



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

***Dynamische Ansteuerungen  
gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen  
– Ein Konzept zur sicherheitstechnischen Quantifizierung –***

**Dissertation  
zur Erlangung eines Doktorgrades**

im  
**Fachbereich D - Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,  
Sicherheitstechnik**  
der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

**- Abteilung Bauingenieurwesen -**

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Eugen Nachtigall**  
aus Barnaul (Russland)

Wuppertal 2013

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20130827-143616-4

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20130827-143616-4>]



Dieses Werk bzw. sein Inhalt steht unter einer Creative Commons  
Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 3.0 Unported Lizenz.  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.de>

# Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand aus praktischer und theoretischer Beschäftigung mit Aufgaben aus diversen Bereichen des Brandschutzes während meiner Tätigkeit als Assistent am Lehrstuhl für Baustofftechnologie und Brandschutz der Bergischen Universität Wuppertal sowie als Mitarbeiter des Unternehmens Brandschutz Planung Klingsch des Herrn Universitätsprofessors Dr.-Ing. Wolfram Klingsch.

Mein ganz besonderer Dank gilt an erster Stelle Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Wolfram Klingsch, der mich auf die Bedeutung des Themas aufmerksam machte, die Arbeit großzügig förderte und unterstützend begleitete.

Des Weiteren danke ich Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. habil. Josef Börcsök, Universität Kassel, für das Erstellen des Zweitgutachtens und die zahlreichen Anregungen.

Ferner möchte ich allen Kollegen des Unternehmens Brandschutz Planung Klingsch für zahlreiche Hinweise und Anregungen aus der Praxis danken. Die Mitarbeit war stets von hoher gegenseitiger Hilfsbereitschaft und hervorragender Arbeitsatmosphäre gekennzeichnet.

Den Kollegen des Lehrstuhls für Baustofftechnologie und Brandschutz und später des Lehrstuhls für Werkstoffe im Bauwesen des Herrn Universitätsprofessors Dr.-Ing. Steffen Anders sei an dieser Stelle ebenfalls recht herzlich für viele Anregungen und die Unterstützung gedankt. Herrn Universitätsprofessors Dr.-Ing. Steffen Anders danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die aufgebrauchte Geduld und Rücksichtnahme bedanken.



# Abstract

## **Dynamische Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen**

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen spielen bei der Bewältigung von Herausforderungen der Brandsicherheit eine zunehmend wichtigere Rolle. Aufgrund steigender Anforderungen, stetiger technischer Entwicklungen, Vernetzungen und Interaktionen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen untereinander und mit anderen Systemen steigt auch die Komplexität des Gesamtsystems technischer Anlagen von Gebäuden.

Bislang werden gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen überwiegend als autarke Anlagen geplant, errichtet, geprüft und betrieben. Brandfallsteuerungen solcher Anlagen sind überwiegend statischer Natur und berücksichtigen in der Regel weder die dynamische Natur eines Brandereignisses noch Interaktionen zwischen Anlagen. Damit wird das Potential von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen nicht ausgeschöpft.

Die vorliegende Arbeit zeigt Wege, wie gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen sicher gestaltet und dynamisch gesteuert werden können, um adäquat auf das dynamische Brandgeschehen zu reagieren. Hierzu wird ein Modell vorgestellt, mithilfe dessen gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen als ein Gesamtsystem geplant werden können.

## **Dynamic Controls of Fire Protection Systems**

Fire protection systems play an increasingly important role in resolving challenges to fire safety. Due to increasing demands, continuous technical development, networking and interactions of fire protection systems with each other and other systems, also rises the complexity of these systems.

Up to now fire protection systems are primarily designed, built, tested and operated or controlled as stand-alone systems. The fire protection control systems of such systems are therefore predominantly of a static nature and do not take into account the dynamic nature of the fire or the interactions of systems. Thus, the potential of fire protection systems is not fully realized.

This thesis shows ways in which fire protection systems can be built safely and controlled dynamically to respond adequately to the dynamic fire events. For this purpose a model is presented for the planning of fully comprehensive fire protection systems.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Vorüberlegungen . . . . .	1
1.2	Aufgabenstellung . . . . .	2
1.3	Abgrenzung des Themas, Methodik und Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Sicherheitsgerichtete Systeme</b>	<b>5</b>
2.1	Eigenschaften komplexer Systeme . . . . .	6
2.1.1	Anforderungen und Eigenschaften technischer Systeme . . . . .	8
2.1.2	Einordnung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen . . . . .	10
2.2	Dynamische Steuerungen technischer Anlagen . . . . .	10
2.2.1	Grundlagen der Steuerung und Regelung . . . . .	11
2.2.2	Typen und Untersuchungsmethoden dynamischer Steuerungen . . . . .	12
2.2.3	Darstellungsformen dynamischer Steuerungen . . . . .	13
2.3	Sicherheitsgerichtete Anlagen außerhalb des Brandschutzes . . . . .	15
2.3.1	Grundlagen der Sicherheit von Anlagen . . . . .	16
2.3.2	Funktionale Sicherheit . . . . .	19
2.3.3	Quellen und Auswirkungen von Fehlern . . . . .	23
2.3.4	Systemanalyse und Bestimmung von Risiken . . . . .	25
2.3.5	Sicherheit von Hardware . . . . .	27
2.3.6	Sicherheit von Software . . . . .	34
2.3.7	Aktuelle Tendenzen im sicherheitstechnischen Anlagenbau . . . . .	36
2.4	Zusammenfassung . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Gebäudetechnischer Brandschutz</b>	<b>39</b>
3.1	Einordnung des anlagentechnischen Brandschutzes in den ganzheitlichen Brandschutz . . . . .	39

3.2	Aktuelle Tendenzen im anlagentechnischen Brandschutz . . . . .	41
3.3	Elemente gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen . . . . .	43
3.3.1	Sensoren . . . . .	43
3.3.2	Verarbeitende Einheit . . . . .	45
3.3.3	Aktoren . . . . .	45
3.4	Brandmeldeanlage . . . . .	47
3.4.1	Grundlegende Eigenschaften von Brandmeldeanlagen . . . . .	47
3.4.2	Aufbau von Brandmeldeanlagen . . . . .	50
3.4.3	Brandmelder . . . . .	53
3.4.4	Brandmelderzentralen . . . . .	58
3.5	Andere gebäudetechnische Komponenten mit Brandschutzfunktionen . . .	62
3.5.1	Feuerschutz- und Rauchschutzabschlüsse . . . . .	62
3.5.2	Lüftungsanlagen . . . . .	63
3.5.3	Entrauchungsanlagen . . . . .	64
3.5.4	Automatische Löschsysteme . . . . .	67
3.5.5	Inertisierungs- und Sauerstoffreduzierungsanlagen . . . . .	69
3.5.6	Gefahren-Informations-Management-System . . . . .	70
3.5.7	Fluchtwegsteuerungen . . . . .	71
3.5.8	Akustische Alarmierungsanlagen . . . . .	74
3.5.9	Übertragungseinrichtung . . . . .	75
3.5.10	Einbruchmelde- und Videoüberwachungsanlagen . . . . .	75
3.5.11	Abschaltungen von Energieverbrauchern . . . . .	76
3.5.12	Aufzüge und Fahrtreppen . . . . .	77
3.5.13	Gebäudeautomation . . . . .	78
3.5.14	Feuerwehrperipherie . . . . .	79
3.5.15	Sonstige Anlagen . . . . .	82
3.6	Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen und deren Zusammenwirken . . . . .	82
3.6.1	Allgemeine Schutzziele des Brandschutzes . . . . .	82
3.6.2	Besondere Schutzziele des anlagentechnischen Brandschutzes . . .	84
3.6.3	Anforderung aus baurechtlicher Sicht . . . . .	84
3.6.4	Anforderung aus normativer Sicht . . . . .	86
3.6.5	Anforderung aus Sicht der Gebäudenutzer . . . . .	87



3.6.6	Zusammenwirken gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen mit anderen Systemen . . . . .	89
3.6.7	Sicherheit gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen . . . . .	93
3.7	Brandfallsteuerungen und die Steuermatrix . . . . .	95
3.7.1	Ziele von Brandfallsteuerungen . . . . .	95
3.7.2	Erstellung von Steuermatrizen . . . . .	97
3.7.3	Struktur von Steuermatrizen . . . . .	100
3.7.4	Statische Eigenschaften von Brandfallsteuerungen als Regelfall . . .	102
3.7.5	Probleme bei der Umsetzung der Vorgaben der Steuermatrix . . . .	103
3.8	Zusammenfassende Bewertung der Eignung von Komponenten für dynamische Steuerungen . . . . .	105
3.9	Zusammenfassung . . . . .	107
<b>4</b>	<b>Entwicklung dynamischer Steuerungen</b>	<b>109</b>
4.1	Dynamische Systeme . . . . .	109
4.2	Definition und Eigenschaften dynamischer Steuerungen . . . . .	113
4.3	Modell dynamischer Brandfallsteuerungen . . . . .	116
4.3.1	Anforderungen an ein Modell zur Berücksichtigung von dynamischen Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen . .	116
4.3.2	Allgemeine Beschreibung der Eigenschaften und Elemente des Modells . . . . .	117
4.3.3	Relevanz der Dynamik für die Ansteuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen . . . . .	120
4.3.4	Möglichkeiten der Visualisierung . . . . .	121
4.3.5	Umsetzung dynamischer Brandfallsteuerungen . . . . .	124
4.4	Chancen und Risiken des Einsatzes dynamischer Steuerungen . . . . .	125
4.4.1	Bewertung aus baurechtlicher und normativer Sicht . . . . .	126
4.4.2	Bewertung aus anlagentechnischer Sicht . . . . .	127
4.4.3	Bewertung aus Sicht des Gebäudeeigentümers . . . . .	128
4.5	Probabilistisches Modell des individuellen Risikos . . . . .	129
4.5.1	Einleitung . . . . .	129
4.5.2	Philosophie des Modells . . . . .	130
4.5.3	Normierte Zeit und kritische Brandrisikogrößen . . . . .	131
4.5.4	Bestimmung des individuellen Risikos . . . . .	135

4.5.5	Wahrscheinlichkeit der Evakuierung . . . . .	137
4.5.6	Funktionszuverlässigkeit von gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen . . . . .	140
4.5.7	Nachweisführung im Modell . . . . .	142
4.5.8	Beispiel der Nachweisführung im Modell . . . . .	144
4.5.9	Diskussion des Modells . . . . .	146
4.6	Zusammenfassung . . . . .	148
<b>5</b>	<b>Umsetzung dynamischer Steuerungen</b>	<b>151</b>
5.1	Untersuchungen mithilfe numerischer Simulationen . . . . .	151
5.2	Zielsetzung . . . . .	152
5.3	Fallbeispiel 1: Simulation natürlicher Entrauchung einer Halle mit Atrium ohne und mit Berücksichtigung des Windeinflusses . . . . .	152
5.3.1	Aufgabenstellung, Schutzziele und Risikoanalyse . . . . .	154
5.3.2	Bemessung der Rauchableitungsöffnungen und Nachströmflächen	156
5.3.3	Randbedingungen und Vorgaben für die Simulationen . . . . .	157
5.3.4	Qualitativer Vergleich der Ergebnisse . . . . .	160
5.3.5	Quantitativer Vergleich der Ergebnisse . . . . .	162
5.3.6	Anwendung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen . . . . .	165
5.3.7	Anwendung des probabilistischen Modells des individuellen Risikos	167
5.3.8	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	171
5.4	Fallbeispiel 2: Unterschiedliche Brandfallsteuerungen von maschinellen Entrauchungsanlagen in einem Verkehrstunnel . . . . .	172
5.4.1	Aufgabenstellung, Schutzziele und Risikoanalyse . . . . .	172
5.4.2	Randbedingungen und Vorgaben für die Simulationen . . . . .	177
5.4.3	Qualitativer Vergleich der Ergebnisse . . . . .	179
5.4.4	Quantitativer Vergleich der Ergebnisse . . . . .	181
5.4.5	Anwendung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen . . . . .	183
5.4.6	Anwendung des probabilistischen Modells des individuellen Risikos	185
5.4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	189
5.5	Zusammenfassung . . . . .	190
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>191</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>197</b>

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>215</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>217</b>
<b>Glossar</b>	<b>219</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>225</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>229</b>
<b>Anhang A</b>	<b>231</b>
<b>A1 Eingabedatei des Beispiels 1</b> . . . . .	231
<b>A1 Zeichnungen des Beispiels 1</b> . . . . .	235
<b>A2 Eingabedatei des Beispiels 2</b> . . . . .	236
<b>A2 Zeichnungen des Beispiels 2</b> . . . . .	239
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>241</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Vorüberlegungen

Erfahrungen von Feuerwehren und die Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeiten zeigen, dass Brandereignisse dynamische Phänomene sind [96, 194]. Die Dynamik besteht zum einen darin, dass Brandgeschehen sich innerhalb kürzester Zeit verändert, und zum anderen darin, dass viele Ereignisse während eines Brandverlaufs parallel oder gleichzeitig stattfinden und sich die Randbedingungen kontinuierlich oder unstetig verändern können [50].

Um die Auswirkungen eines Brandereignisses auf einen definierten Bereich zu begrenzen, steht neben dem baulichen, dem abwehrenden und dem organisatorischen auch der anlagentechnische Brandschutz zur Verfügung. Die Bedeutung des anlagentechnischen Brandschutzes, also von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen (GB), hat in den vergangenen Jahrzehnten gegenüber anderen Maßnahmen kontinuierlich zugenommen [65, 81].

Die Gründe hierfür sind vielfältig. Als Erstes sind hier die stetige technische Weiterentwicklung und die hohe Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen zu nennen. Ferner verfügen diese Anlagen über Eigenschaften, Möglichkeiten und Vorteile, die andere Brandschutzmaßnahmen nicht aufweisen. Zu den Vorteilen von GB gehört unter anderem, dass diese, wie z. B. eine Sprinkleranlage, das Brandgeschehen automatisch feststellen, diesem entgegenwirken und gleichzeitig die Alarmierung von Personen einleiten können.

Trotz der Vorteile solcher technischer Systeme haben auch GB ihre Grenzen und Unzulänglichkeiten. Aufgrund technischer Entwicklungen ist in der Vergangenheit die Komplexität von Brandschutzeinrichtungen kontinuierlich gewachsen. Mit der Komplexität wachsen auch die Anforderungen an den Umgang mit solchen Anlagen, da diese im Verbund und aufeinander abgestimmt wirken sollen [77]. Gleichzeitig müssen diese Anlagen dem Brandereignis als einem dynamischen Phänomen gerecht werden und diesem effektiv entgegenwirken.

Die neuen technischen Möglichkeiten, die für gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen zur Verfügung stehen, werden derzeit jedoch nicht in vollem Umfang genutzt. Die heute gebräuchlichen Brandfallsteuerungen und Interaktionen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen sind überwiegend statischer Natur und lassen sich meist auf einfachste Ansteuerungen von Anlagen reduzieren, die nach einmaliger Aktion beendet werden.

## **1.2 Aufgabenstellung**

Die Ziele der Arbeit bestehen zum einen darin, ein Modell zu entwickeln, das es ermöglicht, dynamische Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen planbar zu machen, um somit dem dynamischen Phänomen Brand optimal im Verbund mit anderen Maßnahmen des ganzheitlichen Brandschutzes entgegenwirken zu können. Die Gesamtheit von allen interaktiv wirkenden Brandschutzeinrichtungen soll dabei als ein Ganzes betrachtet und als ein System verstanden werden. Die Sicherheit von Brandschutzeinrichtungen wird hierbei ebenfalls berücksichtigt. Das Modell soll praxisorientiert ausgerichtet werden.

Im Einzelnen sollen folgende Punkte betrachtet werden:

- Erarbeitung von Anforderungen und Kriterien von dynamischen Brandfallsteuerungen gebäudetechnischer (Brandschutz-)Einrichtungen
- Eignungsbeurteilung gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen für dynamische Brandfallsteuerungen
- Erarbeitung eines Modells zur Berücksichtigung von dynamischen Brandfallsteuerungen unter der Berücksichtigung von Interaktionen und der Sicherheit von GB für die Praxis
- Erarbeitung von Visualisierungsmöglichkeiten für dynamische Brandfallsteuerungen
- Überprüfung des Modells anhand von Fallbeispielen

## **1.3 Abgrenzung des Themas, Methodik und Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit behandelt dynamische Brandfallsteuerungen in erster Linie aus Sicht des gebäudetechnischen Brandschutzes und der Sicherheitstechnik. Es werden daher z. B. keine elektrotechnischen Beschreibungen von Steuerungen gegeben, sondern vielmehr Möglichkeiten zur anwendungsbezogenen Planung von dynamischen Brandfallsteuerungen aufgezeigt. Der Fokus bei den Betrachtungen der dynamischen Brandfallsteuerungen liegt in erster Linie auf

den Steuerungen von Einrichtungen in Gebäuden und vergleichbaren baulichen Anlagen im Sinne des Baurechts, obwohl sich die Erkenntnisse und Methoden auch auf andere technische Anlagen übertragen lassen.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem gebäudetechnischen Brandschutz, in dem Sinne, dass ansteuerbare oder aktivierbare gebäudetechnische Einrichtungen betrachtet werden, während passive Systeme, wie z. B. trockene Steigleitungen, eine nachgeordnete Rolle spielen [171]. Aspekte und Komponenten des baulichen, organisatorischen und abwehrenden Brandschutzes als Bestandteile des ganzheitlichen Brandschutzes sowie Themen des Explosions- und Arbeitsschutzes werden daher weitgehend ausgeklammert.

