht über eine ausreichende Wissensbasis bezüglich der möglichen Vorgänge im System verfügt, respektive aufgrund einer „falschen“ Wissensbasis falsche Assoziationen entwickelt (mangelhafte Informationsverarbeitung).

In der Darstellung von Perrow [P03, S.125ff] wird der Zusammenhang zwischen komplexen Systemen und der Entstehung und Entwicklung von Katastrophenergebnissen beschrieben. Als Teil seiner Umschreibung des Begriffs des „komplexen“ Systems finden sich Angaben, die den „Operateur“ mit in das System einbeziehen [S. 128]. Perrow führt den Begriff der „komplexen Interaktionen“ ein [S. 115] und kennzeichnet damit die sich für den „Operateur“, anders als für den außerhalb des Systems befindlichen Betrachter, ergebenden Schwierigkeiten.

„Lineare Interaktionen treten im erwarteten und bekannten Betriebsablauf auf oder sind für den Operateur gut sichtbar, auch wenn sie außerplanmäßig vorkommen. Komplexe Interaktionen sind entweder geplant, aber den Operateuren nicht vertraut, oder ungeplant und unerwartet, und sie sind für das Bedienungspersonal entweder nicht sichtbar oder nicht unmittelbar durchschaubar.“¹

¹ Man erkennt, wie unterschiedlich der Begriff der Komplexität verwendet wird: Der Operateur ist Systemteil, Komplexität wird jedoch - anders als bei Gell-Mann - zur Eigenschaft des von ihm betrachteten Systems. Das Zusammenwirken von Objekt- und Subjektbeitrag zur Beschreibung des Komplexitätsbegriffs wird an dieser Stelle verbal nicht berücksichtigt.

Beachtet werden muß in diesem Zusammenhang, daß auch bereits lineare Kopplungen zwischen den Subsystemen zu einem schwierig zu interpretierenden zeitlichen Verhalten einzelner Output-Merkmale führen können, denn bereits die positive Rückkopplung über zwei linear gekoppelte Zustandsgrößen ergibt für jede dieser beiden Größen einen exponentiellen Wachstums- oder Schrumpfungsprozeß über die Zeit. Exponentielle Prozesse sind jedoch außerordentlich schwierig abzuschätzen und in ihrem weiteren Verlauf zu prognostizieren. Insbesondere wenn der Operateur - wie das Opfer im Brandfall - nicht über ausreichende Erfahrungen verfügt.

Die Beziehung der bisher aufgezeigten Zusammenhänge zum Brandereignis wird im nächsten Kapitel hergestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Komplexität des Systems sich für die in ihm involvierten Personen vollständig anders darstellt als bei einer Betrachtung von außerhalb des Systems. Dem Brandschutzplaner erscheinen Zusammenhänge eindeutig und einleuchtend, die sich dem Opfer vollkommen anders darstellen.

In einem anderen Zusammenhang verdeutlichen Hauhs/Lange [H02] den Unterschied in der Sichtweise externer und interner Systembeobachter, in Anlehnung an den durch Gell-Mann dargestellten Komplexitätsbegriff, mit der Erzeugung von (Pseudo-) Zufallszahlen durch einen Computer. Die Person, die diese erzeugte Zahlenfolge als interner Systembeobachter betrachtet, wird keine Regel zur Schemabildung finden können; hingegen kann der Programmierer des Zufallszahlengenerators bei bekannten Initialisierungsdaten die entwickelte Zahlenfolge beliebig genau angeben. Betrachtet man dies aus der Sichtweise des internen Beobachters, so bleibt der Objektbeitrag zur Komplexität dadurch unverändert gering. Da der Algorithmus zur Bildung der Zufallszahlen jedoch unbekannt ist, wird hier der Subjektbeitrag ausschlaggebend für die mangelhafte Interpretierbarkeit des Datenstroms und damit für die Komplexität des aus „Beobachter“ und „Objekt der Beobachtung“ bestehenden Systems.

2.3 Abgrenzung

Nicht angesprochen wurden in den vorangegangenen Kapiteln einige wissenschaftliche Entwicklungen der letzten Jahre, die mit dem Komplexitätsbegriff verknüpft sind. Stichworte wie: Fraktale Geometrie, Zelluläre Automaten, Neuronale Netze und Chaostheorie sind eng mit diesem neuen Wissensbereich der Erforschung komplexer Systeme verbunden. Die diesbezüglichen Entwicklungen dienen zur Zeit jedoch vorrangig der Grundlagenforschung über verallgemeinerbares Verhalten komplexer Systeme. Modelle, die auf der Grundlage dieser neuen Entwicklungen in der Lage sind, die Ziele der vorliegenden Arbeit zu unterstützen, sind bislang nicht bekannt.

3 KOMPLEXITÄT DES BRANDVERLAUFS

3.1 Vorbemerkung

Die Komplexität eines Systems wächst, wie im letzten Abschnitt gezeigt, sowohl mit zunehmender Unregelmäßigkeit der vom System angebotenen Daten (Objektbeitrag), als auch mit abnehmenden Fähigkeiten des Systembetrachters, Regelmäßigkeiten im Datenstrom zu erkennen (Subjektbeitrag) und in ein Handlungsschema umzusetzen.

Im folgenden werden beide Bereiche für das System „Brandverlauf“ dargestellt:

- der Objektbeitrag anhand eines virtuellen Brandszenarios und der Darstellung der Schwierigkeiten der Determinierbarkeit einzelner Brandparameter in ihrem zeitlichen Verlauf ;
- der Subjektbeitrag anhand von Forschungsergebnissen aus dem Bereich „Verhalten von Menschen bei Gebäudebränden“.

Der im Brandfall außerordentlich wichtige Einfluß von Strukturveränderungen wird im Anschluß daran anhand eines Fallbeispiels verdeutlicht.

Die im folgenden gezeigten Modelle sind ohne Anspruch an Detailliertheit und physikalisch-numerische Genauigkeit aufgebaut worden. Der Vorteil dieser Darstellung gegenüber einem detailgenauem physikalischem Modell ist die einfach Nachvollziehbarkeit bei an dieser Stelle ausreichender Aussagekraft. Die physikalischen Grundlagen für Brandraummodelle finden sich beispielsweise in [H03].

3.2 Objektbeitrag

3.2.1 Ein Szenario

Angenommen wird ein Brand in seiner entwickelten Phase innerhalb eines Büroraumes. Eine Rauchschrift hat sich gebildet und Rauch strömt bereits kontinuierlich über ein geöffnetes Oberlicht aus dem Brandraum ins Freie ab, die Tür zum Raum ist geschlossen. Eine vor der Tür befindliche Person muß zu einer Entscheidung über ihre Handlungen kommen. Welche Daten liefert das System beim Öffnen der Tür und welche Rückschlüsse ergeben sich für die handelnde Person ?

Folgendes Erklärungsmodell idealisiert das Geschehen im Brandraum für einige Parameter. Gegenläufige Kopplungen - wird A größer (kleiner), so sinkt (steigt) B - sind gestrichelt dargestellt.

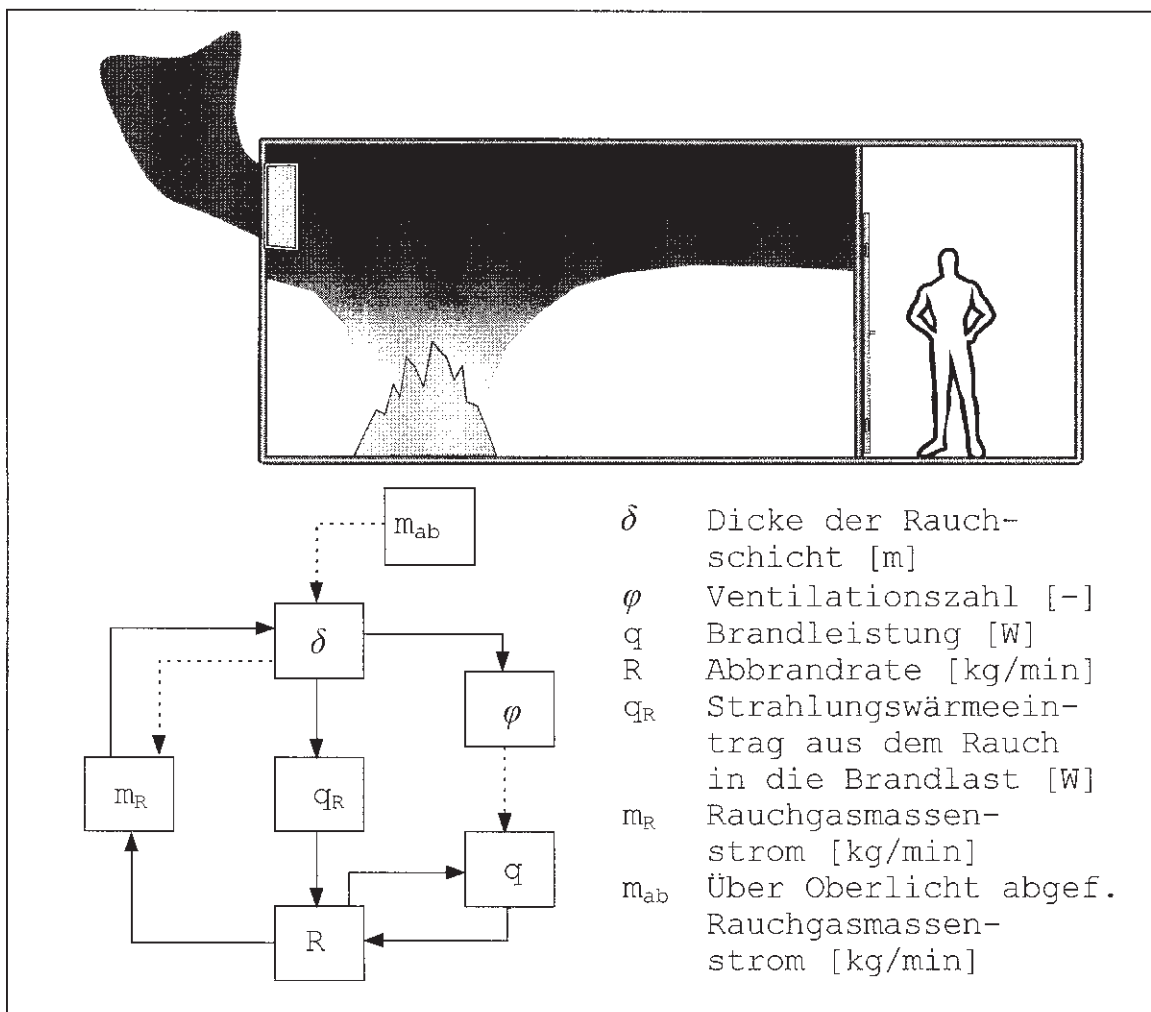


Abb 3.1: Situationsdarstellung und Erklärungsmodell

Die Ventilationszahl kennzeichnet das Verhältnis zwischen stöchiometrischem Sauerstoffbedarf und zugeführter Sauerstoffmasse, die Abbrandrate gibt den Massenumsatz des Brennstoffs pro Zeiteinheit wieder.

Die Wirkungsbeziehungen (\rightarrow) lassen sich wie folgt erläutern:

$$q \rightarrow R \rightarrow m_R \rightarrow \delta \rightarrow \omega \rightarrow q:$$

Ein Anstieg der Brandleistung q verstärkt den Wärmeeintrag in die Brandlast durch die Strahlung der Flamme und die Abbrandrate R steigt durch das Absinken des Zündverzuges der Brandlast. Dadurch vergrößert sich die Flamme in vertikaler und horizontaler Richtung und die Flammentemperatur steigt. Die vergrößerte Flammenoberfläche und der größere thermisch bedingte Auftrieb bewirken einen erhöhten Lufteintrag und damit ein Anwachsen der Masse produzierter Rauchgase m_R mit der Folge des Anwachsens der Rauchsicht δ . Erreicht der Rauch die Flamme, steigt der Quotient aus stöchiometrischem Sauerstoffbedarf und zugeführter Sauerstoffmasse, die Ventilationszahl ω . Dies hat zur Folge, daß die Vollständigkeit der Verbrennung sinkt und die Brandleistung q abnimmt.

$$q_R \rightarrow R:$$

Ein zunehmender Strahlungswärmeeintrag q_R aus der Rauchsicht in die Brandlast bewirkt die Erhöhung der Brandlasttemperatur, der Zündverzug sinkt und die Abbrandrate R steigt an.

$$\delta \rightarrow m_R:$$

Die dicker werdende Rauchsicht δ bewirkt, daß die diffuse Luft-eintrittsfläche des Plume und damit die produzierte Rauchgasmasse geringer wird.

$$R \rightarrow q:$$

Mit wachsender Abbrandrate R steigt die Brandleistung q .

$$m_{ab} \rightarrow \delta:$$

Die abströmende Rauchgasmasse verringert die Dicke der Rauchsicht.

3.2.2 Nicht-lineare Beziehungen und Rechenmodell

Bereits diese einfache Darstellung enthält eine Reihe von nicht-linearen Wirkungsbeziehungen. So ist beispielsweise der radiative Strahlungswärmeeintrag aus dem Rauch q_R in die Brandlast proportional zum Quadrat des Inversen des Abstandes z zwischen Strahler und Empfänger [D01, S.62]:

$$q_R \sim z^{-2},$$

was hier gleichbedeutend mit einem nicht-linearen Zusammenhang zwischen der Dicke der Rauchschrift δ und der Abbrandrate R ist.

Ein Rechenprogramm, das eine numerisch genaue Modellbildung zu dem dargestellten Problemkreis verwendet, ist nicht verfügbar. Bei allen bekannten Brandsimulationsprogrammen wird die Brandleistung als Datenbasis vorgegeben und durch das Wärmeregime im Raum nicht vergrößert. Lediglich der dämpfende Einfluß aus der Sauerstoffunterversorgung findet im allgemeinen Berücksichtigung.

Vereinfachend wurden für das Rechenmodell einige der im obigen Erklärungsmodell angegebenen Wirkungsbeziehungen zusammengeführt und Bezeichnungen neu definiert.

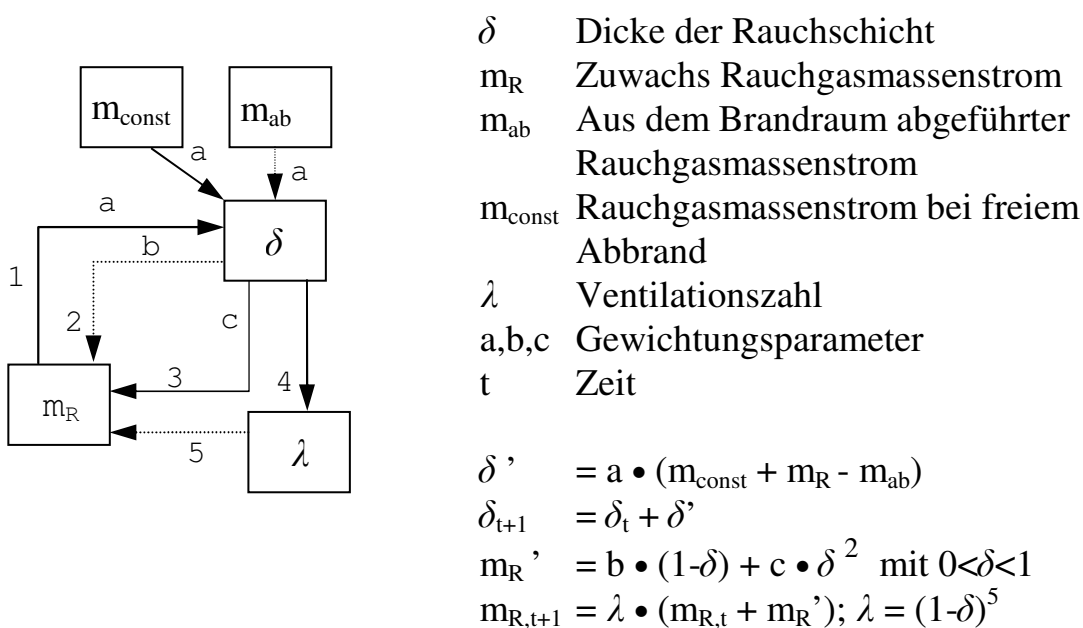


Abb. 3.2: Rechenmodell

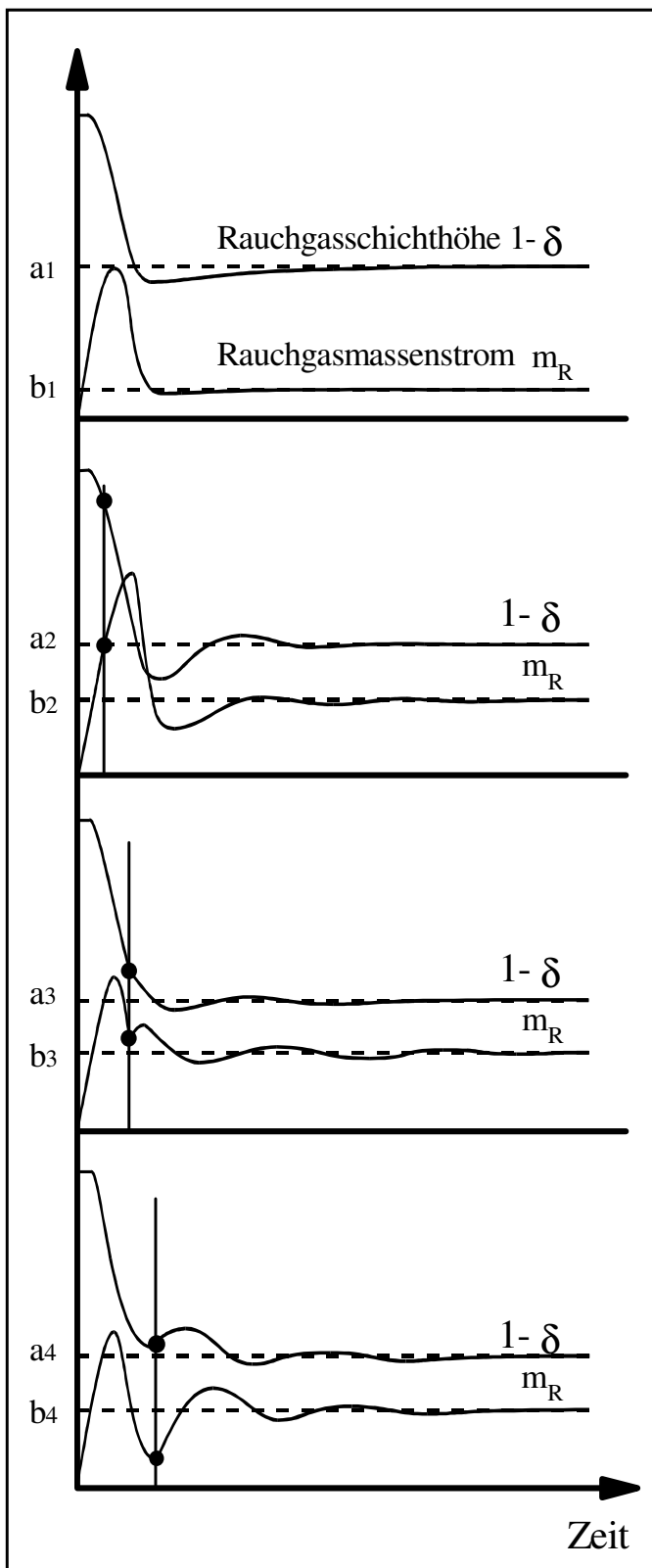
1) Die Beziehung wird als linear angenommen, da lediglich der Kubus des Brandraumes mit Rauch gefüllt wird und eine Veränderung der zuströmenden Rauchgasmasse eine proportionale Veränderung der Rauchsichtdicke bewirkt ($a \cdot (m_{\text{const}} + m_{\text{R}} - m_{\text{ab}})$).

2) Die absinkende Rauchsicht verringert die zur Einströmung der Frischluft verfügbare Plume-Oberfläche. Unter der vereinfachenden Annahme eines zylinderförmigen Plume ist diese Beziehung ebenfalls linear ($b \cdot (1-\delta)$).

3) Mit absinkender Rauchsicht, also größer werdendem δ , nimmt der Strahlungseintrag in den Brennstoff zu, die Abbrandgeschwindigkeit steigt und mit ihr die Rauchgasmassenproduktion. Die Beziehung wird als quadratisch, wie bereits weiter oben dargestellt, angenommen ($c \cdot \delta^2$).

4-5) Der Wert λ - hier als Parameter für die Sauerstoffunterversorgung angesetzt - beeinflusst den Grad der Verbrennung, also den Energieumsatz, und damit über die Strömungsgeschwindigkeit der zugeführten Luft die Rauchgasmassenproduktion. Mangelhafte Sauerstoffzufuhr wird dann relevant für die Brandleistung, wenn der Rauch den Hauptoxidationsbereich des Plume erreicht. Die hier gesetzte Abhängigkeit $\lambda = (1-\delta)^5$ trägt dem Rechnung. Ab $\delta \approx 0,5$, also etwa bei halber Raumhöhe, geht der Zuwachs des Rauchgasmassenstroms ($\lambda \cdot (m_{\text{R,t}} + m_{\text{R}}')$) schnell gegen Null.

Ab dem Zeitpunkt des im folgenden simulierten Öffnens der Tür wird verstärkt Rauch aus dem Brandraum abgeführt. Die Abbildung auf der nächsten Seite zeigt das zeitliche Verhalten der beiden Zustandsgrößen Rauchgasmassenstrom m_{R} und Rauchsichtdicke δ und beschreibt den Eindruck, den eine involvierte Person von der weiteren Systementwicklung, in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Öffnens der Tür, gewinnen muß.



• Zeitpunkt des Öffnens der Tür

1. Das System ist stark gedämpft, wenn die Tür geschlossen bleibt und lediglich ein geringer Rauchvolumenstrom aus dem Brandraum abgeführt wird. Wird die Tür geöffnet, verschlechtert sich die Situation, bei den hier zugrundegelegten Anfangsbedingungen, da: $a_2, a_3, a_4 < a_1$ und $b_2, b_3, b_4 > b_1$.

2. Das Öffnen der Tür hat zur Folge, daß die Brandintensität größer wird als bei geschlossener Tür. Die handelnde Person bemerkt nichts davon, da die Entwicklung weiterhin kontinuierlich verläuft.

3. Die handelnde Person wird hier einen anderen Eindruck erlangen. Durch das Öffnen der Tür steigt zunächst, da die gedämpfte Phase schon begonnen hatte, die Brandintensität an, wenn auch nur geringfügig und kurzfristig.

4. Das Öffnen der Tür in der stark gedämpften Brandphase hat zur Folge, daß der Brand erneut entfacht wird. Die Person wird von der Heftigkeit der Systemreaktion überrascht.

Abb. 3.3: Interpretation der Systemreaktion durch den Beobachter

3.2.3 Strukturänderungen

Strukturänderungen sind vielfältig und werden weiter unten im Fallbeispiel und bei der Analyse des Systems „Brandverlauf“ herausgearbeitet. Ein Ereignis, das stärkste Strukturänderungen bewirkt, ist beispielsweise der Flash-Over, also das plötzliche und vollständige Entzünden aller Brandlasten und brennbaren Gase im Brandraum.

3.3 Subjektbeitrag

3.3.1 Forschungsergebnisse

Eine dezidierte Darstellung der Forschungsergebnisse zum Verhalten von Menschen bei Bränden unterbleibt im Rahmen der vorliegenden Arbeit, da an dieser Stelle lediglich aufgezeigt werden soll, welche Einflüsse grundlegend für den Subjektbeitrag zur Komplexität sind. Bezug wird deshalb im folgenden auf Sekundärliteratur genommen, die die vielfältigen Forschungsaktivitäten zusammenfaßt und analysiert.

Die Untersuchung des Verhaltens von Menschen bei Gebäudebränden ist seit Anfang der siebziger Jahre Gegenstand wissenschaftlichen Interesses. Bodamer [B02] erarbeitete eine Auflistung internationaler Forschungsergebnisse, faßte diese zusammen und stellte spezifische menschliche Verhaltensformen in Abhängigkeit vom Gebäudetyp, bzw. der Nutzungsart des Bauwerks dar [B03].

Eine Wertung der von Bodamer zusammengestellten Forschungsergebnisse und weiterführende Gedanken in soziologischer und psychologischer Hinsicht erfolgte durch Dombrowsky/Schuh [D02]. Sie bemängeln am bisherigen Vorgehen bei der Untersuchung menschlichen Verhaltens bei Bränden, daß „weltweit Unmengen an empirischen Daten erhoben“ werden, ohne daß sich aus ihnen eine „generelle Verhaltenstheorie“ deduzieren ließe und daß wesentliche psychologische Verhaltensdeterminanten nur ungenügend berücksichtigt würden.

In ihren Anforderungen an eine synthetisierende Forschungsmethodik beziehen sie sich auf Vesters Forderung nach einem „vernetzten Denken“ bei der Analyse komplexer Systeme. Weiter konstatieren sie, daß es kaum ein durch Brände determiniertes spezielles Verhalten gäbe, vielmehr hätten die meisten Menschen in den Industrienationen, kulturell bedingt, keine Beziehung zum Gegenstand „Feuer“ aufbauen können. Das beobachtbare Verhalten von Menschen bei Brandereignissen sei daher auf ein allgemein menschliches Verhalten zurückzuführen, wie es auch bei anderen Extremsituationen festzustellen sei.

Verhaltensdeterminanten entstammen entweder dem Bereich archaischer Verhaltenssteuerung oder sind kulturell geprägt. Im Brandfall wirken beide Verhaltensmuster gegeneinander und führen zu einem Konflikt zwischen normativer sozialer Erwartung und Fluchtimpuls. Der Fluchtimpuls wird darüberhinaus von der „rationalen Fertigkeit der Gefahrenbewertung überformt (...)“, die durch „Kenntnisse, Fertigkeiten und Instrumentarien“ der betroffenen Person beeinflusst wird.

3.3.2 Resultierende Einflußgrößen

Wesentliche Einflußgrößen auf das Verhalten der Nutzer und die Komplexität der Situation sind somit:

- **Widerstreit normativer Erwartung mit Fluchtimpuls:** Abhängig von Wertvorstellungen und Gefahreneinschätzung.
- **Grundsätzliche Prognosemöglichkeiten:** Die zeitliche Entwicklung beobachtbarer Brandparameter ist häufig exponentiell. „Menschen haben überhaupt kein intuitives Verhältnis zu exponentiell ablaufenden Prozessen“ [D05, S.166].
- **Abnahme analytischer Fähigkeiten:** Die Analysefähigkeiten des Nutzers werden selbst durch das System beeinflusst.
- **Zeitverknappung:** Bei wachsender Komplexität bedarf es zur Entwicklung erfolgreicher Lösungsstrategien eines steigenden Zeitaufwandes; bei wachsender Dynamik fällt andererseits das dafür zur Verfügung stehende Zeitbudget.

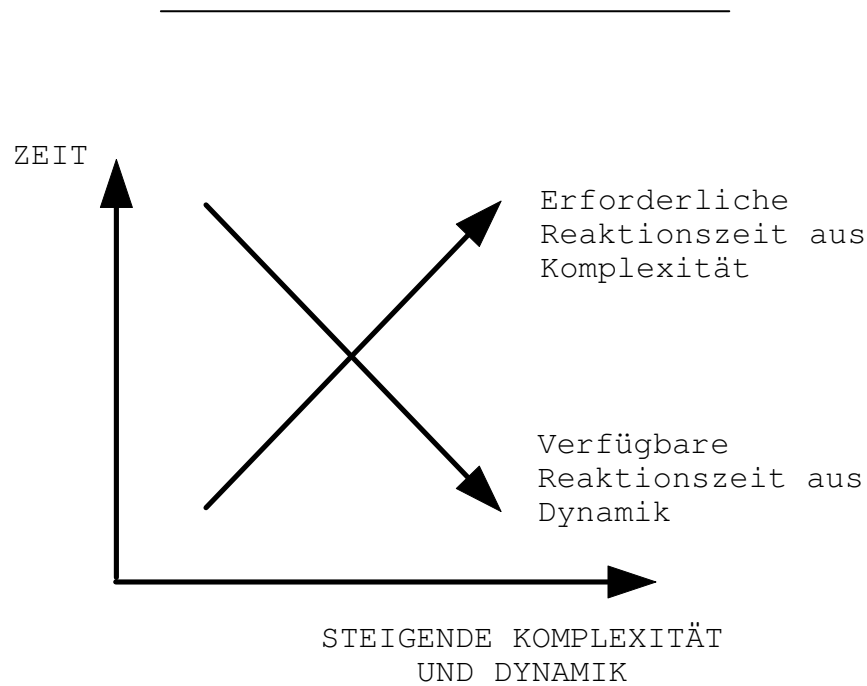


Abb. 3.4: Einfluß von Komplexität und Dynamik auf die Reaktionszeiten nach [U01]

Dörner bemerkt zu diesem letztgenannten Zeitaspekt bezüglich der Brauchbarkeit analytischen Vorgehens in einer Gefahrensituation [D05]:

„Das Suchen neuer Handlungsmöglichkeiten durch Denken als „internes Probehandeln“ ist in einer Gefahrensituation fehl am Platz; es dauert viel zu lange. Besser ist es, das „programmierte“ Inventar von Verhaltensweisen einzusetzen, welches in gelernten Reiz-Reaktions-Sequenzen bereits vorliegt.“

Dombrowsky/Schuh [D02, S.23] unterstützen diese Auffassung, wie folgt:

„(...) wie wichtig die rationalen und wie unwichtig die affektiven Komponenten des Verhaltens und Handelns sind. Das Problem der Angst, gar der Panik, um nur dies herauszugreifen, ist deswegen belanglos, weil Angst und Panik erst auftreten, wenn zuvor alle Instrumentarien der kulturellen Überformung ausgefallen sind, und der Mensch (...) zwangsläufig auf seine Instinktresiduen zurückfallen muß. (...) Worauf es also ankommt, ist im Gegenteil sogar die Einübung von Beherrschungstechniken, mit denen wir im Ernstfall unsere evolutionär überkommenen Impulse im Zaum halten und durch rationales Handeln ersetzen können.“

Dörner und Dombrowsky/Schuh betonen übereinstimmend die Wichtigkeit der Einübung von Techniken, die der Gefahrensituation angepaßt sind und kein „Denken als internes Probehandeln“ mehr voraussetzen. Die Aussagen scheinen zunächst widersprüchlich. Dombrowsky bestätigt jedoch, daß die Begriffe „gelernte Verhaltensweisen“ und „eingeübte Beherrschungstechniken“ synonym zu verstehen sind [D09]. Auf diesen Aspekt wird nochmals im Kapitel 5.6.6.5 Bezug genommen.

3.4 Fallbeispiel

Das folgende Fallbeispiel unterstützt die bisher getroffenen Aussagen.

Anhand der Brandkatastrophe vom 11.04.1996 auf dem Rhein-Ruhr-Flughafen in Düsseldorf kann die Vielfältigkeit des Geschehens bei diesem Brand angedeutet werden, bei einer genaueren Analyse der bisher nicht verfügbaren Aussagen der beteiligten Personen würde sie noch deutlicher. Die in der folgenden Auflistung in Klammern angegebenen Quellennachweise beziehen sich auf [W01]. Aussagen ohne Quellennachweis entstammen eigenen Gesprächen mit am Brandgeschehen beteiligten Personen.

Schweißarbeiten an einer im Außenbereich liegenden Fuge einer Betondeckenplatte führten zu einer Entzündung eines unterhalb dieser Fuge angeordneten Zwischendeckenbereichs. Im Verlauf des Brandes starben sechzehn Personen durch den äußerst intensiven Rauch, ein siebzehntes Todesopfer war nach einigen Wochen zu beklagen.

Ursachen und Einflüsse:

- Dem Schweißer war keine, wie ansonsten üblich, die Schweißarbeiten überwachende Person beigeordnet. Er kannte die Bauwerksstruktur des Flughafens anscheinend nicht (Subunternehmen), obgleich im Schweißauftrag die unterhalb der Decke befindliche ausgedehnte Halle beschrieben war (2-9).
- Die Werkfeuerwehr des Flughafens (WF) rückte nach der Brandmeldung mit einem Fahrzeug mit der Besetzung 1/1 (1 Einsatzleiter, 1 Maschinist) aus, obwohl für das Fahrzeug weitere zwei Mitarbeiter eingeteilt waren. Grund dafür war, daß die Alarmierung ohne Alarmgong erfolgte, so daß diese zwei Personen die Information nicht erhielten (3-20).
- Die WF verfügte vor allem wegen des nicht mittels Rauchmeldern überwachten und auch nicht einzusehenden Zwischendeckenbereichs, in dem der Brand entstand, über zu geringe Informationen, um die entstehende akute Gefahr richtig einschätzen zu können (5-35). So glaubten die Feuerwehrleute zunächst, die aus der Zwischendecke abtropfenden Funken seien auf einen Defekt in der Elektroanlage zurückzuführen (2-16). Um dies klären zu lassen, wurde ein Elektriker bestellt, so daß sich eine Zeitverzögerung von 5 Minuten ergab. Erst im Anschluß daran wurden weiter Erkundungen unternommen..
- Die Einschätzung der Gefahr durch die WF wurde dadurch beeinflusst, daß in der Vergangenheit eine Vielzahl von kleinen Brandereignissen nie zu einem größeren Personenrisiko geführt hatten.
- Nach dem Erkennen einer ca. 1 m² großen „glühenden“ Fläche im Bereich der abgehängten Decke durch einen Mitglied der WF stürzte wenig später ein 20 m² (5-34) großer Deckenbereich brennend ab und die Halle verrauchte stark. Es dauerte, da zunächst der Leiter der WF zum Brandort gerufen wurde, vom Zeitpunkt des Erkennens der „glühenden“ Fläche an 11 Minuten, bis die Berufsfeuerwehr (BF) zu Hilfe gerufen wurde.
- Die BF funkte auf einer anderen Frequenz als die WF, so daß im weiteren Verlauf des Brandes Kommunikationsprobleme bestanden. Darüberhinaus verursachte die Stahlbetonstruktur des Bauwerks starke Funkschatten, so daß auch im internen Funkverkehr der BF die Kommunikation äußerst problematisch war, zudem alle Einheiten der BF auf einer Funkfrequenz arbeiteten und die Einheitsführer dadurch rasch die Übersicht und Verbindung zur eigenen Rettungseinheit verloren (3-29).

-
- Es war keine Hauptreisezeit und auch keine Spitzenstunde; die Belegungsdichte war somit relativ gering.
 - Eine Lounge, in der 8 Personen starben, war von der allgemeinen Lautsprecherdurchsage abgekoppelt worden, da diese im Normalbetrieb als störend empfunden wurde.
 - Beide Ausgangstüren aus dem vorgenannten Bereich führten in einen Flur der zwei unterschiedlichen Rauchabschnitten hätte angehören können, wenn nicht eine eigentlich vorgesehene Tür gefehlt hätte (5-72).
 - Die WF hatte nicht die Möglichkeit, eine Warndurchsage mit Räumungsanordnung selbständig auszulösen, so daß eine Zeitverzögerung von 8 Minuten eintrat, bis Kompetenzen geklärt waren (3-4).
 - Die automatische Lautsprecherdurchsage (Ansageband) forderte im Gebäude befindliche Personen auf, sich in den unmittelbaren Brandbereich zu begeben. Die Ansage konnte nicht korrigiert werden, da auch der Kontrollraum, in dem sich das Abspielgerät befand, verrauchte war und das Personal den Raum bereits verlassen hatte.
 - Der Bereich des Zugangs zum Aufzug auf der Seite des Parkhauses ließ zunächst keine Rückschlüsse auf das einige Etagen unterhalb stattfindende Brandereignis zu, so daß Personen in den verrauchten Bereich einfuhren.
 - Die Türen zweier in den verrauchten Bereich gefahrener, besetzter Aufzüge schlossen nicht wieder, da der Rauch die Lichtschranken unterbrach. Die in unmittelbarer Nähe zu den Aufzügen befindlichen rettenden Türen zu sicheren Treppenträumen konnten wegen der Dichte des Rauchs nicht erkannt werden; sieben Menschen starben (2-19).
 - Mehrere Personen bemerkten bereits zu einem frühen Zeitpunkt Brandrauch. Eine Meldung an die WF unterblieb aber anscheinend deshalb, weil bereits Feuerwehrleute am Einsatzort waren. Ein weiterer Alarm hätte zum Ausrücken weiterer Einheiten geführt (3-21).