Um die oben genannten Ziele der Aufgabenstellung zu erreichen, wird zunächst eine Literaturrecherche zu gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen, zu Brandfallsteuerungen sowie zu Steuerungen von sicherheitsrelevanten Anlagen in anderen Branchen durchgeführt. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und der Beurteilung von einzelnen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen wird das Modell zur Berücksichtigung von dynamischen Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen erarbeitet. Sodann wird im anschließenden Abschnitt anhand von Beispielimplementierungen von dynamischen Ansteuerungen dargelegt, wie diese in konkreten Anwendungen funktionieren und welche Vorteile diese bieten. Danach wird das vorgestellte Modell anhand von Beispielen überprüft. Am Ende der Arbeit werden eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick gegeben.

Die Arbeit gliedert sich insgesamt in sechs Abschnitte. Ausgehend vom einleitenden ersten Abschnitt erfolgt im zweiten und dritten Abschnitt eine Literaturrecherche, in der auf die Grundlagen und Definitionen von sicherheitsrelevanten Anlagen im Allgemeinen und gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Besonderen eingegangen wird. Hierbei werden einzelne Brandschutzeinrichtungen auf die Eignung zur dynamischen Ansteuerung beurteilt.

Im vierten Abschnitt wird das Modell zur Berücksichtigung von dynamischen Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen entwickelt. Hierzu werden zunächst die Anforderungen an solche Steuerungen beschrieben. Sodann wird das Modell erläutert und bewertet. Im fünften Abschnitt wird das entwickelte Modell auf Beispiele angewendet und untersucht.

Die Arbeit schließt mit dem sechsten Abschnitt, in dem eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt und ein Ausblick auf weitere mögliche Untersuchungen zum Thema gegeben werden. Im Anhang werden die verwendete Literatur sowie weitere Informationen aufgeführt.





## 2 Sicherheitsgerichtete Systeme

Unter Sicherheit versteht man die Freiheit oder das Fehlen von unververtretbaren Risiken [189]. Sicherheitsgerichtete Systeme sind daher solche Systeme, die darauf ausgelegt sind, diesen Zustand zu erreichen oder wiederherzustellen. Der Begriff des Systems ist in diesem Zusammenhang und allgemein in der Wissenschaft jedoch nicht eindeutig definiert. Der Grund hierfür ist, dass die Systeme, mit denen Menschen zu tun haben, sehr unterschiedlicher Natur sind, und die Fachdisziplinen den Systembegriff sowie die systemtheoretischen Ansätze sehr vielfältig nutzen. Auch die Sicherheitstechnik mit ihren Grundlagen ist eine Wissenschaft, die gerade erst begonnen hat sich zu manifestieren.

Im Folgenden werden zunächst Eigenschaften komplexer Systeme grundsätzlich beschrieben. Ferner werden dynamische Steuerungen technischer Anlagen allgemein vorgestellt. Schließlich wird die Herangehensweise an sicherheitsgerichtete Anlagen außerhalb des gebäudetechnischen Brandschutzes vorgestellt und die zugehörigen Methoden und Ansätze erläutert. Diese Ausführungen beschreiben die wichtigsten Grundlagen, mit denen sicherheitsgerichtete Einrichtungen auch in Gebäuden sicherer gestaltet werden können.

In unterschiedlichen Fachdisziplinen sind z. T. abweichende Definitionen von ähnlich gelagerten Begriffen und Sachverhalten gängig. Auch in Fachdiskussionen ist immer wieder festzustellen, dass unterschiedliche Personenkreise die fundamentalen Begriffe wie Risiko, Sicherheit, Zuverlässigkeit usw. z. T. unterschiedlich definieren. Die Einführung von Definitionen und deren Erläuterung stellen daher für den Leser eine Grundlage zum besseren Verständnis der in dieser Arbeit verwendeten Begriffe dar.

## 2.1 Eigenschaften komplexer Systeme

Für (sozio-)technische Systeme hat Günther Ropohl aus der allgemeinen Systemtheorie eigene grundsätzliche Konzepte von Systemen entwickelt. In Abbildung 2.1 sind die Konzepte in Anlehnung an seine Ausführungen dargestellt [128].

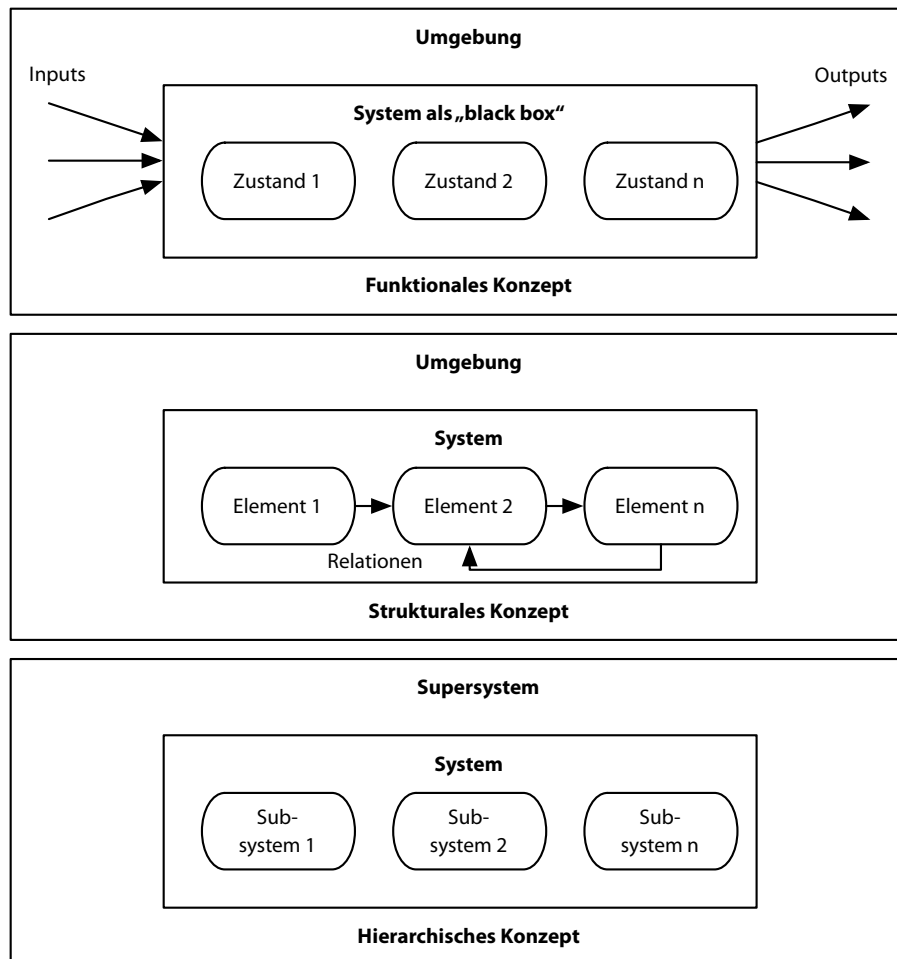


Abbildung 2.1: Konzepte der Systemtheorie in Anlehnung an Ropohl [128]

Zu den wichtigsten Konzeptarten gehören das Funktionale, das Strukturele und das Hierarchische Konzept von Systemen. Jedes Konzept kann dabei bestimmte Aspekte, Eigenschaften und Zusammenhänge von Systemen erklären und ermöglicht eine spezialisierte Betrachtungsweise von Systemen.

Das Funktionale Konzept gestattet es, das System in unterschiedlichen Zuständen zu betrachten. Das System wird gegenüber der Umgebung als abgegrenzte „black box“ betrachtet und

wechselwirkt über In- und Outputs mit dieser. Bei diesem Konzept steht das Verhalten des Systems in seiner Umgebung im Vordergrund.

Das Strukturelle Konzept versteht das System als eine Ganzheit miteinander verknüpfter Elemente. Es ermöglicht es, die Wechselwirkungen und Beziehungsgeflechte zwischen den Elementen eines Systems zu untersuchen. Diese kennzeichnen das jeweilige System. Hierbei spielen die Relationen zwischen den Elementen eine wichtige Rolle, da die Elemente nicht losgelöst voneinander betrachtet werden, sondern in ihren Interdependenzen mit anderen Teilen innerhalb des Systems zu sehen sind.

Das Hierarchische Konzept betrachtet das System aus der Perspektive von Subsystemen und untersucht Hierarchiestufen in diesen. Hierarchische Systeme haben in der Regel mehrere Stufen von Super- und Subsystemen. Das System selbst erhält keine In- und Outputs aus der Umgebung, sondern ist vielmehr in ein Supersystem integriert, mit dem es in Beziehung steht.

Diese drei Systemkonzepte schließen einander nicht aus, sondern können auf dasselbe System angewendet und miteinander verknüpft werden, um die Zusammenhänge in z. B. technischen oder soziotechnischen Systemen, wie das des ganzheitlichen Brandschutzes insgesamt, besser zu verstehen.

***Definition: System***

*Ein System besteht aus einer Reihe von Elementen, die in Beziehungen und Verbindungen zueinander stehen und eine gewisse Ganzheitlichkeit oder eine Einheit bilden [105, 148, 172].*

Diese Definition ist so weit gefasst, dass sehr viele Phänomene und Sachverhalte darunterfallen. Um ein bestimmtes System genauer zu beschreiben, werden daher seine Eigenschaften, Wechselwirkungen, Zustände, Elemente und Subsysteme sowie Systemgrenzen spezifiziert [35].

Häufig werden Systeme als komplex bezeichnet. Solche Systeme sind von besonderem Interesse, da sie in der realen Welt weitverbreitet sind und von vielen unterschiedlichen Fachdisziplinen untersucht werden. Die Kennzeichen komplexer Systeme sind:

***Definition: komplexes System***

*Ein komplexes System besteht aus einer großen Anzahl von wechselwirkenden Elementen. Die Wechselwirkungen zwischen den Elementen solcher Systeme sind oft nichtlinear und dynamisch [101, 113].*

Komplexe Systeme können oft nur schwer mit den herkömmlichen Methoden verstanden, modelliert und gesteuert werden. Neuere Entwicklungen der Systemtheorie tragen zum Verständnis komplexer Systeme bei [3]. Neue systemtheoretische Ansätze zum Verständnis komplexer Systeme, zusammen mit technologischem Fortschritt in der Elektronik, Sensorbau und anderen Bereichen, helfen traditionelle, aber auch neue Probleme auf unkonventionelle Art zu lösen [5].

Diese neuen Ansätze eröffnen den Weg für neue Produkte und effizienten Betrieb von komplexen technischen Systemen. Komplexe Systeme und intelligente Steuerungen werden in verschiedenen Disziplinen und Branchen eingesetzt und geben adäquate Lösungsmöglichkeiten für vielfältige Problemstellungen. Hierbei können das Verständnis von komplexen Systemen und neue Methoden von verschiedenen Disziplinen auf andere Bereiche und Branchen übertragen werden [141].

### **2.1.1 Anforderungen und Eigenschaften technischer Systeme**

Kennzeichen technischer Systeme sind, dass sie von Menschen geschaffen werden, also künstlich sind, und bestimmten Zwecken dienen.

#### ***Definition: technisches System***

*Ein technisches System ist ein von Menschen oder einem anderen technischen System geschaffenes künstliches und nutzungsorientiertes (Sach-)system, das in seiner natürlichen, technischen und gesellschaftlichen Umgebung Masse, Energie und Informationen zielorientiert verändert. (In Anlehnung an Ropohl [128]).*

Technische Systeme sind oft komplex, da sie in der Regel aus einer großen Anzahl von wechselwirkenden Komponenten oder Subsystemen bestehen bzw. viele Hierarchien und Interdependenzen aufweisen können (vgl. Abbildung 2.1; Hierarchisches Konzept). Systeme können mithilfe der Systemtheorie, wie zuvor beschrieben, je nach Fragestellung nach unterschiedlichen Konzepten betrachtet werden.

Die Wechselwirkungen zwischen den Elementen in technischen Systemen sind oft nichtlinear und dynamisch. Dies bedeutet, dass solche Wechselwirkungen sich über die Zeit und z. T. nach noch nicht verstandenen Gesetzmäßigkeiten entwickeln. Hinzu kommt häufig die Wechselwirkung von technischen Systemen mit Menschen. Es kann daher sinnvoll sein, den Menschen

und die jeweilige technische Anlage als ein Gesamtsystem mit jeweiligen Subsystemen zu betrachten [30].

Die Wechselwirkungen zwischen Mensch und technischen Systemen sind, wie die systeminternen Zusammenhänge, ebenfalls häufig dynamisch. Dies führt zur Komplexität der Systeme, die mit geeigneten Methoden und Verfahren beherrscht werden kann [2]. Aufgrund vorhandener Möglichkeiten und der Komplexität technischer Systeme werden an diese häufig vielfältige und hohe Anforderungen gestellt. In Abbildung 2.2 sind die wichtigsten Anforderungen an ein technisches System dargestellt.

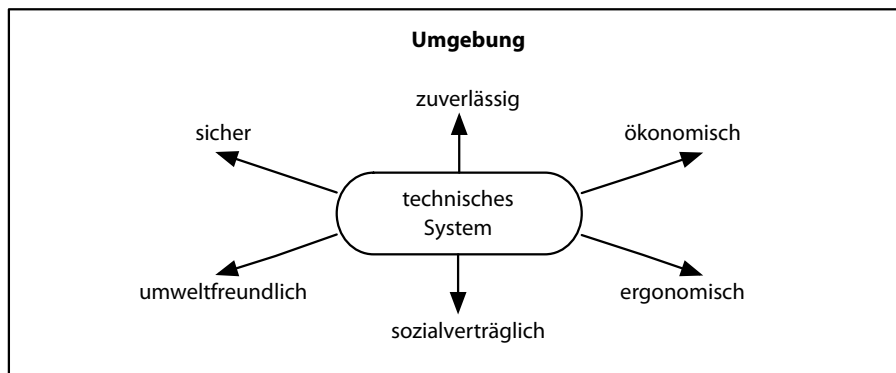


Abbildung 2.2: Anforderungen an ein technisches System in Anlehnung an [103]

Aus der Bandbreite von Anforderungen sind zunächst die Sicherheitsanforderungen zu nennen. Zu den wichtigsten Anforderungen dieser Kategorie gehören die Sicherheits- und die Zuverlässigkeitsanforderungen an technische Systeme. Weitere wichtige Anforderungen sind ökonomischer und ökologischer Natur. Auch hinsichtlich der Ergonomie sowie der Einwirkungen auf den Menschen bzw. die Gesellschaft bestehen Anforderungen an technische Systeme [103].

Die hier exemplarisch genannten Anforderungen an technische Systeme stehen häufig in Widerspruch oder zumindest in Konkurrenz zueinander. Ein wichtiges Ziel der Gestaltung des jeweiligen technischen Systems besteht daher darin, die Anforderungen gegeneinander abzuwägen, um zu einem hinsichtlich der unterschiedlichen Anforderungen ausgewogenen System im Sinne einer Optimierungsstrategie zu kommen. Hierfür sind die Beteiligung aller betroffenen Personenkreise sowie ein interdisziplinärer Dialog, der über die klassischen Methoden der jeweiligen Fachdisziplin hinausgeht, erforderlich.

### 2.1.2 Einordnung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen, wie z. B. Brandmelde- oder Entrauchungsanlagen (allgemeine Definition von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen siehe Abschnitt 3.1 auf Seite 39) und deren Steuerungen, die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen, weisen Systemeigenschaften auf, die eindeutig die Komplexität dieser Anlagen belegen [131, 132]. In Tabelle 2.1 sind allgemeine Systemeigenschaften von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen exemplarisch dargestellt.

<b>Ausprägung/ Eigenschaft</b>	<b>Bezug auf gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen</b>
<b>Anzahl der Elemente</b>	<b>groß</b>
<b>Ähnlichkeit/Variabilität der Elemente</b>	<b>in vielen Merkmalen verschieden</b>
<b>Anzahl der Beziehungen</b>	<b>groß</b>
<b>Dichte der Beziehungen, Vernetzungsgrad</b>	<b>groß</b>

*Tabelle 2.1: Systemeigenschaften von GB*

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen kommen planmäßig überwiegend in größeren Bauwerken oder Sonderbauten im Sinne der Musterbauordnung (MBO) u. a. als Kompensationen von Abweichungen zum Einsatz. Hinzu kommt, dass in diesen Gebäuden häufig mehrere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen installiert werden. Aus diesen Gründen ist die Anzahl der Elemente solcher Anlagen in der Regel groß. Darüber hinaus sind die Elemente der Anlagen in ihren Merkmalen verschieden, da sie unterschiedliche Funktionen erfüllen. Die Anzahl der Beziehungen zwischen den Elementen einzelner Anlagen sowie die Dichte der Beziehungen bzw. der Vernetzungsgrad sind daher besonders groß [132].

Die oben beschriebenen Eigenschaften führen zu der Feststellung, dass es sich bei gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen um komplexe technische Systeme handelt. Um das Zusammenwirken von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen besser zu verstehen, werden in Abschnitt 3 daher zunächst die Eigenschaften einzelner Einrichtungen dargestellt.

## 2.2 Dynamische Steuerungen technischer Anlagen

Steigende Sicherheitsanforderungen und ökonomische Randbedingungen erhöhen in einer globalisierten Welt stetig auch die Anforderungen an technische Anlagen. Die Antwort auf diese

Herausforderungen liegt häufig in der Verwendung moderner, technisch effizienter, qualitativ hochwertiger und sicherer Anlagen. Die Folge des Einsatzes solcher Anlagen ist die Zunahme der Komplexität, deren Beherrschung einen entsprechenden Aufwand in allen Lebenszyklus-Phasen der Anlage verursacht.

Neben der stetigen Weiterentwicklung der Hardware von Anlagen werden auch Effizienzsteigerungen durch Einsatz von neuen Möglichkeiten der Steuerung und Regelung erreicht [230]. Moderne technische Anlagen werden in vielen Branchen, wie z. B. der Prozesstechnik oder der chemischen Industrie, bereits dynamisch gesteuert. Dies bedeutet, dass die Anlagen je nach Bedarf ereignisbezogen oder aber zeitbasiert gesteuert werden. Hierdurch erreichen die Anlagen die erforderliche Effizienz [92]. Unter Dynamik eines Systems bzw. einer Anlage wird im Sinne dieser Arbeit Folgendes verstanden:

***Definition: Dynamik***

*Unter Dynamik versteht man Veränderungen und Wechselwirkungen zwischen Elementen in einem System und von Elementen selbst über die Zeit [101].*

Veränderungen können idealisiert entweder ereignisbezogen „event-based“ oder aber zeitbasiert „time-based“ stattfinden [132]. Die ereignisbezogene Betrachtung kann jedoch nur bedingt und nie vollständig von der zeitlichen Komponente entkoppelt werden.

### **2.2.1 Grundlagen der Steuerung und Regelung**

Um Steuerungen moderner gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen verstehen zu können, müssen zunächst die Grundbegriffe der Steuerung und Regelung definiert werden [178, 190].

***Definition: Steuern, Steuerung***

*„Das Steuern, die Steuerung, ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken“ [178].*

**Definition: Regeln, Regelung**

*„Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst“ [178].*

Steuerungen und Regelungen von Anlagen werden auf unterschiedlichste und vielfältigste Art und Weise bereits seit langer Zeit eingesetzt [43]. Häufig werden sogenannte Ablaufsteuerungen verwendet. Diese können in prozessabhängige und zeitgeführte unterschieden werden. Bei prozessabhängigen Ablaufsteuerungen sind die Transitionsbedingungen vorwiegend von Signalen aus der gesteuerten Anlage abhängig. Bei zeitgeführten Ablaufsteuerungen sind die Transitionsbedingungen nur von der Zeit abhängig. In der Steuerungspraxis ist der Ablauf sowohl von der Zeit als auch von den Signalen aus dem Prozess abhängig [76, 92].

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen, wie in Abschnitt 3 dargestellt, werden bislang zum größten Teil gesteuert und nicht geregelt. Dies bedeutet, dass es sich in der Regel bei den gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen um offene Wirkungswege handelt, d. h., es findet keine Rückwirkung der zu steuernden Größe auf die Führungsgröße statt [76].

## **2.2.2 Typen und Untersuchungsmethoden dynamischer Steuerungen**

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Grundtypen dynamischer Steuerung, die ereignis- und die zeitbezogene Steuerung, unterschieden. Diese Grundtypen können, obwohl von einander nicht unabhängig, wie in Abschnitten 4 und 5 gezeigt wird, zur Analyse und Planung von Anlagensteuerungen verwendet werden.

Bei der ereignisbezogenen Steuerung handelt es sich um einen Steuerungsalgorithmus, der aufgrund eines vorher definierten Ereignisses, z. B. der Überschreitung eines bestimmten physikalischen Schwellenwertes wie etwa Temperatur oder Gaskonzentration, ausgelöst wird. Als Beispiel kann hierfür die Auslösung eines Brandalarms durch einen automatischen Brandmelder und eine Brandmeldeanlage infolge der Überschreitung einer Brandrauchkonzentration genannt werden.

Der zweite Grundtyp ist die zeitbezogene Steuerung. Bei diesem Typ werden Steuerungsalgo-



rhythmen nach vorher definierten Zeitabschnitten oder zu bestimmten Uhrzeiten oder Tagen ausgelöst. Als Beispiel kann hierfür die regelmäßige Selbstüberprüfung eines sicherheitsgerichteten Systems genannt werden.

Neben den beiden Grundtypen können auch deren Kombinationen zum Erreichen bestimmter Ziele zum Einsatz kommen. Zu diesem Kombinationstyp gehören auch Steuerungen der Systeme durch den Menschen. Diese Steuerungen können entweder zu bestimmten Zeiten und/oder bei bestimmten Ereignissen erfolgen. Durch die Beteiligung des Menschen an Steuerungen können diese auf vielfältigste Art und Weise kombiniert und erweitert werden.

Systeme können mit Methoden der Systemanalyse untersucht werden [16, 70]. Die wesentlichen Ziele der Systemanalyse liegen zum einen darin, die bestehenden Systeme besser zu verstehen, und zum anderen darin, neue Systeme besser und zielgerichteter planen zu können [1]. In Abbildung 2.3 sind die wichtigsten Methoden zur Untersuchung der Dynamik und der Sicherheit von Systemen dargestellt.

Mithilfe der Systemanalyse können u. a. Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalysen durchgeführt werden. Die Sicherheitsanalysen können im Wesentlichen Aspekte der „safety“ und „security“ beinhalten [109]. Die Sicherheitsanalyse im Sinne der „safety“, die von primärem Interesse für diese Arbeit ist, kann in statische und dynamische Analysen unterteilt werden. Das dynamische Systemverhalten, das wie die Sicherheit im Fokus dieser Arbeit steht, kann entweder nach der Methode oder nach der Definition von „Dynamik“ untersucht werden. Für diese beiden Möglichkeiten steht die dynamische Fehlerbaumanalyse, „Dynamic Fault Tree Analysis: DFTA“, als Untersuchungsmethode zur Verfügung. Bei der DFTA handelt es sich um eine Erweiterung der klassischen Fehlerbaumanalyse „Fault Tree Analysis: FTA“ [179, 126]. Bei den Erweiterungen der FTA zur DFTA unterscheidet man die zustandsbasierten Erweiterungen und die Methoden der temporalen Logik. Die Ansätze der temporalen Logik und hier insbesondere der Ansatz „Temporal Fault Tree Analysis: TFTA“ eignen sich für die Analysen von komplexen und sich dynamisch verhaltenden sicherheitsrelevanten Systemen [112, 135].

### **2.2.3 Darstellungsformen dynamischer Steuerungen**

Die Darstellungsformen von dynamischen Steuerungen oder allgemeiner von Dynamik orientieren sich zum einen an dem Zweck, der mit ihnen erreicht werden soll, zum anderen an den Inhalten der Steuerungsmechanismen und dem jeweils betrachteten Teil der zu steuernden

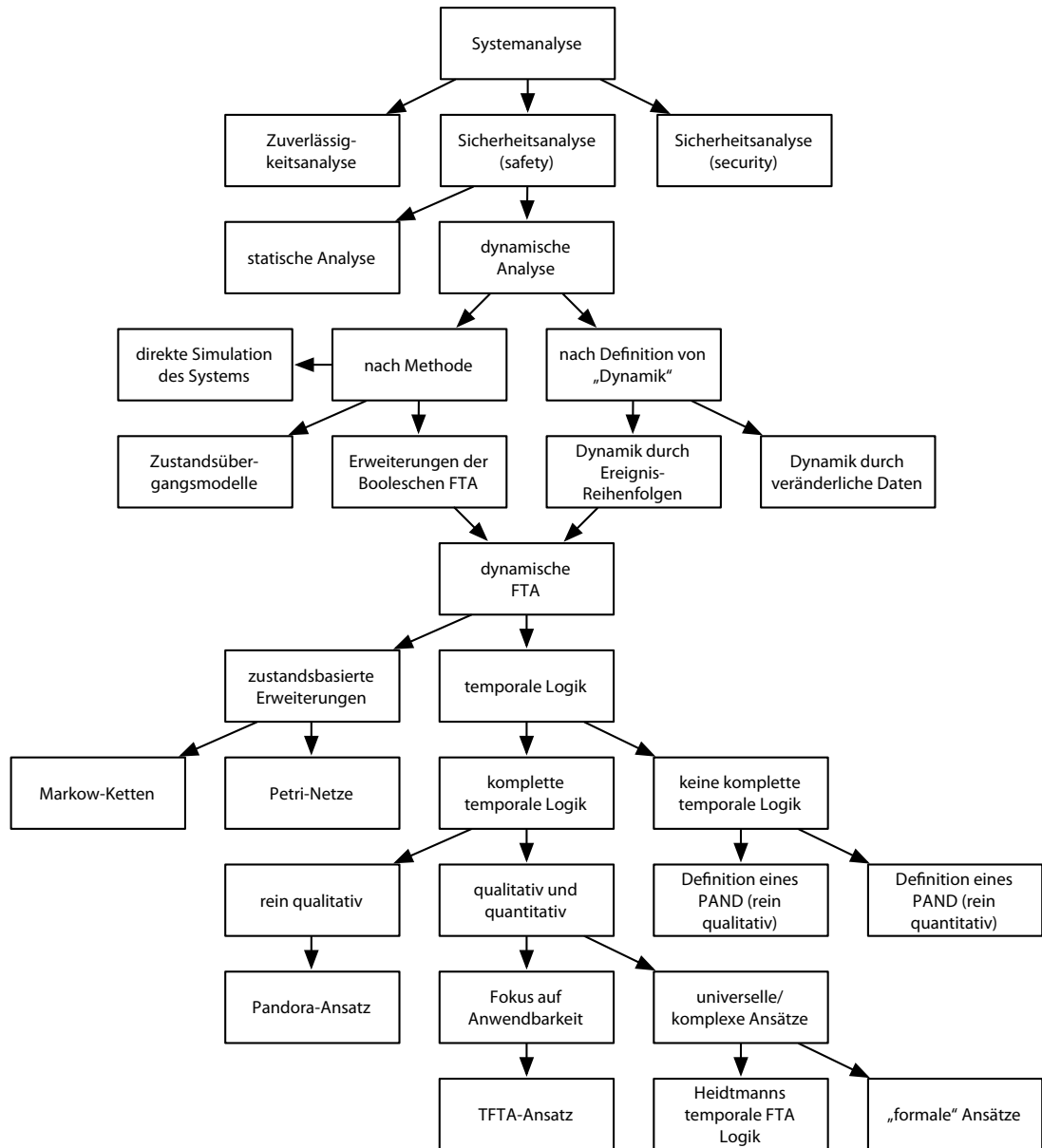


Abbildung 2.3: Methoden zur Berücksichtigung dynamischer Effekte in Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalysen in Anlehnung an [135]

Anlage selbst. Das Ziel der Darstellungen ist es, die dynamischen Steuerungen zu veranschaulichen.

Eine Möglichkeit, dynamische ereignisbezogene Steuerungen oder Systeme darzustellen, ist der Programmablaufplan [181]. In diesem werden die Verarbeitungsfolgen bzw. Schritte eines Ablaufs z. B. in einem Programm dargestellt. Die Verbindungen zwischen den Elementen des Ablaufplans zeigen die Reihenfolgen der Verarbeitungen. Die wichtigsten Elemente des Ablaufplans sind die allgemeine und die manuelle Verarbeitungseinheit und die Auswahlinheit.

Zeitbezogene Steuerungen können z. B. mithilfe eines oder mehrerer Zeitstrahlen dargestellt werden. Eine weitere Möglichkeit für diesen Typ von Steuerungen ist die Darstellung mithilfe von Balkenplänen. Die Vorgänge in Balkenplänen können, neben den Informationen zu Anfangs- und Endzeitpunkten, auch Informationen zu Abhängigkeiten bzw. der Logik enthalten [182]. Komplexere Steuerungen und Abläufe in Systemen können mithilfe von Computeranimationen unter anderem dreidimensional dargestellt werden.

Ferner besteht die Möglichkeit, dynamische Vorgänge mithilfe von mathematischen Ausdrücken wie z. B. der Logik darzustellen. Bei dieser Darstellungsweise ist die Anschaulichkeit in der Regel jedoch nur bei einfachen Zusammenhängen gegeben. Fallbeispiele von Darstellungen dynamischer Zusammenhänge in Systemen sind in Abschnitt 5 zu finden.

## **2.3 Sicherheitsgerichtete Anlagen außerhalb des Brandschutzes**

Sicherheitstechnische Anlagen kommen zum Einsatz, wenn Personen oder Objekte geschützt werden müssen, bei hohen Wertkonzentrationen in Lagerung oder Prozessen oder wenn Stör- und Unfälle zu besonders gravierenden Folgen für Mensch und Umwelt führen würden. In den folgenden Abschnitten sollen zunächst die Grundbegriffe sicherheitstechnischer Anlagen eingeführt und erläutert werden. Anschließend werden Voraussetzungen aus Bereichen außerhalb des Brandschutzes genannt, die es erlauben, sicherheitstechnische Anlagen erfolgreich einzusetzen. Die Darstellung erfolgt vor dem Hintergrund schneller Entwicklungen und neuer Ansätze auf den unterschiedlichen Gebieten sicherheitsgerichteter Anlagen. Abschließend werden daher aktuelle Tendenzen im sicherheitstechnischen Anlagenbau außerhalb des Brandschutzes aufgezeigt. In den Abschnitten 3 bis 5 werden die erarbeiteten Grundlagen auf gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen übertragen.

### 2.3.1 Grundlagen der Sicherheit von Anlagen

Technische Systeme, die sicherheitsrelevante Prozesse steuern, werden mit zunehmender Komplexität der Prozesse selbst immer komplexer [35]. Die Gründe für diesen allgemeinen Trend liegen in den steigenden Anforderungen, welche diese Systeme erfüllen sollen. Die Anforderungen bestehen hinsichtlich technischer Leistungsfähigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und der Sicherheit der Systeme. Zeitgleich zu den steigenden Anforderungen finden sicherheitsrelevante Systeme eine zunehmende Verbreitung in diversen Branchen und in vielfältigsten Anwendungsgebieten [162].

Die sicherheitsrelevanten Systeme können aufgrund der unterschiedlichen Einsatzgebiete verschiedenste Eigenschaften aufweisen. Zu den wichtigsten systemspezifischen Eigenschaften in nahezu allen sicherheitsrelevanten Systemen gehören häufig folgende Merkmale [14, 126, 145]:

- Zuverlässigkeit (insbesondere *Funktionszuverlässigkeit*)
- Verfügbarkeit
- Fehlersicherer Betrieb
- Systemintegrität
- Datenintegrität
- Systemwiederherstellung
- Wartbarkeit
- Verlässlichkeit

Im weiteren Verlauf werden die genannten Begriffe vorgestellt und erläutert.

#### ***Definition: Zuverlässigkeit***

*„Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsanforderung zu erfüllen“ (nach DIN 40041 [180]).*

Die Zuverlässigkeit ist demnach die Fähigkeit eines Systems oder einer Komponente, über einen gegebenen Zeitraum hinweg und unter bestimmten Randbedingungen, korrekt zu funktionieren [6]. Die Zuverlässigkeitsfunktion  $R(t)$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit in einem Betrachtungszeitraum  $(0 \dots t)$  funktionsfähig ist [14]. Die Definition

der Zuverlässigkeit beinhaltet insbesondere den Bezug zum Zeitraum. Der relevante Zeitraum kann dabei je nach Aufgabe des Systems von wenigen Sekunden bis zu Jahrzehnten reichen. Im Allgemeinen nimmt die Zuverlässigkeitsfunktion in technischen Systemen, etwa aufgrund von Alterungsprozessen oder Teilausfällen von Komponenten, über die Zeit ab.

Die Zuverlässigkeit ist besonders wichtig bei Systemen, in denen ein ununterbrochener und kontinuierlicher Betrieb gewährleistet werden soll (z. B. Brandmeldesystem zur kontinuierlicher Überwachung eines Gebäudes). Ferner ist die Zuverlässigkeit wichtig bei Systemen, die im Anforderungsfall (z. B. bei einer automatischen Löschanlage im Brandfall) korrekt funktionieren sollen. Um diesen Aspekt hervorzuheben wird in der VDI 4003 der Begriff der *Funktionszuverlässigkeit* eingeführt, bei dem die quantitative Ermittlung einer Überlebenswahrscheinlichkeit der jeweiligen Anlage im Anforderungsfall im Vordergrund steht [215].

**Definition: Verfügbarkeit**

„Die Verfügbarkeit eines Systems ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein System zu einem Zeitpunkt korrekt funktioniert“ (nach DIN 40041 [180] und [14]).

Während sich die Zuverlässigkeit auf einen Zeitraum bezieht, bezieht sich die (momentane) Verfügbarkeit auf einen Zeitpunkt. Die Verfügbarkeit eines Systems lässt sich als das Verhältnis der Dauer, in dem das System korrekt funktioniert, zu der Gesamtbetriebsdauer des Systems beschreiben. Bei reparierbaren Systemen kann die mittlere Verfügbarkeit „point availability (PA)“ wie folgt bestimmt werden:

$$PA = \frac{MTTF}{MTBF} \quad (2.1)$$

Dabei bedeutet *MTBF*: die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen „Mean Time Between Failures“. Diese Größe setzt sich zusammen aus:  $MTBF = MTTF + MTTR$ : der Summe der mittleren Zeit bis zum Ausfall „Mean Time To Failure: *MTTF*“ und dem Mittelwert der Reparaturzeit „Mean Time To Repair: *MTTR*“. Die meisten derzeit eingesetzten sicherheitsgerichteten Systeme sind zum großen Teil reparable Systeme. Durch den Einsatz solcher Systeme, die selten ausfallen und schnell repariert werden können, wird eine hohe Systemverfügbarkeit und -sicherheit erreicht.

Die Verfügbarkeit von sicherheitskritischen Systemen ist insbesondere dann wichtig, wenn das System nicht kontinuierlich arbeitet, sondern nur in selten vorkommenden Betriebszuständen benötigt wird (z. B. ein Sprinklersystem im Brandfall) [58]. Die Sicherheit des Systems hängt in

diesem Fall von der Wahrscheinlichkeit ab, ob das System bei Anforderung korrekt funktioniert. In diesem Fall kann der Verfügbarkeit eine größere Rolle als der Zuverlässigkeit beigemessen werden (für Definitionen hier und weiter [14], [11]).