-
- Ein Mann konnte aus einem Sanitärraum von der Feuerwehr gerettet werden, da er ein Funktelefon zur Verfügung hatte und es ihm mit Hilfe seines besetzten Büros gelang, die Feuerwehr bis zu seiner Position zu lotsen [R02].
 - Der Grund für die nach heutiger Sicht baulichen Defizite in Bezug auf den Brandschutz war u.a., daß andere Risiken dem Betreiber bedrohlicher erschienen als der Brand im Bauwerk (3-6). So wurde verstärkt Wert auf die Sicherheitsbelange der Flugzeuge gelegt und die Feuerwehr vor allem in Bezug auf denkbare Vorfälle ausgebildet.
 - Viele Notausgänge waren wegen der besonderen Sicherheitsinteressen eines Flughafens (Terrorismusabwehr, Zoll, allgemeine Kriminalität, etc.) verschlossen. Dies führte zu Zeitverzögerungen bei der Evakuierung (5-15).
 - Der Flughafen war im allgemeinen nur relativ gering mit sichtbaren Brandlasten beaufschlagt. Nach dem Motto „Was soll hier schon brennen?“ entstand ein Gefühl der Sicherheit vor großen Brandereignissen.
 - Es gab zur Entrauchung einige Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA), die jedoch in ihrer Funktionsfähigkeit nahezu unwirksam wurden, da rauchdichte Unterdecken eine Anströmung verhinderten (5-17ff). Darüberhinaus war nur eine außerordentlich eingeschränkte Zuluftzuführung gegeben.
 - Wegen der Bemühungen, vor ihrer Flucht einen Verkaufsbereich abzuschließen, war eine Frau einer so starken Verrauchung ausgesetzt, daß sie einige Tage nach dem Brandereignis verstarb (2-27).
 - Mehr als 50 Personen konnten durch die BF vom Dach des Zentralgebäudes gerettet werden, da die Vorfeldseite dem Wind zugewandt war und ein Anleitern dort möglich wurde (3-28).

Die Beschreibung derartiger Zusammenhänge könnte bei näherer Detailkenntnis fortgeführt werden.

Perrow schildert eine Vielzahl vergleichbarer Unfälle, bei denen die Ursache für das Gesamtgeschehen auf systemimmanente Eigenschaften zurückzuführen ist [P03]. Er untersucht, wie die Systemkomponenten beschaffen und miteinander verwoben sein müssen, damit scheinbar unvorhersehbare Ereignisse, wie die soeben geschilderten, ablaufen können. Maßgebend sind demnach die Systemeigenschaften der „Komplexität“ und der „engen Kopplung“. „Eng gekoppelt“ sind Systeme, bei denen die Ereignisse zu einem hohen Anteil direkt und unmittelbar voneinander abhängig sind.

Im dargestellten Fall wurden im Brandverlauf über die hohe optische Dichte des Rauchs das Versagen der Schließmechanik der Aufzugtür und die mangelhafte Erkennbarkeit des benachbarten Treppenaufgangs gekoppelt. Vielleicht handelte es sich bei den Überlegungen der Planer sogar um einen Redundanzpfad, bei dem diese Kopplung mißachtet wurde: Sollte bei einem Brandfall die Benutzung des Aufzugs nicht mehr möglich sein, so führte eben eine direkt benachbarte Treppe in sichere Bereiche. Die Unmöglichkeit der Nutzung der Treppe wurde jedoch durch denselben Faktor hergestellt, der ihre Benutzung erforderlich machte: durch die hohe optische Rauchdichte.

„Lose“ gekoppelt sind Ereignisse, die nahezu unabhängig voneinander im System auftreten. Als Beispiel: Die Zeitverzögerung, die entstand, weil Kompetenzen bezüglich der Räumungsanordnung über die Lautsprecheranlage geklärt werden mußten, hatte nichts mit dem fehlenden zweiten Rettungsweg aus der Lounge zu tun. Trotzdem wirkten sich beide Umstände zusammen katastrophal aus, da wegen der nicht rechtzeitig erfolgten Information der einzige Rettungsweg zum Zeitpunkt des Erkennens der Gefahr nicht mehr begehbar war. Darüberhinaus hätte die Räumungsanordnung die Personen der Lounge auch nicht erreicht, da die Lautsprecheranlage in diesem Bereich außer Funktion war.

Perrows Kernaussage ist, daß „Komplexität“ und der „Grad der Kopplung“ maßgebend für die Neigung eines Systems zur Katastrophe sind. Hohe Komplexität und ein hoher Anteil enger Kopplungen erhöhen demnach die Neigung eines Systems zur Entwicklung in die Katastrophe.

3.5 Zusammenfassung und Ergänzung

Die große Anzahl unterschiedlicher Subsysteme und ihre vielfache Verknüpfung untereinander bewirken die Vielfältigkeit der möglichen Verhaltensweisen von komplexen Systemen. Reale adaptive Systeme verfügen über Anpassungsmechanismen, die durch eine Veränderung der Struktur und die Einbeziehung benachbarter und/oder dem Abstoßen bisheriger eigener Elemente eine Anpassung der erforderlichen Verhaltensweisen an die Umwelt gestatten. Derartige Strukturveränderungen müssen im Brandfall durch Personen, automatische Anlagen oder die Feuerwehr bewerkstelligt werden.

Die Geschwindigkeit, mit der Veränderungen im zu lenkenden System vor sich gehen, vergrößern jedoch das Problem der sinnvollen Reaktion. Ist die Dynamik hoch, so bietet sich dem lenkenden System nicht die Möglichkeit, die für eine Steuerung notwendigen erforderlichen Komponenten und Kopplungen zu entwickeln (vgl. Abb. 3.4). Das Aufbauen von Fähigkeiten für die Reduzierung des Subjektbeitrages zur Komplexität gelingt dann nicht und das zu steuernde System gerät außer Kontrolle.

Eine Handlungsweise, die dazu geeignet ist, ungewollte Kopplungen zu unterdrücken, um zunächst den Objektbeitrag zur Komplexität nicht ansteigen zu lassen, ist im Brandfall beispielsweise das Schließen von Türen¹. Unge­stört durch das Bauwerk strömender Rauch führt, neben der direkten Bedrohung von Personen durch Wärme und Toxe, zu einer Reihe von Kopplungen unterschiedlichster Art, die die Komplexität erhöhen und das Systemverhalten nur schlecht beherrschbar werden lassen. Ziel von Brandschutzmaßnahmen muß es sein, den Kopplungsgrad des Systems „Brandverlauf“ zu verringern und parallel dazu zur Handhabung der verbleibenden Komplexität eine geeignete Steuerungskomplexität zu entwickeln. Ersteres geschieht im traditionellen baulichen Brandschutz vor allem durch die Schaffung von Brand- und Rauchabschnitten (Entkopplung) und dem Einsatz automatischer Brandmelde- und Brandbekämpfungsanlagen (Steuerung).

¹ vgl. Auszüge aus Zeitungsartikeln, Anhang A dieser Arbeit

Ein Beispiel für das mögliche Zusammenwirken der Entkopplung kritischer Größen durch ein technisches System unter gleichzeitiger Erhöhung der Steuerungskomplexität wird anhand einer konkreten Fragestellung im Kapitel 5.8.3 untersucht. Die exemplarische Problembearbeitung behandelt dort eine Risikoabschätzung in Bezug auf den Ersatz von Rauchabschnitten in Tiefgaragen durch den Einsatz eines leistungsfähigen Entrauchungssystems.

Die bisherigen Erläuterungen sind für den hier betrachteten Untersuchungsgegenstand "Brandverlauf" ausreichend, um festzustellen, daß es sich dabei um ein dynamisches und komplexes System handeln kann. Die Untersuchung mittels des Sensitivitätsmodells ist deshalb generell möglich und gerechtfertigt.

Zur schnellen Anpassung des Systems „Brandverlauf“ an veränderte Bedingungen ist in der Folge die Frage nach der besten Ausgangsposition des lenkenden (Nutzer/Feuerwehr/automatische Anlagen) und des zu lenkenden Systems (Nutzer/Brand-Bauwerk) zu stellen. Vester beschreibt dies durch die Bemerkung, man könne das Verhalten komplexer Systeme nur in einem sehr engen Zeithorizont im Detail prognostizieren¹, man könne jedoch die Systemstruktur so entwickeln, daß sie „der Zukunft geneigt“ sei.

¹ Vester auf dem Anwenderseminar zum Sensitivitätsmodell im Frühjahr 1995; zur selben Thematik vergleiche auch [B04, S.97].

4 „SENSITIVITÄTSMODELL PROF. VESTER“

4.1 Vorbemerkung

Über das Sensitivitätsmodell (SM) und seine gedanklichen Grundlagen sind bereits eine Vielzahl an Veröffentlichungen erschienen [V04;V01;P01]. Aus diesem Grund werden in vorliegender Arbeit in Bezug auf die grundlegenden Gedanken zur Methodik nur die wesentlichen Punkte herausgegriffen und vorgestellt.

Die Unzufriedenheit mit herkömmlichen Planungsmethoden, vor allem im Bereich der Regional- und Unternehmensplanung sowie der Entwicklungshilfe, führte dazu, daß die Forschungsgruppe um Prof. Vester im Rahmen des Programms "Man and the Biosphere" im Jahre 1975 mit der Entwicklung eines Modells beauftragt wurde, das zur Lösung von Problemen im Zusammenhang mit der Komplexität von Systemen beitragen sollte [S03, S.15].

Das Instrumentarium wurde für den Bereich der Regionalplanung entwickelt [V02], fand jedoch in der Folgezeit auch Anwendung in vollkommen andersartigen Bereichen. Ein Einsatz für die Katastrophenforschung, insbesondere im Bereich Brandschutz, hat bisher noch nicht stattgefunden.

Die Anwendung des Verfahrens wird durch ein Computerprogramm unterstützt. Zum Servicepaket gehören neben dem Programm ein Methodenhandbuch [V05] mit ausführlichen Erläuterungen zur Arbeitsweise, ein dreitägiges Seminar zur Einführung in die Methodik des SM und diverse Arbeitsunterlagen für die im Rahmen der Analyse durchzuführenden Arbeitssitzungen.

Das Modell arbeitet rekursiv, d.h., anfängliche Arbeitsschritte werden durch Folgearbeiten erneut überarbeitet und ergänzt. Die in einzelnen Tools durchgeführten Veränderungen wirken sich nahezu im gesamten Modell aus. Die anfänglich grobe Systemdarstellung wächst und reift durch die wiederholte Anwendung der Instrumente des Verfahrens.

4.2 Besonderheiten des Modells

4.2.1 Realtheoretische und realempirische Modellauffassung

Bei der Ausgestaltung der im Kapitel 2.1 vorgestellten „allgemeinen“ zur „speziellen“ Systemtheorie unterscheidet Ropohl [R01, S.88f] die „real-empirische“ und die „realtheoretische“ Interpretation.

Die realempirische Interpretation wird im allgemeinen von den Ingenieurwissenschaften bevorzugt. Sie verwendet Subsysteme, die einer unmittelbaren Beobachtung zugänglich sind. Die realtheoretische Auslegung hingegen arbeitet mit Variablen eher abstrakten Inhalts, bei denen auf einer hohen Aggregationsebene eine direkte Meßbarkeit nicht mehr gegeben ist. Die Methode von Vester gründet auf der realtheoretischen Sichtweise. Modelle auf der Grundlage beider Ansätze werden innerhalb der Systemtheorie gleichberechtigt nebeneinander aufgeführt. Die numerisch exakten Modelle werden unter „Hard-Modeling“, Modelle wie das SM unter „Soft-Modeling“ kategorisiert [S04].

Für Modelle, die die Verhaltensrelevanz der Realitätsnähe der Modellstruktur gegenüber der Detailgenauigkeit präferieren, bemerkt Ropohl bereits im Jahr 1979 [R01, S.89], daß die realtheoretische Interpretation

„zu einer höchst interessanten Erkenntnisprozedur“ führt, „weil man somit über Verhaltens- und Aufbauprinzipien eines Systems bereits sehr viel aussagen kann, ohne sich in dieser Phase bereits auf die Vielfalt möglicher empirischer Realisationen einlassen zu müssen“.

4.2.2 Integration numerisch genauer Aussagen

Numerisch genaue Verfahren bleiben in zweierlei Hinsicht eingebunden: Die Erfahrungen über das Verhalten einzelner Systemteile können aus der numerisch genauen Simulation mit anderen Modellen stammen und die Wirkungsbeziehungen in den weiter unten aufgebauten Teilszenarien werden - soweit möglich - wissenschaftlich-empirisch hinterlegt, wobei sich gegebenenfalls die Struktur von Modellen herauskristallisiert, die auch genauer gefaßt werden können.

4.2.3 Begriffsbildung im Sensitivitätsmodell

Eindeutige Fachtermini (Merkmale) dienen im Rahmen der Wissenschaften dazu, eine gemeinsame Sprache zwischen allen beteiligten Personen zu ermöglichen und die numerisch genaue Darstellung dieser Begrifflichkeiten (Merkmalsausprägungen) bewirkt eine eindeutige Grundlage für Entscheidungen.

Im SM werden Begriffe hingegen entsprechend den aktuellen, fachübergreifenden Erfordernissen gebildet. Sie richten sich nicht immer nach den vordefinierten Termini der tangierten Fachdisziplinen, sondern entstammen häufig der Umgangssprache. Dies hat den Vorteil, in den Modellbildungsprozess Personen mit unterschiedlichem Sprachgebrauch einbeziehen zu können. Die Konsensbildung über die Begriffsinhalte erfolgt durch wiederholte Überprüfung und Redefinition im Rahmen der Anwendung der einzelnen Instrumente des SM. Nachteil dieses Verfahrens ist eine geringere Eindeutigkeit der in Schrift und Bild wiedergegebenen Untersuchungsergebnisse. Hier zeigt sich im Bereich der Simulationen der Vorteil wissenschaftlich exakter Terminologien im Vergleich zu der hier angewendeten relativ freien Begriffsbildung.

Eine eindeutige Grundlage für Entscheidungen durch die genaue Darstellung sich verändernder Merkmalsausprägungen, wie sie in den numerisch exakten Simulationsmodellen gegeben ist, ist nicht vorhanden. Im Bereich komplexer Systeme stellen nach Vester jedoch numerisch genaue Werte ohnehin nur eine scheinbar sichere Entscheidungsgrundlage dar [V01, S.33f].

4.2.4 Beispiel für die Terminologie des Sensitivitätsmodells

Um einen inhaltlichen Vorgriff auf das System „Brandverlauf“ zu vermeiden, sei für die realtheoretische Systemdarstellung ein Beispiel aus einer Arbeit Vesters [V03] aufgezeigt. Vester verwendet eine Variable „Gesunder Naturhaushalt“ im System „Verkehr“. Umschrieben wird diese durch „Indikatoren“ [S03, S.36]¹ wie „saubere Luft, intakte Böden und Gewässer, Artenvielfalt, Selbstregulation“. Derartige Begriffe reichen aus, um das Bild eines „Gesunden Naturhaushalts“ zu entwerfen. Der Versuch, diese Begriffe zu analysieren, wäre auf der Betrachtungsebene, auf der sie verwendet werden, nicht sinnvoll.

¹ Merkmale, teilweise mit Merkmalsausprägungen, vgl. Kap. 2.1

Die Beziehungen zwischen den Variablen (Subsystemen) werden nicht über Einzelattribute hergestellt (Relationen), sondern beinhalten bereits deren Gesamtheit (Kopplungen). Damit entspricht die Darstellungsform den Vorgaben von Ropohl (vgl. Kap. 2, Df. 8 u. 9). Die Wirkung von „Gesunder Naturhaushalt“ auf beispielsweise „Lebensqualität“ wird, ohne die jeweiligen Einzelkomponenten genauer zu definieren oder gar analysieren zu müssen, festgestellt. Die vielfältige Wirkung erscheint sozusagen vor dem „inneren Auge“.

Betrachtet man die beiden zitierten Variablen, so fällt auf, wie schwierig eine numerisch-funktionale Kopplung ihrer Merkmale fallen würde.

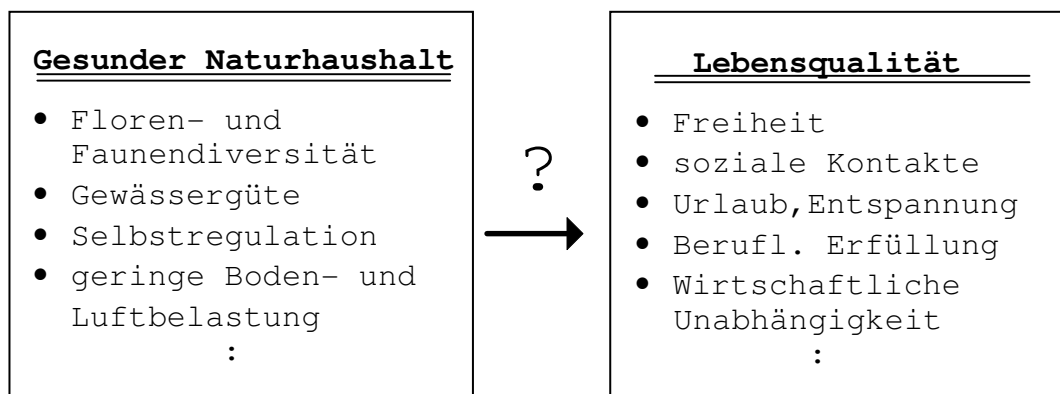


Abb. 4.1: Kopplung von Variablen im SM

Gründe dafür sind :

- Es gibt teilweise keine numerischen Parameter (Merkmalausprägungen) zur Beschreibung der Merkmale. Womit beschreibt man „Freude“ ?
- Es gibt keine verfügbaren Daten. Wie stark wirkt die „Faunendiversität“ auf die „Entspannung“ oder die „Luftbelastung“ auf „soziale Kontakte“ ?

4.2.5 Möglichkeiten des Erkenntnisgewinns

Auch ohne die Verknüpfung der einzelnen Merkmale der beiden Variablen ist es jedoch möglich, eine Beziehung zwischen ihnen herzustellen:

- es gibt einen deutlich spürbaren Einfluß von „Gesunder Naturhaushalt“ auf „Lebensqualität“;
- der Einfluß wird, beispielsweise im städtischen Raum, im allgemeinen gleichläufig sein, d.h. eine Verbesserung des „Gesunden Naturhaushalt(s)“ führt auch zu einer Steigerung der „Lebensqualität“;
- über Expertenbefragung ließe sich, unter der Voraussetzung desselben Verständnisses für die Variable, auch eine zunächst eher qualitative, funktionale Beschreibung dieser Kopplung angeben.

4.2.6 Vorteile des Verfahrens

Die Methodik stellt folgende Punkte bei der Modellbildung sicher:

- **Interdisziplinarität:** Die Grundlagen für die abzubildende Systemstruktur werden im interdisziplinären Expertenkreis gewonnen. Notwendig ist dafür der terminologische Konsens.
- **Terminologischer Konsens:** Bei allen Beteiligten herrscht größtmögliche Übereinstimmung in der Interpretation der gewählten Bezeichnungen für die zu untersuchenden Elemente. Der Prozeß der Vereinheitlichung der Interpretation der verwendeten Begrifflichkeiten wird durch das Verfahren auf mehreren Bearbeitungsstufen wiederholt eingefordert.
- **Relevanz:** Das abgebildete System ist bezüglich der Problemstellung relevant. Dies wird durch die Interdisziplinarität und durch Kontrollmechanismen innerhalb der Methodik unterstützt.
- **Praktikabilität:** Ein Computerprogramm ermöglicht erst die sinnvolle Anwendung einiger Instrumentarien, wie beispielsweise das des Wirkungsgefüges oder der Simulation.
- **Terminologische Adäquanz:** Die Methodik unterstützt eine Tendenz der Variablen, sich durch wiederholte Redefinitionen in Richtung auf eine gemeinsame Aggregationsebene hin zu bewegen.

4.3 Die Werkzeuge im Überblick

Die Abbildung 4.2 zeigt die Struktur des Sensitivitätsmodells [V05]. Die Instrumente werden im folgenden übersichtlich beschrieben, bevor im nächsten Kapitel detaillierter auf sie eingegangen wird.

- **Systembeschreibung:** Erste Abgrenzung des betrachteten Systems anhand spezieller Fragestellungen. Ergebnis ist ein vorläufiges Systembild, ein erstes Wirkungsgefüge und eine gegliederte Begriffssammlung.
- **Variablensatz:** Beschreibung der im Teil „Systembeschreibung“ gefundenen Begriffe und Einflußfaktoren mittels Variablen, Indikatoren und externen Einflußgrößen.
- **Kriterienmatrix:** Überprüfung der Variablen anhand vorgegebener Kriterien auf ihre Systemrelevanz. Ergebnis ist ein Variablensatz, der alle für die Systemuntersuchung wesentlichen Bereiche des Systems abdeckt.
- **Einflußmatrix:** Expertenbefragung zur Erfassung aller potentieller Wirkungen der Variablen aufeinander in quantitativer Form. Ergebnis ist eine numerische Erfassung der spezifischen Wirkungsstärke jeder Variablen.
- **Rollenverteilung:** Auswertung der numerischen Ergebnisse der Einflußmatrix und Interpretation der sich daraus ergebenden kybernetischen Eigenschaften einzelner Variablen, des Teil- oder Gesamtsystem.
- **Wirkungsgefüge:** Festlegung der Wirkungsrichtung vorhandener Wirkungen. Ergebnisse sind Aussagen zur Gesamtzahl vorhandener positiver und negativer Rückkopplungen, zum Vernetzungsgrad und zum Verlauf einzelner Rückkopplungen und deren Interpretation.
- **Teilszenarien:** Wirkungsgefüge zur Untersuchung konkreter Fragestellungen unter Verwendung von Teilsystemen. Ergebnisse sind konkrete Antworten zu aktuellen Fragestellungen.
- **Simulation:** Simulation der dynamischen Abläufe in den Teilszenarien unter Verwendung unscharfer Wirkungsbeziehungen.
- **Systembewertung:** Bewertung der Überlebensfähigkeit des Systems anhand der 8 biokybernetischen Grundregeln Vesters. Dieses Instrument eignet sich zur Überprüfung der Möglichkeiten zur Stabilisierung komplexer Systemen. Es wird im folgenden nicht weiter einbezogen, da das System „Brandverlauf“ nicht im Hinblick auf eine etwaige Stabilisierung von Zuständen untersucht wird. Vielmehr werden die Randbedingungen gesucht, die eine Destabilisierung des Brandes in risikomindernde Richtung bewirken.

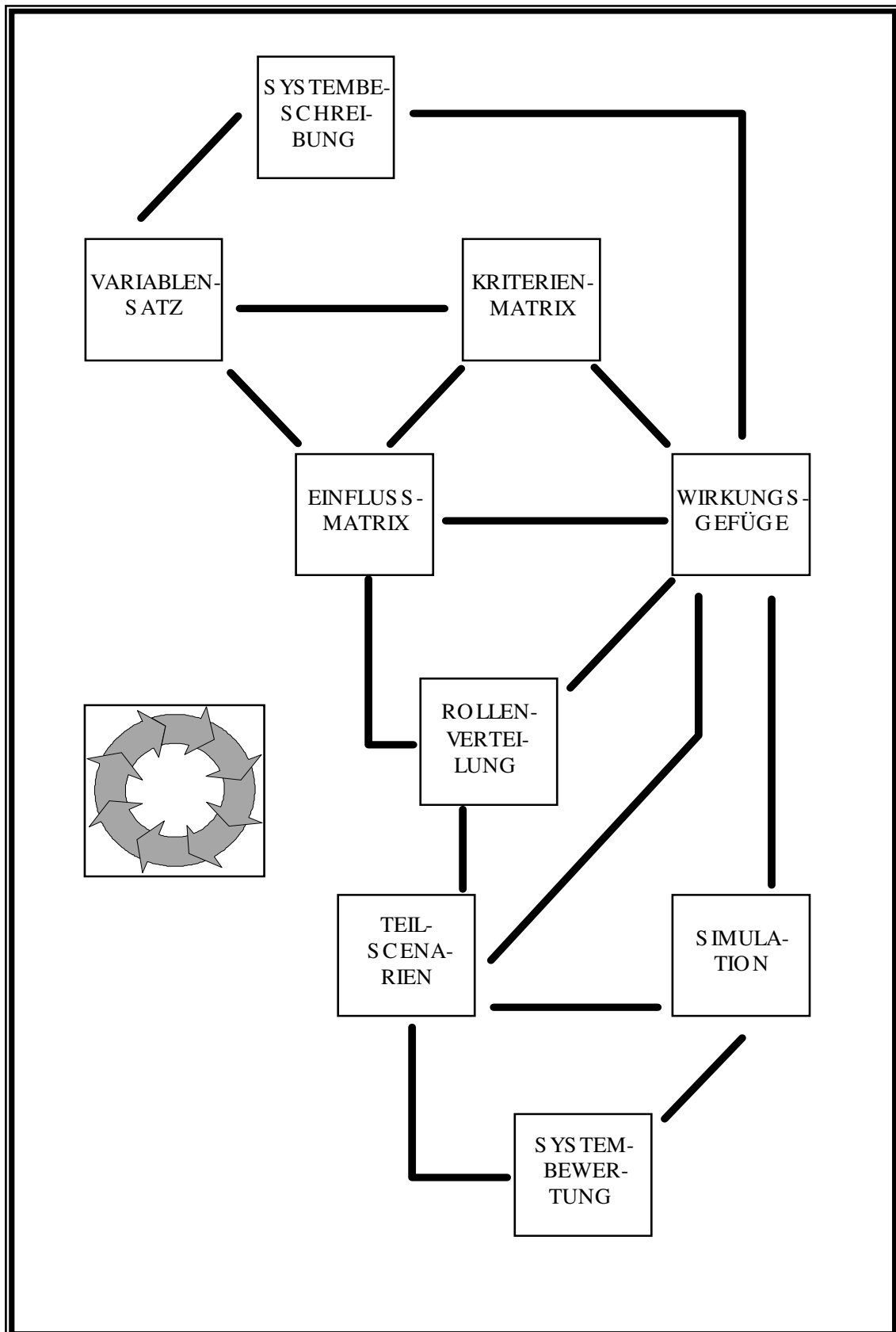


Abb. 4.2: Übersicht über die Werkzeuge des SM nach [V05]

5 SENSITIVITÄTSANALYSE „BRANDVERLAUF“

5.1 Vorbemerkung

Im folgenden wird die Untersuchung eines Systems „Brandverlauf“ aus dem Gesamtbereich „Brand in Bauwerken“ dargestellt [K02]. Die im vorherigen Kapitel umrissene Methodik findet dabei Anwendung und wird in ihren Einzelheiten näher erläutert. Dabei sind systembedingt zwei Besonderheiten zu beachten.

a) Die Entwickler des Sensitivitätsmodells (SM) gingen davon aus, daß es grundsätzlich erwünscht sei, Mechanismen zur Stabilisierung von Systemen zu finden. Dies ist für die Anwendungsbereiche, in denen das SM bisher eingesetzt wurde, wie beispielsweise die Verkehrs- und Landschaftsplanung, auch sinnvoll, ebenso wie in einem zur Zeit in der Bearbeitung befindlichem System „Brandschutz im gesellschaftlichem Kontext“, in dem die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Aspekte des Brandschutzes in der Bundesrepublik untersucht werden. Im hier betrachteten System „Brandverlauf“ hingegen werden die Bemühungen dahingehen müssen, geeignete Hebel zur Destabilisierung des Brandes in risikomindernder Hinsicht zu finden. Die Blickrichtung ist somit unüblich für das Modell und einige Werkzeuge müssen anders genutzt werden als bisher.

b) Eine weitere Besonderheit des Systems im Hinblick auf die Anwendung des SM ist die im Kapitel 3 bereits angesprochene starke Veränderlichkeit der Struktur. Damit wird eine Vorgehensweise für die Aufstellung des Wirkungsgefüges notwendig, die geeignet ist, unterschiedliche zeitliche Phasen des Brandverlaufs abzubilden. Dem Vorschlag von Ulrich/Probst [U01, S.156] zur Erfassung von zeitlichen Differenzen durch unterschiedliche Kennzeichnung der Kopplungen in einer gemeinsamen Darstellung wird in vorliegender Arbeit wegen der Unübersichtlichkeit dieser Präsentationsform nicht gefolgt. Die Abbildung deutlich unterscheidbarer Brandverlaufphasen erfolgt vielmehr jeweils in einem eigenen Wirkungsgefüge. Die Einflußmatrix bleibt von dieser zeitlichen Differenzierung unbeeinflusst, da bei der Bewertung der kybernetischen Eigenschaften der untersuchten Elemente natürlich deren Wirkungen über den gesamten Brandverlauf zu berücksichtigen sind.

5.2 Untersuchungsgegenstand

Untersuchungsgegenstand ist der Brandverlauf im Bauwerk. Das System besteht aus den Teilbereichen *Bauwerk*, *Nutzer*, *Feuerwehr* und *Feuer*.

Bauwerk: Gedanklich zugrundegelegt wird zunächst ein Gebäude mittlerer Höhe und normaler Art und Nutzung im städtischen Umfeld. Für die Untersuchung von Bauten mit starken brandschutztechnischen Besonderheiten, wie beispielsweise Hochhäuser, Tunnelanlagen oder außergewöhnlich weiten räumlichen Distanzen zur Feuerwache, müssen die unten aufgeführten Variablen und ihre Kopplungen hinsichtlich ihrer Adäquanz überprüft und gegebenenfalls ergänzt oder angepaßt werden.

Nutzer: Den Bauwerksnutzern werden zunächst keine besonderen Eigenschaften zugesprochen.

Feuerwehr: Die Feuerwehr erreicht den Brandort im dargestellten System in der Phase des stark entwickelten Brandes bzw. des Vollbrandes; also zu einem Zeitpunkt, zu dem ihre hohe Steuerungskomplexität benötigt wird.

Feuer: Die Entwicklung der Brandintensität in ihrem zeitlichen Verlauf wird wie unten dargestellt vorausgesetzt.

Der qualitative Verlauf des Energieumsatzes Q über die Zeit t mit der Zuordnung zu aktionsbezogenen Brandverlaufphasen wird wie folgt angenommen:

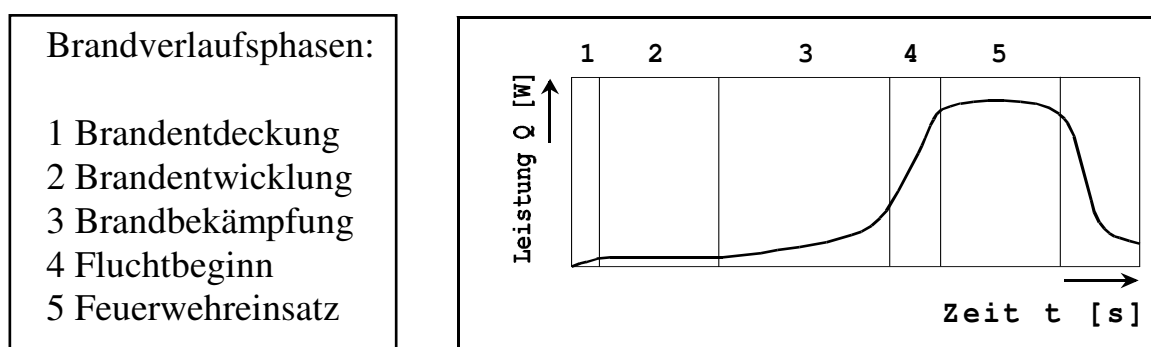


Abb. 5.1 Brandverlaufphasen

5.3 Systembeschreibung und -abgrenzung

5.3.1 Methodische Vorgaben

Die Systembeschreibung soll im interdisziplinär besetzten Team erfolgen. Das zu untersuchende System wird dabei vertikal, d.h. zu seinen Sub- und Supersystemen, und horizontal, also zu den Systemen derselben Aggregationsebene, abgegrenzt. Die Grenze soll an den „Minima bereichsüberschreitender Flüsse“ [V04, S.97] liegen.

Die Methode des SM hat beim Arbeiten im Team im Rahmen von Planungsprozessen den Vorteil, eine frühzeitige Konsensbildung bei allen Beteiligten zu bewirken. Da jeder Mitwirkende seine ihm wichtig erscheinenden Elemente rechtzeitig in das System einbringen kann, findet er seine Ansichten ausreichend berücksichtigt; Konflikte werden reduziert. Dies ist insbesondere wichtig bei Planungen, die Aspekte stark gegenläufiger Interessen integrieren müssen.

5.3.2 Systembeschreibung „Brandverlauf“

Die Systemabgrenzung wurde im Rahmen eines Workshops von einer Anzahl Experten unterschiedlicher Fachrichtungen durch die Aufstellung einer Stichwortsammlung für den Betrachtungsgegenstand „Brand in Bauwerken“ vorgenommen. Beteiligt waren Fachleute aus den Bereichen Architektur, Physik, Feuerwehr, Soziologie und Katastrophenforschung, Versicherung, Baurecht und Bauingenieurwesen.

Die für das System „Brandverlauf“ wesentlichen Begriffe konnten in der Folgezeit nach der Arbeitssitzung kategorisiert, aggregiert oder aufgespalten werden, so daß ein Variablensatz entstand, der die unter Kap. 5.2 genannten Teilbereiche abdeckt. Eine Ergänzung der Variablen erfolgte anhand eigener Literaturstudien und durch Gedanken aus einer Vielzahl von Einzelgesprächen mit Fachleuten und Laien unterschiedlichster fachlicher Ausrichtung.

5.4 Variablensatz

5.4.1 Methodische Vorgaben

Die Aufstellung eines systemrelevanten Variablensatzes ist grundlegend für alle weiteren Schritte. Er ist, bedingt durch die angestrebte Rekursivität des Verfahrens, jedoch zunächst nicht endgültig oder vollständig, sondern auch bei späteren Schritten immer wieder veränderbar. So wurden in der Folge des Workshops Variablen umdefiniert, hinzugenommen oder gelöscht. Dieser Vorgang schafft, dies ist bereits im Kapitel 4.2.3 erläutert worden, ein gleiches Verständnis des Sinngehalts der verwendeten Begrifflichkeiten bei allen Beteiligten und führt die Variablen nach und nach auf derselben Aggregat-ebene zusammen. Neben der verbalen Variablendefinition hilft dabei vor allem die Angabe von Indikatoren und externen Größen. Die Anwendung der Instrumente des SM führen darüberhinaus wiederholt zur Kontrolle des Variablensatzes in bezug auf seine Vollständigkeit, denn die Berücksichtigung aller relevanten Variablen ist für die Erzielung realitätsnaher Ergebnisse außerordentlich wichtig.

5.4.2 Variablensatz „Brandverlauf“

Im folgenden ist der letzte Stand der Variablendefinitionen in Tabellenform wiedergegeben. Neben der direkten verbalen Begriffsdefinition und den externen Einflußgrößen befindet sich eine Spalte „Indikatoren“. Sie können im Rahmen der „realtheoretischen Interpretation“ (vgl. Kap. 4.2.1) als „Merkmale“ (vgl. Kapitel 2.1) aufgefaßt werden, wobei dann die Variablen als „Subsysteme“ zu verstehen sind.