### ***Fehlersicherer Betrieb***

Vom fehlersicheren Betrieb „Fail-safe“ eines Systems kann gesprochen werden, wenn das System im Falle des Auftretens eines Fehlers automatisch in einen sicheren Zustand übergeht bzw. falls dieser bereits erreicht ist, in diesem verbleibt. Das System kann als „fehlersicher“ bezeichnet werden, wenn das System auch dann in einen sicheren Zustand übergeht, wenn Zweifel daran bestehen, ob das System noch korrekt funktioniert.

### ***Definition: Systemintegrität***

*„Die Integrität eines Systems ist seine Fähigkeit, Fehler in seinem eigenen Betrieb zu erkennen und einen Systembediener zu informieren.“*

Bei der Systemintegrität ist insbesondere die Fehlererkennung und Fehlermeldung wichtig. Dies erlaubt, auf die Fehler noch vor dem Anforderungsfall zu reagieren, die Fehler zu beheben oder Ersatzmaßnahmen zu ergreifen.

### ***Definition: Datenintegrität***

*„Datenintegrität ist die Fähigkeit eines Systems, der Zerstörung seiner eigenen Datenbank vorzubeugen und Fehler zu erkennen und evtl. zu korrigieren, die in diesem Zusammenhang auftreten.“*

Die Datenintegrität ist insbesondere dann wichtig, wenn der aktuelle Systemzustand aufbauend auf den Aufzeichnungen vorhergegangener Systemzustände beeinflusst oder bestimmt wird. Die Historie des Systems spielt hierbei für den Ist-Zustand eine wichtige Rolle.

### ***Systemwiederherstellung***

Bei der Systemwiederherstellung handelt es sich um eine Eigenschaft des Systems, bei dem das System sich bei Ausfällen wieder neu startet und hierzu dem Bediener eine Meldung ausgibt.

### ***Definition: Wartung, Wartbarkeit***

*„Wartung ist die Tätigkeit, ein System in seinem erwünschten Betriebsverhalten zu erhalten oder in dieses Verhalten zurückzuführen. Wartbarkeit ist die Fähigkeit, gewartet zu werden.“*

Bei der Wartbarkeit geht es zum einen um die Fähigkeit eines Systems gewartet zu werden, zum anderen aber auch um die Zeit, in der die Wartung eines Systems durchgeführt werden kann. Des Weiteren ist bei der Wartung eines Systems von Bedeutung, ob das System während der Wartungszeit seine Sicherheitsfunktionen zumindest teilweise erfüllt. Ein weiterer Aspekt der Wartbarkeit ist der Umstand, dass durch die Wartung möglichst keine Fehler neu in das System kommen sollten.

***Definition: Verlässlichkeit***

*„Verlässlichkeit ist die Eigenschaft eines Systems, die es rechtfertigt, Vertrauen in das System zu setzen.“*

Die Verlässlichkeit umfasst die Aspekte der Zuverlässigkeit, der Verfügbarkeit, der Sicherheit, der Wartbarkeit sowie weitere wichtige Aspekte sicherheitskritischer Systeme. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller Aspekte können Konflikte zwischen den Zielgrößen entstehen. In diesen Fällen ist eine Abwägung zwischen den einzelnen Anforderungen erforderlich.

Ein ganzheitlicher Ansatz für die Betrachtung der Sicherheit sicherheitsrelevanter Anlagen ist der Ansatz der funktionalen Sicherheit nach DIN EN/IEC 61508 [188]. Dieser Ansatz wird im Folgenden lediglich in den Grundzügen vorgestellt, da alleine die Normenreihe Hunderte von Seiten umfasst und stetig weiterentwickelt wird.

### **2.3.2 Funktionale Sicherheit**

Funktionale Sicherheit bedeutet allgemein, dass Komponenten oder Systeme ihre sicherheitsgerichtete Aufgabe entsprechend des abzudeckenden Risikos korrekt erfüllen. Diese Aufgabe oder Funktion wird auch beim Auftreten interner Fehler und Ausfälle bzw. bei Störeinflüssen aus der Systemumwelt ausgeführt oder aber es wird ein vordefinierter sicherer Zustand eingenommen [14, 93, 143].

Speziell für sicherheitsrelevante Systeme wurde die Grundsicherheitsnorm DIN EN/ IEC 61508 im Wesentlichen von der International Electrotechnical Commission (IEC) entwickelt [188]. In Teil 4 der Norm wird der Begriff „funktionale Sicherheit“ wie folgt definiert:

**Definition: Funktionale Sicherheit**

„Teil der Gesamtsicherheit, bezogen auf die EUC und das EUC-Leit- oder Steuerungssystem, der von der korrekten Funktion des sicherheitsbezogenen E/E/PE-Systems und anderer risikomindernder Maßnahmen abhängt“ [188].

Die englische Abkürzung EUC steht für „equipment under control“.

**Definition: EUC-Einrichtung (equipment under control)**

„Einrichtung, Maschine, Apparat oder Anlage, verwendet zur Fertigung, Stoffumformung, zum Transport, zu medizinischen oder anderen Tätigkeiten“ [188].

Die Abkürzung E/E/PE-System oder E/E/PES steht für:

**Definition: E/E/PE-System (programmierbares elektronisches System)**

„System zur Steuerung, zum Schutz oder zur Überwachung, basierend auf einem oder mehreren programmierbaren elektronischen Geräten, einschließlich aller Elemente des Systems wie z. B. Energieversorgung, Sensoren und anderen Eingabegeräten, Datenverbindungen und anderen Kommunikationswegen sowie Aktoren und anderen Ausgabeeinrichtungen“ [188].

Um eine Herangehensweise an die Probleme sicherheitsgerichteter Systeme zu ermöglichen, definiert die Norm einen Sicherheitslebenszyklus. Mithilfe dieser und weiterer Betrachtungen und Maßnahmen wird das jeweils erforderliche Sicherheits-Integritätslevel (SIL) erreicht. In Abbildung 2.4 wird der Gesamt-Sicherheitslebenszyklus eines Systems dargestellt (hier und weiter [188], [14]).

**Definition: Safety Integrity Level (SIL), dt.: Sicherheits-Integritätslevel**

„Eine von vier diskreten Stufen, die einem Wertebereich der Sicherheitsintegrität entsprechen, wobei der Sicherheits-Integritätslevel 4 die höchste Stufe der Sicherheitsintegrität und der Sicherheits-Integritätslevel 1 die niedrigste darstellt“ [188].

Im Gesamt-Sicherheitslebenszyklus wird zunächst, in Phase 1, ein Konzept zum Gesamtsystem und seiner Umgebung aufgestellt. In das Konzept fließen wahrscheinliche Gefahrenquellen ebenso ein wie die Anforderungen aus Vorschriften.

In Phase 2 werden Festlegungen bezüglich des gesamten Anwendungsgebietes des Systems getroffen. Darauf aufbauend wird in Phase 3 eine Gefährdungs- und Risikoanalyse durchgeführt. In der Gefährdungs- und Risikoanalyse müssen die Gefahren und potentiell gefährliche



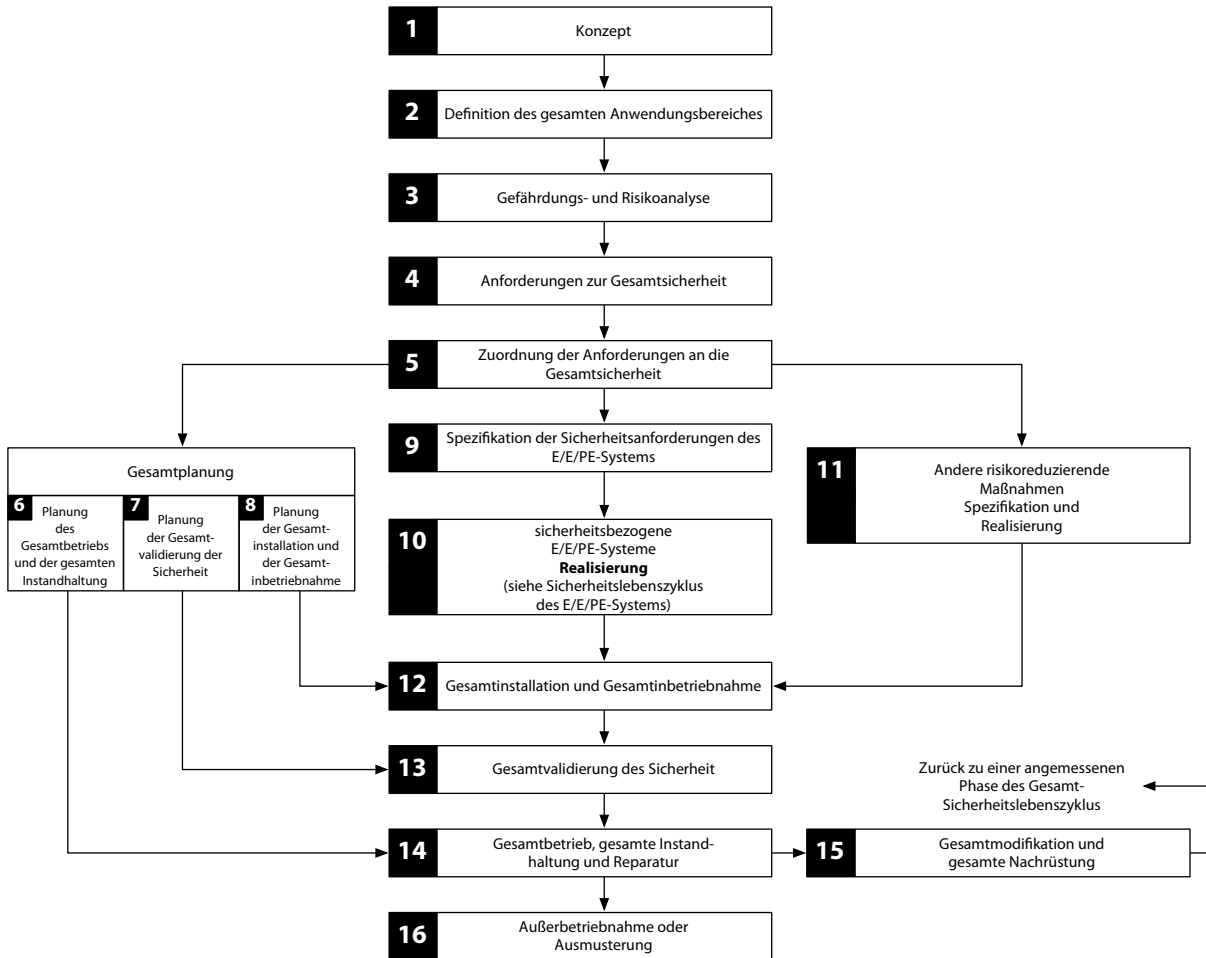


Abbildung 2.4: Gesamt-Sicherheitslebenszyklus nach [188]

Ereignisse des EUC betrachtet werden [24]. Des Weiteren müssen Wahrscheinlichkeiten und erkennbare Folgen von gefährlichen Ereignissen bestimmt werden. In Phase 4 werden die Anforderungen an die Gesamtsicherheit wie auch andere Systeme zur Risikoreduzierung festgelegt. In Phase 5 werden die sicherheitsbezogenen Systeme festgelegt, die zum Erreichen der funktionalen Sicherheit dienen. Hierzu werden verschiedene SIL festgelegt, welche der jeweiligen Sicherheitsfunktion zugeordnet werden.

In Phase 6 bis 8 folgt anschließend die Gesamtplanung. Diese Phasen beinhalten die Planung zum Gesamtbetrieb und zur Instandhaltung, zur Validierung der Sicherheit und zur Inbetriebnahme des Systems.

In Phase 9 sind die Spezifikationen der Sicherheitsanforderungen des E/E/PE-Systems zu planen. Die sicherheitsbezogenen Systeme müssen hierbei den Sicherheitsanforderungen ent-

sprechen. In dieser wichtigen Phase werden sowohl die Hard- als auch die Software vom System entwickelt.

In der anschließenden Phase 10 folgt die Realisierung des zuvor spezifizierten Systems. In Phase 11 werden noch andere in der Regel erforderliche, risikomindernde Maßnahmen festgelegt. Auf die Gesamtinstallation in Phase 12 folgt die Gesamtvalidierung der Sicherheit in Phase 13. Phase 14, die Phase des Gesamtbetriebs, beinhaltet ebenfalls die Instandhaltung und die Reparatur des Systems. Hierbei können in Phase 15 Modifikationen auftreten, die das System in vorherige Phasen zurückbringen. In Phase 16 wird das System außer Betrieb genommen. Damit wird der Gesamt-Sicherheitslebenszyklus des Systems beendet [14].

Die IEC/DIN EN 61508 besteht derzeit aus insgesamt sieben Teilen. Abbildung 2.5 gibt einen Überblick.

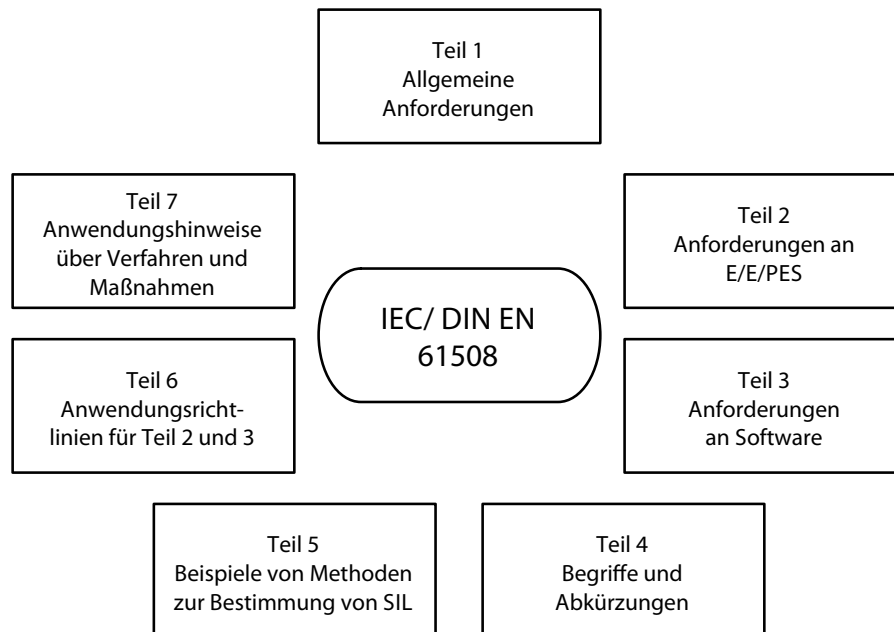


Abbildung 2.5: Überblick über die Teile der IEC/DIN EN 61508 in Anlehnung an [14] und [188]

Die sieben Teile der Norm decken vollständig den zuvor vorgestellten Gesamt-Sicherheitslebenszyklus ab. Zur Sicherheits-Grundnorm gehören dabei die Teile 1 bis 4 dieser Normenreihe. Diese Teile sind grundlegend, während die Teile 5 bis 7 Richtlinien für die Anwendung der vorhergehenden Teile sind. Die Norm ermöglicht unter der Betrachtung des Gesamt-Lebenszyklus und der Beachtung aller Teile eine systematische und risikobasierte Herangehensweise an sicherheitsrelevante Probleme.

Ferner liefert die Norm Methoden für die Entwicklung der Spezifikation der Sicherheitsanforderungen, die notwendig sind, um die geforderte funktionale Sicherheit des sicherheitsbezogenen E/E/PE-Systems zu erreichen. Dazu verwendet sie das SIL für die Spezifikation der Zielvorgabe der Sicherheitsintegrität der Sicherheitsfunktionen. Für die Festlegung der Anforderungen des SIL benutzt sie einen risikobasierten Lösungsansatz. Für die sicherheitsbezogenen Systeme wird dabei eine numerische Ausfallgrenze gesetzt, welche das Sicherheitsniveau quantifiziert. Die Norm ist allgemeingültig und daher auf alle sicherheitsbezogenen Systeme übertragbar und anwendbar [14].

Da die Norm eine Sicherheits-Grundnorm ist, ist es möglich oder z. T erforderlich, sie an branchenspezifische Anforderungen und Randbedingungen anzupassen [209]. In dieser Richtung sind in der Vergangenheit z. B. in der Prozess- und Luftfahrttechnik erhebliche Fortschritte erzielt worden.

Auch für die Erfordernisse der Baubranche gibt es vielversprechende Ansätze, die sich aber noch in der Entwicklungsphase befinden und daher weitere Entwicklungsarbeit erfordern. Diese Anstrengungen sind jedoch notwendig und bieten Chancen für die Entwicklung der Sicherheit und Effizienz von sicherheitsrelevanten Systemen in Gebäuden [195].

### **2.3.3 Quellen und Auswirkungen von Fehlern**

Fehler und Ausfälle in technischen Systemen können zum Teil verheerende Folgen haben. Diese Aussage trifft vor allem auf sicherheitsrelevante Systeme zu, die für die Sicherheit von Personen und zum Erreichen anderer Schutzziele konzipiert sind. Zur Validierung sicherheitsgerichteter Anwendungen werden daher spezielle Kennzahlen der Fehlerraten verwendet, die im Folgenden vorgestellt werden (hier und weiter [12, 14, 15]).

#### ***Definition: Fehler***

*„Ein Fehler ist die Nichterfüllung einer vorgesehenen Forderung durch einen Merkmalswert. Ein Fehler ist also ein Zustand.“*

Eng im Zusammenhang mit Fehler steht der Begriff des Ausfalls eines Systems.

**Definition: Ausfall**

„Ein Ausfall ist das Aussetzen der Ausführung einer festgelegten Aufgabe. Als Ausfall wird somit der Übergang vom fehlerfreien in einen fehlerhaften Zustand bezeichnet. Der Ausfall ist somit ein Ereignis.“

Die Bewertung von Sicherheitssystemen erfolgt anhand von Daten und Eigenschaften dieser Systeme. Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung ist das der Verteilung von Fehlern über den Lebenszyklus eines Systems hinweg. Bei der Fehlerbetrachtung unterscheidet man zunächst zwischen sicheren und gefährlichen Fehlern. Die Systematik der Fehler ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

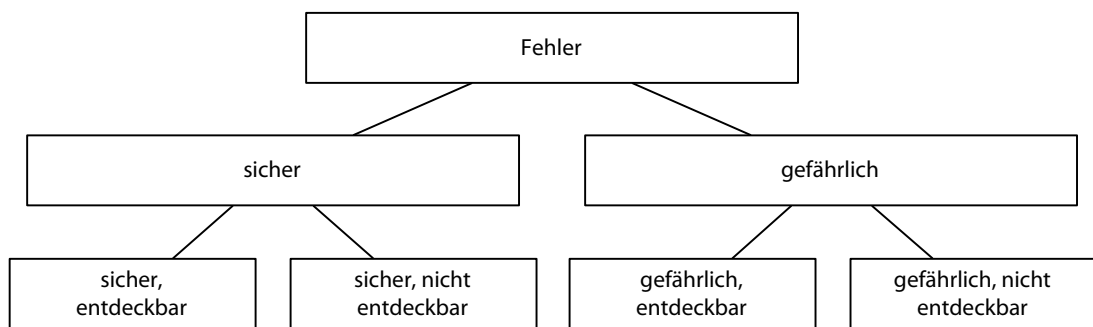


Abbildung 2.6: Systematik der Fehler

Bei den sicheren Fehlern unterscheidet man weiter die sicheren entdeckbaren und sicheren nicht entdeckbaren Fehler. Bei Fehlern, die als sichere Fehler bezeichnet werden, handelt es sich um Fehler, die keinen Einfluss auf die sichere Funktion des Systems haben. Die gefährlichen Fehler haben dagegen einen Einfluss auf die sichere Funktion eines Systems. Diese Fehler werden in gefährliche entdeckbare und gefährliche nicht entdeckbare Fehler unterteilt.

Alle Ausfälle in einer betrachteten Zeiteinheit werden durch die Basis-Ausfallrate  $\lambda_B$  beschrieben. Diese setzt sich zusammen aus:

$$\lambda_B = \lambda_S + \lambda_D \tag{2.2}$$

Bei  $\lambda_S$  handelt es sich um die sicheren Fehlerraten. Diese setzen sich weiter zusammen aus:

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU} \tag{2.3}$$

Wobei  $\lambda_{SD}$  die sicheren entdeckbaren und  $\lambda_{SU}$  die sicheren nicht entdeckbaren Fehlerraten

sind. Mit  $\lambda_D$  werden die gefährlichen Fehlerraten bezeichnet. Diese setzen sich zusammen aus:

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (2.4)$$

Wobei  $\lambda_{DD}$  die gefährlichen entdeckbaren und  $\lambda_{DU}$  die gefährlichen nicht entdeckbaren Fehlerraten sind.

Bei gefährlichen entdeckbaren Fehlern kann bei Ausbildung entsprechender Redundanz des Sicherheitssystems das Gesamtsystem in einen noch sicheren Zustand versetzt werden. Weitaus kritischer sind die gefährlichen nicht entdeckbaren Fehler, da diese ohne die Kenntnis des Betreibers bis zur Abschaltung oder bis zum Systemversagen in diesem verbleiben [13].

Die Kenntnis des Verhaltens eines Systems und die Kenntnis von potentiellen Fehlern in einem System sind die Voraussetzungen für die Systemanalyse und die Bestimmung von Risiken, welche im Folgenden beschrieben werden.

### **2.3.4 Systemanalyse und Bestimmung von Risiken**

In der IEC 61508 werden Systeme hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials in vier Risiko- oder Anforderungsklassen (SIL) eingeteilt. Aus den jeweiligen Klassen werden Vorgehensweisen bei der Entwicklung und der Implementierung der Systeme abgeleitet [188].

Die IEC 61508 betrachtet dabei im Gegensatz z. B. zur VDE 0801 (Grundsätze für Rechner in Systemen mit Sicherheitsaufgaben, herausgegeben vom Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE)) das Gesamtsystem aus Sensoren, der verarbeitenden Einheit, den Aktoren sowie den zugehörigen Feldbussen [191]. Dies ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

Durch diese umfassende Betrachtungsweise der IEC 61508 wird die Sicht auf alle sicherheitsrelevanten Komponenten eines Systems möglich.

Zur sicherheitstechnischen Bewertung von Anlagen können grundsätzlich unterschiedliche Methoden verwendet werden. Eine dieser Methoden ist der Risikograph nach z. B. DIN V 19250 oder IEC 61508-5 [188]. Der Risikograph ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

Bei Verwendung eines Risikographen nach Anhang D von IEC 61508-5 handelt es sich um ein qualitatives Verfahren, mit welchem sich die abgestuften Anforderungsklassen (SIL) unter Kenntnis der Risikofaktoren bestimmen lassen. Dieser Risikograph wurde aus der DIN V 19250

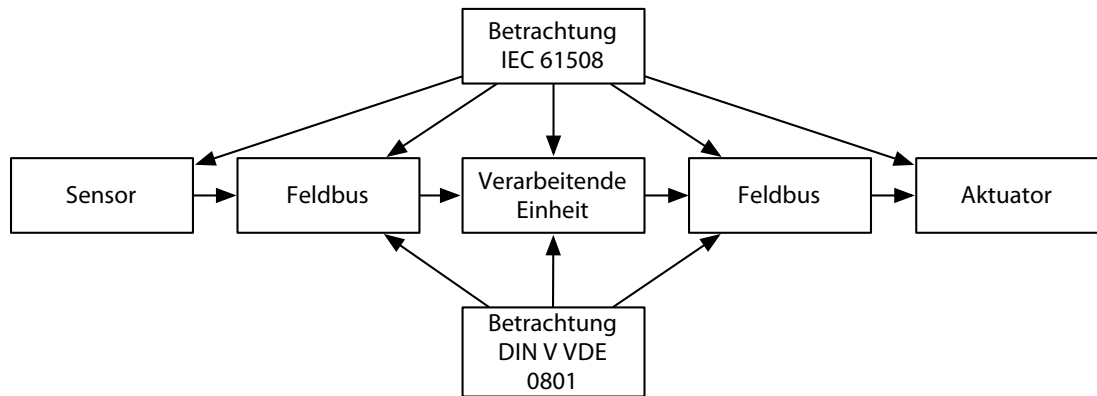


Abbildung 2.7: Systematik/Informationsfluss: Sensor, Verarbeitungseinheit, Aktuator und Normen

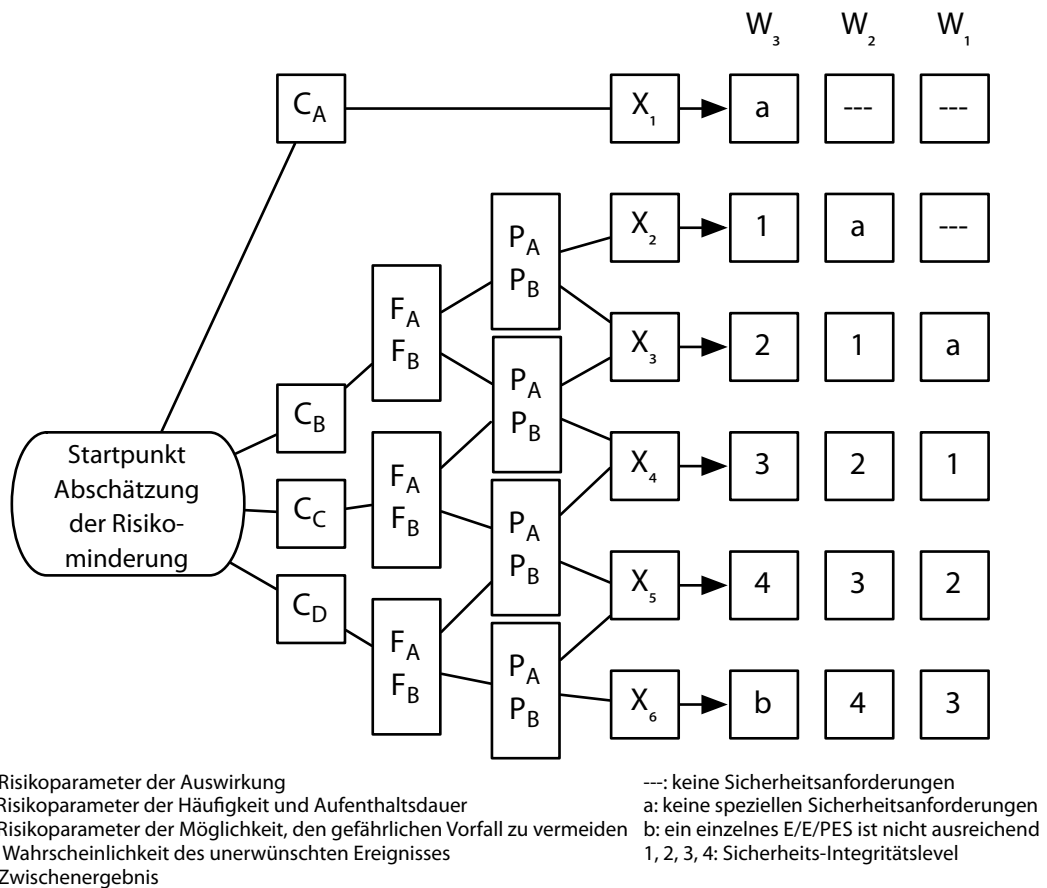


Abbildung 2.8: Risikograph: Allgemeiner Aufbau in Anlehnung an IEC 61508, Teil 5 [188]

übernommen und überträgt das dort beschriebene Verfahren von Anforderungsklassen AK1 bis AK8 auf SIL1 bis SIL 4 [14].

Dabei versteht man unter Risiko:

**Definition: Risiko**

„Kombination aus der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Schaden auftritt, und dem Ausmaß dieses Schadens“ [138] oder allgemeiner

„Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele“ [8, 39, 200].

In Tabelle 2.2 ist das SIL in Abhängigkeit zur niedrigen und zur hohen Anforderungsrate dargestellt.

Sicherheits-Integritätslevel (SIL)	Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate (Mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung der Sicherheitsfunktion)	Betriebsart mit hoher Anforderungsrate (Mittlere Häufigkeit eines gefahrbringenden Ausfalls der Sicherheitsfunktion pro Stunde)
1	$\geq 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$
2	$\geq 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$
3	$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$
4	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ bis $< 10^{-8}$

Tabelle 2.2: Zusammenhang zwischen den Ausfallgrenzwerten, der niedrigen und hohen Anforderungsrate und SIL in Anlehnung an IEC 61508

Hierbei wird zwischen der Betriebsart mit niedriger und hoher Anforderungsrate unterschieden. Bei Systemen mit niedriger Anforderungsrate beziehen sich die Grenzen der Wahrscheinlichkeit des Ausfalls der Sicherheitsfunktion auf den Anforderungsfall. Für Systeme mit hoher Anforderungsrate werden die Wahrscheinlichkeiten auf den gefahrbringenden Ausfall pro Stunde betrachtet. In Tabelle 2.3 sind die wichtigsten Spezifikationen und Anforderungen für die verschiedenen SIL genauer spezifiziert.

**2.3.5 Sicherheit von Hardware**

Betrachtungen nach dem Konzept der funktionalen Sicherheit unterscheiden zwischen den Anforderungen an die Hard- und an die Software.

Bei der Betrachtung der Hardware von sicherheitsgerichteten oder sicherheitsrelevanten Systeme-

Spezifikationen	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4	Anwendbarkeit
					Hardware (H) Software (S)
<b>Anforderungen und Design-Spezifikationen</b>	Formal (z. B. natürliche Sprache)	Halbförmlich (z. B. natürliche Sprache)	Informell (z. B. natürliche Sprache)	Informell (mathematisch)	H/S
<b>Strukturierte Designmethoden</b> (z. B. Flussdiagramme)	Optional	Bevorzugt	Ja	Ja	H/S
<b>Design-Überprüfung</b>	Test (Experten)	Ja (Projekt-Team)	Ja (Projekt-Team)	Ja (Projekt-Team)	H/S
<b>Projekt-Management</b>	Bevorzugt	Ja	Ja	Ja	H/S
<b>Unabhängige technische Beurteilung</b>	Optional	Optional	Bevorzugt	Ja	H/S
<b>Daten-Beurteilungsanalysen und korrigierende Handlungen</b>	Ja	Ja	Ja	Ja	H/S
<b>Statistische Analysen</b>	Optional	Optional	Ja	Ja	H/S
<b>Dynamische Analysen</b> (z. B. autom. Testen)	Ja	Ja	Ja	Ja	S
<b>Umweltbedingtes/betriebsfähiges Testen</b>	Ja	Ja	Ja	Ja	H/S
<b>Zusätzliche Produktüberwachung</b> (z. B. unabhängige Prüfungen)	Optional	Ja (Bevorzugt von einem externen Experten durchgeführt)	Ja (Von einem externen Experten durchgeführt)	Ja (Von einem externen Experten durchgeführt)	H/S
<b>ISO 9001</b>	Ja	Ja	Ja	Ja	H/S

Tabelle 2.3: Spezifikationen und Anforderungen für die verschiedenen SIL gemäß IEC 61508 in Anlehnung an [14]



men kann diese in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Elektrische (E)
- Elektronische Systeme (E)
- Programmierbare Elektronische Systeme (PES)
- andere Systeme (z. B. mechanische, pneumatische)

Diese Einteilung ist nicht endgültig, da die Systeme häufig kombiniert vorkommen. Das bedeutet, dass z. B. ein auf die Sicherheit gerichtetes System wie ein Ventilator sowohl elektrische als auch mechanische Komponenten beinhaltet.

Die Sicherheit von Hardware kann z. B. mithilfe der Anwendung der Maßgaben der IEC 61508 erreicht werden, indem der Sicherheitslebenszyklus vollständig betrachtet wird. Der Hardware-Sicherheitslebenszyklus ist in Abbildung 2.9 dargestellt [14].

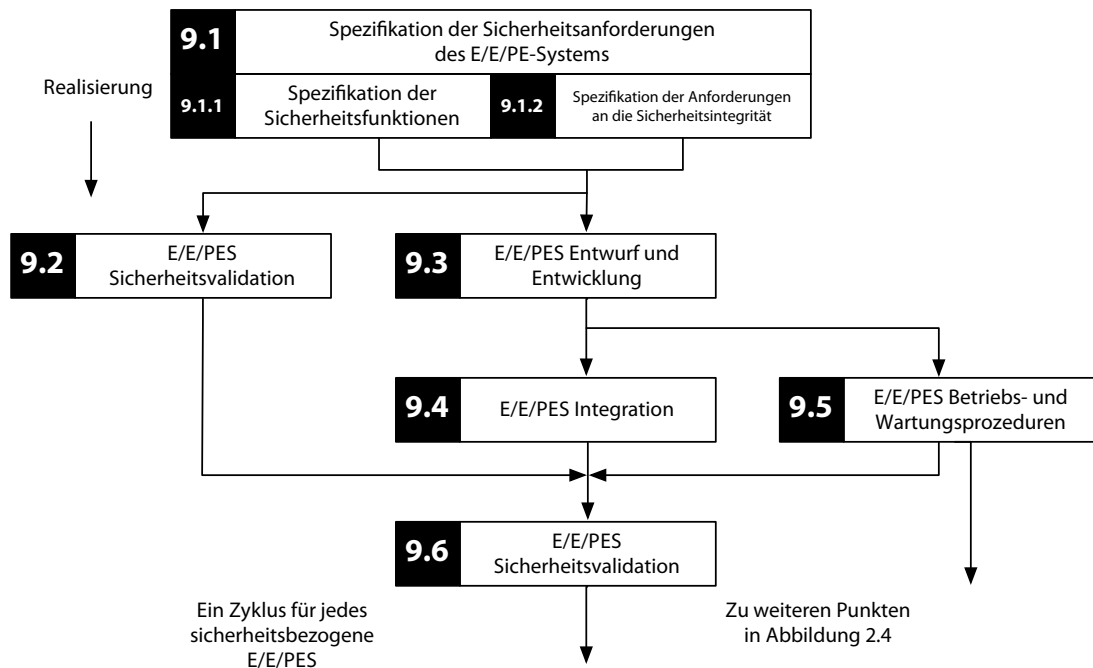


Abbildung 2.9: Hardware-Sicherheitslebenszyklus in Anlehnung an [14]

Der Hardware-Sicherheitslebenszyklus besteht aus insgesamt sechs Realisierungsphasen. In Phase 1 erfolgt zunächst die Spezifikation der Sicherheitsanforderungen des jeweiligen E/E/PE-Systems. Dabei werden die Spezifikationen der Sicherheitsfunktionen und die Spezifikationen der Anforderungen an die Sicherheitsintegrität festgelegt. Das Ziel ist es, die geforderte funktionale Sicherheit zu erreichen.

In Phase 2 wird die Validierung des E/E/PE-Systems geplant. In Phase 3 erfolgt zunächst der Entwurf und anschließend die Entwicklung des E/E/PE-Systems und in Phase 4 die Integration der Hardware in das Gesamtsystem erfolgt. Dabei werden in Phase 5 die Betriebs- und Wartungsprozeduren ausgearbeitet. Bei diesen Prozeduren muss die geforderte Sicherheit ebenfalls erreicht werden.

In Phase 6 wird anschließend das System bezüglich der Sicherheit validiert. Nach Phase 6 folgen weitere Schritte im Gesamt-Sicherheitslebenszyklus (siehe Abbildung 2.4).