KENNZEICHNUNG VARIABLEN- BEZEICHNUNG	INDIKATOREN	EXTERNE GRÖSSEN
DEFINITION		

1 QdR Qualität der Rettungswege	<ul style="list-style-type: none"> • Länge • Abmessungen, Einengungen • Bauteilqualitäten • Rauchschtung • Beleuchtung • Eindeutigkeit und Zuverlässigkeit der Wegführung • Kapazität • Brandlasten 	<ul style="list-style-type: none"> • Funktional. des Betriebsablaufs • Nachträgliche Wandverkleidungen • Einbruchschutz • Bauwerksalter
<p>Fluchtweg = Rettungsweg, ohne Berücksichtigung der bauaufsichtlichen Definition. Bestandteile der Flucht- und Rettungswege sind deshalb: Fenster, Balkone, Aufzüge, Flure, Treppenträume, etc. Die Qualität wird u.a. gewährleistet durch die Qualität und das Vorhandensein von brandschutztechnisch relevanten Bauteilen, Funktionssicherung (Türen), Kapazität, etc.. Beeinträchtigungen erfolgen beispielweise durch nutzungsbedingte Verengungen und Brandlastansammlungen.</p>		

2 WdU Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile	<ul style="list-style-type: none"> • Querschnitt der Bauteile • Feuerwiderstandsfähigkeit von Türen und Fenstern • Unversehrtheit • Statische Auslastung • Abschottung von Durchführungen • Offene Türen, Fenster 	Schwächung durch: <ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedliche Gewerke • Türkeile wg. Betriebsablauf • Häufige Umnutzung • Bauwerksalter • Kleinzellige Bauweise
<p>Die Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile ergibt sich aus deren Potential, einen Raum thermisch und in Bezug auf die Rauchausbreitung abzuschotten. Dies bezieht sich sowohl auf die horizontale als auch auf die vertikale Richtung der Brand- und Rauchentwicklung.</p>		

3 BI Brandintensität	<ul style="list-style-type: none"> • Brandlast <ul style="list-style-type: none"> · Reaktive Oberfläche · Feuchte · Zündtemperatur · Geometrische Anordnung · Eigentemperatur • Luftzufuhr • Kleinzelligkeit (Flash-Over) • Art der Umfassungsbauteile 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesetze über die Lagerung von leicht brennbaren Substanzen • Kunststoffant. Einrichtungen • Zulassung von Baustoffen
<p>Die Intensität des Brandes beinhaltet zum einen die Vorstellung von der tatsächlich freigesetzten maximalen Brandleistung als auch von der Geschwindigkeit derer Veränderung. So kennzeichnet der Flash-Over eine Phase hoher Brandintensität, auch wenn der Energieumsatz im Vergleich zur Vollbrandphase gering ist.</p>		

4 HN Heftigkeit von Nebenerscheinungen	<ul style="list-style-type: none"> • Abtropfen von Aluminium und brennendem Kunststoff • Holz (Geräusche) • Versagen von Gläsern • Explodierende Druckgasbehälter • Wasserdampf 	<ul style="list-style-type: none"> • Trend zur Leichtbauweise (Bsp.:Aluminium, Kunststoffe)
<p>Diese Variable beschreibt das Auftreten von Geräuschen, Gerüchen und visuellen Effekten, die für nicht mit dem Brand vertraute Personen unbekannt und erschreckend sind.</p>		

5 ENTR Entrauchung	<ul style="list-style-type: none"> • Öffenbare Fenster • Türen • Kleinzelligkeit • Transparenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimaanlage • Wind • Wetter
<p>Eine gute Entrauchung des Bauwerks wird erreicht, wenn ausreichend Luft nachströmen kann und genügend Rauchabzugsflächen vorhanden sind. Dies kann durch automatische Anlagen, durch die Nutzer oder die Feuerwehr bewerkstelligt werden.</p>		

6 IdR Intensität der Rauchausbreitung	<ul style="list-style-type: none"> • Kunststoffe, Kabel • Abschottung von Schächten und Fahrstühlen • Höhe des Brandraums • Geschößzahl über dem Brandort • Kleinzelligkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Kostengünstige Baumaterialien • Umfang der Gebäudetechnik • Bauwerksalter
--	--	---

Der Begriff der Intensität der Rauchausbreitung im Bauwerk faßt Größen wie die Höhenlage, die Temperatur und die Toxizität der Rauchsicht zusammen. Von größtem Einfluß ist die Geschwindigkeit, mit der sich der Rauch im Bauwerk ausbreitet sowie seine optische Dichte.

7 BaW Bauwerksbedingter Angriffswiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Bauwerkshöhe • Verschlussene Türen, Tore • Verkehr im Umfeld • Gefährliche Stoffe, Tanks • Löschwasserversorgung, Feuerlöscher • Kleinzelligkeit • Geschößzahl unter Brandort 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßigkeit von Brand-schauen • Einbruch-sicherung • Schaulustige
---	---	--

Das Bauwerk setzt den Bestrebungen der Feuerwehr bzgl. Eindringen, Fortbewegung, Schadenminderung und Evakuierung einen Widerstand entgegen. Auch bauwerksspezifische Risiken, die nicht zu einer Gefährdung werden (Gastanks, u.a.), sind einbezogen.

8 BrW Brandbedingter Angriffswiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Hitze und Rauch aus Zugängen und Fenstern • Versagende Bauteile, auch der Bauwerkshaut • Flash Over, Flash-Back • Feuerwalzen • Fliehende Personen • Rettungsgeräte im Zugangsbereich • Informationslage, Licht 	<ul style="list-style-type: none"> • Reinlichkeit und Ordnung im Bauwerk • Bauwerksalter
<p>Diese Variable beschreibt den aus dem Brand resultierenden Widerstand gegen die Arbeit der Feuerwehr: insbesondere gegen deren Bestrebungen, zum Hauptbrandort vorzudringen, durch Rauch, Hitze, abtropfende Materialien, versagende Bauteile, etc..</p>		

9 ZvFW Zeitverzögerung im FW-Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • Widerstände gegen die Arbeit der FW • Planvolles Handeln 	<ul style="list-style-type: none"> • Schutzbereichsgröße • Dunkelheit • Verkehr • Schaulustige
<p>Beschrieben wird die durch die Besonderheiten des betrachteten Einsatzes zusätzlich notwendige Zeit bis zu wirksamen Lösch- und Rettungsmaßnahmen. Die sich ergebenden Zeitverzögerungen im Feuerwehreinsatz hängen von betrieblichen Größen ebenso ab wie von den aktuellen Einsatzbedingungen.</p>		

10 IFW Informations- stand der FW	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Ausstattung • Feuerwehrpläne • Qualität der Alarmierung • Kleinzelligkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Qual. d. Ausbildung • Bekanntheit mit dem Objekt • Verf. Kommunikationsmedien
--	---	---

Von einem hohen Informationsstand der Feuerwehr kann ausgegangen werden, wenn die Alarmierung qualitativ hochwertig erfolgte (Rauchmelder, Feuerwehrtableau, Gelassenheit der Alarmierenden, etc.) und/oder die Informationsbeschaffung vor Ort nicht wesentlich durch die komplexe Situation beeinträchtigt wird.

11 LdFW Leistungsfähigkeit der Feuerwehr	<ul style="list-style-type: none"> • Mannschaftsstärke • Adäquate Mittel • Motivation 	<ul style="list-style-type: none"> • Liquidität • Öffentl. Kassen • Wetter • Gemeindegröße
<p>Die Leistungsfähigkeit einer Feuerwehr zeigt sich neben der Zeitdauer, die vom Zeitpunkt der Alarmierung bis zu wirksamen schadensmindernden Maßnahmen vergeht (vgl. Zeitverzögerung im FW-Einsatz), an der individuell möglichen Einsatzdauer und vor allem am Erfolg bei der Rettung von Personen und der Brandbekämpfung.</p>		

12 ErB Erfolgreiche Brandbekämpfung	<ul style="list-style-type: none"> • Bekanntheit mit dem Bauwerk • Verfügbare techn. Hilfen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zivilisatorischer Umgang mit Feuer
<p>Erfolgreich ist die Brandbekämpfung im Sinne dieser Variable dann, wenn es gelingt, die Brandleistung mittels geeigneter Maßnahmen zu dämpfen. Dies kann durch die Feuerwehr oder durch die Nutzer geschehen.</p>		

13 ExRW Exposition durch Rauch und Wärme	<ul style="list-style-type: none"> • Vergiftungen • Orientierungslosigkeit • Verbrennungen • Kleinzelligkeit (Schutz) • Alter u. körperliche Leistungsfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Wind
<p>Die Exposition durch Rauch und Wärme beschreibt die sich aus der räumlichen und zeitlichen Zuordnung der Nutzer zum Bauwerk und zum Brand ergebenden Einwirkungen auf den Menschen. Sie faßt Expositionsdauer und Stärke der Einwirkung (Wärme, Toxe) zusammen.</p>		

14 ZvN Zeitverzögerung Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinzelligkeit • Sensorische Leistungsfähigkeit der Nutzer • Geruchsintensität der entflammten Brandlast (Brandentdeckung) • Belegungsdichte • Alarmierung durch andere 	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Technologien • Sensibilisierung durch Medien • Tageszeit • Geräuschpegel • Häufigkeit von Fehlalarmen
<p>Zeitverzögerungen beziehen sich auf die Vergrößerung der Zeitdauer des Verweilens der Nutzer im Bauwerk. Sie resultieren häufig aus einer späten Branderkennung, Versuche des Löschens, Alarmierens oder Rettens und den körperlich konstitutiven Möglichkeiten zur Flucht.</p>		

15 Fl Fluchtchancen	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilität der Nutzer • Qualität der Rettungswege • Disziplin 	<ul style="list-style-type: none"> • Persönliche Bindung an das Bauwerk • Verantwortlichkeit von Personal
<p>„Fluchtchancen“ beinhalten neben dem Aspekt der Flucht aus dem Bauwerk auch die Möglichkeiten zur vorübergehenden Schutzsuche in Räumen.</p>		

16 LdN Leistungs- fähigkeit Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> • Geschlecht • Alter • Gesundheit, Drogen • Ausbildung • Mentalität 	<ul style="list-style-type: none"> • Zivilisatorische Entfremdung vom Feuer
<p>Eine hohe Leistungsfähigkeit der involvierten Personen ist gekennzeichnet durch das körperliche und geistige Vermögen, einen Brand zu bekämpfen, zu fliehen, zu retten oder andere schadenmindernde Maßnahmen ergreifen zu können.</p>		

17 QvI Qualität verfügbarer Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinzelligkeit • Rezeptionsvermögen des Empfängers • Eindeutigkeit der angebotenen Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Tageszeit • Technische Hilfen
<p>Ähnlich wie die „Verfügbare(n) Handlungsalternativen“ koppelt diese Variable das menschliche Verhalten an den Teilbereich „Brand“ und „Bauwerk“ an. Verfügbar sind Informationen dann, wenn sie</p> <ul style="list-style-type: none"> • angeboten werden, • dem Assoziationsschema des Empfängers entsprechen, und • ausreichend langsam auftreten, um vom Empfänger verarbeitet werden zu können. <p>Qualitativ hochwertig sind sie, wenn sie eindeutig sind und kaum falsche Schlüsse zulassen. Dies hängt jedoch auch wieder vom Empfänger und dessen analytischer Leistungsfähigkeit ab.</p>		

18 STR Stress	<ul style="list-style-type: none"> • Zittern, Schreien • Handlungsunfähigkeit • Fluchtreiz 	<ul style="list-style-type: none"> • Grad der Beziehungen zu anderen Nutzern • Streßtyp
<p>Stress bezeichnet den Zustand innerer Erregung, der sich körperlich vor allem in</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigung von Puls und Atmung, • Erweiterung der Pupillen, • Hautblässe und • Zittern <p>äußert. Der Streßzustand ist zunächst wichtig für die Erhöhung der körperlichen Leistungsfähigkeit und das Einsetzen der Fluchtreaktion. Übermäßiger Streß führt hingegen zu einer Blockierung sinnvollen Handelns. Die Umsetzung äußerer Reize in Streßreaktionen ist abhängig vom individuellen Streßtyp.</p>		

19 VHA Verfügbare Handlungsalternativen	<ul style="list-style-type: none"> • Körperliche Fitness • Vorhandene Informationen • Bauwerksstruktur • Technische Hilfen 	<ul style="list-style-type: none"> • Brandschutz- erziehung • Kulturelle Distanz zum Feuer
<p>Eine Abnahme der verfügbaren Handlungsalternativen kennzeichnet die sich entwickelnde Ausweglosigkeit der Situation. Die Handlungsalternativen sind stark abhängig vom persönlichen Vermögen und den Möglichkeiten, die sich aus dem Bauwerk und dem Brandgeschehen ergeben, und stellen damit ein Kopplungsglied zwischen den Bereichen Nutzer, Brand und Bauwerk dar.</p>		

20 PS Personenschäden	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Opfer • Schwere der körp. u. psych. Schäden 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungs- fähigkeit medizinische r Hilfstrupps • Psychische Nachsorge
<p>„Personenschäden“ umschreibt den Grad der Verletzungen, denen die Opfer unterliegen. In Abgrenzung zur Variablen „Körperliche Leistungsfähigkeit“ faßt diese Variable die Summe aller individuellen Verletzungen zusammen.</p>		

5.5 Kriterienmatrix

5.5.1 Methodische Vorgaben

Systeme weisen Eigenschaften auf, die einzelne Subsysteme (Variablen) nicht haben (Emergenz). Die ausgewählten Variablen müssen in ihrer Gesamtheit in der Lage sein, diese Eigenschaften abzubilden. Vester postuliert deshalb für den Einsatz des Modells im Bereich gesellschaftlicher Systeme Kriterien, die im Modell eine Entsprechung finden müssen. Diese sind:

- *Lebensbereiche*: Beteiligte, Tätigkeiten, Raum, Befinden, Umweltbeziehung, innere Abläufe, innere Ordnung;
- *Physikalische Grundkategorien*: Materie, Energie, Information;
- *Dynamische Grundkategorien*: Flußgröße, Strukturgröße, zeitliche Dynamik, räumliche Dynamik;
- *Systembeziehungen*: Input, Output, intern steuerbar, extern steuerbar.

Im Gegensatz zu Vesters früheren Arbeiten [V02] verzichtet er im Methodenhandbuch [V05] auf die Kriteriengruppen: „Kybernetische Grundkategorie“ und „Variablenentwicklung“. Grund dafür ist, daß das weiter unten beschriebene Instrument der „Einflußmatrix“ erst die Aussagen über das kybernetische Verhalten der Variablen erbringt und somit eine Einschätzung im Rahmen der Kriterienmatrix zu früh ist. Ebenso wird die hier fehlende „Variablenentwicklung“ erst im Modellelement „Simulation“ zum Tragen kommen und dort nur im Rahmen ausgesuchter Fragestellungen (Teilszenarien) von Belang sein. In der Kriterienmatrix wird jede Variable entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den vorgegebenen Kriterien numerisch bewertet.

5.5.2 Anpassung der Kriterienmatrix „Brandverlauf“

Das betrachtete System „Brandverlauf“ soll hier nicht im allgemein gesellschaftlichen Kontext untersucht werden, sondern für den akuten Brandfall im Zusammenwirken von Bauwerk, Brand, Nutzer und Feuerwehr. Einige Bezeichnungen der „Lebensbereiche“ wurden deshalb in die „Teilbereiche“ *Brand, Bauwerk, Nutzer, Feuerwehr*, geändert. Damit ergab sich die auf der folgenden Seite dargestellte Kriterienmatrix. Nähere Begründungen für die Vergabe der Punkte können aus [K02] entnommen werden.

	TEIL- BEREICHE				PHYS. KATEG.			DYNAMI. KATEGOR.			SYSTEMBE- ZIEHUNGEN						
	B R A N D	B A U W E R K	N U T Z E R	F E R W E H R	M A T E R I E	E N E R G I E	I N F O R M A T I O N	F L U S S R Ö S E	S T R U K T U R G R A D I E N	Z E I T L A U F D I N E R S C H E	R Ä U M L I N I E N D Y N A M I S C H	I N P U T	O U T P U T	E I N F L U S S E N	E I N F L U S S E N		
„+“ = 1 Punkt bedeutet: Kriterium voll- ständig zutreffend																	
„o“ = ½ Punkt bedeutet Kriterium teil- weise zutreffend																	
QUAL.D.RETTUNGSW.	+	+	o	o	+		+	o	+	o	o			+	o		
WIDERST. UMBAUT.	+	+			+	+		o	+	o	o	o	o	+			
BRANDINTENSITÄT	+	o		o		+		+		+	o			o	o		
HEFT. NEBENERSCH.	+	+		o	+	+		o		o	+	+					
ENTRAUCHUNG	o	o	+	+	+	o	o		+	o	+	+		+	o		
INTEN.D.RAUCHAUS.	+	+		o	+	+		+	o	+	+	+		o	+		
BAUWBED.WIDERST.	o	+		+	+	o		o	+	o	+	+			o		
BRANDBED.WIDERST	+	o		+	+	+		+		+	+			o			
ZEITVERZ.FW-EINS.		o	o	+		+	+		o		o	+		o	+		
INF.-STAND FW	o	o	o	+			+	+	o	o	o	+	o	o	o		
LEISTUNGSF. FW			+	+	o	+		o	+	o	+	+	o	o	o		
ERFOLGR.BRANDBEK.	+	o	+	+	o	o	o	o	o	+	o			o			
EXPOS.RAUCH/WÄRME	o	o	+	o	o	o	o	+		+	+			o			
ZEITVERZ. NUTZER			+				+	o		o	o	o		+			
FLUCHTCHANCEN	+	+	o	o	o		o	+	o	o	o	+	o	+	o		
LEISTUNGSF. NUTZ.			+			+	+	+	o	+		+			o		
QUAL.VERF.INFORM.	o	o	+				+	+	o	+	o	o		o	o		
STRESS			+		o		o	+		+	o	o			+		
VERF.HANDLUNGSAL.	o	+	+	o	o		+	o	o	o	o	+		o	o		
PERSONENSCHÄDEN			+	o	+		o	+		o	o		+	+			
SPALTENSUMMEN:	11,0	12,0	11,0	11,0	10,0	10,0	9,0	13,0	3,0	8,0	11,0	11,0	10,0	14,0	13,5	12,0	11,0

Abb.5.2: Kriterienmatrix Brandverlauf

5.5.3 Auswertung der Kriterienmatrix

Die gleichmäßigen Spaltensummen der *Teilbereiche* und *physikalischen Kategorien* zeigen, daß diese Kriterien gleichwertig abgedeckt wurden und Defizite hinsichtlich der Variablenauswahl nicht bestehen.

Die *dynamischen Kategorien* weisen vor allem eine Betonung der Flußgrößen mit zeitlicher und räumlicher Dynamik auf. Diese Betonung der Dynamik ist gewollt, da gerade sie, wie dargestellt, die Komplexität des Brandgeschehens stark beeinflusst.

Die Bewertung der *Systembeziehungen Input-Output* belegt, daß Einflüsse von außen stark in das System hineinwirken, die Wirkung nach außen jedoch nur gering ist. Dieses Ungleichgewicht ist begründet, da gerade das Einwirken äußerer Einflüsse mitverantwortlich für die hohe Komplexität des Brandgeschehens ist. Im Gegensatz zu adaptiven Systemen stellt das System „Brandverlauf“ keine nutzbringende Beziehung zu anderen Systemen her, deshalb ist die Wirkung nach außen gering. Auszunehmen ist hier gegebenenfalls die Wirkung auf die Rettungsdienste. Sie findet über die Vergabe eines vollen Punktes im Bereich der Kategorie *Output* Berücksichtigung (Personenschäden).

Die gewählten Variablen werden ebenso von *innen* wie auch von *außen* gelenkt. Dies ist zu begründen, da der präventive Brandschutz natürlich in viele Bereiche dieses Systems steuernd eingreift und gute Regelungschancen im Vorfeld potentieller Brände bestehen (Einfluß von Außen = 8 Pkt.). Ebenso zeigt die Kriterienmatrix, daß eine Systembeeinflussung während des Brandablaufs potentiell möglich ist (Einfluß von Innen = 11 Pkt.).

Anhand der Kriterienmatrix konnte gezeigt werden, daß die Variablenauswahl sinnvoll ist. Alle Teilbereiche des Systems „Brandverlauf“ werden gleichmäßig im System berücksichtigt und die Variablenauswahl ist geeignet, die inneren und äußeren Wechselwirkungen des Systems abzubilden.

5.6 Einflußmatrix und Rollenverteilung

5.6.1 Vorbemerkung

Durch die Einflußmatrix werden die Variablen hinsichtlich der Stärke ihrer Wirkung aufeinander quantitativ erfaßt. Sie können daraufhin bezüglich ihrer Rolle im System beurteilt werden und zeigen ihren Systemcharakter in der Darstellung der Rollenverteilung.

Die für die Konsensmatrix grundlegenden drei Einflußmatritzen wurden in Zusammenarbeit mit zwei Mitarbeitern des Lehr- und Forschungsgebietes Baustofftechnologie und Brandschutz des Fachbereichs Bauingenieurwesen der Bergischen Universität/GH Wuppertal separat voneinander erstellt. Eine anschließende inhaltliche Diskussion führte auf die unter 5.6.3 dargestellte Konsensmatrix. Die numerische Auswertung dieser Matrix wird unter 5.6.5 besprochen.

Die Bewertung jeder potentiellen Wirkungsbeziehung¹ führt für den einzelnen Mitarbeiter teilweise zum Erkennen vollkommen neuer Zusammenhänge und Erkenntnisse. Es werden Fragen gestellt, die sonst auch von Insidern nicht thematisiert werden. Insofern ist die Arbeit an der Matrix auch bereits vor der Analyse der numerischen Ergebnisse lohnenswert.

5.6.2 Methodische Vorgaben und ein neues Kontrollverfahren

5.6.2.1 Vorbemerkung

Die Bearbeitung der Einflußmatrix soll durch drei unterschiedliche Personen oder Personengruppen vorgenommen werden. Beim Vergleich der drei Ergebnisse zeigen sich anschließend Abweichungen zwischen den Matritzen, die auf ein unterschiedliches Verständnis der Beteiligten in Bezug auf die Variablen hindeuten. Die Konsensmatrix stellt die von diesen differierenden Einschätzungen befreite, abschließende Matrix der gesamten Arbeitsgruppe dar. Die Konsensbildung geschieht gegebenenfalls durch Redefinition der Variablen.

¹ Für vorliegendes System wurden $(n^2 - n) = 380$ Bewertungen durchgeführt.

5.6.2.2 Punktevergabe

Jede Variable wird gegenüber jeder anderen bezüglich der Stärke einer ggfls. vorhandenen direkten Wirkung abgefragt. Die Gewichtung erfolgt mittels Punktevergabe. Dabei bedeutet bezogen auf eine Wirkung $A \rightarrow B$:

- 0 Pkt. Vernachlässigbare Wirkung von A auf B;
- 1 Pkt. Starke Änderung von A bewirkt schwache Änderung bei B;
- 2 Pkt. Mittlere Änderung von A bewirkt mittlere Veränderung bei B;
- 3 Pkt. Schwache Änderung von A bewirkt starke Änderung bei B.

Die Bewertung lediglich mit 4 unterschiedlichen Werten erscheint grob. Eine differenziertere Punktevergabe könnte nach Vester [V05, S.EM-13] jedoch das Bild verwischen und zuviele schwache und schwächste Wirkungen mit einbeziehen. Dies würde von der zunächst angestrebten unscharfen Sichtweise wegführen.

Die Punktevergabe erfordert, da nur die direkten Beziehungen abgefragt werden, eine gute Kenntnis aller Variablen des Systems, denn oftmals kommt die Wirkung von A auf B nicht direkt zustande, sondern erst über eine Variable C, so daß nicht die Beziehung $A \rightarrow B$ zu bewerten ist, sondern die Beziehungen $A \rightarrow C$ und $C \rightarrow B$. Wird dies nicht berücksichtigt, so entstehen Doppelbewertungen und daraus folgend eine Verzerrung der Aussagen. Vester weist auf diese Gefahr hin, bietet jedoch keinen Kontrollmechanismus zur Vermeidung dieses Fehlers an. Um das Verfahren des SM diesbezüglich zu unterstützen, wird im folgenden eine Möglichkeit zur Kontrolle der mittleren und starken indirekten Beziehungen über eine weitere Variable vorgestellt. Die mathematische Grundlage stammt aus dem Bereich der Verkehrsplanung und wird zur Beschreibung der Anzahl von Verkehrsverbindungen zwischen verschiedenen Orten verwendet. Eine Darstellung findet sich in [G04, S.2-77f].

5.6.2.3 Ein neues Kontrollverfahren

In der Einflußmatrix [E] wird wie bisher - hier an einer fiktiven Matrix beispielhaft verdeutlicht - die Stärke der Wirkung der Zeilenvariablen auf die Spaltenvariablen festgelegt.

[E]	1	2	3	4	5	6
1		1	2	2	3	1
2	0		1	2	0	2
3	2	1		3	1	2
4	1	0	3		1	3
5	0	1	2	3		0
6	1	0	0	2	1	

Das Kontrollverfahren überführt nun die Einflußmatrix [E] in eine duale Matrix [D] indem die Plätze der 2-er und 3-er Beziehungen mit 1 und alle anderen mit 0 besetzt werden.

[D]	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	1	0
2	0	0	0	1	0	1
3	1	0	0	1	0	1
4	0	0	1	0	0	1
5	0	0	1	1	0	0
6	0	0	0	1	0	0

Das Quadrat dieser Matrix ($[D]^2$) liefert in der Hauptdiagonalen die Anzahl wechselseitiger Direktverknüpfungen, was hier weniger von Interesse ist. Auf den anderen Plätzen jedoch gibt diese Matrix an, wie oft die Beziehung über eine weitere Variable verläuft.

$[D]^2$	1	2	3	4	5	6
1	1	0	2	2	0	2
2	0	0	1	1	0	1
3	0	0	2	2	1	1
4	1	0	0	2	0	1
5	1	0	1	1	0	2
6	0	0	1	0	0	1

An den Stellen, an denen in der dualen Matrix eine 1 gesetzt war und die Quadratmatrix eine Ziffer ≥ 1 aufführt, existiert neben der direkten eine indirekte Beziehung. Setzt man die Ziffern dieser Stellen in eine neue Matrix ein und bewertet alle anderen Stellen mit 0, so entsteht die für die Hinterfragung von Doppelbewertungen relevante Matrix [R].

[R]	1	2	3	4	5	6
1		0	2	2	0	0
2	0		0	1	0	1
3	0	0		2	0	1
4	0	0	0		0	1
5	0	0	1	1		0
6	0	0	0	0	0	

Bei der Wirkung $2 \rightarrow 4$, $2 \rightarrow 6$, $3 \rightarrow 6$, etc., tritt damit jeweils eine Doppelbewertung auf, bei $1 \rightarrow 3$, $1 \rightarrow 4$, etc. jeweils zwei, die überprüft werden sollten. Vergleicht man dieses Ergebnis mit einem Wirkungsgefüge für die 2-er und 3-er Beziehungen der Einflußmatrix, so wird die Übereinstimmung mit dieser Aussage deutlich.

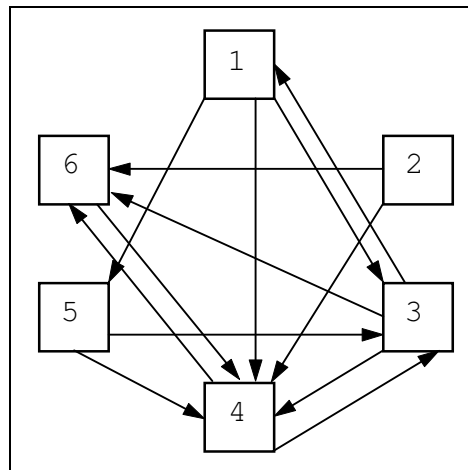


Abb. 5.3: Exemplarische Systemstruktur

So bestehen beispielsweise neben der direkten Beziehung $1 \rightarrow 3$, indirekte über die Variablen 4 ($1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$) und 5 ($1 \rightarrow 5 \rightarrow 3$). Diese drei Beziehungen müssen überprüft und bei Inhaltsgleichheit geändert werden.

5.6.3 Einflußmatrix „Brandverlauf“

Die Einflußmatrix (Konsensmatrix) für das System „Brandverlauf“ ergab sich wie unten aufgeführt. Dargestellt wurde die Bewertung der Wirkungsstärke der Zeilenvariablen auf die Spaltenvariablen und die Berechnung der Aktiv- (AS) und Passivsummen (PS).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	AS	PS
1 QdR	X	0	2	1	2	3	2	3	0	1	0	0	0	2	2	0	2	0	2	2	24	27
2 WdU	3	X	2	2	3	3	1	2	0	2	0	2	2	0	2	0	2	0	2	0	28	9
3 BI	0	3	X	3	2	3	0	3	0	2	2	3	2	0	0	1	2	3	2	0	31	16
4 HN	2	0	1	X	0	0	0	1	1	2	1	0	1	0	0	0	2	3	0	1	15	10
5 ENTR	0	0	0	0	X	3	0	2	0	0	0	0	2	1	0	0	1	2	0	0	11	15
6 IdR	3	2	3	1	1	X	0	2	0	2	0	0	3	2	0	0	3	1	2	0	25	21
7 BaW	2	1	0	0	0	0	X	0	2	2	1	2	2	2	3	1	2	0	2	1	23	8
8 BrW	0	0	0	0	0	0	0	X	2	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	2	11	22
9 ZvFW	2	0	3	0	0	2	0	3	X	2	2	0	1	0	0	1	1	2	0	2	21	22
10 IFW	2	1	0	0	0	2	2	2	3	X	2	3	1	0	0	0	2	2	2	0	24	23
11 LdFW	3	1	0	1	3	0	1	2	3	2	X	3	1	0	0	0	0	1	0	3	24	19
12 ErB	0	0	3	1	0	2	0	2	1	1	2	X	3	2	0	2	1	3	0	1	24	22
13 ExRW	2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	X	2	0	3	3	3	2	3	22	26
14 ZvN	0	0	2	0	0	2	0	0	3	0	0	0	0	X	2	2	0	0	0	0	11	20
15 FI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	2	2	X	0	0	0	3	0	10	14
16 LdN	0	1	0	0	2	0	1	0	2	2	2	3	2	2	3	X	3	2	3	2	30	18
17 Qvl	3	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	2	2	2	2	2	X	3	2	0	22	28
18 STR	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	3	3	X	0	1	14	31
19 VHA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	1	3	X	2	11	22
20 PS	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	3	0	3	0	X	12	20

Abb. 5.4 Konsensmatrix Brandverlauf

Das unter 5.6.2.3 geschilderte Verfahren wurde auf diese Matrix angewendet. Ungerechtfertigte Doppelbewertungen konnten entfernt werden.

5.6.4 Musterbildung und erste Interpretation

Eine Schattierung der Elemente der Matrix - entsprechend ihrer Gewichtungen - verdeutlicht die Beziehungen zwischen und innerhalb der Teilbereiche. So steht beispielhaft der stark umrandete Bereich in der linken oberen Ecke der folgenden Abbildung für die interne Interaktion „Brand-Bauwerk“, der rechts daneben befindliche Bereich für den Einfluß von Brand-Bauwerk auf die Feuerwehr und die Nutzer.

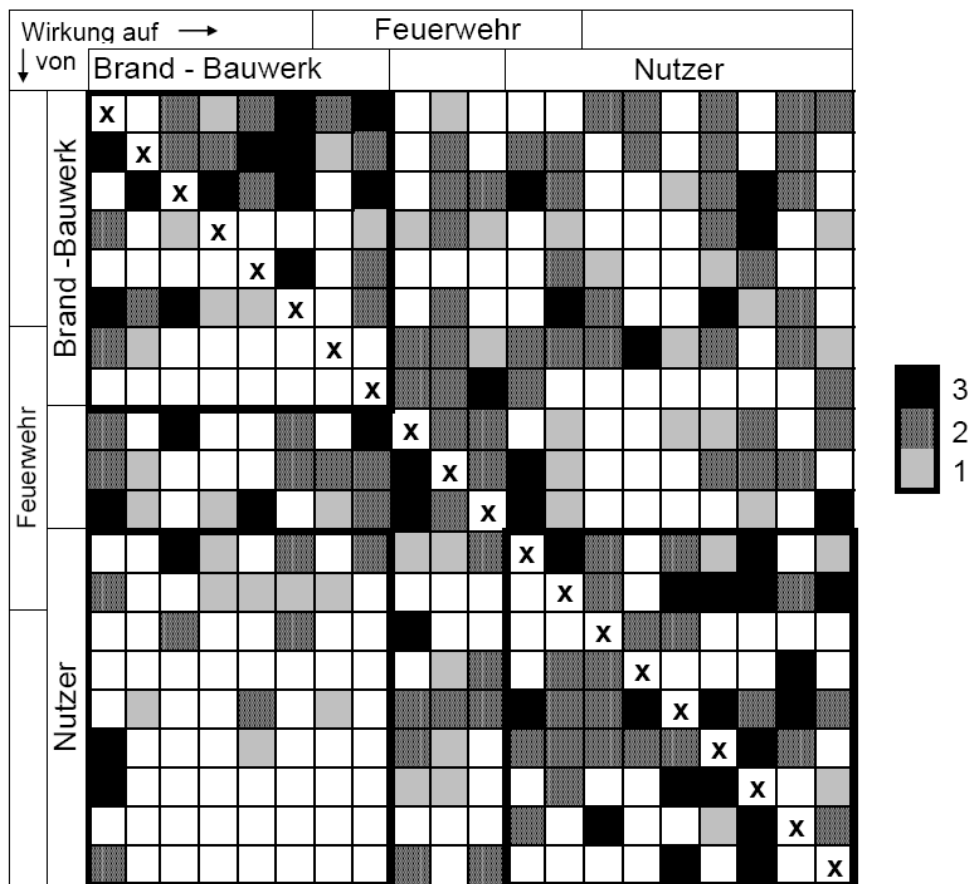


Abb. 5.5: Musterbildung in der Konsensmatrix

Die starke Punkteverteilung entlang der Hauptdiagonalen zeigt, daß zwar deutliche Unterstrukturen gebildet wurden, die Teilbereiche jedoch noch stark genug miteinander verbunden sind, um nicht zu dem Schluß gelangen zu müssen, sie seien voneinander unabhängige, autarke Systeme; der Systemzusammenhang wurde gewahrt.

Auffällig ist die geringe Punktebelegung im linken unteren Bereich, also der Wirkungen der Nutzer auf den Bereich Brand-Bauwerk. Den Personen im Brandfall werden damit nur geringe Möglichkeiten der Einflußnahme auf das Brandgeschehen zugesprochen. Die innere Vernetzung im rechten unteren Teil der Matrix verdeutlicht darüberhinaus, daß die Variablen im Bereich der Bauwerksnutzer in starker Interaktion zueinander stehen. Das menschliche Verhalten wird wesentlich durch die Eigenschaften der handelnden Personen beeinflußt.

Die große Menge starker innerer Beziehungen im Bereich links oben bestätigt, daß günstigste Bedingungen zur Einflußnahme auf den sich entwickelnden Brand im Bereich des baulichen und betrieblichen Brandschutzes zu suchen sind.

5.6.5 Rollenverteilung

5.6.5.1 Methodische Vorgaben

Neben den während der Bearbeitung gewonnenen vielfältigen neuen Einsichten in die Wirkungsbeziehungen liegt der Nutzen der Einflußmatrix vor allem in den Ergebnissen in Bezug auf das Erkennen kybernetischer Charakteristiken (Sensitivitäten) von Teilbereichen oder Einzelvariablen. Zu diesem Zweck erfolgt eine numerische Auswertung der Einflußmatrix.

Dazu werden die Zeilensummen (AS=Aktivsumme) und die Spaltensummen (PS=Passivsumme) jeder Variablen gebildet. Eine hohe PS kennzeichnet eine Variable tendentiell als Indikator für das Systemverhalten, eine hohe AS bedeutet, daß die Variable ein gutes Potential aufweist, Bewegung in das System zu bringen. Sie ist jedoch nur dann günstig als Steuerelement verwendbar, wenn sie nicht gleichzeitig eine hohe PS aufweist, da sie nur dann nicht selbst vom System stark beeinflußt wird und die Entwicklungen sich aufschaukeln. Ebenso ist eine Variable mit hoher PS nur dann ein guter Indikator, wenn sie nicht selbst das System stark beeinflußt, also ihre AS gering ist.

Es zeigt sich, daß AS und PS alleine nicht geeignet sind, die Systemeigenschaften der Variablen sinnvoll wiederzuspiegeln. Dies kann erst unter gleichzeitiger Betrachtung beider Größen geschehen.

Das SM unterscheidet deshalb vier Variablentypen mit unterschiedlichen kybernetischen Eigenschaften [V05, S.EM-5]:

Aktive Variable: Sie wird von anderen Variablen wenig beeinflusst, beeinflusst ihrerseits jedoch andere Variablen stark. (AS hoch, PS niedrig).

Reaktive Variable: Sie wird von anderen Variablen stark beeinflusst, beeinflusst ihrerseits jedoch andere Variablen nur schwach (AS niedrig, PS hoch).