In den Phasen 1 und 3 werden Festlegungen zur konkreten Ausgestaltung und der Architektur des entstehenden Systems getroffen. Die DIN EN/ IEC 61508 beschreibt verschiedene Systemarchitekturen mit denen unterschiedliche SIL erreicht werden können [11, 188]. Anhand von einigen gängigen Architekturen werden im Weiteren deren wichtigste Eigenschaften exemplarisch dargestellt.

### 2.3.5.1 1oo1-System

Das einfachste System ist das sogenannte „Single-Controller-System“, das in Abbildung 2.10 dargestellt ist.

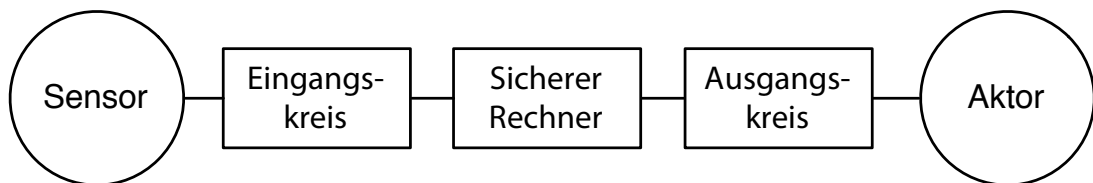


Abbildung 2.10: Darstellung des 1oo1-Systems in Anlehnung an [11]

Die Bezeichnung „1oo1“ bedeutet, dass es sich um ein einkanaliges System handelt, das aus einem Eingangskreis, einem sicheren Rechner (Logik-Solver) und einem Ausgangskreis besteht. Die beiden mittleren Buchstaben „oo“ in der Bezeichnung stehen dabei für „out of“, was sich, wie bereits beschrieben, auf die Kanäle des jeweiligen Systems bezieht. Zum System gehören ferner mindestens ein Sensor sowie mindestens ein Aktor. Bei der Bezeichnung sicherheitstechnischer Systeme unterschiedlicher Architekturen wird oft die „MooN“-Bezeichnungssystematik verwendet. Dabei bedeutet die Bezeichnung, dass das System aus „N“ unabhängigen Kanälen besteht und dem „M“ Kanäle genügen müssen, um die sicherheitstechnische Funktion zu erfüllen [15].

Das System 1oo1 kann nur bedingt für sicherheitsgerichtete Applikationen verwendet werden, da der Ausfall nur eines Elementes bereits zum physikalischen Ausfall des gesamten Systems führt. Mit einem solchen System lässt sich daher maximal SIL 2 erreichen [15].

Der *MTTF*-Wert (Definitionen und Bezeichnungen siehe Abschnitte 2.3.1 und 2.3.3) dieser Architektur berechnet sich aus (hier und weiter: [14, 15, 188]):

$$MTTF_{1oo1} = \frac{1}{\lambda_S + \lambda_D} \quad (2.5)$$

Der *MTTF*-Wert kann ebenfalls als die Fläche unterhalb der Zuverlässigkeitsfunktion  $R(t)$ , die selbst eine Funktion der Zeit ist, allgemein nach folgender Gleichung angegeben werden:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.6)$$

Für ein System, welches wie das 1oo1-System aus aufeinander folgenden Elementen besteht, die alle für das Funktionieren des Gesamtsystems notwendig sind und deren Ausfallverhalten unabhängig sind, kann die Zuverlässigkeit  $R_{seriell}(t)$  nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$R_{seriell}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.7)$$

Mit der Annahme, dass die Basisausfallrate ( $\lambda_B = \lambda_S + \lambda_D = \text{const}$ ) konstant in Bezug auf die Zeit ist, kann für die Zuverlässigkeit des seriellen Systems mithilfe der Addition der Ausfallraten einzelner Elemente nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$R_{seriell}(t) = e^{-\sum_i \lambda_i \cdot t} \quad (2.8)$$

Mithilfe der Taylorreihe, bei  $\lambda \cdot t < 0,1$  kann ferner angegeben werden:

$$R_{seriell}(t) = e^{-\sum_i \lambda_i \cdot t} = 1 - \sum_i \lambda_i \cdot t \quad (2.9)$$

Dann beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit des seriellen Systems:

$$P_{seriell}(t) = 1 - R_{seriell}(t) = 1 - (1 - \sum_i \lambda_i \cdot t) = \sum_i \lambda_i \cdot t = 1 - e^{-\sum_i \lambda_i \cdot t} \quad (2.10)$$

Zur Bestimmung des  $PFD_{avg}$ -Werts (Average Probability of Dangerous Failure on Demand),

also der mittleren Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung, kann allgemein folgende Gleichung angegeben werden:

$$PFD_{avg}(T) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t) dt \quad (2.11)$$

Der  $PFD_{avg}$ -Wert ist vor Allem für Sicherheitsfunktionen, die nur im Falle einer Störung benötigt werden, von Interesse. Diese Versagenswahrscheinlichkeit stellt im Rahmen der DIN EN/ IEC 61508 ein wichtiges Kriterium zur qualitativen Bewertung einer Sicherheitsfunktion dar.

Durch das Einsetzen der Gleichung 2.10 in die allgemeine Gleichung 2.11 ergibt sich der  $PFD_{avg, 1001}$ -Wert, also die mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung des 1001-Systems näherungsweise nach [15]:

$$PFD_{avg, 1001} \approx \frac{1}{2} \cdot \lambda_{DU} \cdot T_1 \quad (2.12)$$

wobei  $T_1$  ein Zeitintervall und  $\lambda_{DU}$  die gefährlichen nicht entdeckbaren Fehlerraten angibt.

Um das in der Abbildung 2.10 dargestellte System vollständig zu betrachten, ist die Bestimmung von  $PFD$ -Werten getrennt nach den Elementen, also vom Sensor bis zum Aktor nach folgender Gleichung vorzunehmen (vgl. [188]):

$$PFD_{SYS} = PFD_S + PFD_L + PFD_{FE} \quad (2.13)$$

Die Addition der  $PFD$ -Werte einzelner Elemente ergibt den Gesamt- $PFD_{SYS}$ -Wert des Systems bzw. der Sicherheitsfunktion.

Neben den  $PFD$ -Werten werden u. a. für die Betriebsart mit hoher Anforderungsrate Werte für die mittlere Häufigkeit eines gefahrbringenden Ausfalls der Sicherheitsfunktion pro Stunde  $PFH$  angegeben. Der  $PFH$ -Wert (Probability of dangerous failure per hour) oder genauer (average frequency of dangerous failure) wird nach der DIN EN/ IEC 61508 für das System 1001 nach [188] angegeben mit:

$$PFH_{G, 1001} = \lambda_{DU} \quad (2.14)$$

### 2.3.5.2 1oo2-System

Eine weitere, sehr beliebte Sicherheitsarchitektur ist in der Abbildung 2.11 dargestellt.

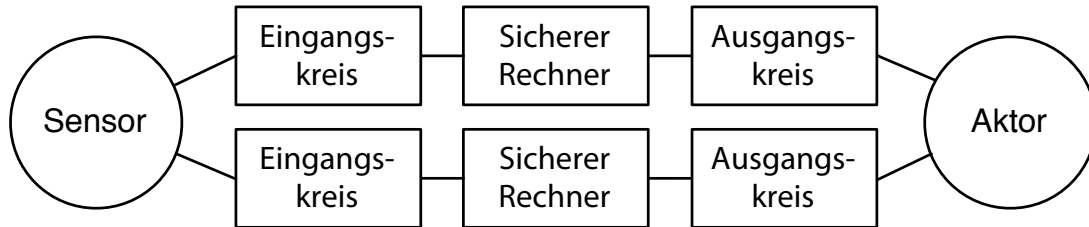


Abbildung 2.11: Darstellung des 1oo2-Systems in Anlehnung an [11]

Das 1oo2-System besteht aus zwei unabhängigen Kanälen. Für die korrekte Ausführung der Sicherheitsfunktion genügt dabei das Auslösen mindestens eines Kanals. Bei Systemen wie dem 1oo2-System ist die Betrachtung von Versagensursachen, die sich auf mehrere Kanäle gleichzeitig auswirken können, von Bedeutung. Die Beliebtheit des 1oo2-Systems resultiert aus der vergleichsweise hohen Zuverlässigkeit im Vergleich zu Einkanal-Systemen bei einer minimal erforderlicher Anzahl von notwendigen Elementen.

Der  $PFD_{avg, 1oo2}$ -Wert, also die mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung des 1oo2-Systems beträgt näherungsweise:

$$PFD_{avg, 1oo2} \approx \frac{\lambda_{DU}^2 \cdot T_1^2}{3} + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2} = \frac{4}{3} \cdot PFD_{avg, 1oo1}^2 + \beta \cdot PFD_{avg, 1oo1} \quad (2.15)$$

Wobei  $\beta$  den Anteil an Fehlern bezeichnet, die sich auf mehrere Kanäle gleichzeitig auswirken.

Der  $PFH$ -Wert wird nach der DIN EN/ IEC 61508 für das System 1oo2 nach [188] angegeben mit:

$$PFH_{G, 1oo2} = 2 \cdot [(1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD}]^2 \cdot t_{CE} + \beta_D \cdot \lambda_{DU} \quad (2.16)$$

Wobei  $t_{CE}$  die äquivalente mittlere Ausfalldauer eines Kanals ist.

Eine einfache Bewertung der Systeme, die Sicherheitsfunktionen ausführen, ist mithilfe der in DIN EN/ IEC 61508 angegebenen Tabellen möglich, falls die Systemstruktur mit den in der Norm angegebenen übereinstimmt. Anderenfalls ist eine detaillierte Berechnung unumgänglich.

Mit dem 1oo2-System lässt sich maximal SIL 3 erreichen (vgl. Tabelle 2.3). Weitere Verbesserungsmöglichkeiten der vorgestellten und anderer Systeme ergeben sich, wenn Diagnose- und Testverfahren Anwendung finden. Die Diagnose- und Testverfahren verändern zwar nicht die Architektur des jeweiligen Systems, stellen jedoch im Allgemeinen wichtige Informationen und andere Maßnahmen zur Verfügung, die gezielte Eingriffe in das Verhalten des sicherheitsgerichteten Systems und das Ergreifen anderer Kompensationsmaßnahmen ermöglichen.

Die Ausführung und die Einsatzbedingungen einer Sicherheitsfunktion werden im Wesentlichen von den Eigenschaften der einzelnen Komponenten, zu denen Sensoren, die verarbeitende Einheit und Aktoren gehören, bestimmt. Zu weiteren wichtigen Eigenschaften des Systems zählen u. a. die Architektur, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Hardware- und/oder Software-Fehlern, von System-Fehlern oder von Fehlern gemeinsamer Ursache, die Online-Diagnose und die periodischen Testintervalle, die sogenannten Proof-Tests.

Diagnose-Tests werden verwendet, um Fehler in Systemen zu identifizieren. Diese Tests werden in der Regel während des Betriebes des Sicherheitssystems und automatisch durchgeführt. Nach Entdeckung von Fehlern bei diesen Verfahren ist es wichtig, korrekte Gegenmaßnahmen zu ergreifen, um das System in einen definierten sicheren Zustand zu bringen. Der Vorteil des Diagnose-Tests ist, dass Fehler schnell und automatisch gefunden und anschließend behoben werden können.

Proof-Tests finden statt, wenn das Sicherheitssystem nicht in Betrieb ist. Wenn durch einen Proof-Test Fehler im Sicherheitssystem gefunden werden, so werden diese schnellstmöglich behoben, um so den ursprünglichen Zustand des Systems wiederherzustellen. Da Proof-Tests im Vergleich zu Diagnose-Tests in der Regel seltener durchgeführt werden, kann es vorkommen, dass bei ihnen das System bis zum nächsten Test mit einem unentdeckten Fehler läuft. Hierdurch wird die Bedeutung der verantwortungsvollen Festlegung der Test-Intervalle sicherheitsgerichteter Systeme besonders deutlich.

### **2.3.6 Sicherheit von Software**

Moderne sicherheitsgerichtete Anlagen können ihre Funktionen nur auf Basis von passender und qualitativ hochwertiger Software ausführen. Neben dem Einsatz von sicherer Hardware spielt im Kontext der funktionalen Sicherheit die Software in diesem Bereich eine zunehmend wichtige Rolle. Die Komplexität und die Bedeutung von Software sind aufgrund der leichten nachträglichen Veränderbarkeit/Anpassungsfähigkeit im System in der Vergangenheit enorm

gestiegen. Zu erwarten ist, dass auch künftig die Entwicklung von Software in sicherheitsrelevanten Systemen rasant vorangeht.

Analog zur Betrachtung des Sicherheitslebenszyklus von Hardware wird die Software nach dem Ansatz des Sicherheitslebenszyklus betrachtet. Der Software-Sicherheitslebenszyklus ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

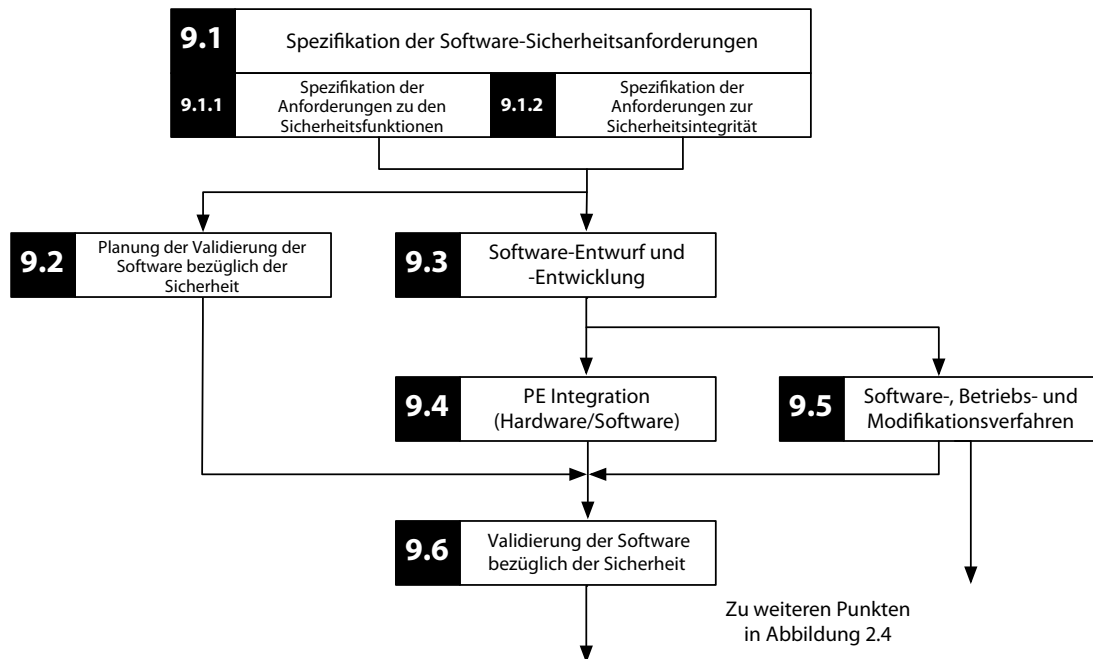


Abbildung 2.12: Software-Sicherheitslebenszyklus in Anlehnung an [14]

Hiernach werden zunächst die Sicherheitsanforderungen an die Software spezifiziert. Dies beinhaltet die Spezifikation der Anforderungen zu den Sicherheitsfunktionen und der Anforderung der Sicherheitsintegrität. Dabei ist es wichtig, dass die Spezifikationen vollständig sind, um alle Anforderungen zu erfassen. Nach den Spezifikationen wird die Software entworfen und entwickelt. Um das angestrebte SIL zu erreichen, muss die Software analysierbar und verifizierbar sein.

Neben der Festlegung der Spezifikationen wird die Planung der Validierung der Software bezüglich der Sicherheit vorgenommen. Hierbei ist es wichtig, Kriterien für das Bestehen bzw. das Nichtbestehen von Validierungsprüfungen und anderen Randbedingungen der Validierung festzulegen.

Anschließend erfolgt die Integration der Software in das Gesamtsystem. Die Software muss

zu der Hardware kompatibel sein. Dies wird durch Tests überprüft, um das geforderte SIL zu erreichen. Neben der Integration finden auch Modifikationen an der Software statt. Hierbei darf die Software hinsichtlich der geforderten Sicherheit nicht negativ verändert werden. Abschließend wird die Software bezüglich der Sicherheit validiert. In weiteren Schritten wird das Gesamtsystem realisiert (siehe Abbildung 2.4).

### **2.3.7 Aktuelle Tendenzen im sicherheitstechnischen Anlagenbau**

Die Komplexität von technischen Anlagen, die sicherheitstechnische Prozesse steuern, nimmt zu [132]. Die Gründe hierfür sind die steigenden Anforderungen an die Anlagen, wie Wettbewerbsfähigkeit und Leistungsfähigkeit, die mit möglichst wenig Aufwand erreicht werden sollen [11]. Gleichzeitig nehmen die Vernetzung von Anlagen und der Anteil von neuen Steuerungen zu [10]. Diese Entwicklungen werden häufig mit dem Begriff der „Komplexität“ umschrieben [66].

Die Produktivität und die Sicherheit von Anlagen sind die beiden wichtigsten Zielrichtungen für Entwickler und Betreiber von sicherheitstechnischen Systemen. Diese beiden Ziele stehen jedoch nicht im Widerspruch zueinander, sondern ergänzen sich vielmehr, um Folgekosten durch Aus- und Unfälle von Anlagen zu vermeiden bzw. allgemeiner formuliert, um die Risiken im Sinne des Risikomanagements zu beherrschen [47, 88, 200, 201]. Um diese Ziele zu erreichen, werden häufig digitale, speicherprogrammierbare und sicherheitsgerichtete Steuerungen verwendet.

Solche Systeme für sicherheitskritische Anwendungen werden so ausgelegt, dass diese unter Berücksichtigung ihrer Vorteile und Leistungen für den zu kontrollierenden Prozess angemessen sicher sind [134]. Ein wichtiger Ansatz zur Umsetzung solcher sicherer und gleichzeitig wirtschaftlicher Anlagen ist der Ansatz der funktionalen Sicherheit, der in Abschnitt 2.3.2 dargestellt ist. Bei konsequenter Anwendung der mittlerweile weltweit etablierten Normen, welche die Methoden der funktionalen Sicherheit beschreiben, entsprechen die so entworfenen Anlagen dem heutigen Stand der Sicherheitstechnik.

Für die korrekte Anwendung der Norm ist die Expertise und die Verfolgung der z. T. sehr raschen Entwicklungen bei Normen im Bereich der funktionalen Sicherheit notwendig. Diese Anstrengungen machen sich jedoch nicht nur für die jeweiligen Erbringer solcher Dienstleistungen bezahlt, sondern bringen dem Anlagenbetreiber kurz- und langfristig wirtschaftliche und sicherheitstechnische Vorteile.



## 2.4 Zusammenfassung

In Abschnitt 2 wurden zunächst Eigenschaften komplexer Systeme erläutert. Dabei wurden unterschiedliche Konzepte zur Betrachtung von Systemen aus dem systemtheoretischen Ansatz vorgestellt und wichtige Definitionen für Systeme und komplexe Systeme eingeführt. Nach Benennung der Eigenschaften von technischen Systemen und der Anforderungen an diese fand eine Untersuchung und Einordnung der gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen auf ihre Systemeigenschaften hin statt.

Des Weiteren wurden Herangehensweisen und Methoden zur Betrachtung dynamischer Steuerungen technischer Anlagen nach Einführung von Definitionen zur Steuerung und Regelung aufgezeigt.

Darüber hinaus fand eine Analyse sicherheitsgerichteter Anlagen statt. Es folgte eine ausführliche Vorstellung und Erläuterung der Grundlagen der Sicherheit von programmierbaren und sicherheitsgerichteten Systemen. Sodann wurden wichtige Definitionen aus diesem Bereich eingeführt und aktuelle Tendenzen im sicherheitstechnischen Anlagenbau in unterschiedlichen Branchen aufgezeigt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Komplexität von Anlagen, die sicherheitsgerichtete Funktionen ausführen, über die Zeit enorm zugenommen hat. Damit einhergehend durchdringen die komplexen technischen Systeme mehr und mehr Bereiche in der Industrie und im täglichen Leben. Diese Systeme übernehmen alleine aufgrund des Gebots der Wirtschaftlichkeit zunehmend neue Aufgaben und erfüllen neue Funktionen. Die dynamischen Steuerungen dieser Systeme sind daher eine logische Konsequenz der technischen Weiterentwicklung. Die zunehmende Bedeutung dieser Systeme macht es erforderlich, neue Vorschriften zu erarbeiten und bestehende Sicherheitskonzepte auch in der Gebäudetechnik zu überdenken.

Um den steigenden sicherheitstechnischen Anforderungen gerecht zu werden, wurde das sogenannte Konzept der funktionalen Sicherheit vorgestellt und erläutert. Es kann festgestellt werden, dass dieses Konzept für die ganzheitliche Betrachtung von sicherheitsgerichteten Anlagen sehr gut geeignet ist und viele Potentiale aufweist. Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse auf gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen in Bauwerken übertragen.



## 3 Gebäudetechnischer Brandschutz

In diesem Abschnitt werden zunächst gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen in den ganzheitlichen Brandschutz eingeordnet. Sodann werden aktuelle Entwicklungen des gebäudetechnischen Brandschutzes aufgezeigt und die grundlegenden Bestandteile von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen vorgestellt. Ferner werden die wichtigsten Brandschutzeinrichtungen und weitere gebäudetechnische Anlagen dargestellt und hinsichtlich der dynamischen Steuerungsmöglichkeiten im Brandfall als Einzelanlagen beurteilt. Anschließend werden die Anforderungen an Brandschutzeinrichtungen sowie deren Zusammenwirken aus unterschiedlichen Perspektiven formuliert und die Sicherheit dieser Anlagen dargestellt. Danach wird auf die Rolle der Steuermatrix im Zusammenspiel von Brandschutzeinrichtungen eingegangen. Am Ende des Abschnitts erfolgen eine Zusammenfassung und eine Darstellung der Ergebnisse des Abschnittes.

### 3.1 Einordnung des anlagentechnischen Brandschutzes in den ganzheitlichen Brandschutz

Zu den allgemeinen Zielen des Brandschutzes können der Personenschutz, der Sachwertschutz, der Umweltschutz sowie weitere Schutzziele gezählt werden. Der Personenschutz hat in der Hierarchie der Schutzziele die oberste Priorität [79]. Die Grundlage der Forderung von Schutzziele resultiert in Deutschland aus den jeweiligen Landesbauordnungen. In der Musterbauordnung (MBO) ist in § 3(1) bzw. in § 14 festgelegt:

*„Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“ [203].*

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind“ [203].

Die Formulierungen in den jeweiligen Landesbauordnungen sind ähnlich bis identisch zu diesen Forderungen der MBO. Um die oben genannten Schutzziele zu erreichen, wird häufig der sogenannte ganzheitliche Brandschutz gefordert. Darunter versteht man, dass nur aufeinander abgestimmte Maßnahmen zum Erreichen der angestrebten Ziele und eines angemessenen Schutzniveaus führen [81].

Ganzheitliche Brandschutzmaßnahmen lassen sich zunächst, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, in vorbeugende und abwehrende Maßnahmen gliedern.

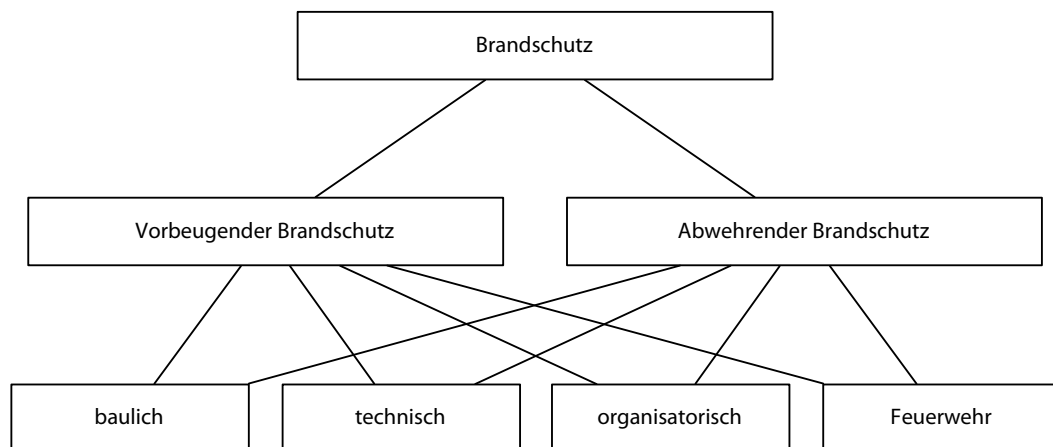


Abbildung 3.1: Einteilung des Brandschutzes

Diese übergeordneten Teile lassen sich weiter in bauliche, technische, organisatorische und der Feuerwehr (FW) zugeordnete Komponenten aufteilen. Sowohl der vorbeugende als auch der abwehrende Brandschutz haben Auswirkungen auf alle vier vorgenannten Komponenten. Der ganzheitliche Brandschutz fordert, dass alle Komponenten in einem ausgewogenen Maße Berücksichtigung finden [51, 81].

Der gebäudetechnische Brandschutz bzw. die gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen sind überwiegend dem technischen Teil des ganzheitlichen Brandschutzes zuzuordnen und haben Auswirkungen auf alle anderen Komponenten des Brandschutzes [106]. Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen werden in dieser Arbeit wie folgt definiert:

**Definition: Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen (GB)**

*Alle technischen Einrichtungen, die im Brandfall angesteuert werden können und wirken, um die Schutzziele zu erreichen.*

Hierzu gehören im engeren Sinne Einrichtungen, die man in Anlagen zur Branddetektion, Brandmeldung und Alarmierung, Brandbekämpfung und Information unterscheidet. Streng genommen sind alle Einrichtungen gemeint, die nicht nur im Brandfall, sondern, wie auch im Falle eines Falschalarms, nach Auslösung/Detektion wirken.

Im weitesten Sinne fallen unter diese Definition auch Anlagen wie z. B. die Notstromversorgungs- oder Zutrittskontrollanlagen, da diese im Brandfall ebenfalls zur Erreichung von Schutzziele, wie etwa dem Sach- oder Personenschutz, dienen können, mit anderen Anlagen gekoppelt sind und kausal und/oder zeitbezogen mit dem Brandfall zusammenhängen [124].

Weitere Definitionen und Beispiele von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen finden sich z. B. in [216], [71] oder [78]. Eine scharfe Trennlinie der Zugehörigkeit von Anlagen zu gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen lässt sich jedoch aufgrund der Vielfalt von Anlagen, deren zunehmender Komplexität, Aufgabenvielfalt und Vernetzung nicht ziehen und muss daher im Einzelfall gezogen werden [25, 175].

Für die Bezeichnung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen wird gelegentlich synonym der Begriff Brandschutzanlagen (BSA) aus dem Oberbegriff des anlagentechnischen Brandschutzes verwendet [67, 116]. In dieser Arbeit werden daher die Begriffe Einrichtungen, Anlagen und Systeme im Kontext des gebäudetechnischen Brandschutzes synonym verwendet.

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen gewinnen im ganzheitlichen Brandschutz zunehmend an Bedeutung, da sie wichtige Funktionen übernehmen und gegenüber anderen Brandschutzmaßnahmen viele Vorteile bieten [81, 140]. Im Folgenden werden die aktuellen Tendenzen im anlagentechnischen Brandschutz aufgezeigt.

## **3.2 Aktuelle Tendenzen im anlagentechnischen Brandschutz**

Die Entwicklung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen begann im Wesentlichen mit der Industrialisierung. In dieser Zeit sind die ersten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen wie z. B. die Sprinkleranlage entstanden und seitdem stetig weiterentwickelt worden. Eine Ausdifferenzierung und Spezialisierung von gebäudetechnischen Brandschutz-

einrichtungen kann bis zum heutigen Tage beobachtet werden [132].

Derzeit lassen sich insbesondere die Tendenzen im Brandschutzanlagenbau mit folgenden Schlagwörtern umreißen:

- Vielfalt, Differenzierung und Spezialisierung
- Vernetzung und Integration
- steigende Komplexität
- Sicherheit und Zuverlässigkeit
- Standardisierung

Es kann allgemein eine zunehmende Vielfalt, Differenzierung und Spezialisierung hinsichtlich der unterschiedlichen Ausprägungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und ihrer Eigenschaften beobachtet werden [25, 89]. Zahlreiche Hersteller bieten ihre Anlagen und zugehörige Dienstleistungen zunehmend auf den internationalen Märkten an.

Einhergehend mit der Zunahme von unterschiedlichen Möglichkeiten der einzelnen Brandschutzeinrichtungen werden auch Komplettlösungen für die von der Anlagentechnik abzudeckenden Bedürfnisse nachgefragt. Dies erfordert eine Abstimmung der einzelnen Anlagen sowie intelligente Kommunikation zwischen diesen, damit diese im Verbund wirken und somit Synergien hinsichtlich der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit erzeugen [144]. Diese Anlagen müssen, um zukunftsfähig zu bleiben, eine Offenheit gegenüber der Integration neuer Komponenten und der Anpassungsfähigkeit an bauliche und nutzerspezifische Veränderungen gewährleisten. Neben der Integration von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen untereinander müssen auch die Schnittstellen und Interaktionen zu anderen technischen Systemen in Gebäuden wie z. B. Lüftungs- oder EDV-Systemen beachtet werden [163]. Ferner werden neben den rein technischen Schnittstellen zunehmend auch Schnittstellen der Mensch-Maschine-Interaktionen betrachtet, um Fehlbedienungen zunehmend komplexer werdender Anlagen zu reduzieren [56, 69].

Die Zunahme von vernetzten und integrierten Anlagen führt zur Erhöhung der Komplexität von modernen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen. Um die steigende Komplexität zu beherrschen, bedarf es auf der Seite der Anbieter und Errichter von Anlagen eines breiten Wissens und ausreichender Erfahrungen [54].

Die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Anlagen findet neben den anderen Aspekten ebenfalls zunehmend Beachtung. Aufgrund der steigenden Komplexität bedarf es hier neuer Ansätze, die nicht mehr, wie in der Vergangenheit, die Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutz-

einrichtungen heuristisch und qualitativ beurteilen, sondern eine quantitative Beurteilung ermöglichen [28, 37, 94, 121].

Um der zunehmenden Komplexität und den steigenden Sicherheitsanforderungen zu begegnen, gibt es auf nationaler und internationaler Ebene Bemühungen, den Standardisierungsprozess voranzutreiben. Die Bemühungen des Standardisierungsprozesses zielen darauf, ein vergleichbares Sicherheitsniveau und eine Kompatibilität von Anlagen herzustellen. Gleichzeitig müssen in diesem Prozess, neben der Berücksichtigung von Erfahrungen und unterschiedlichen Ausgangssituationen, auch Grundlagen für die Weiterentwicklung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen geschaffen werden [195].

### 3.3 Elemente gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen bestehen aus verschiedenen Komponenten, die miteinander verbunden sind und miteinander kommunizieren, um Brände zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt zu entdecken, lokale und/oder externe Alarme weiterzuleiten und Interaktionen von Anlagen unterschiedlicher Art auszulösen. In Tabelle 3.1 ist eine Auswahl der wichtigsten klassischen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen dargestellt [46].

Elemente von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen können generell nach deren Funktion in Sensoren, verarbeitende Einheiten und Aktoren, auch als Aktuatoren bezeichnet, unterteilt werden. Im Folgenden werden zunächst die Sensoren und die verarbeitenden Einheiten und anschließend die Aktoren von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen allgemein vorgestellt und deren Funktion erläutert.

#### 3.3.1 Sensoren

Im allgemeinen Sinne können technische Sensoren wie folgt definiert werden:

***Definition: Sensoren***

*Ein Sensor ist ein technisches Bauteil, das bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaften und/oder die stoffliche Beschaffenheit der Umgebung, in der es installiert ist, qualitativ oder als Messgröße quantitativ erfasst. Die erfassten Messgrößen werden in weiterverarbeitbare Größen (z. B. elektrische Signale) umgeformt und zur Weiterleitung, Verarbeitung und Auswertung bereitgestellt (vgl. [15]).*

<b>Anlagen zur Brandvermeidung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung des Sauerstoffgehaltes der Raumlufte</li> </ul>
<b>Anlagen zur Branderkennung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brandmelde- und detektionsanlagen</li> </ul>
<b>Anlagen zur Alarmierung und Evakuierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sirenen</li> <li>• Sprachalarmsysteme</li> <li>• Fluchttürsteuerungen</li> <li>• Aufzugssteuerungen</li> </ul>
<b>Anlagen zum Rauchschutz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• natürliche Rauch- und Wärmeschutzeinrichtungen</li> <li>• maschinelle Entrauchung</li> <li>• Druckbelüftung</li> </ul>
<b>Anlagen zum Löschen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mobile Löschgeräte</li> <li>• Sprinkleranlagen</li> <li>• Sprühnebellöschanlagen</li> <li>• Gaslöschanlagen</li> <li>• Schaumlöschanlagen</li> </ul>
<b>Anlagen zur Unterstützung der Feuerwehr</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuerwehraufzüge</li> <li>• Gebädefunk</li> <li>• Bedienfelder der Brandmeldeanlagen</li> <li>• Anzeigen und Laufkarten der Brandmeldeanlagen</li> </ul>

*Tabelle 3.1: Auswahl klassischer gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen (In Anlehnung an [48])*

Sensoren brandschutztechnischer Anlagen sind technische Vorrichtungen, die der frühestmöglichen Brandentdeckung oder anderen Zwecken dienen. Die Vielfalt der Sensoren im Brandschutz ist sehr groß, sodass es für sehr viele Randbedingungen bereits geeignete Sensoren gibt [42]. Vielen Sensoren für die Branderkennung ist gemeinsam, dass der jeweilige Sensor auf die Brandkenngröße, z. B. bei Überschreitung eines oder mehrerer Schwellenwerte, reagiert und damit ein Signal der Detektion des Brandes nach einem bestimmten Algorithmus vorliegt. Diese Information der Detektion wird in unterschiedlicher Art und Weise an die weiterverarbeitende Einheit der Brandmeldeanlage (BMA) weitergeleitet und dort verarbeitet. Die von den Sensoren an die Brandmeldeanlage zur Verfügung gestellte Information variiert stark je nach Sensortyp und Hersteller. Die Information des Sensors mit dem minimalsten Informationsgehalt ist die Branddetektion. Darüber hinaus gibt es auch Sensoren, die Störungsmeldungen oder andere Informationen dem System und der Umgebung anzeigen. Die Systematik der Sensoren von Brandmeldeanlagen wird im Abschnitt zu Brandmeldern vorgestellt.



### 3.3.2 Verarbeitende Einheit

Die verarbeitende Einheit, z. B. eine Brandmeldeanlage, die Signale zugehöriger Sensoren erhält, wertet die Informationen nach einer zuvor programmierten Logik aus und initiiert Aktionen (Brandfallsteuerungen) von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und anderen brandschutzrelevanten Anlagen. Die programmierte Logik basiert auf Planungen, Abstimmungen, Vorschriften und den Festlegungen der Baugenehmigung für ein Bauwerk. Die programmierten Brandfallsteuerungen in der verarbeitenden Einheit und die anlagentechnische Ausführung können je nach Anforderungen des jeweiligen Gebäudes sehr stark variieren.