Kritische Variable: Sie wird von anderen Variablen stark beeinflusst und beeinflusst ihrerseits andere Variablen ebenfalls stark (AS hoch, PS hoch).

Puffernde Variable: Beeinflusst andere Elemente nur schwach und wird auch nur schwach beeinflusst (AS niedrig, PS niedrig).

Als Einzelwert zur Beurteilung der relativen Lage eines Elementes in der Spannungslinie Aktiv-Reaktiv bietet sich der Quotient (Q) aus AS und PS an. Der Wert 1 für diesen Quotienten kennzeichnet dabei die Lage der neutralen Achse. $Q > 1$ zeigt, daß das Element aktiv ist, $Q < 1$ zeigt die Reaktivität des Elementes an.

Vester kategorisiert Bereiche für Q, basierend auf empirischen Erfahrungen durch eine Vielzahl bearbeiteter Systeme, wie folgt:

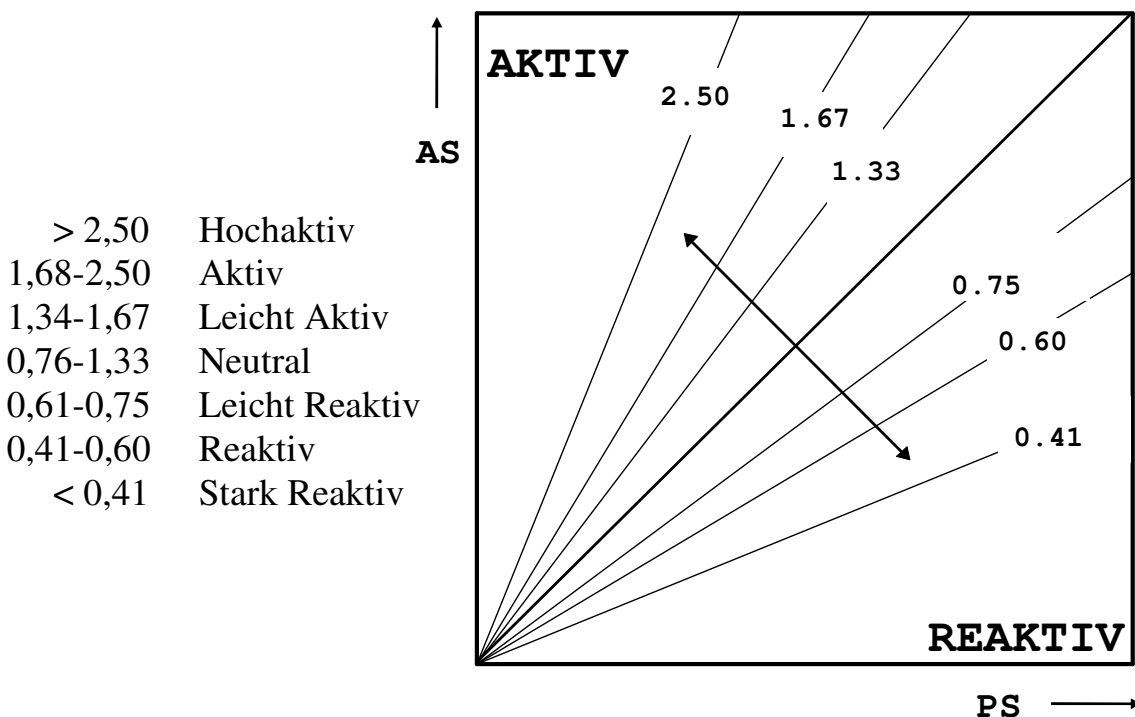


Abb. 5.6: Bereiche unterschiedlicher Q-Werte in der Rollenverteilung

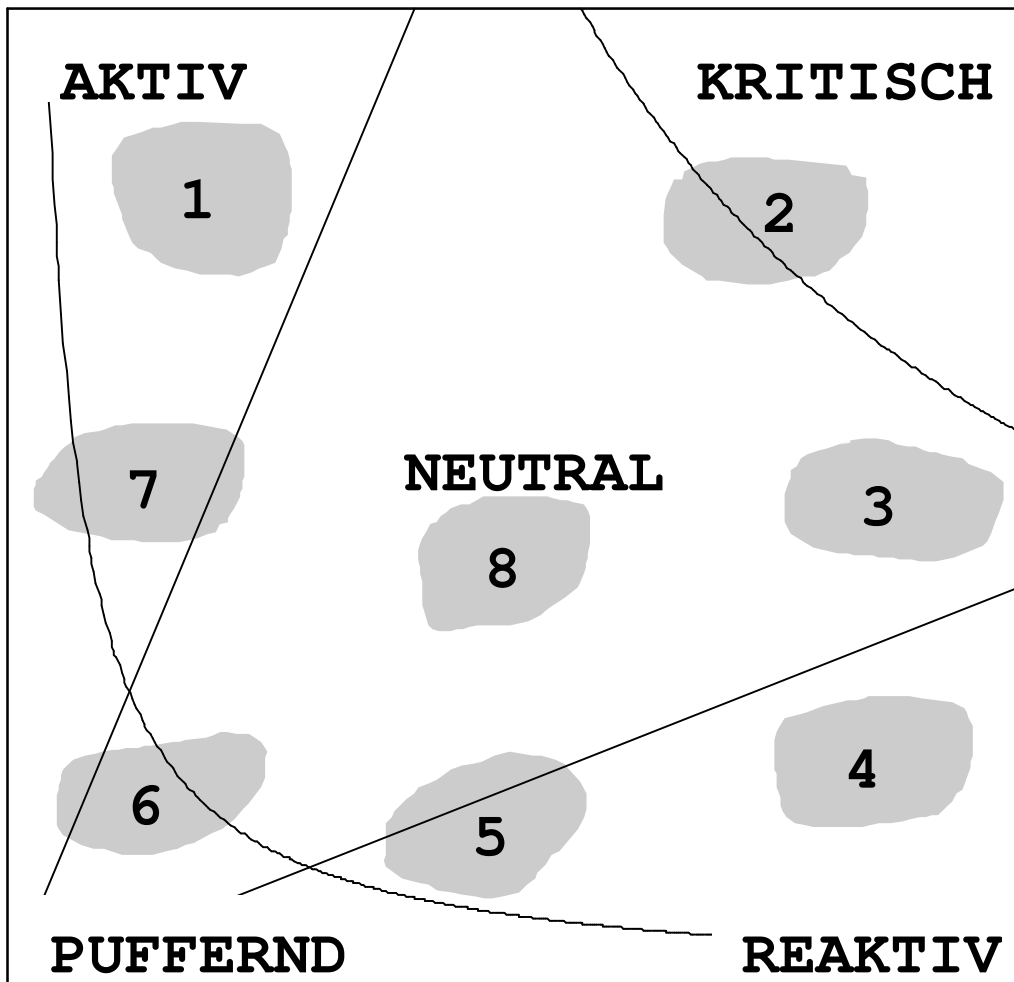


Abb. 5.8: Prinzipskizze von Bereichen unterschiedlicher kybernetischer Aussagen in der Rollenverteilung

Die kybernetischen Eigenschaften der in den angegebenen Bereichen (1-8) liegenden Variablen können wie folgt angegeben werden.

- **Bereich 1:** Hier liegen Schalthebel, die das System nach erfolgter Änderung stabilisieren können, da sie starken Einfluß im System haben, jedoch kaum vom System beeinflusst werden. Eine Veränderung der Elemente dieses Bereichs bedingt deshalb häufig Eingriffe von außen.
- **Bereich 2:** Hier befinden sich Variablen, die Entwicklungen in Gang bringen können. Sie bewegen das System stark, werden allerdings auch stark vom System beeinflusst. Ein unkontrolliertes Aufschaukeln kann die Folge sein. Als Steuerungsgrößen müssen sie deshalb sehr vorsichtig verwendet werden.
- **Bereich 3:** Variablen in diesem Bereich scheinen häufig wegen ihrer Reaktionsfreudigkeit für Eingriffe gut geeignet zu sein. Durch die starken Rückwirkungen aus dem System können sie jedoch auch schnell aus der Hand gleiten.
- **Bereich 4:** Verwendet man Elemente dieses Bereichs zur Steuerung, so erreicht man eher eine Behandlung der Symptome als eine andauernde Beeinflussung des Systemverhaltens. Die Variablen dieses Bereichs eignen sich hingegen sehr gut als sensible Indikatoren für Veränderungen im System.
- **Bereich 5:** Ebenfalls für Indikatoren geeigneter Bereich, jedoch träger als der Bereich 4. Steuernde Eingriffe sind auch hier kaum möglich.
- **Bereich 6:** Elemente in diesem Bereich sind weder als Indikatoren, noch als Steuerelemente einsetzbar. Sie fangen allerdings wegen ihres trägen Verhaltens häufig Störungen im System auf. Zu beachten ist jedoch, ob ein in diesem Bereich liegendes Element seine Wirkung vorwiegend auf ein aktives oder kritisches Element ausübt („Wolf im Schafspelz“).
- **Bereich 7:** Dieser Bereich repräsentiert Elemente, die als gute Schalthebel einsetzbar sind. Ihre Beeinflussung muß jedoch wegen der geringen Passivsumme häufig von außerhalb des Systems erfolgen.
- **Bereich 8:** Mit den in diesem Bereich liegenden Elementen ist das System nur schwer zu steuern. Sie eignen sich jedoch gut für die Selbstregulation.

Eine Verfeinerung der oben dargestellten acht Bereiche ergibt sich durch gleichzeitiges Eintragen aller Q- und P-Linien. Es entstehen 50 Felder, für die das SM jeweils eine bestimmte kybernetische Aussage für eine innerhalb des Feldes angesiedelte Variable angibt (vgl. Abb.5.9 und [V05, S. RV1 ff]).

5.6.5.2 Rollenverteilung „Brandverlauf“

Die Abbildung zeigt die Rollenverteilung für das System „Brandverlauf“¹. Sie ergibt sich aus der Konsensmatrix und zeigt die vorgenannten 50 Felder unterschiedlicher kybernetischer Deutungen.

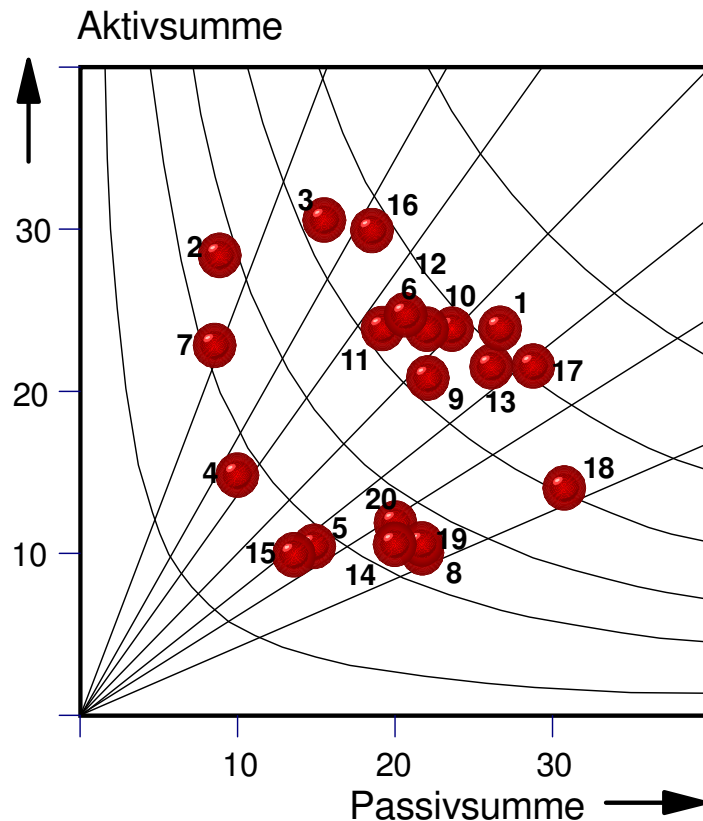


Abb. 5.9: Rollenverteilung für das System „Brandverlauf“

Zur Beurteilung der Größe der kritischen Position des Gesamtsystems als Grundlage für die Beurteilung der Steuerbarkeit kann der k-Wert berechnet werden. Er gibt die prozentuale Abweichung von der neutralen P-Linie ($1,0 \cdot (n-1)^2$) an und wird ermittelt aus:

$$100 \cdot (1 - a/b) \quad \text{mit } a = \text{Summe aller Aktivsummen} \\ \text{und } b = (n-1)^2 \text{ mit } n = \text{Anzahl der Variablen.}$$

Das vorliegende System weist eine Abweichung von +8,9 % auf und liegt damit nur geringfügig im kritischen Bereich; die Steuerbarkeit scheint gegeben.

¹ Die Zahlenangaben können anhand des ausklappbaren Anhangs B den Variablen zugeordnet werden.

5.6.6 Auswertung der Rollenverteilung und Interpretation der Ergebnisse

5.6.6.1 Vorbemerkung

Vernetzte Systeme haben gute Chancen zur Stabilisierung eines Zustands, wenn die Vernetzung entweder nicht zu groß wird oder bei steigender Vernetzung Unterstrukturen entwickelt werden können [V01, S.40]. Lebende Systeme verfügen für derartige Umstrukturierungen meist über ausreichend Zeit, da sich auch die Umweltbedingungen nur langsam ändern; technische Systeme neigen hingegen wegen häufig fehlender Möglichkeiten zur Anpassung bei plötzlichen Ereignissen, hohem Vernetzungsgrad und enger Kopplung zu unerwünschten Aufschaukelprozessen [P03, S.129]. Ob ein System einer derartigen Entwicklung geneigt ist, läßt sich an der Lage der Variablen in der Rollenverteilung erkennen.

5.6.6.2 Gesamtsystem

Der k-Wert von +8,9 % zeigt, daß das Gesamtsystem nicht auffällig im kritischen Bereich liegt. Damit scheint es zunächst schwierig, selbstverstärkende Prozesse in risikomindernder Hinsicht zu aktivieren. Da aber die Vernetzung in den Teilbereichen Brand/Bauwerk, Nutzer und Feuerwehr signifikant höher als im Gesamtsystem liegt, könnten bewußt herbeigeführte Aufschaukelprozesse vor allem innerhalb dieser Teilbereiche erfolgversprechend sein. Nutzbar sind für diesen Zweck vor allem die weiter unten aufgeführten kritischen Variablen.

5.6.6.3 Teilbereiche

Brand-Bauwerk: Die Variablen dieses Teilbereichs (1-6) haben allgemein eine hohe Aktivsumme. Im Sinne der Initiierung risikomindernder Entwicklungen ist ihre Beeinflussung von außerhalb des Systems daher als günstig zu bewerten.

Nutzer: Die Mehrzahl der Variablen des Teilbereichs „Nutzer“ (14,15,18,19,20) liegen im reaktiven Bereich; der Nutzer ist den Ereignissen relativ wehrlos ausgesetzt. Lediglich die Variablen "Leistungsf."

Nutzer" (16), "Qualität verf. Informationen" (17) und „Exposition durch Rauch/Wärme“ (13) können zu einer Beeinflussung der Ereignisse genutzt werden. Die Variable "Stress" (18) hat dabei deutlichen Einfluß auf die "Leistungsf. Nutzer" (16). Bei ihr handelt es sich damit um eine Variable, die deutlich aktiver ist als ihre Lage vermuten läßt („Wolf im Schafspelz“).

Feuerwehr: Das hohe Handlungspotential der Feuerwehr wird durch die Positionen der Variablen 9-13 im leicht kritischen Bereich verdeutlicht.

5.6.6.4 Kritische Variablen

Günstige Elemente in Bezug auf sich selbst verstärkende Prozesse sind die im hoch-kritischen und kritischen Bereich angesiedelten Variablen. Lediglich "Qual. d. Rettungsw." (1) und "Qualität verf. Informationen" (17) kommen dieser Anforderung nahe. Eingriffe in diese Elemente scheinen im Sinne von selbstverstärkenden Entwicklungen lohnenswert zu sein.

Die „**Qualität der Rettungswege**“ ist in ihrer Wichtigkeit erkannt und durch die bauaufsichtlichen Anforderungen stark reglementiert. Leider greifen diese Anforderungen mit Ausnahmen einiger Sonderbaurichtlinien nur bis zur Bauabnahme und kaum noch im Betriebszustand eines Bauwerks. Eine im Brandverlauf stattfindende Verbesserung dieser Variablen kann beispielsweise in der Aktion des Anleiterns durch die Feuerwehr gesehen werden. Ist die Variable in positive Regelkreise eingebunden, so kann davon ausgegangen werden, daß sich durch diese Handlung viele weitere Elemente in schadensmindernder Hinsicht positiv entwickeln werden.

Die „**Qualität verfügbarer Informationen**“ wird bisher eher zu gering beachtet. Fluchtwegebilderungen im Rauchstaubereich an der Decke, fehlende Brandmelde- und Personenwarnanlagen, mangelhafte Beleuchtung, etc., kennzeichnen häufig Defizite. Die „Qualität verfügbarer Informationen“ ließe sich durch rechnergestützte Informationssysteme verbessern, die in Abhängigkeit vom sich entwickelnden Brand Informationen liefern. Entsprechende Systeme befinden sich im Entwicklungsstadium [K03] .

5.6.6.5 Aktive Variablen

Interessant für externe Eingriffe sind die Variablen mit hoher Aktiv- und geringer Passivsumme. Dies sind außerhalb des Teilbereichs „Feuerwehr“ beispielsweise:

	AS	PS
Brandintensität (3)	31	16
Leistungsfähigkeit der Nutzer (16)	30	18
Widerst. Umfassungsb. (2)	28	9
Int. d. Rauchausbreitung (6)	25	21

Es fällt auf, daß drei der genannten Variablen tatsächlich die Haupteinflußgrößen derzeitiger Brandschutzkonzepte darstellen. Die Brandintensität wird durch Brandbekämpfungsanlagen oder die Begrenzung der Brandlasten, die Widerstandsfähigkeit der Bauteile durch die bauaufsichtlichen Standardanforderungen berücksichtigt. Verstärkt reglementiert wurden in den letzten Jahren auch die Maßnahmen zur Begrenzung der Intensität der Rauchausbreitung.

Auf die Leistungsfähigkeit der Nutzer - insbesondere bzgl. der Erlangung brandangepaßter Verhaltensweisen - wird jedoch zu wenig eingewirkt [B05]. So fällt beispielsweise die Brandfrüherziehung in den Schulen immer häufiger den finanziellen Schwierigkeiten der Kommunen zum Opfer. Wie wichtig jedoch eine Förderung dieses Elementes ist, wurde bereits im Kapitel 3.3.2 angesprochen.

5.6.7 Zusammenfassung

Die auf der Grundlage der Konsensmatrix erstellte Rollenverteilung zeigt, daß die Beeinflussung der Elemente des Teilbereichs Bauwerk bezüglich ihres Risikominderungspotentials als günstig einzustufen sind. Darüberhinaus werden jedoch Variablen aufgezeigt, deren hohes Einflußpotential zur Zeit zu gering genutzt wird. Dies betrifft vor allem den Bereich des Informationsangebots und der Verbesserung der Handlungsfähigkeit potentieller Brandopfer.

Weitergehend kann erst dann dezidiert über die Möglichkeiten einzelner Variablen Auskunft gegeben werden, wenn im Folgenden die Beziehungen zu den anderen Elementen des Systems aufgeschlüsselt und mögliche Wirkungspfade in die Überlegungen einbezogen wurden.

5.7 Wirkungsgefüge

5.7.1 Vorbemerkung

Bereits 1977 zeigte Dörner [D06] ein „Block-Diagramm“, das, ebenso wie die Feedback-Diagramme von Gomez [G05], dem Wirkungsgefüge von Vester nahekommt.

Kosko schildert in [K04] sogenannte „fuzzy-logische Karten (FCM: Fuzzy Cognitive Maps), die dem Wirkungsgefüge von Vester entsprechen. Er stellt die Möglichkeiten dar, mittels FCM's Muster zu erkennen. Kosko prognostiziert, daß die Darstellung von Wirkungsgefügen bald zu jedem seriösen Kommentar in Zeitschriften gehören wird. Auch Vester hält das vernetzte Denken für den nächsten und dringend notwendigen Bewußtseinschritt der Menschheit [V01, S.55]. Unter anderem ist das Wirkungsgefüge eine Visualisierung dieser Denktechnik.

Die graphische Darstellung von Wirkungsgefügen wird auch im Bereich der „Systems Dynamics“ angewendet. Sie unterscheiden sich von der Methode des SM durch die numerische Eindeutigkeit der dargestellten Variablen und in der Simulation durch die Exaktheit der funktionalen Beziehungen (vgl. Kapitel 4.2.1 „Realtheoretische und realempirische Systemauffassung“).

Bei der Aufstellung von Wirkungsgefügen zeigen sich deutlich die Vorteile des zur Methodik des SM gehörenden Computerprogramms. Die Vielzahl an Wirkungsbeziehungen manuell oder auch mit einem Zeichenprogramm aufzuzeichnen und so häufig zu verändern, wie dies für die sinnvolle Bearbeitung notwendig ist, sowie die Auswertung der Vielzahl sich ergebender Rückkopplungen würde ohne ein derartiges Hilfsmittel außerordentlich langwierig oder, bei Verwendung einer Matrixdarstellung, sehr unübersichtlich werden. Ein vergleichbares Programm für den Bereich der Simulationen findet sich für die „Systems Dynamics“ in [V06].

Das Wirkungsgefüge beinhaltet im Gegensatz zur Einflußmatrix nicht alle potentiellen Kopplungen, sondern beschränkt sich auf die real existierenden.

5.7.2 Methodische Vorgaben

In der Einflußmatrix wurden quantitative Gewichtungen der Beziehungen aller Variablen abgefragt. Es wurde jedoch bisher nicht festgestellt, ob die Wirkung $A \rightarrow B$ bei einem Anwachsen von A zu einem Anwachsen (gleichsinnige Beziehung) oder einem Schrumpfen (gegensinnige Beziehung) von B führt. Bei der von der Einflußmatrix unabhängigen Aufstellung dieser qualitativen Wirkungspfade im Wirkungsgefüge kann es wiederum zu Redefinitionen oder Ergänzungen des Variablensatzes kommen.

Das Computerprogramm zum SM listet alle Rückkopplungen auf und unterstützt damit ihre variablenbezogene Auswertung. Um aus ihnen Einzelaussagen gewinnen zu können, bedarf es jedoch einer genauen Analyse. Insbesondere muß beachtet werden, daß einige Variablen ihren Zustand irreversibel verändern und damit nicht in beide Richtungen beweglich sind (vgl. V05, S.WG-17). So kann sich beispielsweise die „Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile“ durch Temperaturbeanspruchung im Brandverlauf nur verringern (Ausnahme: aufschäumende Schottungen für Kabeldurchführungen), auch wenn diese Beziehung in eine negative Rückkopplung eingebunden ist.

5.7.3 Wirkungsgefüge „Brandverlauf“

Für das System „Brandverlauf“ ergibt sich wegen der starken Strukturänderungen die Notwendigkeit einer Darstellung des sich entwickelnden Wirkungsgefüges in Abhängigkeit von der jeweiligen Brandverlaufphase (vgl. Abb. 5.1). Die nächsten Seiten zeigen deshalb exemplarisch eine mit fortschreitender Branddauer komplexer werdende Brandsituation und eine jeweilige Erläuterung zu den entstehenden Kopplungen. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit sind dabei die Variablen mit den Abkürzungen entsprechend den Variablendeklarationen (vgl. Anhang B) bezeichnet worden.

PHASE 1: Brandentdeckung

Zugrundegelegt wird eine Brandentdeckung durch die Wahrnehmung der Rauchgase. Die Stärke der Rauchimmission ist von der produzierten Rauchgasmasse und von der räumlichen und baulichen Trennung zwischen Brandentstehungsort und betroffener Person abhängig. Der räumliche Abstand spielt wegen der relativen Kleinzelligkeit der Bauweisen bei den hier betrachteten Nutzungsarten "Wohn- oder Bürogebäude" gegenüber der räumlichen Trennung durch Bauteile nur eine untergeordnete Rolle. Die Qualität der Informationen wird durch den körperlichen Zustand und das Interpretationsvermögen des Opfers bestimmt. Die Variable "Zeitverzögerung Nutzer" (ZvN) kennzeichnet hier, anders als in den folgenden Brandverlaufphasen, einen Zeitpunkt. Der sich ergebende Wirkungskreis ist deshalb nicht als zeitliche Rückkopplung zu werten.

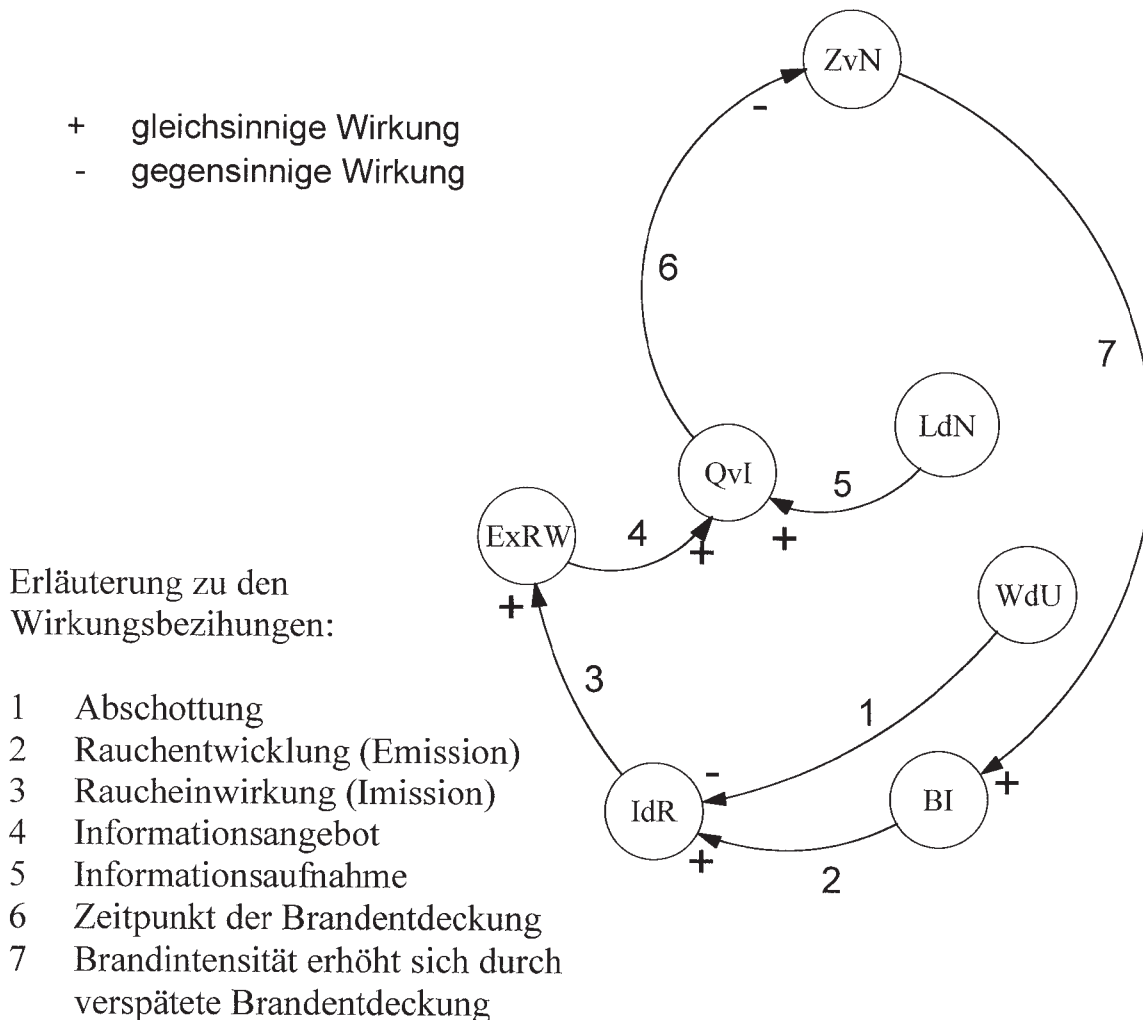
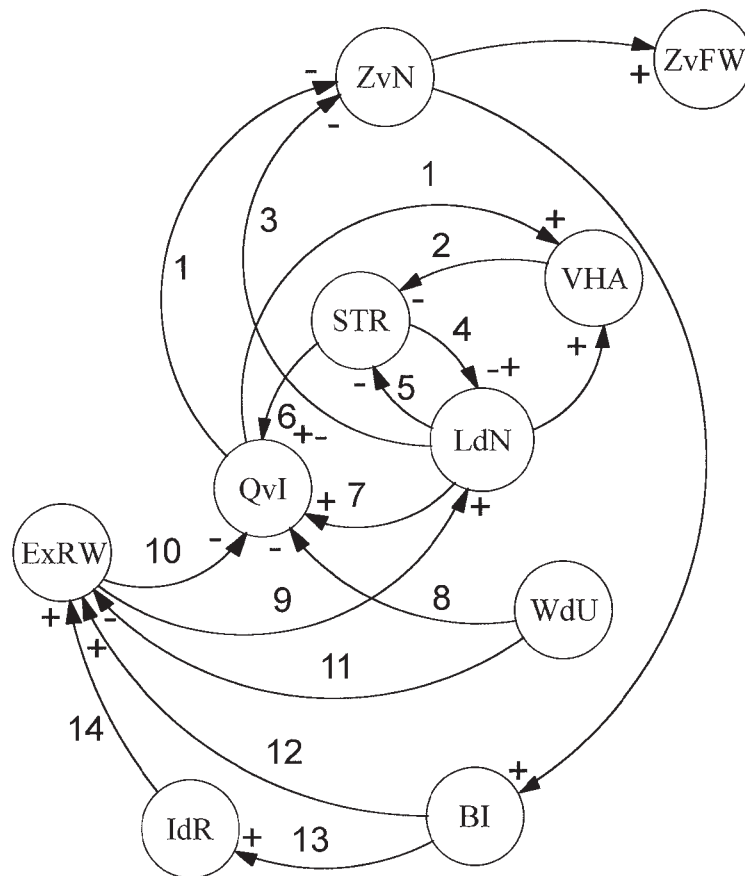


Abb. 5.10. Wirkungsgefüge Phase 1

PHASE 2: Erkennen der Gefahr bis zum Einsetzen erster wirksamer Handlungen.

Zwischen der Brandentdeckung und dem Einsetzen wirksamer Handlungen vergeht ein Zeitraum, der vor allem gekennzeichnet ist von der Orientierungssuche der Nutzer. Insbesondere die wegen des zunehmenden Streß sich verändernden persönlichen Möglichkeiten der Betroffenen spielen eine herausragende Rolle. Die Orientierungsphase kostet Zeit. Dies bewirkt für alle folgenden Phasen eine veränderte Brandintensität und ggf. eine verspätete Alarmierung der Feuerwehr.

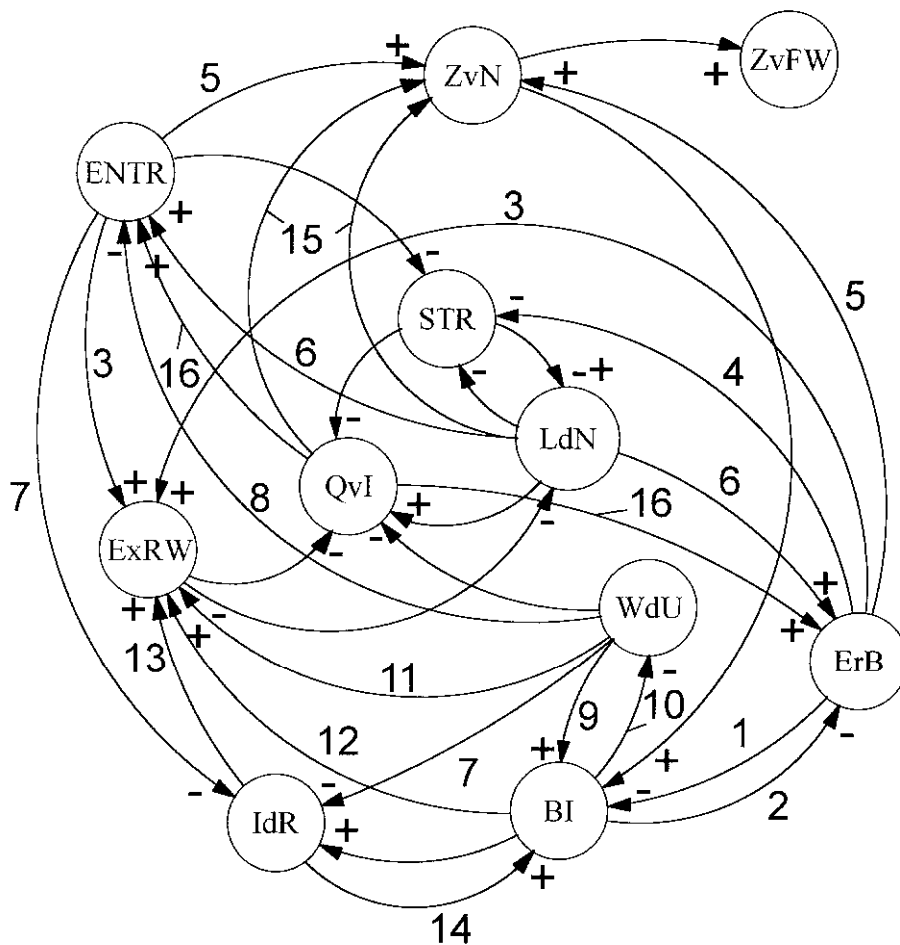


- | | | | |
|---|--------------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Wissen, Kenntnisse | 8 | Blickkontakt |
| 2 | Aussichtslosigkeit, Verwirrung | 9 | Toxische Wirkung |
| 3 | Können | 10 | Informationsangebot |
| 4 | Motorische Fähigkeiten | 11 | Schutzwirkung |
| 5 | Streßresistenz. | 12 | Wärme |
| 6 | Informationsverarbeitung | 13 | Rauchentwicklung (Emission) |
| 7 | Informationsbeschaffung | 14 | Raucheinwirkung (Imission) |

Abb. 5.11. Wirkungsgefüge Phase 2

PHASE 3: Lösch- und Entrauchungsversuche

Streßbestimmend sind in dieser Phase vor allem die Erfolgsaussichten für das Löschen und Entrauchen. Die verfügbaren Handlungsalternativen entfallen, da nun konkrete Handlungen vorausgesetzt werden. Die Aktionen können die Situation durch Einfluß auf den Brand verbessern, gleichzeitig setzen sich die Personen jedoch auch stärker den Brandwirkungen aus, so daß die Tätigkeiten des Löschens und Entrauchens im Gesamtzusammenhang auch ungünstige Wirkungen hervorrufen können.

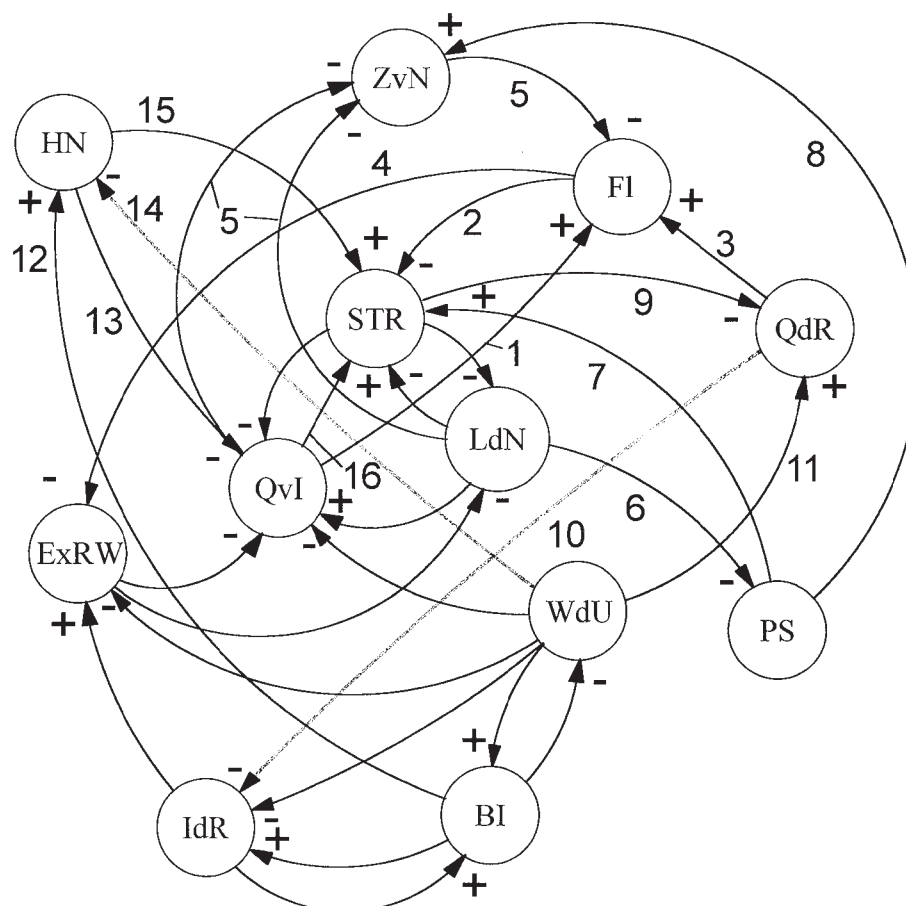


- | | | | |
|---|-----------------------------------|----|---|
| 1 | Löscherfolg | 10 | Thermische Schädigung setzt ein |
| 2 | Adäquanz der Mittel | 11 | Schutzwirkung |
| 3 | Annäherung erforderlich | 12 | Wärme |
| 4 | Erfolg senkt Streß | 13 | Rauch |
| 5 | Zeitaufwand Brandbek. u. Entr. | 14 | Brandfernes Zünden von
Pyrolysegasen |
| 6 | Erfahrung | 15 | Wirkungen entfallen, nun über
die Lösch- u. Entrauchungsversuche |
| 7 | Rauchabführung aus Bauwerk | 16 | Kenntnisse bzgl. Brand u. Bauwerk |
| 8 | Transparenz günstig für Rauchabf. | | |
| 9 | Wärmestrom | | |

Abb. 5.12. Wirkungsgefüge Phase 3

PHASE 4: Aufgabe der Löschversuche und Hinwendung zur Flucht

Streßbestimmend werden nach dem Übergang zur Fluchtphase die Fluchtbedingungen. Der fortgeschrittene Brand beansprucht und schädigt nun bereits deutlich die Umfassungsbauteile, die Rettungswege verrauchen und Erscheinungen, wie laute Geräusche, zerspringende Gläser, etc., führen zu Irritationen. Zunehmende Personenschäden bewirken Zeitverzögerungen bei der Flucht und sind starke Stressoren.

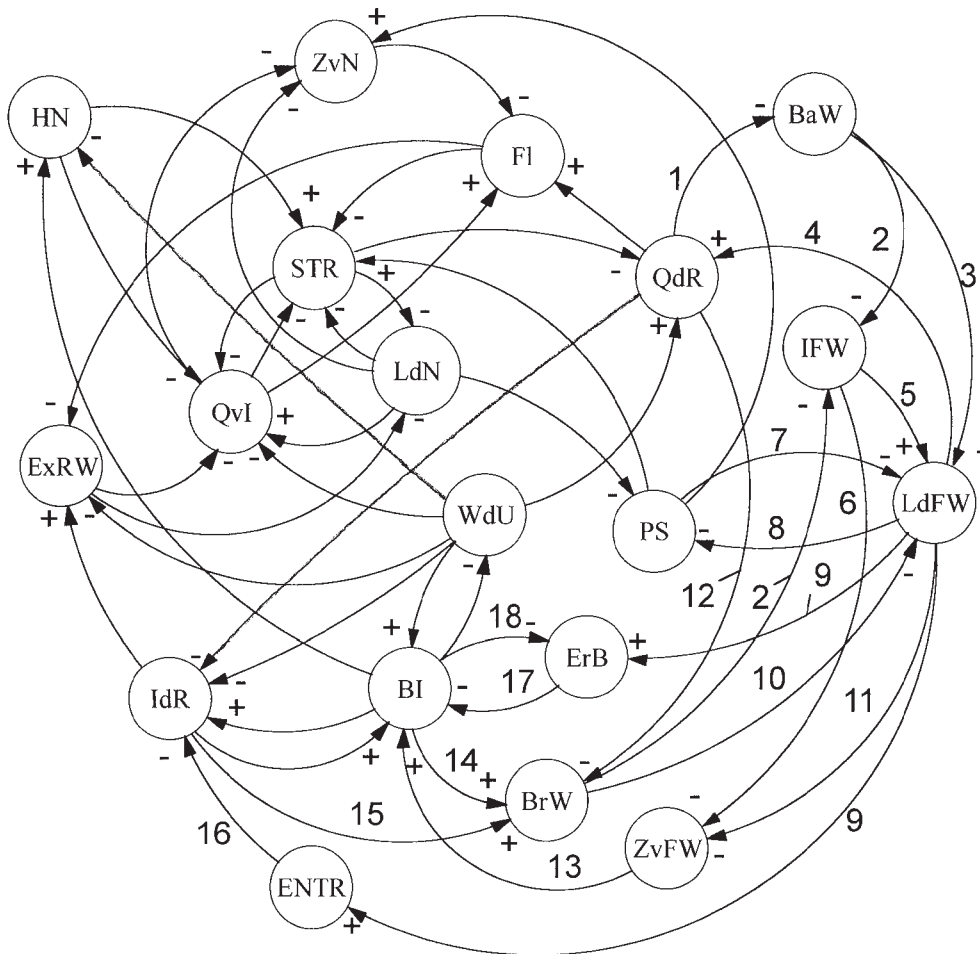


- | | | | |
|---|---------------------------|----|--|
| 1 | Kenntnis der Rettungswege | 9 | Staudruck |
| 2 | Ausweglosigkeit | 10 | Durchströmung |
| 3 | Verfügbarkeit, Kapazität | 11 | Schottung |
| 4 | Rückzug möglich | 12 | Brandwirkungen (Geräusche, abtropfende Materialien, Druckunterschiede, etc.) |
| 5 | Fluchtgeschwindigkeit | 13 | Insbesondere Brennbarkeit |
| 6 | Intoxination, Verletzung | 14 | Fehlinterpretation |
| 7 | Sehen verletzter Personen | 15 | Unbekannte Ereignisse |
| 8 | Retten anderer | 16 | Informationsverarbeitung |

Abb. 5.13. Wirkungsgefüge Phase 4

PHASE 5: Flucht und Feuerwehreinsatz

Rettung, Entrauchung und direkte Brandbekämpfung durch den Löscheinsatz werden in dieser Phase gemeinsam betrachtet, obgleich auch hier im konkreten Fall situationsbedingt eine zeitliche Staffelung erfolgt. Dies kann im Bereich der Simulation (Kap. 6) berücksichtigt werden. Die Arbeit der Feuerwehr wird durch die brandbedingten Einwirkungen, die verletzten Personen und die Zugänglichkeit zum Bauwerk beeinflusst.



- | | | | |
|---|-------------------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Fluchtweg = Zugang für FW | 10 | Erforderl. Schutzausrüstung |
| 2 | Schwierige Informationssuche | 11 | Bsp.: Aufgabenverteilung |
| 3 | Notwendige Aufbruchaktionen | 12 | Brennbare Stoffe, Schottung |
| 4 | 2.RW über FW-Leiter | 13 | Zeit für Brandentwicklung |
| 5 | Inf. Grundlage für zielger. Handeln | 14 | Flash-Back, Flash-Over |
| 6 | Zeitintensive Inf.-suche | 15 | Rauch |
| 7 | Zu rettende Personen | 16 | Rauchabführung |
| 8 | Reanimation, Erstversorgung | 17 | Löscherfolg |
| 9 | Adäquanz v. Mensch u. Material | 18 | Adäquate Mittel |

Abb. 5.14. Wirkungsgefüge Phase 5

5.8 Behandlung konkreter Fragestellungen

5.8.1 Vorbemerkung

Konkrete Fragen sollen sich aus dem aufgebauten Modell hinreichend genau deduzieren und behandeln lassen. Um die prinzipiellen Möglichkeiten dafür aufzuzeigen, seien im folgenden zwei aktuelle Fragestellungen exemplarisch untersucht. Die erste betrifft die zu erwartenden Auswirkungen bei der Nutzung eines rechnergestützten Informationssystems (vgl.S.78), die zweite behandelt eine Problemstellung im Zusammenhang mit der Verwendung einer Anlage zur Rauchabführung in Tiefgaragen (vgl. S.42).

Anders als in den methodischen Vorgaben des SM werden zur Behandlung konkreter Fragestellungen hier keine Teilszenarien gebildet, da einerseits die Anzahl der Variablen nicht übermäßig groß ist und zum zweiten nahezu alle Variablen eine für das Systemverhalten relevante Rolle in den betrachteten Problemfeldern spielen. Für die Analyse der Wirkungsgefüge wird eine Methodik des Programms „VENSIM“ [V06] verwendet, die es erlaubt, aus einem Wirkungsgefüge „Wirkungsbäume“ zu entwickeln.

5.8.2 Fragestellung „Informationssystem“

5.8.2.1 Problemformulierung

Die „Qualität verfügbarer Informationen“ hatte sich im Rahmen der Rollenverteilung (S. 78) als kritische Variable herausgestellt. Dort wurde die Vermutung geäußert, eine Verbesserung dieser Größe könne geeignet sein, Entwicklungen in Gang zu setzen und zu beschleunigen, die sich dadurch selbstverstärkend in risikomindernder Hinsicht entwickeln.

Qualitativ hochwertige Informationen müssen angepaßt an die jeweilige Situation, verständlich und vertrauenswürdig sein. Die zivilisatorische Entfremdung von Feuer, neue Bauwerkstrukturen und neue Bau-, Ausbau- und Einrichtungsmaterialien haben dazu geführt, daß Brandkenngrößen häufig nicht mehr ohne weiteres von Nutzern in ihrer realen Bedeutung richtig eingeschätzt werden können. Für moderne Bauwerke fehlt deshalb ein rechnergestütztes intelligentes Informationssystem, das es gestattet, diese Größen zu messen, zu interpretieren und über interne Entscheidungsverfahren eine situationsangepaßte Informationsausgabe, etwa als Evakuierungsleitsystem, zu liefern [K03].

5.8.2.2 Wirkungsbaum „Qualität verfügbarer Informationen“

Die Möglichkeiten eines derartigen Informationssystems ergeben sich aus der folgenden Darstellung. Sie zeigt den Wirkungsbaum der Variablen „Qualität verfügbarer Informationen“ für die Phase 5: „Flucht und Feuerwehreinsatz“. An den Positionen, an denen eine Variable wiederholt wird, die bereits auf einer höheren Ebene vorhanden ist, wird der jeweilige Pfad abgebrochen. Die eingefügten alpha-numerischen Zeichen dienen der Identifikation der Wirkungsverläufe bei den verbalen Ausführungen.

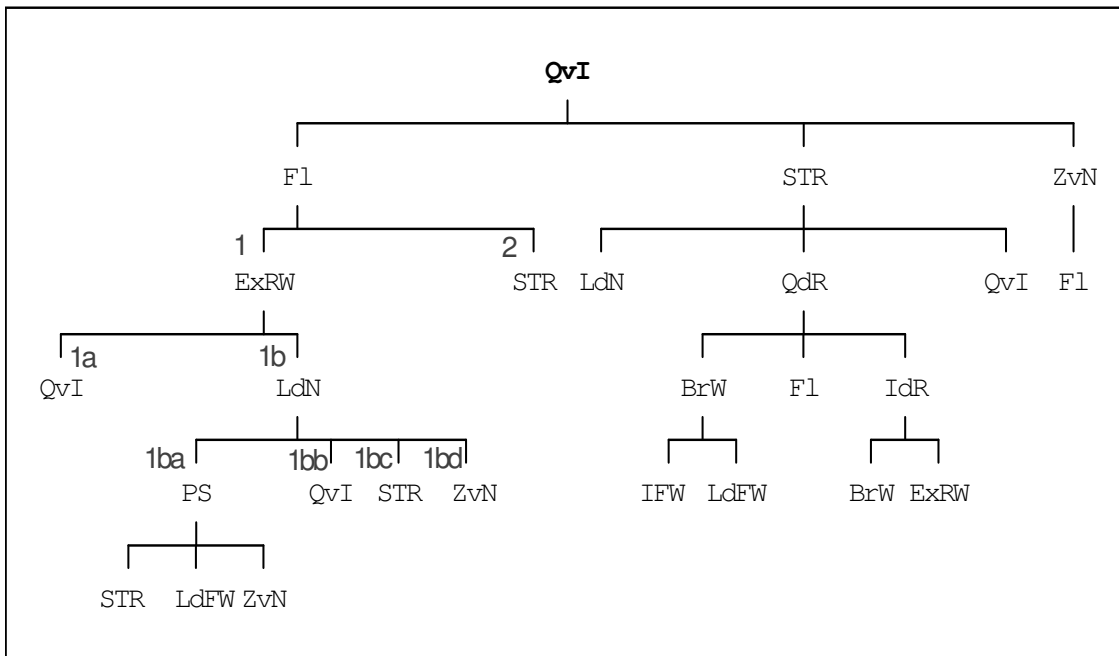


Abb. 5.15: Wirkungsbaum der Variablen „Qualität verfügbarer Informationen“ für die Phase 5: Flucht und Feuerwehreinsatz

Im Vergleich zu einem Brandverlauf ohne Einsatz eines qualitativ hochwertigen Informationssystems führt die Steigerung der Qualität der verfügbaren Informationen (QvI) auf der ersten Ebene zu verringertem Streß (STR) wegen der Eindeutigkeit der angebotenen Informationen zu geringeren Zeitverzögerungen (ZvN) durch die nicht notwendige Informationssuche und zu verbesserten Fluchtchancen (Fl) aufgrund der besseren Kenntnis verfügbarer Wege.

Die weiteren Erläuterungen erfolgen exemplarisch für den linken Ast der Abb. 5.15.

1) Verringerung der Rauch- und Wärmebelastung der Personen durch Nutzung sicherer Bereiche;

1a) daraus folgt ein vergleichsweise günstigeres Informationsangebot (Bsp.: Sichtweite) sowie

1b) ein geringerer Leistungsabbau in körperlicher Hinsicht.

1ba) Es treten geringere Personenschäden auf, mit der Folge, daß

- wegen der weniger starken Verletzungen anderer Personen der Streß weniger stark steigt,
- die Leistungsfähigkeit der Feuerwehr nicht so stark durch notwendige Rettungsaktionen gemindert wird und
- die für den Nutzer aus dem Mitführen verletzter anderer Personen resultierenden Zeitverzögerungen abnehmen.

1bb) Die Möglichkeiten weiterer Informationssuche verbessern sich.

1bc) Aus dem Erhalt der eigenen Leistungsfähigkeit ergibt sich eine verringerte Streßbelastung.

1bd) Die Zeitverzögerung nimmt wegen der höheren individuellen Bewegungsgeschwindigkeit nicht so stark zu wie in einem Brandfall ohne Einsatz eines Informationssystem.

2) Verringerung der Streßbelastung aufgrund der vergleichweisen Minderung des Empfindens einer ausweglosen Situation.

Eine derartige Auswertung des mittleren Astes der zweiten Ebene (STR) führt auf die Steigerung der „Leistungsfähigkeit der Nutzer“ aufgrund verbesserter psychischer Randbedingungen und in deren Folge beispielsweise auf eine verbesserte Informationsverarbeitung, nicht notwendige Rettung „verwirrter“ Personen, geringere Kapazitätssenkung der Rettungswege aufgrund weniger „hysterischer“ Personen mit der Folge der besseren Zugänglichkeit für die Feuerwehr und vielen anderen Zusammenhängen, die ohne eine derartige Analyse argumentativ nur unvollständig zur Verfügung stehen würden.

Für die Variable „Qualität verfügbarer Informationen“ konnte damit exemplarisch gezeigt werden, daß ihre Verbesserung zu einer Reihe von sich gegenseitig begünstigenden, risikomindernden Entwicklungen führt.

5.8.2.3 Abschließende Bemerkung

Die Behandlung der Fragestellung sollte hier vorrangig den Nutzen der Methode des SM darstellen. Eine genauere Untersuchung würde bedingen, daß alle von einem rechnergestützten Informationssystem zu erwartenden Einflüsse einbezogen werden. So könnte beispielsweise der geplante Einbau eines Informationssystems kompensatorisch den Dispens von bauaufsichtlichen Anforderungen ermöglichen. Größere Brandabschnittsflächen oder längere Rettungswege könnten die Folge sein. Für eine Beurteilung der Auswirkungen einer derartigen Neuerung müßte also gleichzeitig zur Verbesserung der Variablen „Qualität verfügbarer Informationen“ von einer Verschlechterung der Variablen „Widerstandsfähige Umfassungsbauteile“ oder der „Qualität der Rettungswege“ ausgegangen werden.

Für die Beobachtung der Wirkung mehrerer sich gleichzeitig verändernder Variablen bietet das SM die im Kapitel 6 dargestellte Möglichkeit der Simulation an.

5.8.3 Fragestellung „Entrauchung von Tiefgaragen“

5.8.3.1 Problemformulierung

Die Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen (GarVO) des Landes Nordrhein-Westfalen [G06] schreibt im §11 für Tiefgaragen vor, daß Rauchabschnitte (RA) nur bis zu einer Größe von 2500 m² ausgebildet werden dürfen, wenn nicht eine automatische Löschanlage vorgesehen wird. Die RA-Bildung hat dabei mit Wänden der Feuerwiderstandsklasse F30 [D07, Abschnitt 5.2] zu geschehen. Diese Wände führen im Brandfall zu einer Dämpfung der Brandentwicklung über den Brandort hinaus, obgleich der Verschluß der Fahrwege lediglich mit „dichtschießenden“ Türen, also ohne Anforderungen an deren thermische Widerstandsfähigkeit, erfolgt. Der Schließvorgang ist durch automatische Rauchdetektion auszulösen. Eine Rauchabzugsanlage wird nicht gefordert, lediglich Lüftungsanlagen für das CO-Management sind zwingend vorgeschrieben.

Diese Anforderungen führen zu einer kleinzelligen Bauweise, die aus betrieblichen, gestalterischen und Sicherheitsgründen häufig nicht befriedigen kann. Gewünscht werden vielmehr Parkhäuser, die einladend, übersichtlich, hell und gut belüftet sind. Der Einbau einer mechanischen Anlage zur Rauchabführung¹ könnte hier äußerst hilfreich sein, wenn daraus resultierend die vorgenannten bauaufsichtlichen Restriktionen gemildert werden können.

Eine Entrauchungsanlage auf der technischen Grundlage des Verfahrens der Tunnelventilation² kann eine ausreichende Rauchabführung gewährleisten. Im Gegensatz zu herkömmlichen maschinellen Rauchabzügen, bei denen der zwischen Absaugstelle und Zuluftöffnung erzeugte Unterdruck im Raum maßgebend für die abgeführte Rauchmasse ist, wird beim Tunnellüftungssystem der Luftstrom durch im Raum angeordnete Ventilatoren unterstützt und gelenkt. Durch die Leistungsfähigkeit der Anlage ist sichergestellt, daß selbst im entwickelten Brand nur begrenzte Bereiche verrauchen können. Die Anlage wird im Normalbetrieb zur CO-Regulierung eingesetzt und die Luftströmung wird in diesem Fall räumlich ebenso gerichtet wie im Falle eines Brandes zur Rauchabführung. Damit ist gewährleistet, daß bei der Aktivierung der Entrauchungsstufe der Anlage prinzipiell dieselben Strömungsverhältnisse im Brandraum erhalten bleiben wie im Normalbetrieb, lediglich die abgeführten Volumina werden geändert. Die Detektion brandbedingter CO-Produkte kann ggf. bereits vor einer Rauchdetektion zu einer Erhöhung des abgeführten Luftstroms führen, da auch beim CO-Management verschiedene Leistungsstufen vorgesehen sind.

Zur Erkennung des Brandfalles und Aktivierung der Entrauchungskapazitäten wird eine flächendeckende, automatische Brandmeldeanlage auf der Basis von Rauchmeldern verwendet, die ansonsten in Tiefgaragen mit RA-Bildung nicht vorgeschrieben ist. Die maximal zulässigen Rettungsweglängen bleiben auch bei Fortfall der baulichen RA-Bildung erhalten.

Untersucht werden soll im folgenden die Fragestellung, welche Kopplungen zugelassen oder aufgelöst werden, wenn die RA-Bildung entfällt und statt dessen eine Entrauchungsanlage mit vorgenannten Eigenschaften installiert wird und welche Auswirkungen auf die Risikosituation zu erwarten sind.

¹ Der Begriff „Rauch“ wird synonym für „Rauchgas“ verwendet.

² Eine derartige Anlage wurde in den Niederlanden eingesetzt [P04].

5.8.3.2 Wirkungsbaumanalyse

5.8.3.2.1 Vorbemerkung

Die Anwendbarkeit der Variablen auf die Nutzungsart „Tiefgarage“ ist gegeben, obgleich im Kapitel 5.2 zunächst als Untersuchungsgegenstand ein Gebäude normaler Art und Nutzung vorgegeben wurde. Eine Kontrolle der Variablen ergab jedoch keinen Hinweis auf prinzipielle Schwierigkeiten.

Auch für diese Fragestellung wird die Auswertung von „Wirkungsbäumen“ durchgeführt. Hauptvariablen beim Einsatz der Entrauchungsanlage sind die „Intensität der Rauchausbreitung“ (IdR) und „Widerstandsfähige Umfassungsbauteile“ (WdU), da die RA-Bildung durch das technische System entfallen soll.

Wie bereits ausgeführt, verändert die geplante maschinelle Anlage zur Rauchabführung im Verlaufe eines Brandes lediglich die abgeführten Luftvolumenströme, arbeitet ansonsten jedoch gleichförmig, so daß die Betrachtung der Variablen „Intensität der Rauchausbreitung“ wegen der fehlenden Strukturänderungen lediglich für das Wirkungsgefüge der Phase 5 (vgl. S. 86) erfolgt.

Die Wirkung nicht stattfindender Rauchabführung im Rauchabschnitt von 2500 m² Größe wird anhand der Variablen „Widerstandsfähige Umfassungsbauteile“ für die herkömmliche Bauweise nach GarVO untersucht. Dabei haben die Umfassungsbauteile sich im Brandverlauf ändernde Wirkungen, so daß Untersuchungen für die unterschiedlichen Brandverlaufphasen durchgeführt werden müssen.

Wie weiter unten gezeigt wird, trägt die Verwendung der hier untersuchten Anlage durch die Gleichförmigkeit ihrer Arbeitsweise über den gesamten Brandverlauf und durch den Fortfall der baulichen RA-Bildung zur risikomindernden Entkopplung einiger im Normalfall vernetzter Größen bei. Erhöhte Anforderungen, sind jedoch an die brandschutztechnische Auslegung der Anlagenteile (Redundanz), die Möglichkeit der neben der automatischen Steuerung zusätzlichen manuellen Inbetriebnahme und die Anlagenwartung zu stellen. Begünstigt wird der Aspekt der Betriebssicherheit durch den auch im Normalbetrieb (CO-Management) erkennbaren Ausfall von Anlagenteilen.

5.8.3.2.2 Wirkungsbaum „Intensität der Rauchausbreitung“

Die Grundlage für den Wirkungsbaum ist das Wirkungsgefüge für Phase 5.

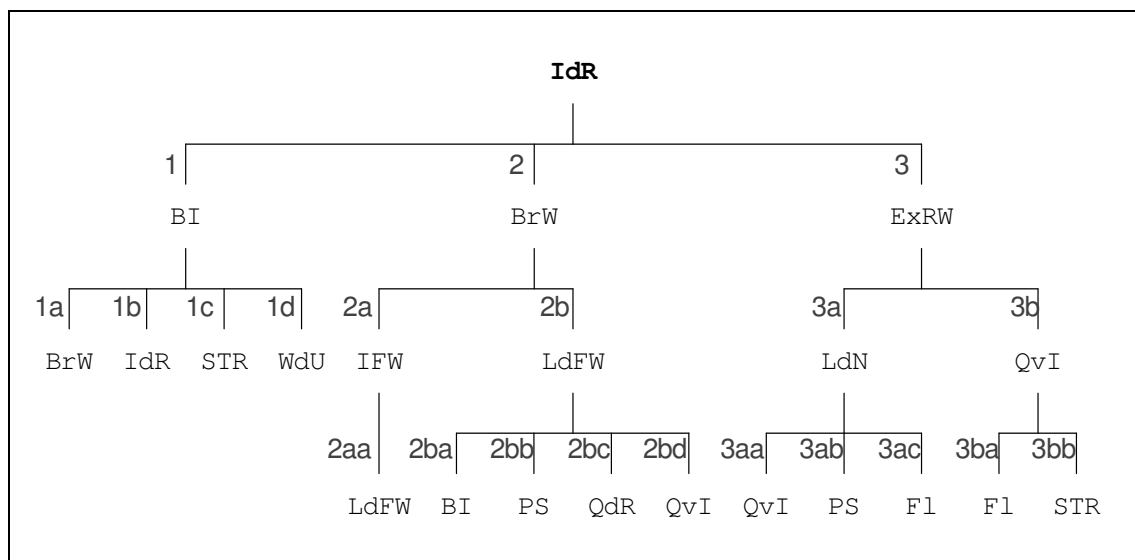


Abb. 5.16: Wirkungsbaum der Variablen „Intensität der Rauchausbreitung“ für die Phase 5: Flucht und Feuerwehreinsatz

Für den Einsatz des Entrauchungssystems ergeben sich vergleichend zur alten Regelung der Rauchabschnittsbildung nach GarVO folgende Wirkungsverläufe:

1) Geringere Brandintensität durch Abnahme des brandfernen Zündens unverbrannter Pyrolysegase und Senkung der Temperaturen im Brandraum durch konvektive Wärmeabfuhr.

1a) Senkung des brandbedingten Widerstandes im Zugangsbereich zum Bauwerk gegen das Vorrücken der FW.

1b) Verringerung des weiteren Freisetzens von Pyrolysegasen durch aufgeheizte Brandlasten.

1c) Geringerer Streß bei den Nutzern durch Vermeidung hoher Temperaturen.

1d) Bestandserhalt der Bauteile und Bauteiloberflächen durch verringerte thermische Beanspruchungen.

2) Abnehmender brandbedingter Widerstand gegen die Arbeit der FW im Gebäude.

- 2a) Verbesserter Informationsstand (Sichtweite, Begehbarkeit).
 - 2aa) Bessere Leistungsfähigkeit aufgrund besserer Informationen.
- 2b) Verbesserung der Leistungsfähigkeit (Bsp.: Atemschutz unnötig).
 - 2ba) Bessere Brandangriffsmöglichkeiten mit der Folge sinkender Brandintensität.
 - 2bb) Verbesserte Möglichkeiten zur Personenrettung.
 - 2bc) Verbesserte Möglichkeiten der Schaffung und Sicherung von Rettungswegen.
 - 2bd) Verbesserte Informationsweitergabe an die Bauwerksnutzer.

3) Abnehmende Exposition der Nutzer durch Rauch/Wärme.

- 3a) Geringere Schwächung der Leistungsfähigkeit der Nutzer.
 - 3aa) Günstige Informationsbeschaffung.
 - 3ab) Geringere Personenschäden.
 - 3ac) Gute Fluchtchancen (Bewegungsgeschwindigkeit).
- 3b) Erhalt des Informationsangebots.
 - 3ba) Gute Fluchtchancen (Kenntnis der Rettungswege).
 - 3bb) Geringere Streßzunahme (Eindeutige Informationslage).

In obiger Analyse wurde wegen des konvektiven Wärmeanteils im abgeführten Rauch von einer durch die Entrauchung vergleichsweise verringerten Brandintensität ausgegangen. Näher zu untersuchen ist - ggf. mit experimentellen oder exakten theoretischen Methoden - die Möglichkeit, daß durch den Strom der zugeführten Luft bei einem PKW-Brand eine Brandausweitung auf benachbarte Fahrzeuge begünstigt wird. Wie im folgenden gezeigt wird, ist für die Entwicklung der Brandintensität bei der herkömmlichen RA-Bildung die Einfassung des Brandraumes durch Wände kritisch. Die Brandweiterleitung durch einen, bedingt durch den zugeführten Luftstrom, abgelenkten Plumekörper, erscheint demgegenüber als zu tolerierendes Risiko.

5.8.3.2.3 Wirkungsbaum „Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile“

Da das Analyseprinzip hinreichend dargestellt wurde, werden im folgenden nur noch die Ergebnisse der untersuchten Wirkungsverläufe für die Variable „Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile“ dargestellt.

Phase 1: Brandentdeckung

Günstig wirkt ein Fortfall der RA-Wände in Bezug auf eine frühzeitige Brandentdeckung und Brandortung auch von einem brandfernen Ort aus. Maßnahmen zur Brandbekämpfung oder Personenevakuierung können dadurch zu einem früheren Zeitpunkt realisiert werden. Für alle nachfolgenden Brandverlaufphasen ist damit die Brandintensität geringer anzusetzen als bei herkömmlicher Bauart entsprechend GarVO. Die notwendigerweise zur Ansteuerung einer Entrauchungsanlage zu installierende Brandfrüherkennungsanlage, die durch die GarVO nicht gefordert wird, wirkt hier in dieselbe risikomindernde Richtung.

Phase 2: Erkennen der Gefahr bis zum Einsetzen wirksamer Handlungen

Die „Exposition durch Rauch und Wärme“ ist im Brandnahbereich - unabhängig von der oben betrachteten Entrauchungsanlage - bei Fortfall der RA-Bildung geringer, da ein größerer Rauchstauraum vorhanden ist. Die Folge ist eine günstige Informationslage (Sichtweite) und der bessere Erhalt der Leistungsfähigkeit der Nutzer, mit der Wirkung, daß die Zeitverzögerungen und der Streß geringer, das Informationsangebot (Rettungswege, Alarmierung der FW, etc.) und die verfügbaren Handlungsalternativen vielfältiger sind. Zeitverzögerungen durch Informationssuche treten kaum auf, so daß eine frühzeitige Alarmierung der FW begünstigt wird und dadurch bedingt alle folgenden Brandverlaufphasen bei im Vergleich geringerer Brandintensität stattfinden.

Vorteilhaft bzgl. der Exposition durch Rauch- und Wärme wirken RA-Wände für außerhalb des Brandraums befindliche Personen. Die als Ersatz für diese Wände vorgesehene Entrauchungsanlage muß zur Gewährleistung eines auch in diesem Punkt mindestens gleichwertigen Sicherheitsniveaus in der Lage sein, auch in dieser frühen Brandphase sichere, weil rauchfreie Zonen, zu gewährleisten.

Phase 3: Lösch- und Entrauchungsversuche

Der Aspekt des manuellen Entrauchens des RA entfällt bei der betrachteten Nutzungsart „Tiefgarage“, da kaum manuell zu aktivierende Rauchabzugs- und Zuluftöffnungen vorhanden sind.

Für außerhalb eines RA befindliche Personen ist die Exposition gering, die allgemeine Situation somit günstig. Sie können jedoch wegen des räumlichen Abstands kaum zur Brandbekämpfung beitragen.

In der Phase der Löschversuche wirkt eine RA-Bildung in mehrfacher Weise ungünstig. Die nicht stattfindende Rauchabführung führt zu einer steigenden Temperatur im RA, wodurch die Exposition durch Rauch und Wärme für Personen, die Löschversuche unternehmen, ansteigt. Dies hat, wie mehrfach gezeigt wurde, sich schnell gegenseitig steigernde, ungünstige Auswirkungen.

Die Informationslage innerhalb des Brandraumes, beispielsweise bezüglich der Lage des Brandortes und der Größe des Brandherdes, ist wegen der Verrauchung schlecht. Darunter leidet die erfolgreiche Brandbekämpfung und die Zeitverzögerungen steigen. Bezüglich der hier betrachteten Brandbekämpfung sind die brandbezogenen Informationen außerhalb des RA ebenfalls gering.

Phase 4 und 5: Flucht und Feuerwehreinsatz

In diesen Phasen stellt sich innerhalb eines RA die Wirkung der Wärmestrahlung von den Umfassungsbauteilen und aus der Rauchsicht auf die Brandlast und damit auf die Brandintensität ein und führt in einer positiven Rückkopplung zu einem immer schnelleren Aufheizen des Brandraumes. Die Geräusche platzender Gläser, Reifen, etc. nehmen zu, ebenso die Intensität der Verrauchung und der Grad der Bauteilschädigungen. Ein Betreten des RA ist nur noch für die mit Schutzanzügen ausgestattete Feuerwehr möglich. Das Anlegen von Schutzanzügen, Atemgeräten und das Vorgehen an Rettungsleinen kostet Zeit. Der zwischenzeitlich weiter anwachsende Brand bedarf deshalb größerer Löschanstrengungen.

Außerhalb des RA kann man solange von günstigen Fluchtbedingungen ausgehen, wie die Bauteile, insbesondere die nach GarVO lediglich als „dichtschließend“ geforderten Türen, den Temperaturen standhalten. Nach Versa-

gen dieser Türen wird jedoch wegen des hohen Brandrauminnendruckes eine schnelle Verrauchung der Rettungswege, mit allen Konsequenzen für die Personenevakuierung und die Feuerwehrzugänglichkeit, stattfinden.

Da der RA mit 2500 m² relativ klein ist und auch wegen der geringen Deckenhöhen über ein geringes Volumen verfügt, kann ein Brand rasch in die ventilationsgesteuerte Phase geraten, mit der Folge, daß die freigesetzten Pyrolysegase nicht vollständig verbrennen können. Die nach dem Versagen der Türen ggf. einsetzende schnelle Ausbreitung überhitzter, zündfähiger Rauchgase in die Rettungswege führt beim Zusammentreffen mit Luft zu einer brandfernen Zündung und damit zu einer starken Brandausweitung.

5.8.3.3 Zusammenfassende Bewertung

Die Bildung von RA in Tiefgaragen führt wegen der unterschiedlichen Wirkung der umfassenden Bauteile in verschiedenen Brandverlaufphasen zu komplexeren Interaktionen als bei der Verwendung einer Entrauchungsanlage. Die Rauchabführung sichert zunächst die Rettungswege und bleibt im weiteren Verlauf eines Brandes durch die Wärmeabführung risikomindernd wirksam.

Der mit der Anwendung dieses besonders leistungsfähigen Entrauchungssystems verbundene Fortfall der RA-Wände begünstigt folgende Punkte:

- Brandentdeckung und die Ortung des Brandherdes;
- Auffinden hilfloser Personen;
- frühzeitige Alarmierung der Feuerwehr und qualitativ hochwertige Informationsweitergabe;
- mögliche Annäherung an den Brandort von der rauchabgewandten Seite;
- Verbreiterung der Fluchtbereiche über die Fahrgassen hinaus;
- guter Informationsstand in allen Brandverlaufphasen;
- Verlangsamung des Aufheizens des Brandraumes (Flash-over);
- Verhinderung brandfernen Zündens überhitzter Pyrolysegase

sowie alle daraus resultierenden Folgeentwicklungen.

Darüberhinaus hat ein Fortfall der RA-Wände den Vorteil der Schaffung übersichtlicher Garagendecks, so daß die Aspekte der Kriminalitätsbekämpfung und des architektonischen Anspruchs zufriedenstellend gelöst werden können. Eine ökologische Bewertung des Systems muß noch erfolgen.

6 SIMULATION

6.1 Vorbemerkung

Die Simulation soll auf ein besseres Verständnis der Systemzusammenhänge führen und nicht als reines Prognoseinstrument mißverstanden werden [V05, SM-05]. Sie baut auf Teilszenarien auf, wobei diese die für spezielle Fragestellungen relevanten Variablen des Gesamtsystems beinhalten. Die Auswahl der Variablen erfolgt unter Beachtung der durch die bisher angewendeten Instrumente erzielten Ergebnisse.

Die bereits im Kapitel 1.2.2 geschilderten Probleme quantitativ-funktional nicht bekannter Kopplungen bedingen den Aufbau des Simulationsmodells auf der Grundlage eher qualitativer Beziehungen. Vester bemerkt dazu in [V05, S.SIM-08]:

„Im allgemeinen herrscht dabei die Meinung vor, ein Simulationsprogramm könne nur mit exakten Daten in ein mathematisches Beziehungssystem gebracht werden. Mit qualitativen, nicht meßbaren Größen sei da nichts anzufangen. Das Gegenteil ist der Fall. Läßt man die (genauso realen) qualitativen Größen aus der Simulation heraus, so wird das Ergebnis mit Sicherheit falsch sein.,,“

6.2 Ähnlichkeiten zum Grundprinzip der „Fuzzy Logic“

Die Variablen werden in der Form der „unscharfen Bereichseinteilungen“ [V05, S.SIM-10] dargestellt und einer numerischen Simulation zugeführt. Diese Bereichseinteilung entspricht der in der Methode der „Fuzzy Logic“ verwendeten Darstellungsform. Die technische Anwendung der „Fuzzy Logic“ verwendet Daten (Merkmalsausprägungen) über die Merkmale eines Systems, die auch für eine quantitativ genaue Entscheidungsfindung auf der Grundlage binärer Logik prinzipiell verwendbar wären. Sie „fuzzyfiziert“ diese jedoch durch die Angabe von Wahrscheinlichkeiten bezüglich der Zugehörigkeit der Merkmalsausprägungen zu unscharfen Mengen, deren verbale Beschreibung mit umgangssprachlich unscharfen Begriffen erfolgt. Die Beziehungen zwischen den Merkmalen werden unter Nutzung dieser unscharfen Mengen und Begrifflichkeiten durch ein Regelsystem hergestellt.

Durch die verbal-unscharfe Beschreibung der Mengen und Verknüpfungsregeln wird eine Anbindung der exakten Steuerung von Abläufen an die nicht-exakte menschliche Methode der Entscheidungsfindung auf der Basis unscharfer Ausgangsdaten ermöglicht. Das Ableiten der Verknüpfungsregeln aus von Personen gesteuerten Abläufen ist möglich [K04, S.255ff].

Die Entscheidungsfindung auf der Basis unscharfer Daten hat deutliche Vorteile in der Steuerungstechnik, wie vielfache Erfolge im technischen Bereich verdeutlichen (vgl. das Beispiel von Vester in [V05, S.SIM-9] oder Kosko in [K04, S.191ff]).

Die Variablen im SM liegen bereits in unscharfer Form vor, da ihnen exakte Merkmalsausprägungen fehlen (vgl. Kap. 4.2.4). Eine „Defuzzifizierung“ und damit die Bildung einer numerischen Entscheidungsgrundlage ist damit nicht möglich und wird auch nicht angestrebt, vielmehr soll untersucht werden, unter welchen Randbedingungen sich das System einer Entwicklung geneigt verhält.

6.3 Teilszenario als Grundlage für die Simulation

6.3.1 Methodische Vorgaben

Nach Vester [V05, S.TS05] geht es in den Teilszenarien darum,

„die Variablen stärker an ihre konkrete Wirkung anzubinden, eventuell spezielle Indikatoren hervorzuheben und diese Wirkung an der Realität zu hinterfragen“.

Die Teilszenarien werden anhand konkreter Fragestellungen in der Form von Wirkungsgefügen dargestellt. Sie sollen in enger Anbindung an die Praxis entwickelt werden, sind ein Teil des Gesamtwirkungsgefüges und brauchen nicht unbedingt dieselben Variablen zu beinhalten; vielmehr können diese erneut aggregiert oder aufgespalten werden. Die enge Anbindung an das Wirkungsgefüge des Gesamtsystems gewährleistet jedoch, daß der Systemzusammenhang gewahrt bleibt und keine isolierten „scheinbaren“ Lösungen gesucht werden.

Zur Steigerung der Realitätsnähe sollen die Kopplungen der Teilszenarien in Frageform den jeweiligen „Repräsentanten der durch das Konzept berührten Zielgruppen“ [V05, S.TS-34] zur Beantwortung vorgelegt werden. Anhand der Ergebnisse dieser Befragungsaktionen werden dann die Beziehungen überarbeitet und wesentliche für die Simulation notwendige Wirkungsverläufe in Form von Tabellenfunktionen aufgestellt.

6.3.2 Das Teilszenario zur Simulation „Brandverlauf“

Abbildung 6.1 zeigt das Teilszenario der Phase 5: „Flucht und Feuerwehreinsatz“. In Abänderung zum Wirkungsgefüge dieser Phase (vgl. S.86) sind einige Größen zusammengefasst worden bzw. entfallen. Der Vorteil der Verringerung der Zahl betrachteter Variablen liegt in der Praktikabilität bei der Simulation. Je nach Fragestellung können jedoch auch neue Variablen auf einfache Weise in das Modell integriert werden.

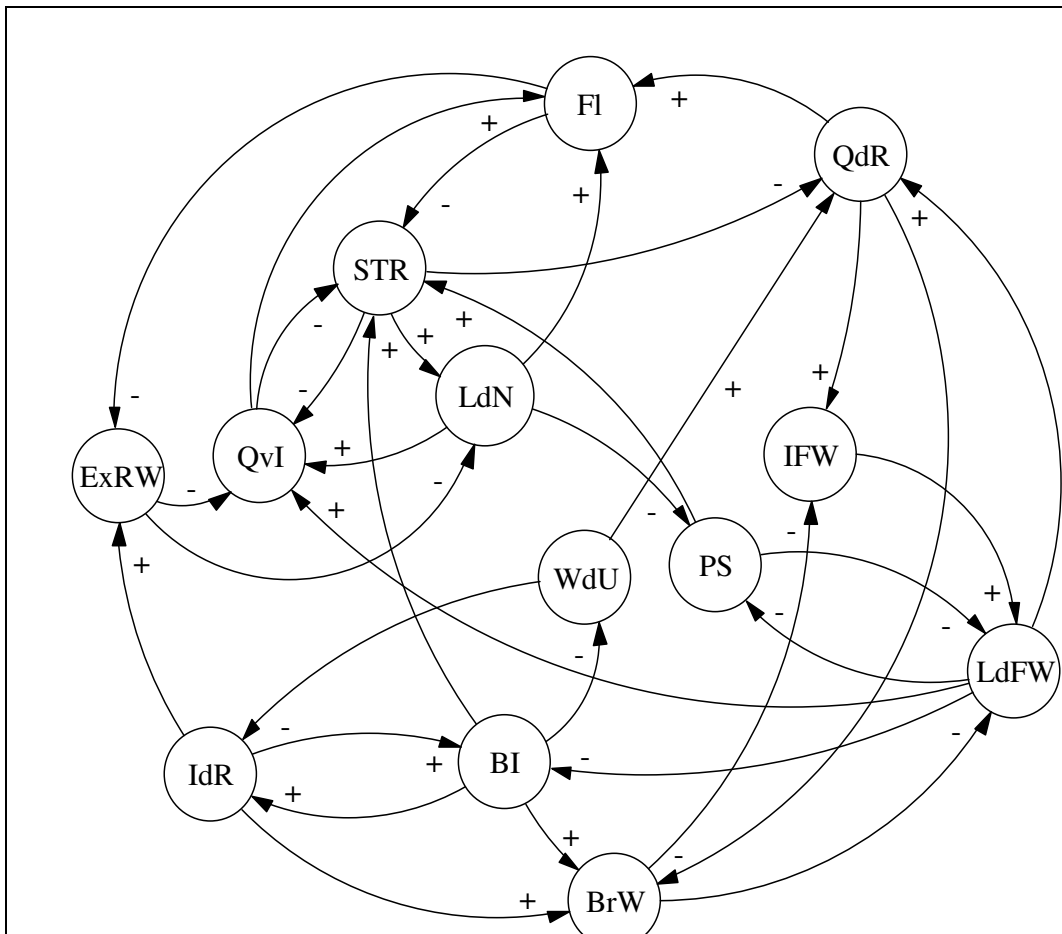


Abb. 6.1: Teilszenario zur Simulation von Phase 5

6.3.3 Wirkung der Variablen „Streß“

Die Untersuchung der Anzahl der Rückkopplungen im Bereich des Teilszenarios der Abb. 6.1 zeigt, daß 100 positiven keine negative Rückkopplung gegenübersteht. Dabei hat die Wirkung der Variablen „Streß“ auf die „Leistungsfähigkeit der Opfer“ und die „Qualität verfügbarer Informationen“ einen außerordentlich hohen Einfluß. Anwachsender Streß wirkt zunächst positiv im Sinne einer Anregung der körperlichen Leistungsfähigkeit und der Aufmerksamkeit gegenüber Informationen. Erst bei Überschreiten eines Grenzwertes kehrt sich diese Beziehung um und eine Minderung vorgenannter Größen setzt ein [L01, S.X.3-3].

Wird diese Umkehrung der Wirkungen im Wirkungsgefüge des Teilszenarios durchgeführt, so ändert sich die Anzahl der Rückkopplungen entsprechend Abbildung 6.2; das System verhält sich stärker gedämpft. Brandschutzordnungen [D08, Abschnitt 4.2.3] beinhalten folglich zu Recht an erster Stelle der Anweisungen für das Verhalten im Brandfall die Angabe „Ruhe bewahren“, da bei ihrer Befolgung der Prozeß des unkontrollierten Aufschaukelns vieler Elemente hinausgezögert werden kann.

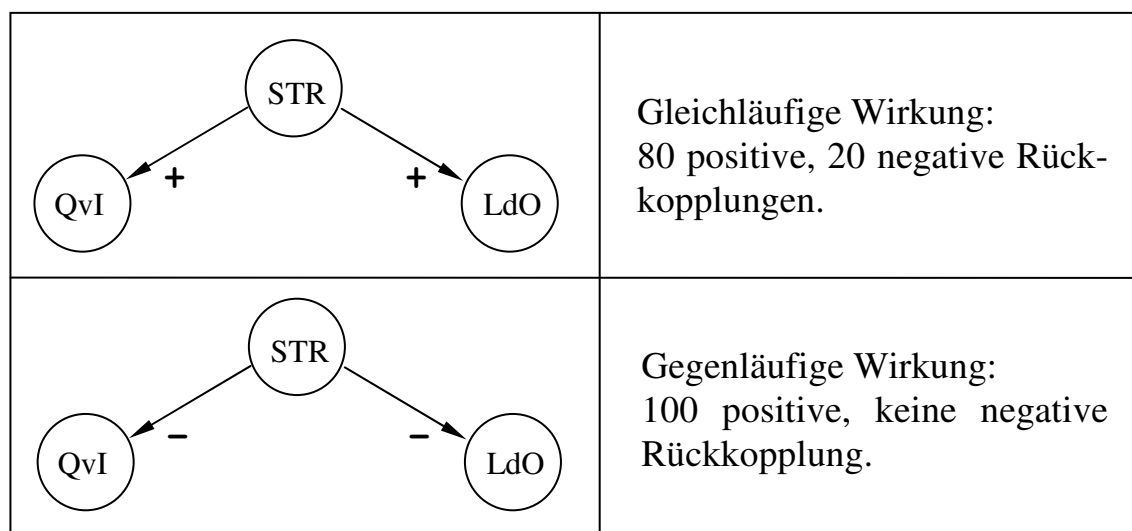


Abb. 6.2: Wirkung der Variablen „Streß“ innerhalb des Teilszenarios nach Abbildung 6.1

6.4 Simulationsmodell

6.4.1 Vorbemerkung

Die Methode des Aufbaus eines Simulationsmodells im Sensitivitätsmodell soll so einfach anwendbar sein, daß eine Veränderung der funktionalen Ausprägung der Kopplungen, eine Veränderung der untersuchten Struktur sowie externe Eingriffe in den Simulationsablauf einfach möglich sind und vielfache „Wenn-Dann-Analysen“ ohne großen Programmieraufwand gestatten.

6.4.2 Bereichseinteilung

Die Bereichseinteilung der untersuchten Variablen geschieht, indem eine Skala von 0-30 Punkten mit den oberen und unteren Grenzwerten versehen, die Zwischenstufen (Klasseneinteilung) beschriftet und der Anfangswert festgelegt werden.

Beispielhaft ist die Skala der Variablen „Exposition durch Rauch und Wärme“ in der folgenden Abbildung wiedergegeben:

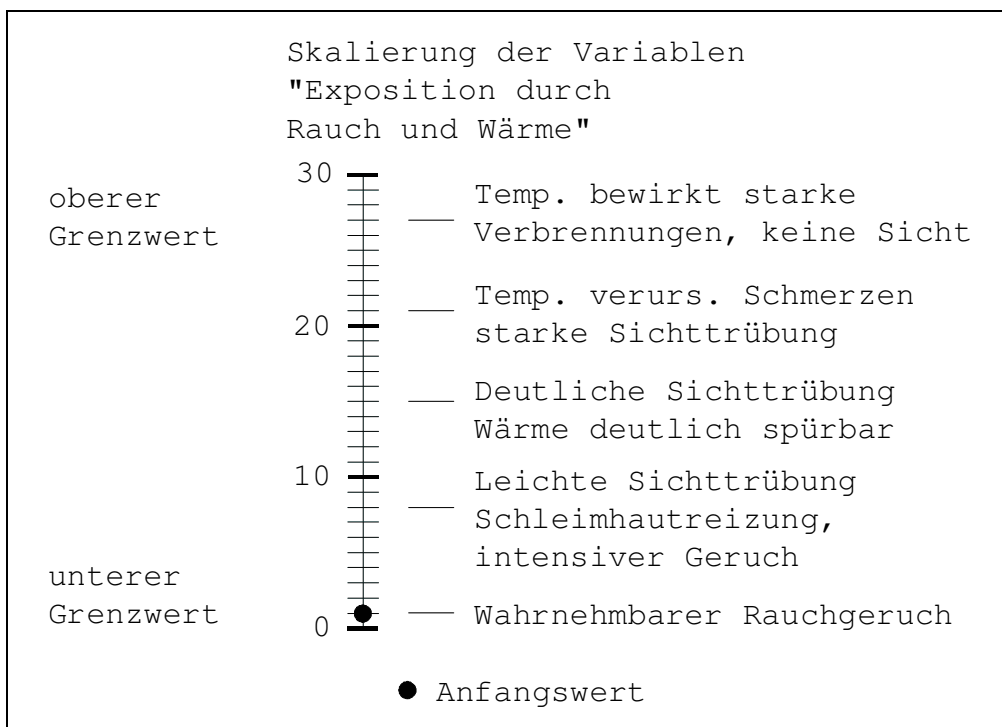


Abb. 6.3: Skalierung der Variablen „Exposition durch Rauch und Wärme“

6.4.3 Tabellenfunktionen zwischen zwei Variablen

6.4.3.1 Vorbemerkung

Im Gegensatz zu Simulationsmodellen auf der Basis numerisch exakter Daten werden die Kopplungen nicht durch funktionale Beziehungen, sondern durch Wirkungseinträge beschrieben. Nicht der Zustand der Variablen A in Abhängigkeit vom Zustand der Variablen B ist von Interesse, sondern die Stärke der Wirkung, die eine Variable A entsprechend ihrem Zustand auf eine Variable B ausübt (vgl. S.111). Die Variablenbeziehungen können aus der Literatur oder aus Experimentgesprächen hergeleitet werden. Ein Beispiel für die Ableitung einer Beziehung aus der Literatur sei im folgenden gegeben.

6.4.3.2 Wirkung von „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf „Leistungsfähigkeit der Nutzer

Für die Wirkung von „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf „Leistungsfähigkeit der Nutzer“ werden zunächst die prägenden Einflußfaktoren exemplarisch dargestellt und veranschaulicht. Anschließend erfolgt eine Umsetzung der gewonnenen Beziehungen in eine für die Simulation im SM nutzbare Tabellenfunktion.

a) Thermische Wirkung:

Die Wirkung der Rauchgase auf die körperliche Leistungsfähigkeit beschreibt Prager [P05, S.86] unter Zusammenfassung einiger Forschungsergebnisse anderer Autoren. Der körperliche Kollaps tritt im Mittel demnach allein durch die thermische Beanspruchung in Abhängigkeit von der Temperatur der Umgebungsluft T [°C] nach einer Zeit t [min] entsprechend der Darstellung in Abbildung 6.4 auf.

$$t = \frac{4,1 \cdot 10^8}{T^{3,61}}$$

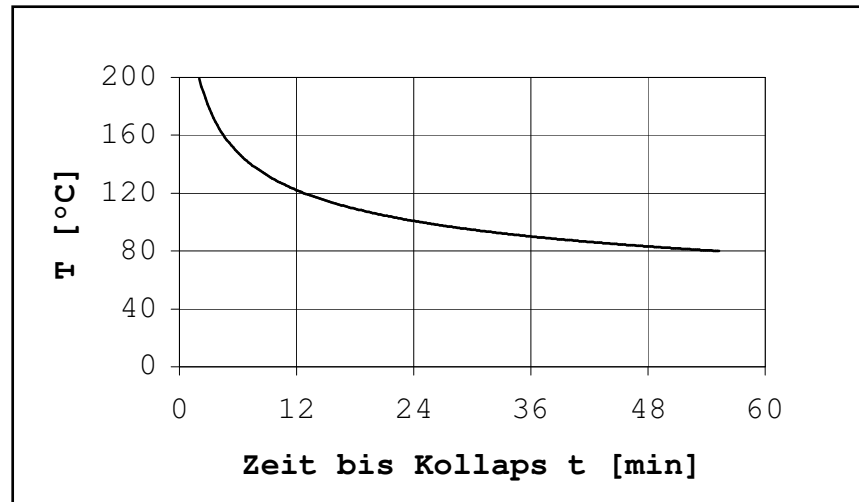


Abb. 6.4: Wirkung der Temperatur auf den menschlichen Organismus

Dabei bleibt der Einfluß der Luftfeuchte jedoch unberücksichtigt. Henriques [H04] beschreibt, daß wassergesättigte Luft bereits bei einer Temperatur von 50°C Verletzungen der inneren Atemwege hervorrufen kann.

Die Strahlungswärme aus der Rauchschiicht trägt ebenfalls stark zur Erhöhung der Temperatur bei. Die Wirkung unterschiedlicher Strahlungswärmeeinträge q [kW/m²] auf den menschlichen Organismus kann nach Drysdale [D01, S.67] wie folgt angegeben werden:

Strahlung q kW/m ²	Wirkung
0,7	Sommersonnenschein in UK
6,4	Schmerz nach 8 s Expositionsdauer
10,4	Schmerz nach 3 s Expositionsdauer
16,0	Blasenbildung auf der Haut nach 5 s

Zum Vergleich: Für planparallele Anordnung und einem Emissionsgrad von 0,9 für Strahler (Rauchschiicht) und Absorber (Person) kann für eine in 1 m über Kopf befindliche Rauchgasschiicht bei einer Temperatur T von einem Strahlungswärmeeintrag q entsprechend Abbildung 6.5 ausgegangen werden¹.

¹ vgl. Berechnungsmethode in [B06], S.48.

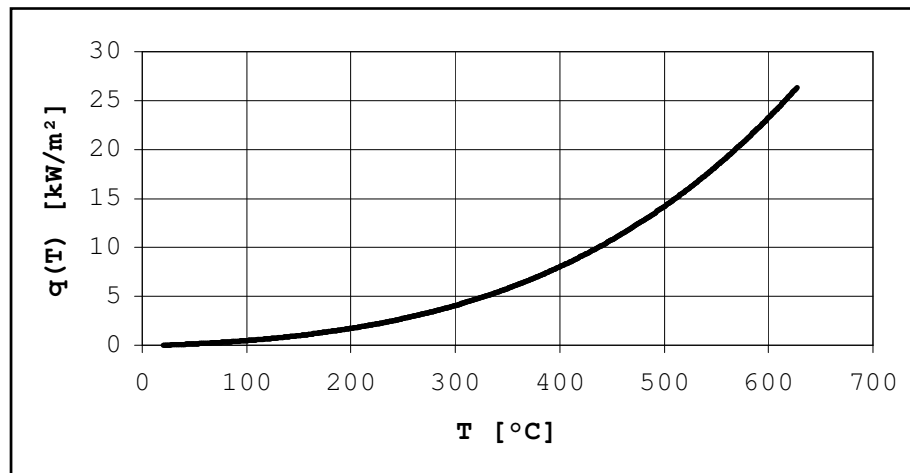


Abb. 6.5: Zusammenhang zwischen Rauchttemperatur und Strahlungswärmeeintrag

b) Sauerstoffdefizit

Die Wirkung des Sauerstoffdefizits gibt Prager [P05, S.87] wie folgt an:

Sauerstoffanteil in der Atemluft [%]	Auswirkungen
20	normal
ca. 17	Muskelkoordination beeinträchtigt, klares Denken fällt schwerer
12-15	Kurzatmigkeit, Kopfschmerzen, schnelle Ermüdung bei Überanstrengung
10-12	Übelkeit, Erbrechen, Anstrengung nicht möglich
6-8	Kollaps, Bewußtlosigkeit
< 6	Tod innerhalb von 6-8 min.

Damit läßt sich etwa folgende Beziehung entwickeln:

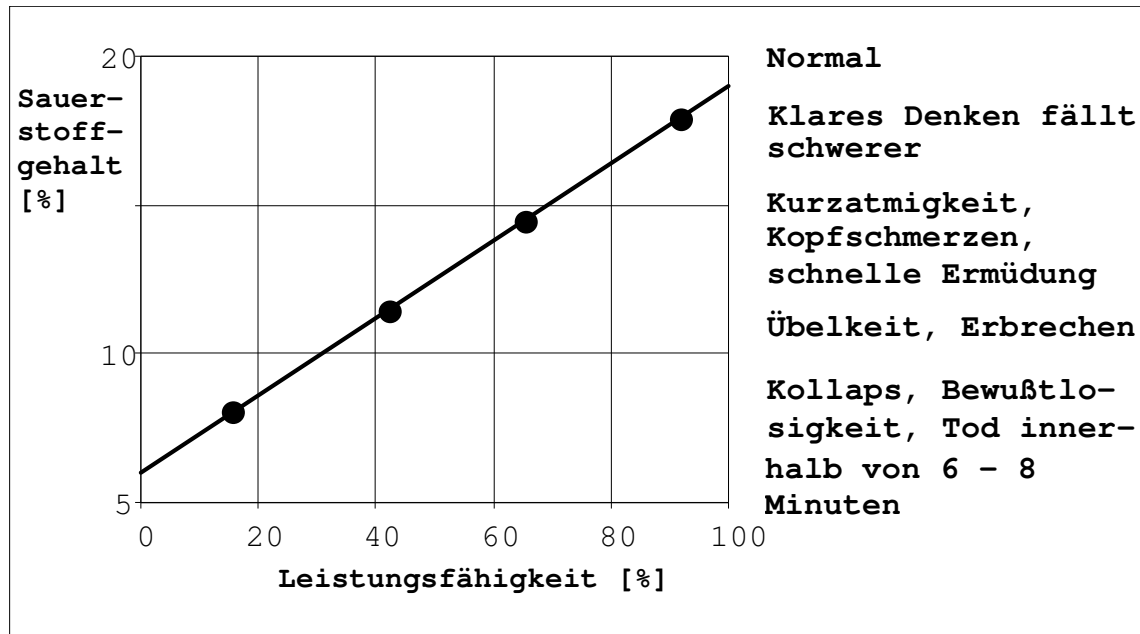


Abb. 6.6: Wirkung des Sauerstoffmangels auf den menschlichen Organismus

Bei thermisch aktivem Rauch bleibt der Sauerstoffanteil in der unterhalb einer Rauchgasschicht liegenden Zone, eigenen Berechnungsergebnissen¹ entsprechend, in den meisten Fällen im Bereich von 18-21 %, so daß, solange eine klare Grenzschicht deutlich über Kopfhöhe liegt, zunächst nicht von einer starken Sauerstoffunterversorgung involvierter Personen ausgegangen werden muß. Ebenfalls aus den Erfahrungen mit Simulationsergebnissen läßt sich angeben, daß die Ver Rauchung des unterhalb der Grenzschicht liegenden Bereichs meist deutlich spürbar ist, der Einfluß toxischer Gase hier also für die Wirkung auf die Leistungsfähigkeit eher maßgebend wird als eine Sauerstoffunterversorgung.

¹ Die Berechnungen wurden unter Verwendung eines Zonenmodells [A02] durchgeführt.

c) CO₂-Einfluß

Der Einfluß erhöhten CO₂-Anteils am Luftvolumen liegt vor allem in der dadurch bewirkten erhöhten Respiration und damit verbunden einer erhöhten Aufnahme toxischer Gase, wie das Kohlenmonoxid CO [P05, S.88].

d) CO-Einfluß

CO nimmt nach Untersuchungen von Rauchgasen realer Brände eine dominierende Stellung unter den Rauchgaskomponenten ein, so daß es hier gesondert betrachtet wird.

Die Wirkungsweise von CO beruht auf seiner im Vergleich zum Sauerstoff stärkeren Affinität zum Hämoglobin des Blutes. Damit setzt ein innerer Erstickungsvorgang ein, der vom Körper nicht durch eine höhere Atemfrequenz, wie sie beim Sauerstoffmangel auftritt, erwidert wird. Die Reaktionsgleichung $O_2Hb + CO = COHb + O_2$ verdeutlicht den Wirkungsmechanismus. Die CO-Absorption nimmt bei „lebhaftem“ Stoffwechsel zu, so daß jüngere Individuen verstärkt bedroht sind.

Hosser/Dobbernack [H05, S.21] geben das auf der Folgeseite dargestellte Diagramm an. Es zeigt die Relation zwischen CO-Anteil in der Atemluft, Expositionsdauer, CO-Hb-Bildung und Wirkung auf den Menschen bei körperlicher Anstrengung. Die im ursprünglichen Diagramm nicht enthaltenen gestrichelten Linien und die zugehörigen Werte kennzeichnen hier das Produkt aus Expositionsdauer (EXD [min]) und CO-Anteil in der Atemluft (CO [ppm]) .

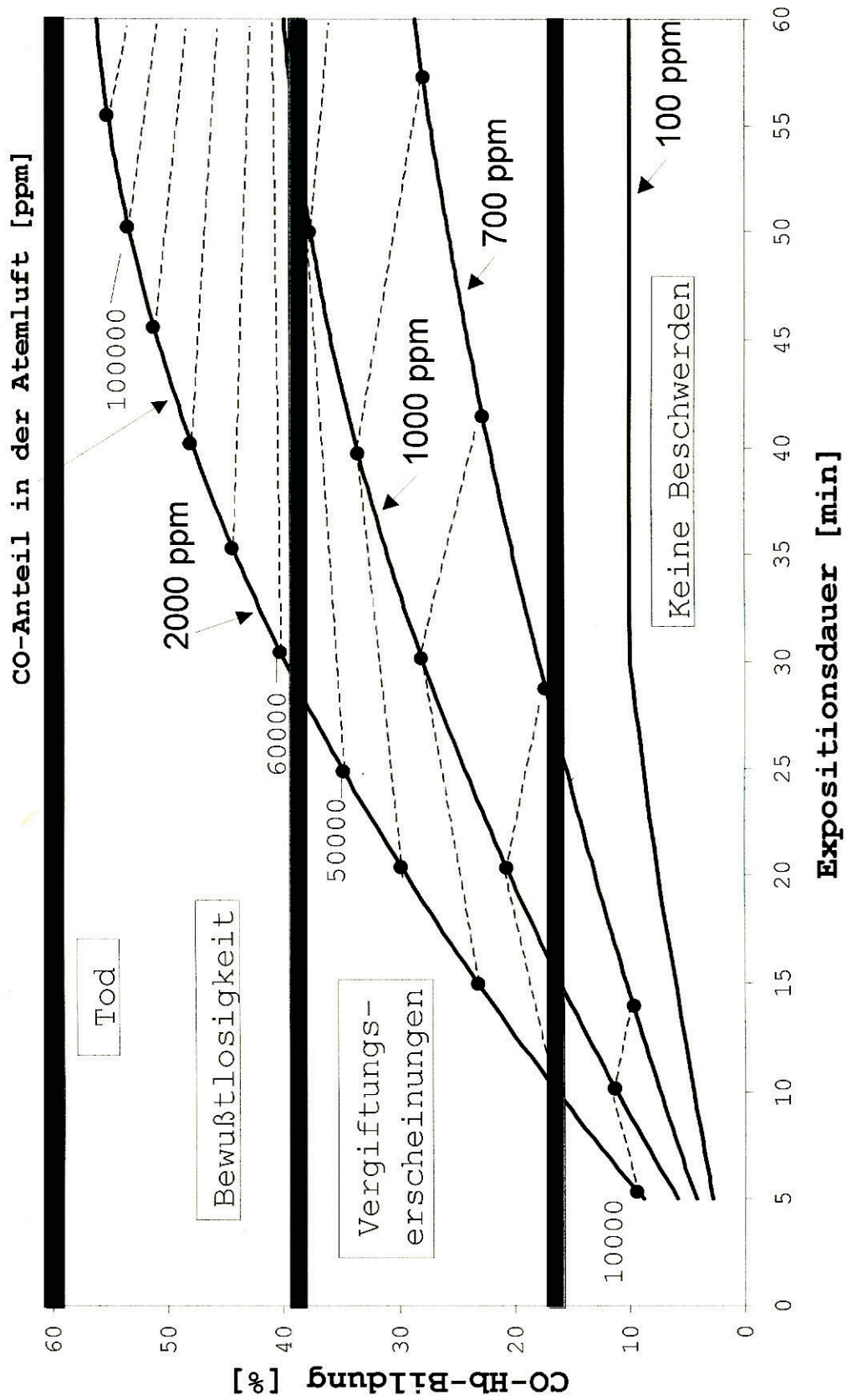


Abb. 6.7: Wirkung des Kohlenmonoxids auf den menschlichen Organismus

Damit läßt sich etwa folgender Einfluß der CO-Immission und der Expositionsdauer auf die Leistungsfähigkeit begründen.

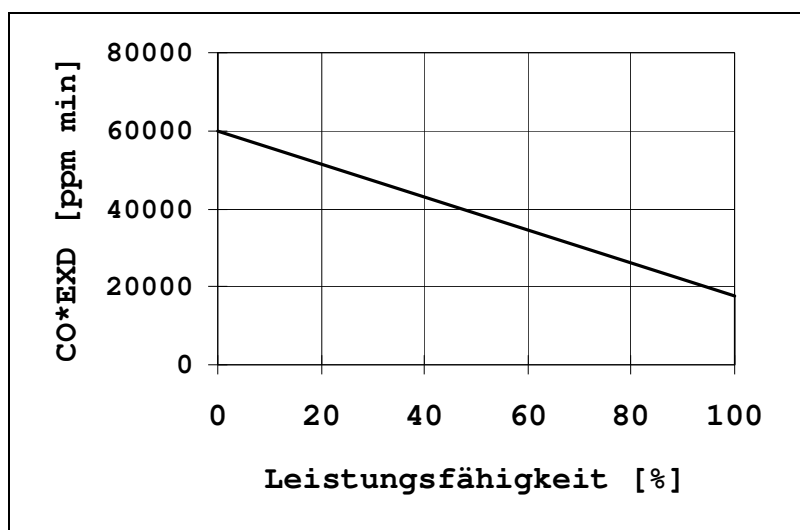


Abb. 6.8: Wirkung der CO -Exposition auf die Leistungsfähigkeit

Sichtweite

Die Leistungsfähigkeit von im Rauch befindlichen Personen wird in Bezug auf ihr Fluchtvermögen weiterhin dadurch reduziert, daß die Sichtweite abnimmt und daraus eine Verringerung der Fluchtgeschwindigkeit resultiert. Den Zusammenhang zwischen Fluchtgeschwindigkeit und Rauchdichte hat Jin [J01] aufgestellt. Die Abbildung zeigt seine Ergebnisse für nur die Sicht behindernden (1) und zusätzlich für die Schleimhäute reizenden (2) Rauch.

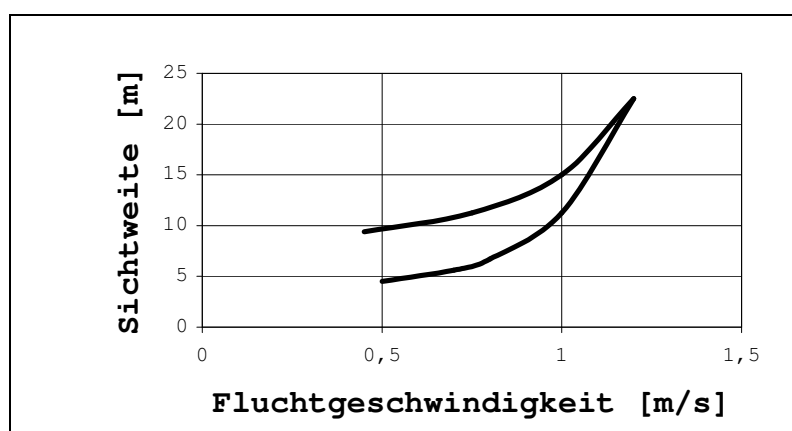


Abb. 6.9: Fluchtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Sichtweite

Die wesentlichen Einflüsse der Wirkungsbeziehung stellt damit die folgende Abbildung dar:

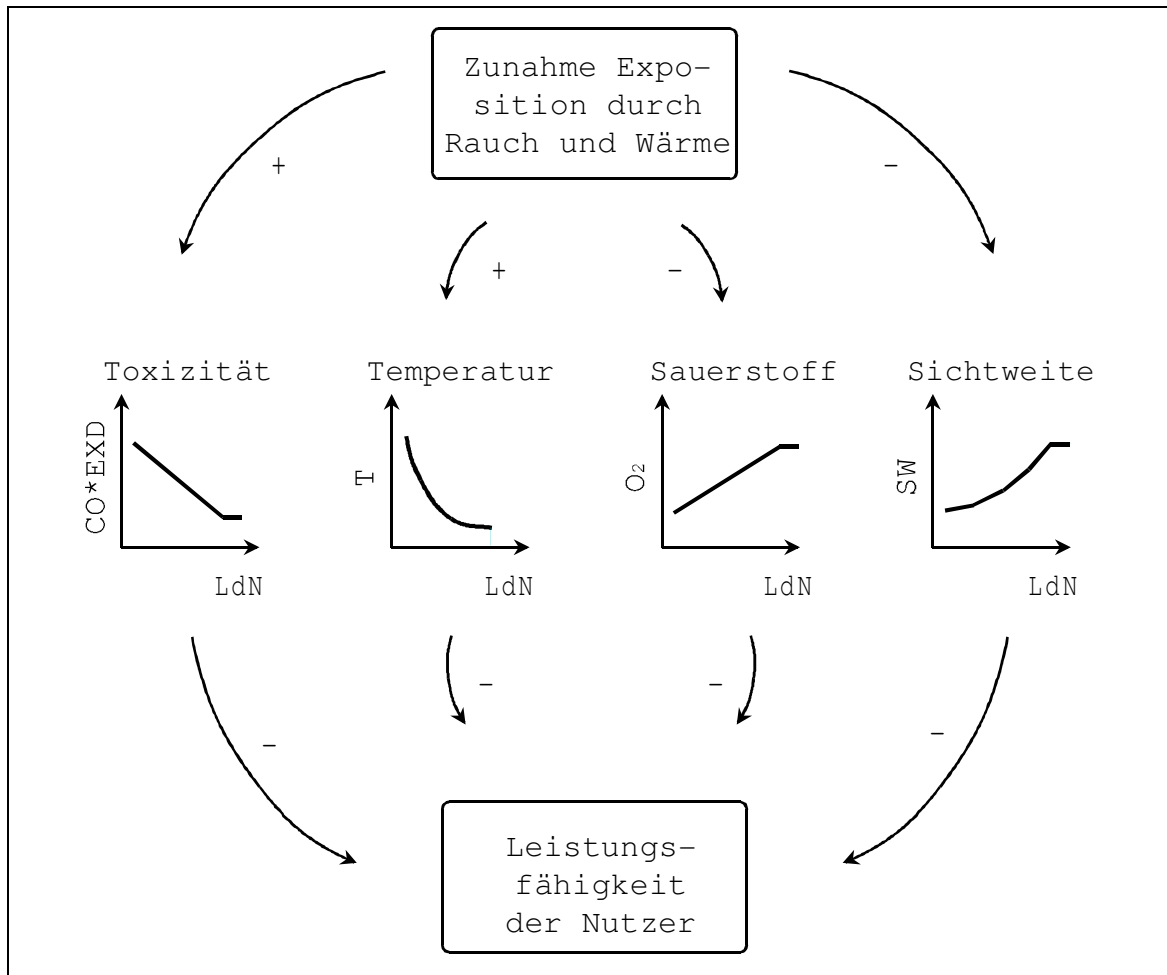


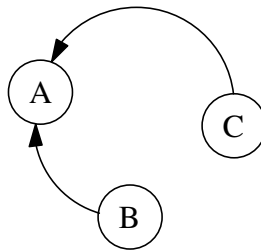
Abb. 6.10: Qualitative Wirkung von „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf „Leistungsfähigkeit der Nutzer“

Die Wirkung von „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf „Leistungsfähigkeit der Nutzer“ kann aufgrund der oben dargestellten vielfältigen Einflüsse als deutlich überproportional angesetzt werden. Hier spielt vor allem die Belastung durch CO und Wärme eine dominierende Rolle.

6.4.3.3 Tabellenfunktionen

6.4.3.3.1 Vorbemerkung

Die Wirkung von Variablen B,C,... auf eine Variable A wird durch die pro Zeittakt einmalig durchgeführte Vergabe von positiven oder negativen Punkten in Abhängigkeit vom Zustand der Variablen B,C,... simuliert. Die Variable A kann entweder statisch oder dynamisch reagieren.



Dynamisch: Die empfangenen positiven oder negativen Punktemengen resultieren aus der Wirkung des Zustands von B, C, ... zum Zeitpunkt t während des Zeitintervalls Δt und werden addiert

$$A_{t+1} = A_t + \Delta t \{ (dA/dB) + (dA/dC) + \dots \} .$$

Statisch: Die von B,C,... vergebenen Punkte resultieren aus den Zuständen von B, C, ... zum Zeitpunkt t und werden von A additiv zusammengeführt. Für den nächsten Zeitschritt wird A wieder auf den Anfangswert gesetzt:

$$A_{t+1} = f(B_t) + f(C_t) + \dots .$$

Eine dynamische Variable ist beispielsweise die „Leistungsfähigkeit der Nutzer“, da die Wirkungen von Rauch und Wärme akkumuliert werden. Ein Beispiel für eine statische Variable ist „Fluchtchancen“, die additiv aus den Zuständen der Personen („Informationsstand der Nutzer“ und „Leistungsfähigkeit der Nutzer“) und bauwerksseitig aus der „Qualität der Rettungswege“ resultiert.

6.4.3.3.2 Direkte Variablenbeziehung

Die Wirkung der „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf die „Leistungsfähigkeit der Nutzer“ läßt sich wie folgt angeben:

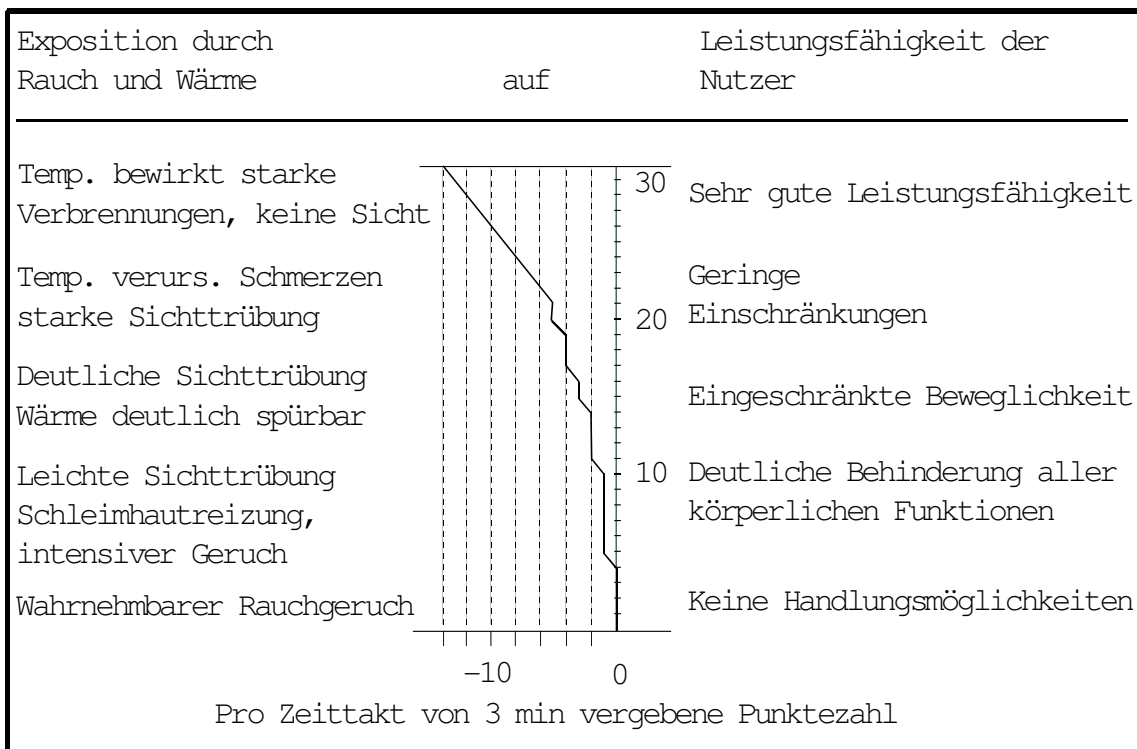


Abb. 6.11: Wirkung von „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf die „Leistungsfähigkeit der Nutzer“

Ohne Berücksichtigung der gleichzeitig durch die Wirkung anderer Variablen vergebenen Punkte und der bei einem zweiten Zeitschritt bereits abgesunkenen Leistungsfähigkeit (siehe Punkt 6.4.3.3.4) würde die sehr starke Beanspruchung durch Rauch und Wärme ($ExRW = 30$ Punkte) für eine Person mit anfänglich sehr guter Leistungsfähigkeit ($LdN = 30$ Punkte) nach $t = 6,4$ min zur völligen Handlungsunfähigkeit führen (-14 Punkte in 3 min $\rightarrow 3$ min $\cdot 30/14 = 6,4$ min). Einer Person mit bereits eingeschränkter Beweglichkeit (Alte, Behinderte; $LdN = 15$ Punkte) stände lediglich eine Zeit von ca. 3,2 min bis zum vollständigen Leistungsabbau zur Verfügung.

Jede Funktion kann mit einem Verzögerungswert Δt versehen werden, so daß die Punktevergabe zeitverzögert erfolgt.

Es muß jedoch zusätzlich berücksichtigt werden, daß die Wirkung von Rauch auf den menschlichen Organismus bereits stark von dessen Leistungsfähigkeit abhängig ist. Für derartige Fälle stellt das SM die Möglichkeit bereit, einen Eingangsfaktor zu definieren.

6.4.3.3 Eingangsfaktor

Ist die Wirkung einer Variablen B auf eine Variable A außer vom Zustand B auch vom jeweiligen Zustand der Variablen A abhängig, so kann dies durch die Multiplikation der vergebenen Punkte mit einem Eingangsfaktor berücksichtigt werden.

Für die im vorigen Abschnitt aufgezeigte Beziehung (vgl. Abb. 6.11) wird der Eingangsfaktor wie folgt aufgestellt.

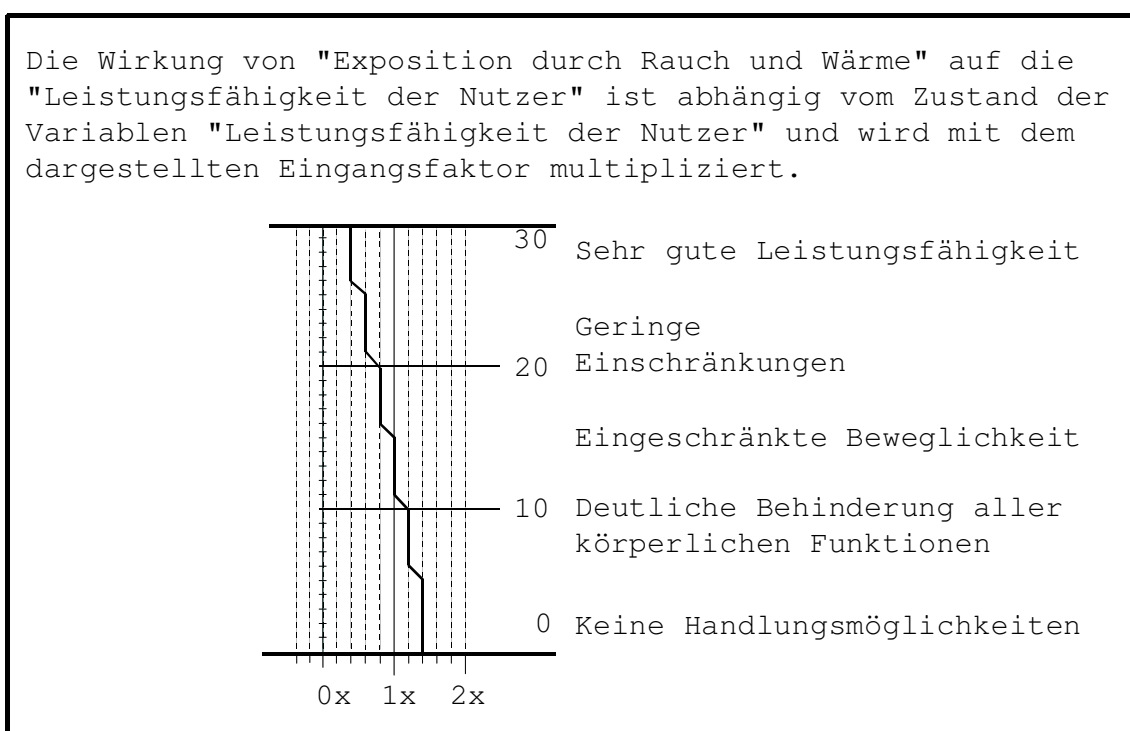


Abb. 6.12: Eingangsfaktor für die Wirkungsbeziehung „Exposition durch Rauch und Wärme“ auf die „Leistungsfähigkeit der Nutzer“

6.4.3.3.4 Interne Funktion

Für Variable, die eine vom System unabhängige Dynamik entwickeln, können interne Funktionen angegeben werden.

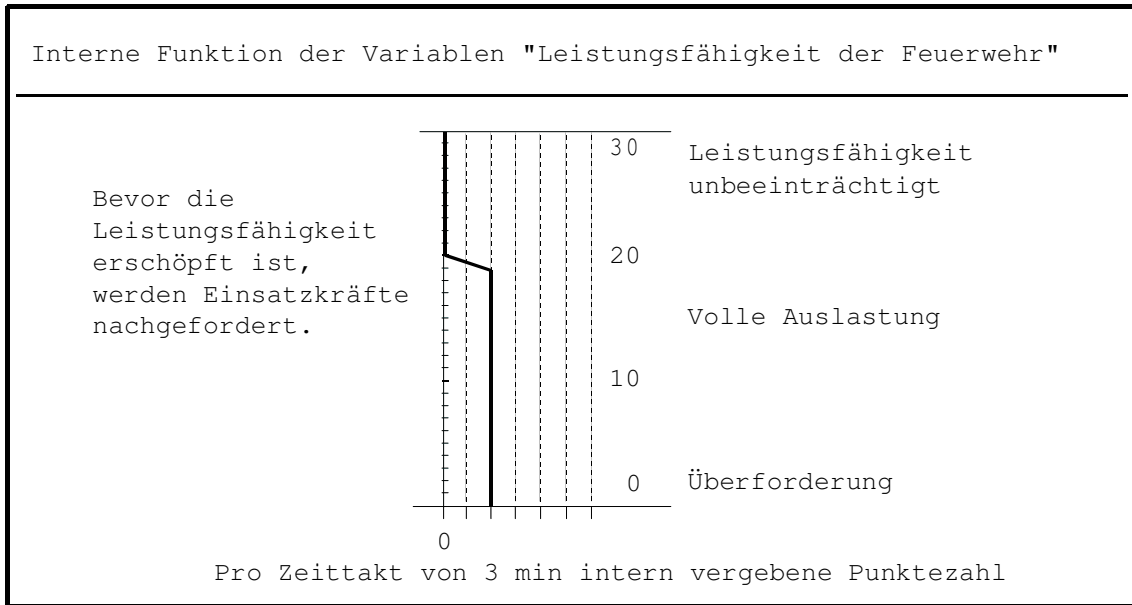


Abb. 6.13: Interne Funktion der Variablen „Leistungsfähigkeit der Feuerwehr“

6.4.4 Übersicht über die verwendeten Funktionen

Die dem Simulationsmodell auf der Basis des Teilszenarios (vgl. S.100) zugrundegelegten Bereichsbezeichnungen, Variablenbeziehungen, Eingangsfaktoren und interne Funktionen sind auf den folgenden Seite dargestellt. Erläuterungen zu den funktionalen Beziehungen finden sich in [K02].

Leistungsfähigkeit der Nutzer	Qualität verfügbarer Informat.	Streß	Brandbed. Angriffswiderst.	Leistungsfähigkeit der FW	Personenschäden	Informationsstand der FW
Sehr gute Leistungsfähig.	Sehr gute Informationslage	Panik, Bewegungssturm	Feuerwalzen Flash-Over	Leistungsfähig. unbeeinträchtigt	Große Zahl Toter und Verletzter	Alle wesentl. Informat. vorhanden
Geringe Einschränkungen	Inf.-Angebot hat Lücken	Schreien	Starke Wärme u. Rauchentwickl.		Einige Tote häufige Reanimationen	Informat. lückenhaft
Eingeschränkte Beweglichkeit		Zittern, Schwindel	Vorrangig Rauchentwickl.	Volle Auslastung	Mehrere Verletzte, Rauchvergiftungen	
Deutliche Behinderung aller motorischen Fähigkeiten	Inf. vielfach interpretierbar	Herzklopfen, feuchte Hände	Rauchentwickl. bedingt Atemschutz		Einige leicht Verletzte	Deutliche Inf. Defizite
Keine Leistungsfähig.	Keine brauchbaren Inf.	Kein Streß	Leichte Verrauchung	Überforderung	Keine Personenschäden	Außerst dürftige Informationslage

Abb. 6.14: Bereichseinteilung

	Qualität der Rettungswege	Widerstandsf.d. Umfassungsbaut.	Brandintensität	Intensität der Rauchausbreit.	Exposition d. Rauch/Wärme	Fluchtchancen
30	100% sicher u. nutzbar	Annähernd "F90" und rauchdicht		Dicht., schwarz. Rauch, keine Sicht möglich	Atmen nicht möglich, Verbrennungen	Flucht gut möglich
25						
20	Nutzbarkeit eingeschränkt	Annähernd "F60" und 80% rauchdicht	Vollbrand	Dichter, grauer Rauch, starke Sichttrübung	Orientierungsprobleme, Atmen fällt schwer / therm. Einfluß deutl. spürbar	Fluchtchancen eingeschränkt
15			Flash-Over Beginn	Deutliche Sichttrübung		
10	Nutzbarkeit stark eingeschränkt	Annähernd "F30" und 50% rauchdicht	Entwickelter Brand	I. Sichttrübung Sleimhautreiz. intens. Geruch	Hustreiz, trärende Augen geringe Wärme	Nur geringe Fluchtchancen
5						
0	Rettungswege nicht nutzbar	F0 und rauchoffen	Entstehungsbrand	Wahrnehmbarer Rauchgeruch	Unangenehmer Geruch, keine thermische Beanspruchung	Flucht nicht möglich

Zu Abb. 6.14: Fortsetzung Bereichseinteilung

6.5 Simulationsergebnisse

6.5.1 Plausibilitätskontrolle des Modellverhaltens

Die folgenden Seiten zeigen die Ergebnisse durchgeführter Simulationsläufe unter Verwendung der in Abb. 6.14 dargestellten Bereichseinteilungen.

Abbildung 6.16 zeigt die Interaktion Brand-Bauwerk in Abhängigkeit von der Anfangsqualität der Umfassungsbauteile. Die Bezeichnungen F90, F60 und F30 sind der DIN 4102 [D07] entlehnt, kennzeichnen hier jedoch die Wandqualitäten entsprechend der unscharfen Bereichseinteilung der Variablen „Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile“. Man erkennt die Verzögerung der Rauchausbreitung (IdR) bei qualitativ hochwertigen Bauteilen und die Auswirkungen auf die Qualität der Rettungswege (QdR)

Die Wirkungen dieser unterschiedlichen Entwicklungen auf den Bereich des menschlichen Verhaltens zeigt Abbildung 6.17. Der ansteigende Streß (STR) wird zunächst durch die noch guten Fluchtchancen gemindert, steigt dann mit zunehmend starker Verrauchung und Brandintensität jedoch rasch wieder an. Die verfügbaren Evakuierungszeiten (Kriterium $F_I = 0$) werden damit deutlich von der Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile (WdU) beeinflusst.

Die Wirkung des bei $t = 16$ min als wirksam angenommenen Feuerwehreinsatzes ($LdFW = 30$ bei $t = 16$ min) auf den Brand und das menschliche Verhalten wird in den Abbildungen 6.18-6.20 bei unterschiedlichen Qualitäten der raumumschließenden Bauteile dargestellt. Im Falle der Bauteile mit geringer brandschutztechnischer Qualität ($WdU = 10$, Abb. 6.17) gelingt es der Feuerwehr, die Qualität der Rettungswege (QdR) für etwa 3 min aufrecht zu erhalten, die Wirkungen auf die Fluchtchancen sind kurzfristig vorhanden, die Entwicklung des Streß (STR) wird kurzfristig gedämpft.

Dies ändert sich signifikant erst bei einer Verbesserung der Anfangsqualität der Bauteile auf eine mittlere Qualität ($WdU = 15$, Abb. 6.19). Hier gelingt es der Feuerwehr, die Rettungswege für etwa 13 min zu sichern. Dies hat deutliche Auswirkungen auf die Fluchtchancen.

Ein verbesserter Anfangswert der Widerstandsfähigkeit der Umfassungsbauteile (ab $WdU = 20$) begünstigt den Löscheinsatz deutlich, so daß über einen langen Zeitraum günstige Bedingungen für die Flucht gegeben sind (vgl. Abb. 6.20).

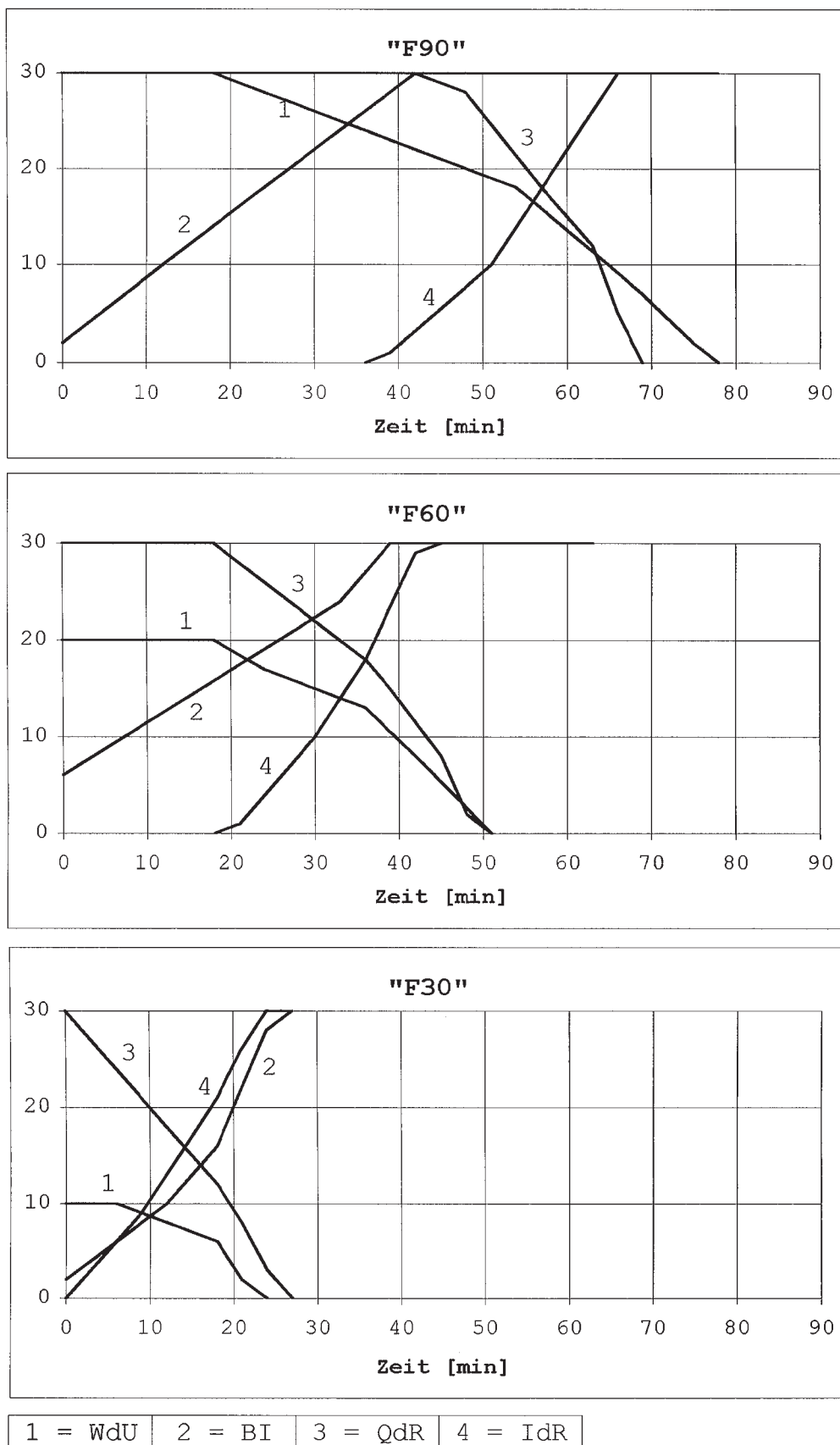


Abb. 6.16: Interaktion Brand-Bauwerk für unterschiedlich widerstandsfähige Umfassungsbauteile

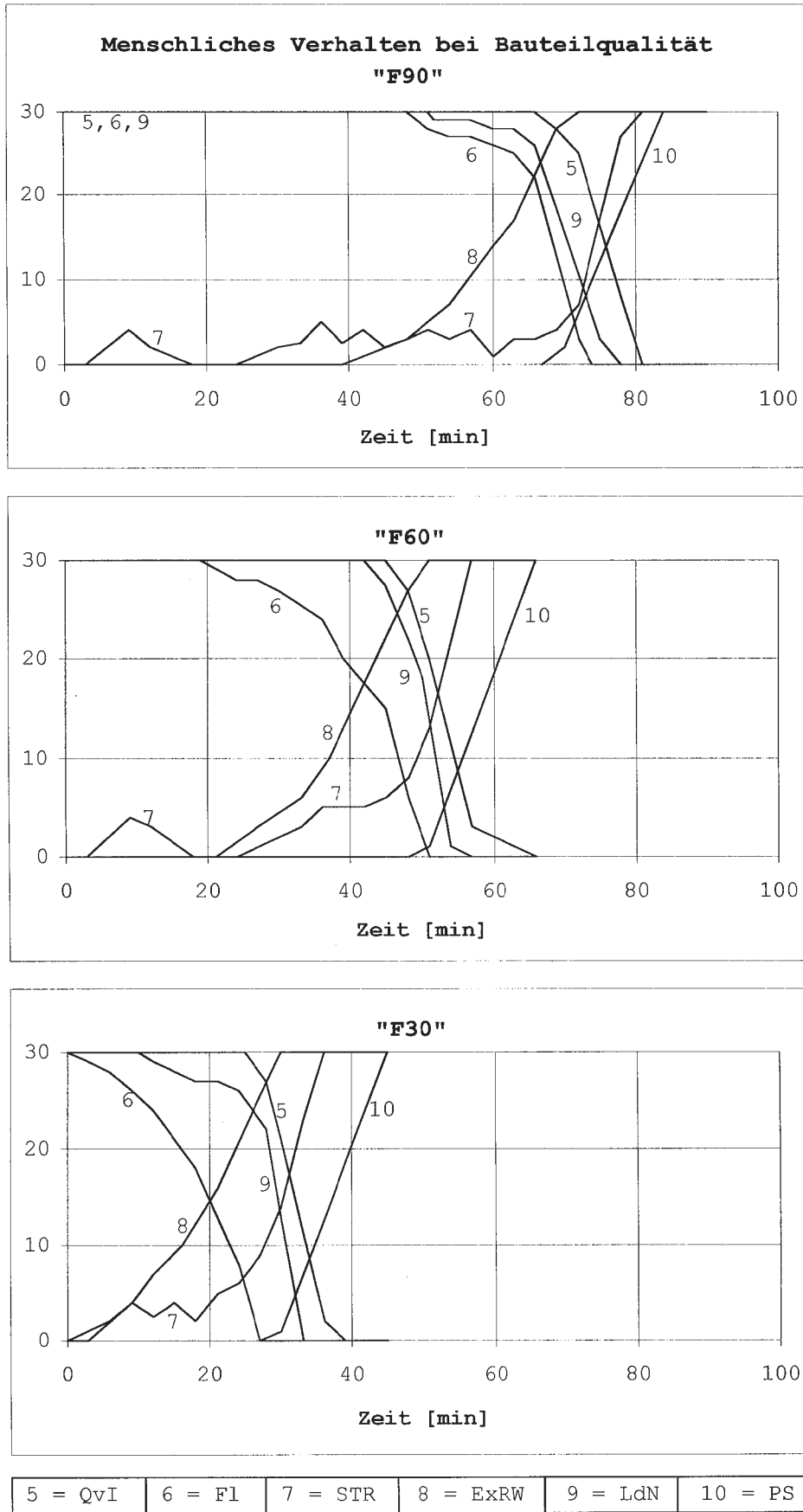
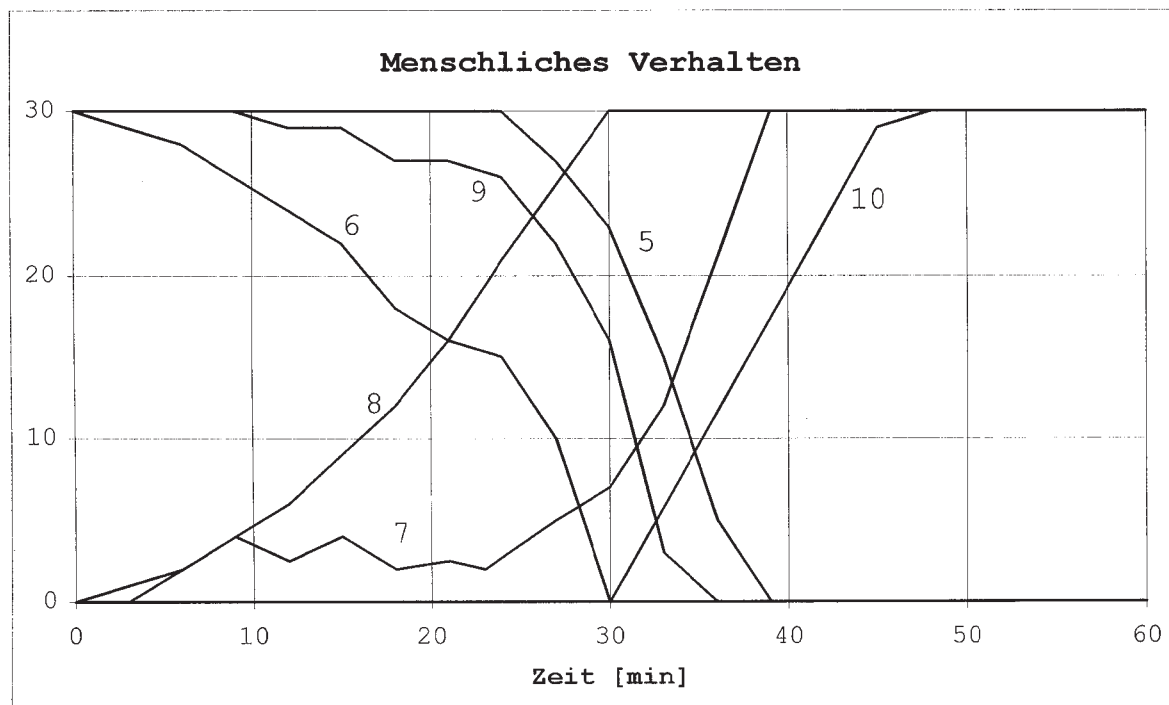
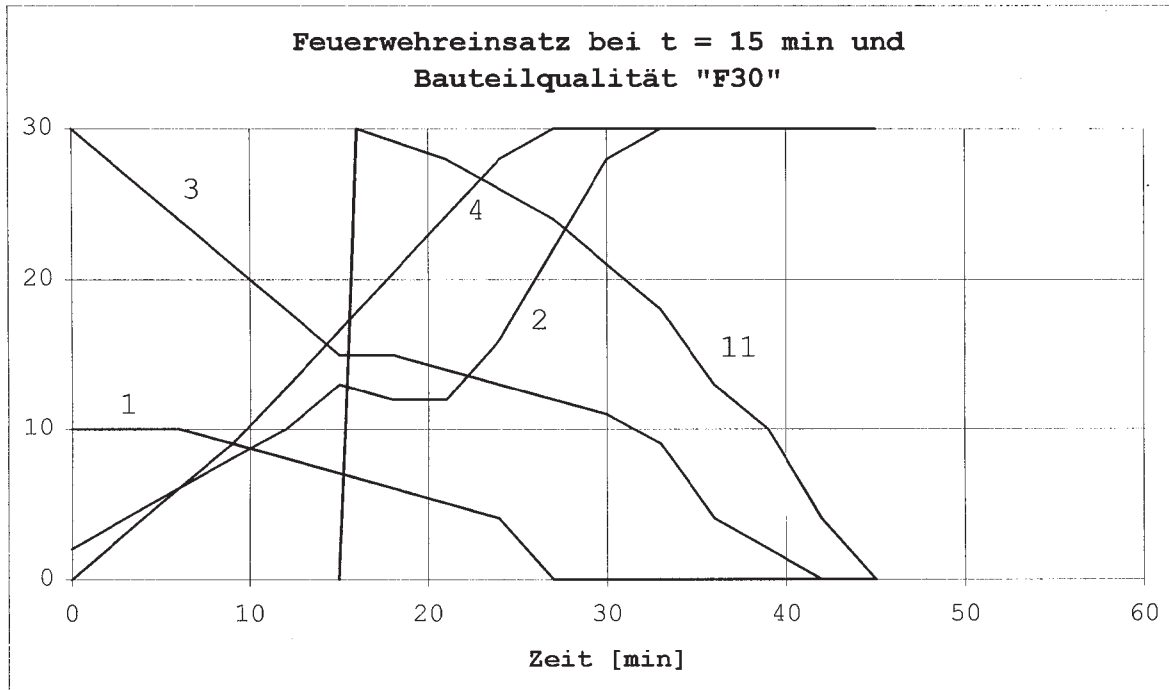
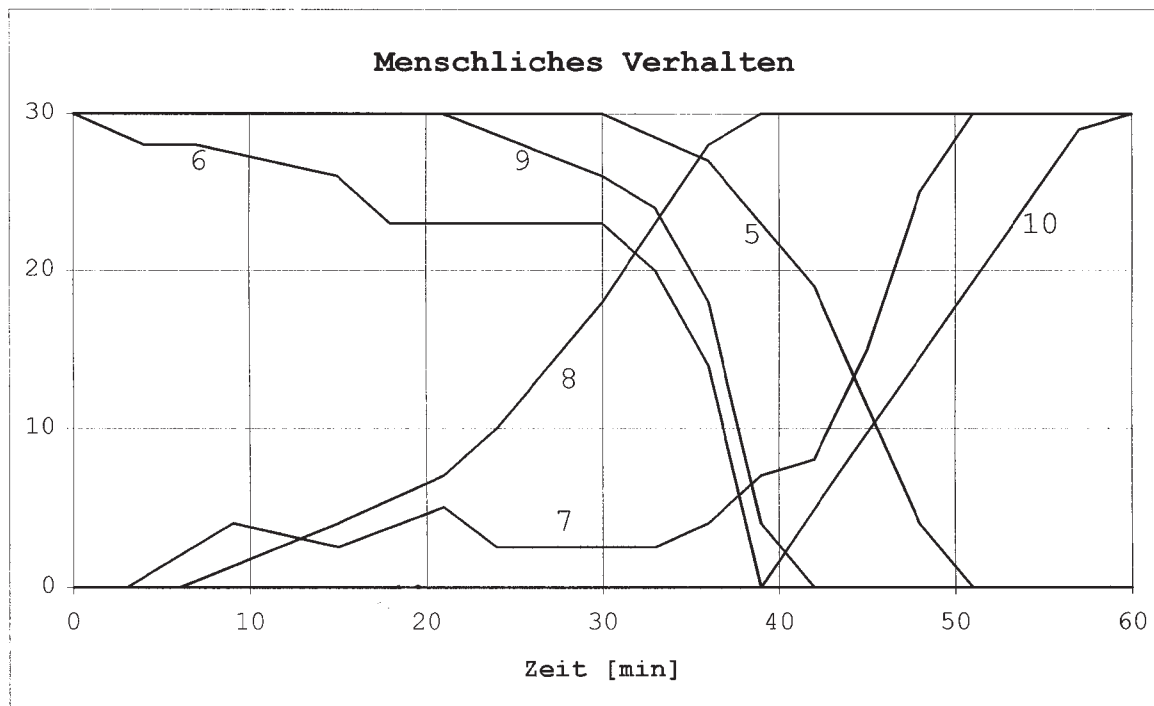
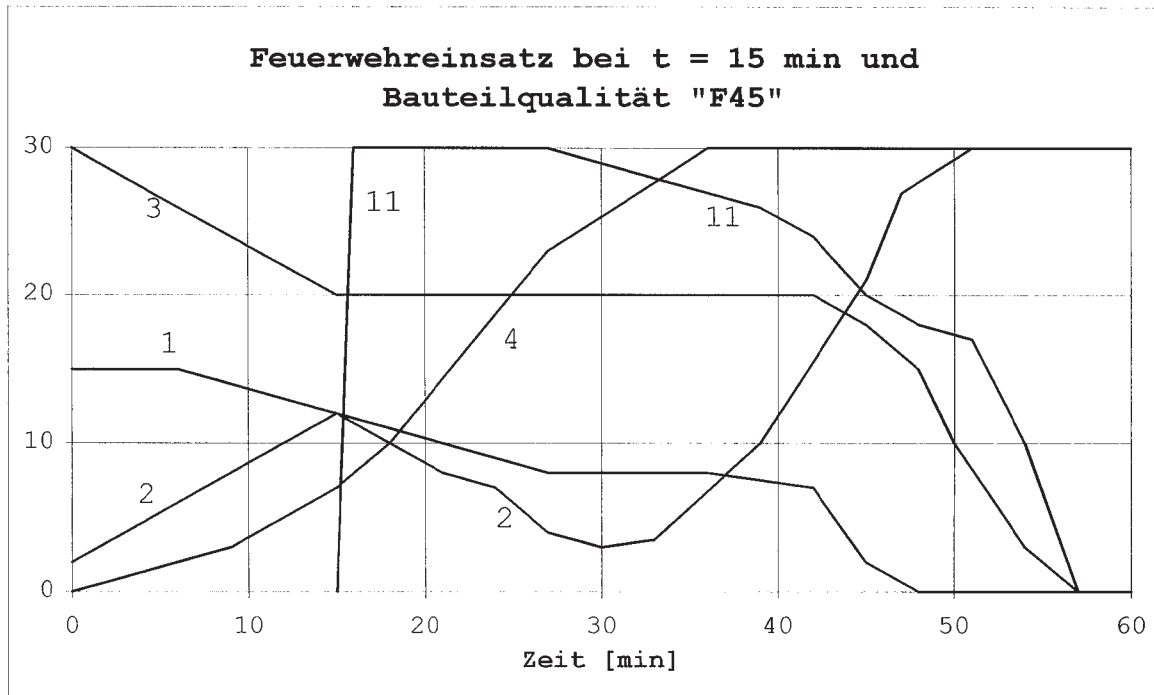


Abb. 6.17 Wirkung der unterschiedlichen Brandverläufe nach Abb. 6.16 auf das menschliche Verhalten



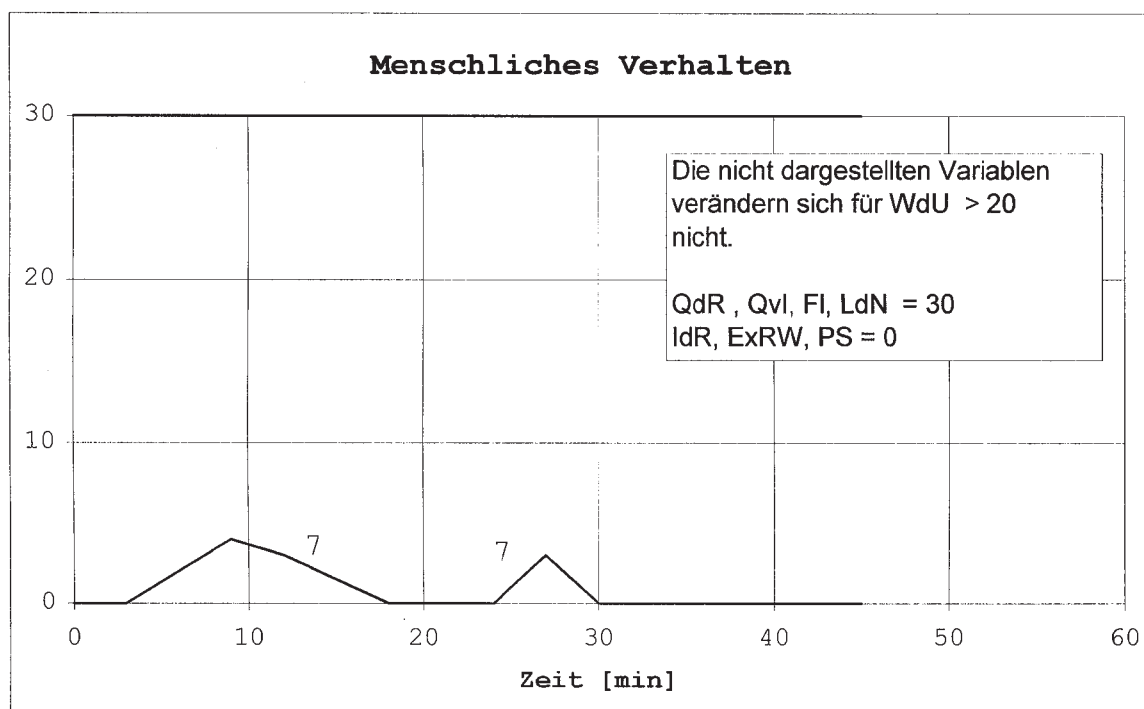
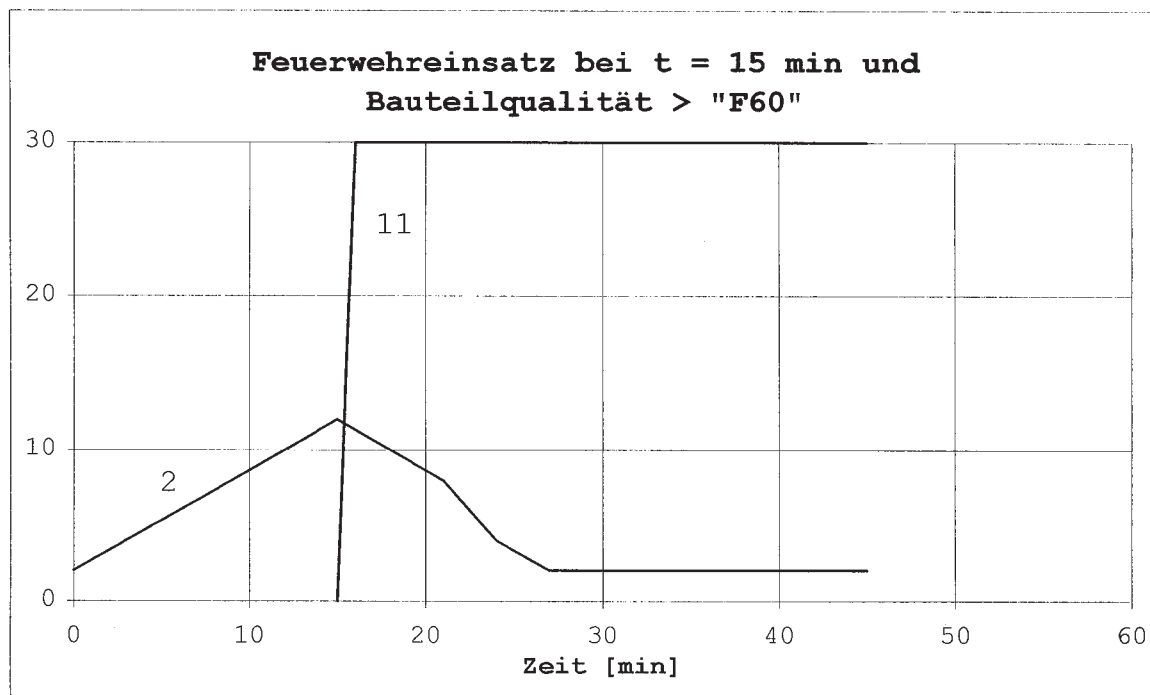
1 = WdU	2 = BI	3 = QdR	4 = IdR	5 = QvI	6 = Fl
7 = STR	8 = ExRW	9 = LdN	10 = PS	11 = LdFW	

Abb. 6.18 Wirkung des Feuerwehreinsatzes ab t = 15 min auf das menschliche Verhalten bei Bauteilqualität F30



1 = WdU	2 = BI	3 = QdR	4 = IdR	5 = QvI	6 = Fl
7 = STR	8 = ExRW	9 = LdN	10 = PS	11 = LdFW	

Abb. 6.19 Wirkung des Feuerwehreinsatzes ab t = 15 min auf das menschliche Verhalten bei Bauteilqualität F“45“



1 = WdU	2 = BI	3 = QdR	4 = IdR	5 = QvI	6 = FI
7 = STR	8 = ExRW	9 = LdN	10 = PS	11 = LdFW	

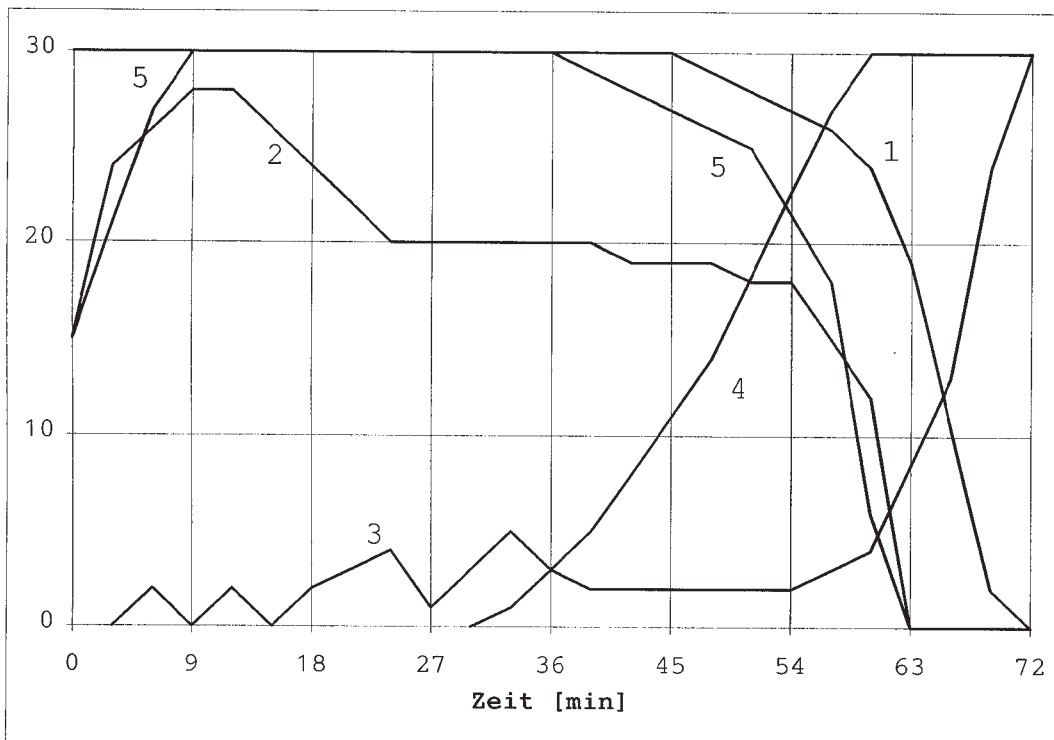
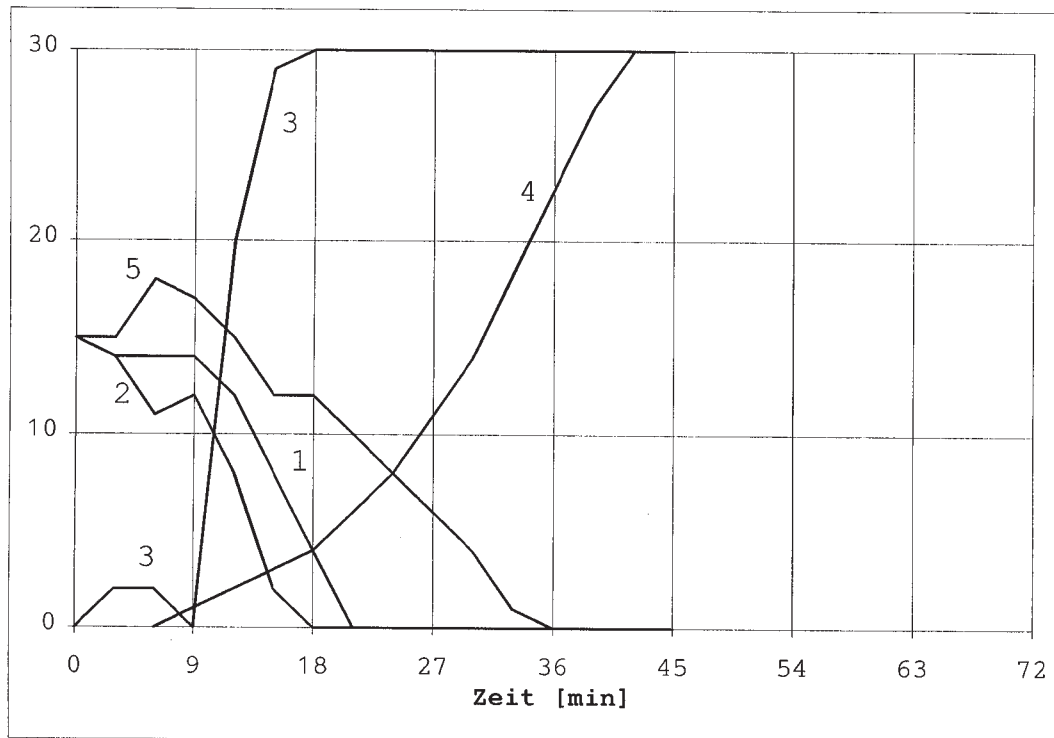
Abb. 6.20 Wirkung des Feuerwehreinsatzes ab $t = 15$ min auf das menschliche Verhalten bei Bauteilqualität > F60

6.5.2 Wirkung der Variablen „Leistungsfähigkeit der Nutzer“

Eine exemplarische Darstellung des Einflusses einer Veränderung der Variablen „LdN“ bei gleichzeitig identischen Anfangswerten aller anderen Variablen soll die Möglichkeiten der Simulation nochmals umreißen. Abb. 6.21 zeigt im unteren Diagramm einen Brandverlauf mit Nutzern, die anfänglich über eine sehr gute Leistungsfähigkeit verfügen (Anfangswert für LdN = 30 Pkt.). In der oberen Hälfte ist hingegen eine Simulation mit Personen eingeschränkter Leistungsfähigkeit (Anfangswert für LdN = 15 Pkt.) dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, daß es leistungsfähigen Personen (LdN = 30 für $t = 0$) möglich ist, ihre Informationslage (QvI) selbständig so deutlich zu verbessern, daß die Fluchtchancen (Fl) sehr gut werden und der Streß (STR) dadurch zunächst nicht übermäßig anwächst. Die hohe Leistungsfähigkeit (LdN) und der gute Informationsstand (QvI) erlauben ein Zurückweichen vor den Brandeinflüssen (ExRW) und die körperlichen und seelischen Belastungen können lange Zeit auf einem unteren Niveau gehalten werden.

Weniger bewegliche Personen (obere Darstellung, LdN = 15 für $t = 0$) können - bedingt durch den ansteigenden Streß (STR) - zwar ihre Leistungsfähigkeit (LdN) zunächst geringfügig steigern. Dies reicht jedoch nicht aus, um ihre Informationslage (QvI) und damit die Fluchtchancen deutlich genug zu verbessern, so daß die Fluchtchancen (Fl) sinken und in der Folge der Streß (STR) zunimmt. Der dann folgende rapide körperliche und geistige Leistungsabbau hat wiederum negative Rückwirkungen auf die Fluchtchancen (Fl).



1 = QvI	2 = Fl	3 = STR	4 = ExRW	5 = LdN	6 = PS
---------	--------	---------	----------	---------	--------

Abb. 6.21 „Brandverlauf bei unterschiedlichen Anfangswerten für die Variable „Leistungsfähigkeit der Nutzer“

6.5.3 Einfluß unterschiedlicher Anfangswerte für LdN, QvI und QdR auf die verfügbaren Fluchtzeiten

Die Sensitivität der Variablen ist bereits in vorangegangenen Schritten untersucht worden. Die Simulation bietet nun nochmals die Möglichkeit, die Wirkungsstärke der Variablen in Bezug zueinander zu überprüfen.

Abbildung 6.22 stellt exemplarisch für unterschiedliche Anfangswerte der Variablen „Leistungsfähigkeit der Nutzer“ (LdN) die jeweils aus einer Simulation ermittelten verfügbaren Flucht- bzw. Rettungszeiten dar. Abbruchkriterium war das Erreichen von „Fluchtchancen“ (FI) = 0 Punkte. Variiert wurden innerhalb der Einzeldarstellungen die Variablen „Qualität der Rettungswege“ (QdR) und „Qualität verfügbarer Informationen“ (QvI). Es ergaben sich u.a. folgende vergleichende Aussagen.

Auch für Personengruppen mit geringer Leistungsfähigkeit (LdN = 10) können ausreichende verfügbare Fluchtzeiten erreicht werden. Notwendig sind dafür jedoch sehr gute Rettungswegqualitäten und eine ebenfalls sehr gute Informationslage. Eine deutliche Steigerung der verfügbaren Fluchtzeiten läßt sich bei sehr guten Rettungswegen (QdR=30) bereits durch eine geringfügige Verbesserung des Informationsangebotes (QvI von 10 auf 20) erreichen.

Mit zunehmender Leistungsfähigkeit (LdN = 20) lassen sich vergleichbare Fluchtzeiten bereits bei mittlerer Informationslage erreichen (vgl. bspw. die Zeiten für LdN = 10, QvI = 30, QdR = 20 mit LdN = 20, QvI = 20, QdR = 20). Vor allem kann die Zunahme der Informations- und Rettungswegequalität deutlich wirkungsvoller in eine Verlängerung der verfügbaren Fluchtzeiten umgesetzt werden als bei geringerer Leistungsfähigkeit der Nutzer.

Bei sehr guter Leistungsfähigkeit bestehen im Bereich der hier dargestellten Simulation selbst dann sehr gute verfügbare Fluchtzeiten, wenn die Qualität der Rettungswege als eingeschränkt (bis QdR=10) angenommen wird.

Diese exemplarischen Aussagen gelten für Simulationen auf der Basis des Wirkungsgefüges der Phase 5 (vgl. S. 86 und 100). In dieser Brandphase ist die Entscheidung zur Flucht bereits getroffen. Andere Ergebnisse werden dann erzielt, wenn beispielsweise das Wirkungsgefüge der Phase 3 „Lösch- und Entrauchungsversuche“ (vgl. S.84) der Simulation zugrundegelegt wird.

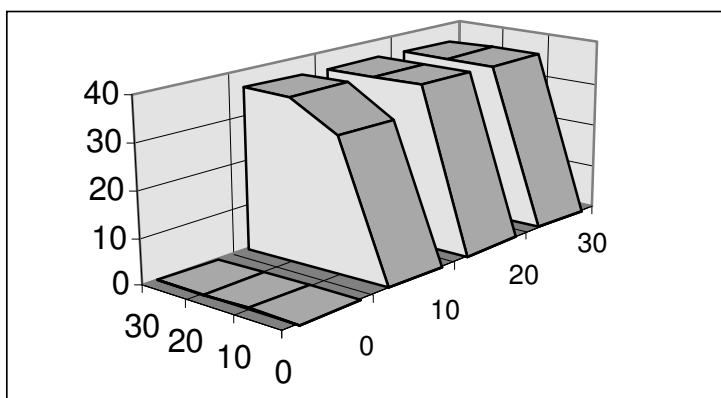
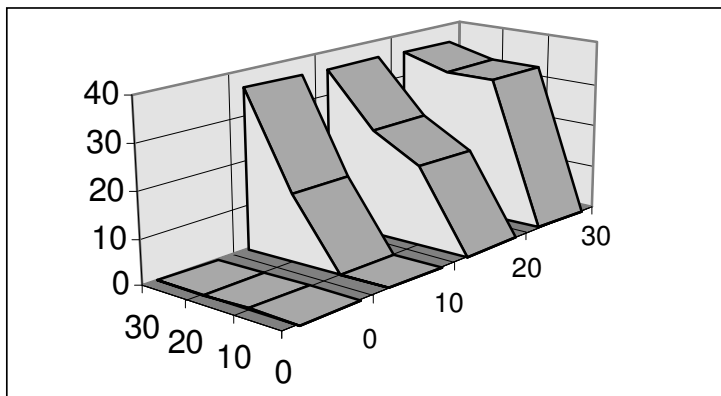
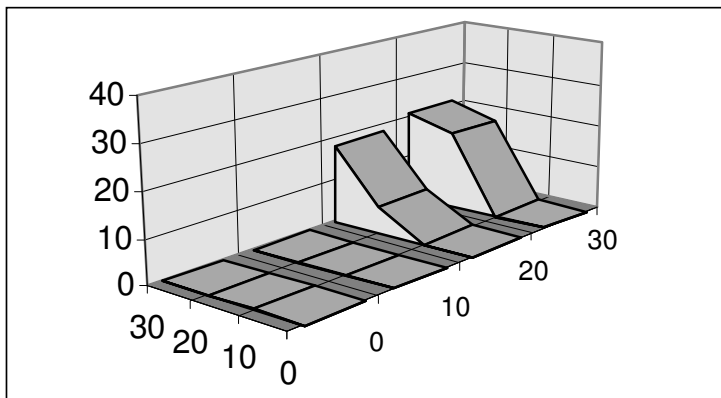
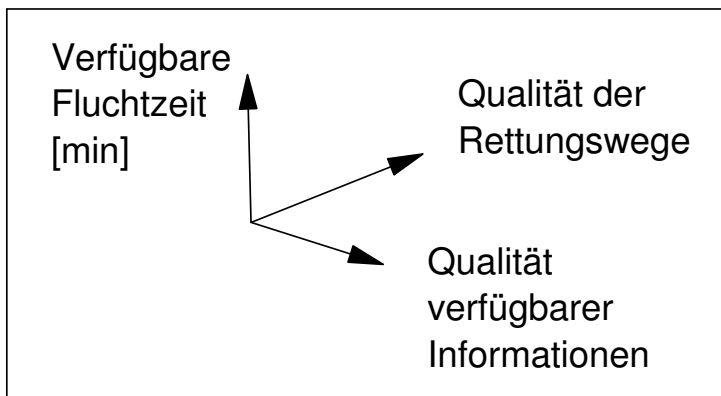


Abb. 6.22: Verfügbare Fluchtzeiten in Abhängigkeit von den Variablen LdN, QdR und QvI

6.5.4 Abschließende Bemerkung

Die Simulation erlaubt die Betrachtung des dynamischen Verhaltens der Variablen für bestimmte Fragestellungen. Von großem Vorteil ist dabei der einfach zu handhabende Modellaufbau und die vom SM vorgesehene Möglichkeit, zu jedem Zeitpunkt in die Simulation eingreifen und den jeweiligen Stand der Variablen beliebig ändern zu können. So ist es beispielsweise möglich, die Einflüsse eines übergeordneten Systems manuell zur Wirkung zu bringen.

Das hier verwendete Simulationsmodell entstand als Teilszenario auf der Basis des Wirkungsgefüges der Brandverlaufphase 5 (vgl. S. 100). Betrachtungen zu Fragestellungen der früheren Phasen bedürfen eigener Modelle, da im verwendeten Teilszenario beispielsweise die Möglichkeiten der Brandbekämpfung durch die Bauwerksnutzer nicht berücksichtigt wurde.

Häufig kommt es bei der Abwägung unterschiedlicher risikomindernder Maßnahmen bei der Planung von Bauwerken in brandschutztechnischer Hinsicht auf eine Einbeziehung der vielfachen, teilweise zeitversetzt auftretenden Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Elementen an. Das Simulationsverfahren ist für eine derartige Nutzung gut geeignet.

Die vorgestellte und für die Brandschutzplanung adaptierte Simulationsmethode ist eine qualitative Hilfe zur Risikoabschätzung. Genaue Bemessungsgrößen für die Bauwerksplanung können zur Präzisierung der Ergebnisse derartiger Risikoabschätzungen beispielsweise durch die Anwendung der im Kapitel 1 angesprochenen Brand- und Evakuierungsmodelle ermittelt werden.

7 ZUSAMMENFASSUNG

7.1 Ziel und Ergebnis der Arbeit

Ziel dieser Arbeit war es, die Komplexität des Verlaufs von Bränden in Bauwerken zu untersuchen und ein Verfahren nutzbar zu machen, das dieser Komplexität bei der Behandlung brandschutztechnischer Fragestellungen gerecht wird.

Dazu wurden auf der Grundlage von Expertenaussagen über die Schwierigkeiten der Abschätzung denkbarer Brandverläufe im Kapitel 1 methodische Anforderungen an ein Instrumentarium hergeleitet. Es wurde die These aufgestellt, daß das Sensitivitätsmodell geeignet sei, diese Anforderungen zu erfüllen.

Das Sensitivitätsmodell ist auf die Untersuchung komplexer Systeme ausgerichtet. Seine grundsätzliche Anwendbarkeit auf Fragestellungen des Brandschutzes wurde in den Kapiteln 2 und 3 erbracht. Dort konnte gezeigt werden, daß es sich beim System „Brandverlauf“ um ein komplexes System handelt. Der Komplexitätsbegriff wurde dazu analysiert und im Hinblick auf den Brandverlauf erläutert. Die explizite Aufspaltung der Komplexität des Gesamtsystems in den Objekt- und Subjektbeitrag ist für die Brandschutzforschung dabei eine neue Sichtweise. In die Risikoabschätzung einbezogen wird dadurch das menschliche Verhalten als gleichberechtigter Betrachtungsgegenstand, wodurch die Entwicklung risikoangepaßter Gesamtbrandschutzkonzepte unterstützt wird.

Die Durchführung der „Sensitivitätsanalyse Brandverlauf“ im Kapitel 5 erfolgte nach der Erläuterung des angewendeten Verfahrens im Kapitel 4. Die praktische Anwendbarkeit der Methode konnte anhand der Behandlung zweier praxisnaher Fragestellungen im Kapitel 5.8 dargestellt werden.

Die Simulation des zeitlichen Verhaltens der betrachteten Variablen folgte im Kapitel 6. Die nutzbringende Verwendung des Simulationsmodells konnte exemplarisch dargestellt werden.

7.2 Einordnung des Verfahrens in die Brandschutzpraxis

Bei der Planung von Bauwerken und bei der Festlegung von Anforderungen durch den Gesetzgeber findet im Rahmen der brandschutztechnischen Risikoabschätzung häufig eine Abwägung unterschiedlicher risikomindernder Maßnahmen statt. Immer wieder taucht dabei die Frage auf, ob einzelne Maßnahmen andere kompensieren können. Die Entscheidung darüber hängt vorwiegend von der Vorstellungskraft bezüglich denkbarer Brand-szenarien der diese Fragestellung beurteilenden Personen ab. Empirische Kenntnisse über stattgefundenen Brandverläufe, ein gutes wissenschaftliches Grundlagenwissen und die Verfügbarkeit numerisch exakter Simulationsmodelle waren bisher dazu die wesentlichen verfügbaren Denkhilfen. Das vorgestellte und für die brandschutztechnische Risikoabschätzung adaptierte Verfahren stellt für den Brandschutz eine ergänzende Methode dar.

7.3 Weitere geplante Untersuchungen im Bereich „Brandschutz“

Das gezeigte Modell wächst mit der Anzahl der damit behandelten Fragestellungen. Es paßt sich durch fortgesetzte Adaption den Realitäten an und entwickelt sich so mit ihnen weiter.

Der Versuch, die Modellteile, die einer genaueren numerischen Erfassung zugänglich sind - auch mit dieser erreichbaren Genauigkeit - zu integrieren, ohne die vielfältigen nicht genau erfaßbaren Wirkungszusammenhänge aufgeben zu müssen, soll im Bereich der Simulation unternommen werden. Geplant ist für diese Aufgabenstellung die Anwendung der Methode der „Systems Dynamics“ (vgl. [S04;V06]).

Das Verfahren der Sensitivitätsanalyse wird zur Zeit angewendet auf ein System „Brandschutz im gesellschaftlichen Kontext“. Dort spielen Variablen wie „Risikobewußtsein in der Bevölkerung“, „Kritische öffentliche Meinung“, „Schadenumfang“, aber auch „Versicherungspolicenbestand“, „Rigide gesetzliche Anforderungen“ oder „Investitionsbereitschaft in den Brandschutz“ eine Rolle. Eine Fragestellung dieser Untersuchung ist beispielsweise die, wovon das Risikobewußtsein in der Bevölkerung gegenüber Brandgefahren abhängt und mit welchen Mitteln es kostengünstig in risikomindernder Hinsicht beeinflußt werden kann.

7.4 Einsatz des Verfahrens in der Lehre

In einigen Lehrveranstaltungen und Studienarbeiten konnte gezeigt werden, daß das Verfahren für Studierende des Bauingenieurwesens und der Architektur erfolgreich nutzbar gemacht werden kann. Insbesondere die Bearbeitung der Einflußmatrizen führte auf gute Resonanz und Ergebnisse.

Ziel des Einsatzes in der Lehre ist die Förderung des Risikobewußtseins für Brandgefahren für die zukünftigen Planer von Bauwerken.

7.5 Schlußbemerkung

Im Rahmen ingenieurwissenschaftlicher Arbeit ist der Umgang mit nicht numerisch exakt beschreibbaren Elementen ungewohnt, für die Steuerung komplexer Abläufe mit ausgeprägten Mensch-Technik-Interaktionen jedoch unerläßlich. Derartige Steuerungsprozesse führen Bauingenieure in der Praxis in zunehmenden Maße durch. Die Bereiche der Verkehrsplanung, der Bauwirtschaft, des Projektmanagements oder des Städtebaus sind dafür beispielhaft.

Die Entwicklung des Berufsbildes des Ingenieurs hin zu einem erfolgreichen „Manager komplexer Abläufe“ erfordert zunehmend ein Umgehen mit einer Vielzahl stark wechselwirkender Elemente. Das Schlußfolgern auf der Basis eines vernetzten Denkens in Wirkungsgefügen und vielfachen Wenn-Dann-Analysen, die die Komplexität der realen Welt - auch ohne Anspruch an numerische Genauigkeit - widerspiegeln, ist für das Ziel einer guten Steuerung von Abläufen strategisch erfolgversprechend.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [A01] Ashby, W.R.; Einführung in die Kybernetik, 1.Auflage, Suhrkamp Taschenbuch Verlag, Frankfurt 1974;
- [A02] ARGOS; Simulationsprogramm zum Mehrraumzonenmodell des Danish Institute of Fire Technologie, Version 3, 12/96;
- [B01] Bossel, H.; Simulation dynamischer Systeme, 2. Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1992;
- [B02] Bodamer, M., Schuh,H., Dombrowsky,W.; Das Verhalten von Menschen bei Gebäudebränden, Teil I, Forschungsbericht Nr. 60, Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Unterausschuß „Feuerwehrangelegenheiten“ Karlsruhe 1987;
- [B03] Bodamer, M.; Das Verhalten von Menschen bei Gebäudebränden, Teil II, Forschungsbericht Nr. 61, Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Unterausschuß „Feuerwehrangelegenheiten“, Karlsruhe 1987;
- [B04] Briggs, J., Peat, F.D.; Die Entdeckung des Chaos, Hanser Verlag, München 1990;
- [B05] Bartl, E.; Pädagogisch-psychologische Aspekte bei der Brand-schadenverhütung, Schadenprisma 1/86;
- [B06] Baschkirzew, M.P.; Aufgaben zur Wärmeübertragung, 1. Auflage, Staatsverlag der DDR, Berlin 1979;
- [D01] Drysdale, D.; An Introduction to Fire Dynamics, 3. Edition, John Wiley & Sons Ltd., Suffolk 1987;

-
- [D02] Dombrowsky,W., Schuh,H.; Verhalten von Menschen bei Bränden, Forschungsbericht Nr. 63, Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Unterausschuß „Feuerwehrangelegenheiten“, Karlsruhe 1988;
- [D03] Dombrowsky,W.; Verhalten bei Bränden, Forschungsbericht 71, AG der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V, Karlsruhe 1989;
- [D04] Dürr, H.P.; Das Netz des Physikers, Carl Hanser Verlag, München 1988;
- [D05] Dörner, D.; Über die Schwierigkeiten menschlichen Umgangs mit Komplexität, Psychologische Rundschau, 7.1981, S.163-179;
- [D06] Dörner, D.; Vernetztes Denken - Strategien zur Problembewältigung, Bild der Wissenschaft, Heft 3, 1977, S.79-102;
- [D07] DIN 4102, Teil 2; 09.77, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Bauteile, Begriffe Anforderungen und Prüfungen, Normenausschuß Bauwesen im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V., 1977;
- [D08] DIN 14096, Teil 1, 04.83; Brandschutzordnung, Normenausschuß Feuerwehrwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1983;
- [D09] Briefwechsel Dombrowsky-Mamrot, 1997;
- [F01] Fire Protection Handbook; National Fire Protection Association, 2nd Edition, Quincy 1991;
- [G01] Galea, E.R., Owen, M., Lawrence, P. and Filippidis, L.; building-EXODUS v1.0 Users Guide and Technical Manual, Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, UK, 1996;

-
- [G02] Groner, N.E.; Important "People" Problems in Hazard Analyses can be Modeled by Using a Cognitive Systems Approach, Proceedings of the Symposium on Fire Hazard and Risk Analysis, National Fire Protection Research Foundation, 1996, S. 422-429;
- [G03] Gell-Mann, M.; Das Quark und der Jaguar, Piper Verlag, München 1994;
- [G04] GFA - Basic; Programmiererhandbuch, 1. Auflage, Düsseldorf, Oktober 1990;
- [G05] Gomez, J. in: Probst, G.J.B; Siegward, H. (Hrsgb.), Integriertes Management, Paul Haupt Verlag 1981, S.215 ff;
- [G06] Garagenverordnung Nordrhein-Westfalen; Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen, 02.11.90, (GV.NW. S.600/SGV.NW.232) geändert durch Verordnung vom 05.12.1995 (GV.NW.S.1236);
- [H01] Hosser, D., Martins, M.; Jahresbericht 1996 der Referate des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates der vfdb, Referat 3: Brandentwicklung und Brandverlauf, vfdb-Zeitschrift 2/97, S. 78f;
- [H02] Hauhs, M., Lange, H.; Ökologie und Komplexität, in: Mensch und Umwelt, Forum für interdisziplinäre Forschung, 16/96, S.45-64;
- [H03] Heins, Th.; Simulationsmodell zur sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung bei Bränden in ausgedehnten Räumen, Dissertation, Heft 92, Braunschweig 1991;
- [H04] Henriques, F.C. Jr.; Studies of thermal injurie, Part V, Arch.Path. 43, 489-502, 1947;

-
- [H05] Hosser, D., Dobbernack, R.; Rechnerische Begleitung der HDR Großbrandversuche mit dem Mehrraummodell FIGARO, Statusseminars „Simulation von Bränden“, Bad Neuenahr 1993;
- [I01] International Organisation for Standardisation; TC 92/SC 4, vfdb-Zeitschrift Forschung und Technik im Brandschutz, 2/97, S. 73;
- [J01] Jin, T.; Journal of Fire and Flammability, April 1978, S. 135-145;
- [K01] Klingsch, W.; Anwendung ingenieurmäßiger Methoden im Brandschutz, in: Berichtsband zur VdS-Fachtagung Schadenverhütung und Technik, Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (3), 17.-18. April 1996, Verband der Schadenversicherer, Köln 1996;
- [K02] Klingsch, W., Mamrot, D.; Sensitivitätsanalyse Brand in Bauwerken, Forschungsvorhaben im Auftrag der Volkswagenstiftung Hannover, Abschlußbericht Juli 1997, unveröffentlicht;
- [K03] Klingsch, W.; Rettungswege-Signalisierungs-System und Evakuierungs-Management-System, Deutsches Patentamt, Patentanmeldungen 19644 126.9 und 19644 127.7;
- [K04] Kosko, B.; Fuzzy Logisch, Econ Verlag, Düsseldorf 1995;
- [L01] Lemke, E. (Hrsgb.); Handbuch Brandschutz, Loseblattsammlung, ecomed-Verlag, 26. Erg.Lfg., Landsberg 1994;
- [M01] Malik; Strategien des Managements komplexer Systeme, Haupt-Verlag, Bern 1984;
- [P01] Principe, S.; Anwendungsorientierter Modelleinsatz im Management - Konzeptionelle Grundlagen für den Einsatz des Sensitivitätsmodells, Dissertation Nr. 1558, Hochschule St. Gallen, 1993;

-
- [P02] Probst, G.J.B.; Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln, Ein Brevier für Führungskräfte, 2. Auflage, Bern 1990;
- [P03] Perrow, Ch.; Normale Katastrophen, Campus Verlag, Frankfurt a.M. 1989;
- [P04] Prager, F.H.; Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bewertung der Rauchgastoxizität, Dissertation, RWTH-Aachen 1985;
- [R01] Ropohl, G.; Eine Systemtheorie der Technik, Hanser Verlag, München 1979;
- [R02] Rheinische Post vom 13.04.1996;
- [S01] Schneider, V., Könnecke, R.; Simulation der Personenevakuierung unter Berücksichtigung individueller Einflußfaktoren und der Ausbreitung von Rauch, vfdb-Zeitschrift, 2/96, April 1996;
- [S02] Schneider, J.; Risiko und Sicherheit technischer Systeme, Birkhäuser Verlag, Basel 1991;
- [S03] Studiengruppe für Biologie und Umwelt; Supplement zu „Ausfahrt Zukunft“, München 1991;
- [S04] St. Gall Center for Futures Research; Homepage: Systems Thinking Practice, <http://sigma.unisg.ch/~sgzz/links/stp/index.html>;
- [T01] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering; National Fire Protection Association, Quincy 1988;
- [U01] Ulrich, H., Probst, J.B.; Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln, Ein Brevier für Führungskräfte, Haupt-Verlag, Stuttgart 1988;

-
- [V01] Vester, F.; Neuland des Denkens, Deutscher Taschenbuch Verlag, 8. Auflage, München 1993;
- [V02] Vester, F., Hesler, A.v.; Sensitivitätsmodell, Forschungsbericht i.A. des Umweltbundesamt, Umlandverband Frankfurt, 2. Auflage, Frankfurt a.M. 1980;
- [V03] Vester, F.; Ausfahrt Zukunft, Strategien für den Verkehr von morgen, W. Heyne Verlag, München 1990;
- [V04] Vester, F.; Ballungsgebiete in der Krise, Deutscher Taschenbuch Verlag, München 1983;
- [V05] Vester, F.; Methodenhandbuch zum Sensitivitätsmodell, Studien-
gruppe für Biologie und Umwelt, 6. Auflage, München 1994;
- [V06] VENSIM; The Ventana Simulation Environment, Vensim PLE
Version 1.62-11, 1988-1996, Ventana Systems Inc.;
- [W01] Weinspach, P.-M., u.a.; Bericht Teil I, Analyse des Brandes am
11. April 1996, Empfehlungen und Konsequenzen für den Rhein-
Ruhr-Flughafen Düsseldorf, Staatskanzlei Nordrhein-Westfalen,
Düsseldorf 1997.