Verarbeitende Einheiten von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen sind typischerweise in eine oder mehrere Brandmelderzentralen einer Brandmeldeanlage oder in separate verarbeitende Einheiten anderer Einrichtungen aufgeteilt. Bei autarken Anlagen, wie z. B. Aufzügen, ist die verarbeitende Einheit fester Bestandteil der Anlage selbst, kann aber Steuerungssignale auch von der übergeordneten verarbeitenden Einheit, in der Regel von der Brandmeldeanlage, erhalten und auch an diese Statusrückmeldungen zum eigenen Zustand geben. Eine formelle Abgrenzung der einzelnen Anlagen ist bisweilen schwierig, zumal die gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und andere Anlagen im Brandfall zusammen und zum Teil abhängig voneinander gesteuert werden.

### 3.3.3 Aktoren

Aktoren nehmen die Signale der verarbeitenden Einheit entgegen und setzen diese entsprechend der vorgesehenen Logik und der zugeordneten Funktion um. Die allgemeine Definition der Aktoren technischer Anlagen kann wie folgt angegeben werden:

***Definition: Aktoren***

*Aktoren sind in der Regel technische Vorrichtungen, die eine Eingangsgröße in eine andersartige Ausgangsgröße umwandeln, um einen gewünschten Effekt in einem System zu erreichen. In der Steuer- und Regelungstechnik bezeichnen Aktoren das wandlerbezogene Gegenstück zu Sensoren und bilden die Stellglieder in einem Regelkreis. Sie setzen Signale einer Regelung in z. B. mechanische Arbeit (Öffnen und Schließen eines Ventils) um (vgl. [15]).*

Aktoren von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen sind z. B. technische Vorrichtungen, die im Brandfall den Brandkenngrößen wie etwa Rauch entgegenwirken, um so für die vorgesehene Zeit bestimmte Entrauchungsqualitäten im Bauwerk zu erreichen. Gemäß der allgemeinen Definition gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen kann dies etwa eine Brandschutzklappe sein, die im Brandfall angesteuert wird, um in Kombination mit anderen Einrichtungen bestimmte Druckverhältnisse in einem Gebäude herzustellen. Andere Aktoren von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen wirken anderweitig auf das Gesamtsystem. Allen Aktoren von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen ist gemeinsam, dass sie Veränderungen aktiv bewirken, um bestimmte Ziele im Brandfall zu erreichen. Zusammenfassend wird das Gesamtsystem aus Sensoren, der verarbeitenden Einheit und den Aktoren in der folgenden Abbildung 3.2 dargestellt.

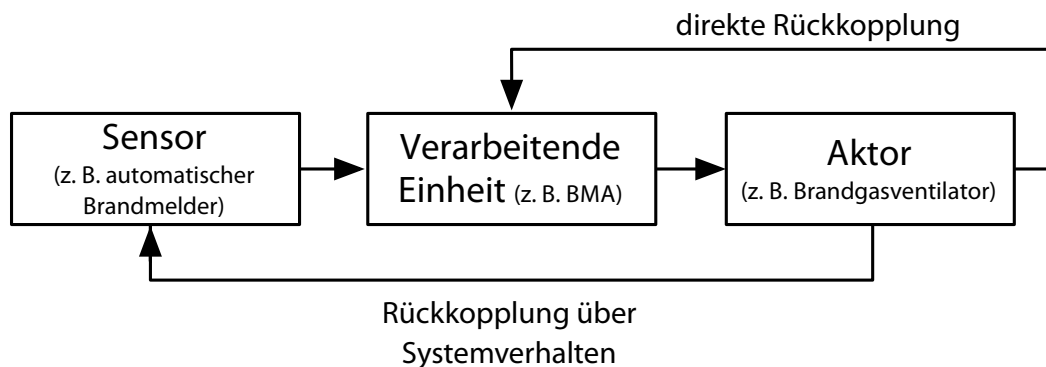


Abbildung 3.2: Systematik/Informationsfluss: Sensor, verarbeitende Einheit und Aktor bei dynamischen Systemen

Die Sensoren eines Bauwerks liefern Signale an die verarbeitende Einheit. Anhand der vorher definierten Logik werden bei bestimmten Systemzuständen Aktoren von der verarbeitenden Einheit angesteuert. Diese können, je nach Systembeschaffenheit, Signale entweder direkt (direkte Rückkopplung) oder über die Rückkopplung des Systemverhaltens an die verarbeitende Einheit geben [21]. In statischen Systemen geben die Aktoren keine Rückkopplung an die verarbeitende Einheit.

Nach der Einteilung von Komponenten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und der Beschreibung von Kategorien dieser Anlagen werden im Weiteren Brandmeldeanlagen als die wichtigste verarbeitende Einheit für den Brandfall detailliert betrachtet.

## 3.4 Brandmeldeanlage

### 3.4.1 Grundlegende Eigenschaften von Brandmeldeanlagen

Brandmeldeanlagen dienen zur möglichst frühzeitigen Erkennung eines Brandes. Die Brandmeldeanlage als eine Gefahrenmeldeanlage (GMA) kann außerdem eine frühzeitige Warnung von Personen im Gebäude sowie eine Alarmierung der Interventionskräfte initiieren. Die frühestmögliche Erkennung eines Brandes durch eine BMA reduziert die Risiken eines Personenschadens und hilft, den Sachschaden gering zu halten. Eine weitere wichtige Aufgabe der BMA ist die Ansteuerung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen sowie weiteren brandschutztechnisch relevanten Anlagen.

Brandmeldeanlagen gehören zu Gefahrenmeldeanlagen. Die Systematik von Gefahrenmeldeanlagen ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

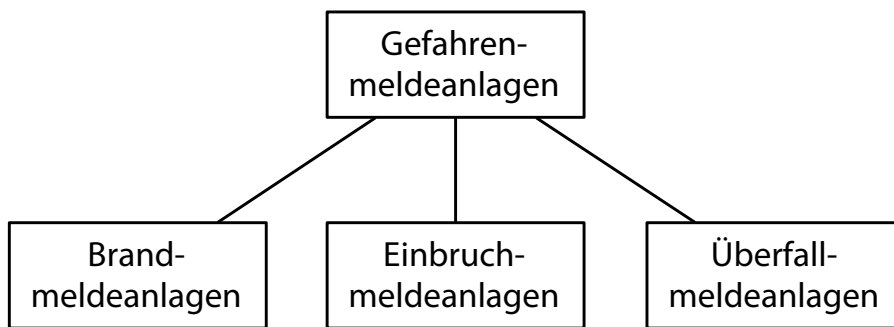


Abbildung 3.3: Systematik der Gefahrenmeldeanlagen nach [192]

Neben Brandmeldeanlagen gehören auch die Einbruch- und die Überfallmeldeanlagen zu den Gefahrenmeldeanlagen [192]. Letztere werden in dieser Arbeit nicht behandelt, da sie im Brandfall zwar je nach Gestaltung beachtet werden müssen, jedoch in der Regel nur eine nachgeordnete Rolle spielen. Die Definition einer BMA wird in DIN EN 54-1 wie folgt gegeben:

**Definition: Brandmeldeanlage (BMA)**

„Gruppe von Bestandteilen einschließlich einer Brandmelderzentrale, die bei Anordnung in einer festgelegten Konfiguration bzw. festgelegten Konfigurationen in der Lage sind, einen Brand zu erkennen, zu melden und Signale zur Einleitung entsprechender Aktionen abzugeben“ [183].

Auf Brandmeldeanlagen wirken vielfältige störende Einflussgrößen ein, denen durch Schutzmechanismen zu begegnen ist, damit die Anforderungen an die Anlagen erfüllt werden. Diese

Zusammenhänge sollen im Folgenden dargestellt werden. In Abbildung 3.4 sind einige der möglichen Einflussgrößen auf die Funktion der BMA dargestellt.

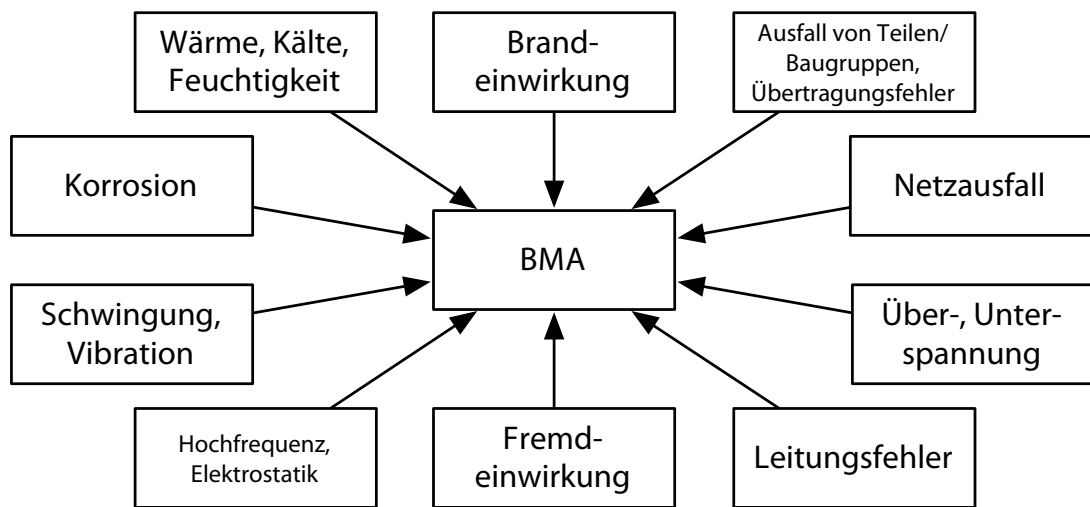


Abbildung 3.4: Auswahl physikalischer Einflussgrößen auf die Funktion der BMA

Die Abbildung 3.4 verdeutlicht, dass vielfältige physikalische Einflüsse auf eine BMA einwirken können. Eine korrekt funktionierende und sichere BMA muss störenden Einflussgrößen eine vorgesehene Dauer widerstehen bzw. die aus den jeweiligen Einflussgrößen resultierende Einwirkung kompensieren. Die physikalische Einwirkung auf die BMA kann dabei sehr kurzfristig (z. B. Über- und Unterspannung) bis lang anhaltend sein (z. B. Korrosion).

Um den Einwirkungen und den Einflussgrößen entgegenwirken zu können, verfügt die BMA über vielfältige Schutzmechanismen. Einige Schutzmechanismen sind exemplarisch in Abbildung 3.5 dargestellt.

Die dargestellten Schutzmechanismen des gesamten Systems sind nicht unabhängig voneinander und müssen im Planungsprozess aufeinander abgestimmt und während der Einbauphase umgesetzt werden. Ferner sind diese exemplarischen Schutzmechanismen neben weiteren während der gesamten Betriebszeit der Anlage und z. T. auch im Brandfall aufrechtzuerhalten, damit die Funktionsfähigkeit der Anlage mit entsprechender Sicherheit gewährleistet bleibt.

Die ausführungstechnisch richtige Umsetzung von Schutzmechanismen der BMA hilft, neben der sorgfältigen Planung, die vielfältigen Anforderungen an eine BMA zu erfüllen. Um so wichtiger ist es, bereits in der Entwurfsphase/Konzeptphase, die Anforderungen an die BMA zu präzisieren. Ferner ist es unumgänglich, eine Qualitätssicherung bei allen Schutzmechanismen zu betreiben und dabei die erreichte Sicherheit im Idealfall quantitativ z. B. mithilfe des

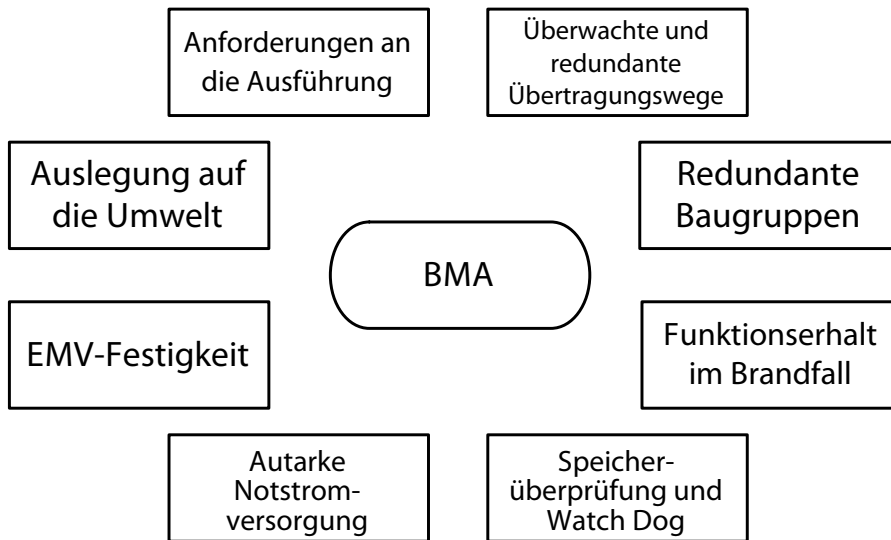


Abbildung 3.5: Schutzmechanismen der BMA

vorgestellten Ansatzes der funktionalen Sicherheit und weiterer Betrachtungen, wie etwa des Lebenszyklus-Modells, zu ermitteln [98, 60].

Die technischen Anforderungen an die Brandmeldeanlagen werden größtenteils in der Produktnorm DIN EN 54 geregelt [48]. Auf diese spezifischen Anforderungen wird noch bei den einzelnen Komponenten der Anlage näher eingegangen. Neben den technischen Anforderungen an die BMA bestehen viele weitere Anforderungen (siehe Abbildung 3.6), die von einer Vielzahl von Akteuren (wie z. B. Bauaufsicht, Feuerwehr, Bauherr und Fachplaner) an die BMA gestellt werden.

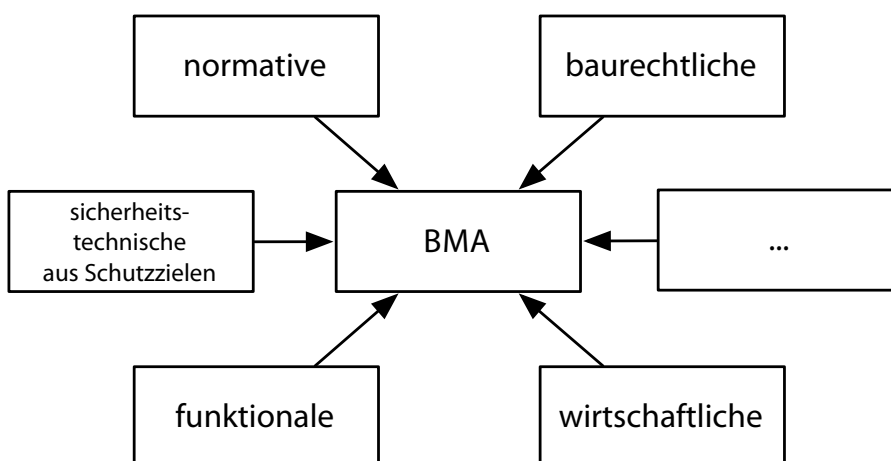


Abbildung 3.6: Anforderungen an die BMA

Aus den unterschiedlichsten Anforderungen an eine BMA und deren anlagentechnische Umsetzung resultieren aber auch vielfältige Möglichkeiten, von denen einige wichtige in Abbildung 3.7 dargestellt sind.

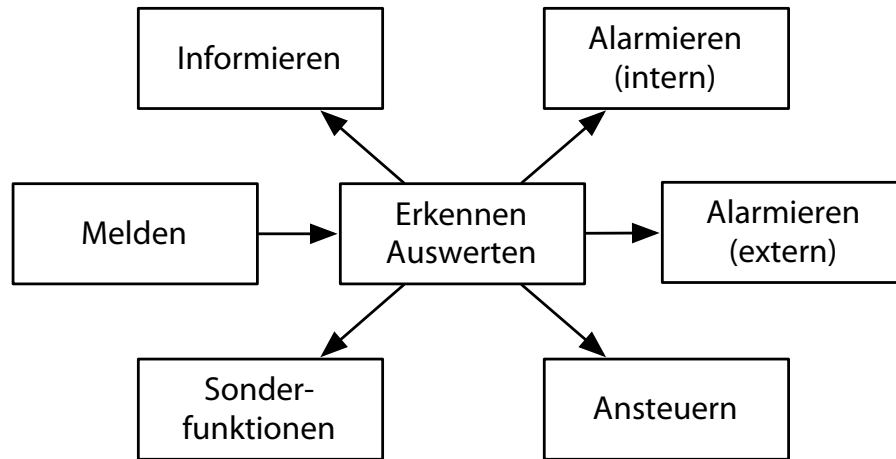


Abbildung 3.7: Möglichkeiten der BMA

Zu den wichtigsten Möglichkeiten der BMA zählen das Melden, das Erkennen und Auswerten, das Informieren und Alarmieren sowie das Ansteuern von Anlagen. Aus dem letzten Teil der Definition der BMA geht hervor, dass es eine der Aufgaben einer BMA ist, entsprechende Aktionen von anderen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen einzuleiten. Hierfür sind Anlagen mit Aktoren notwendig, welche die Vorgaben der BMA ausführen. Für die Umsetzung dieser Möglichkeiten sind viele Subsysteme und Anlagen erforderlich, die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt werden.

### 3.4.2 Aufbau von Brandmeldeanlagen

In Abbildung 3.8 sind die Funktionen der BMA mit Subsystemen dargestellt. Die Funktionen von BMA sind sehr zahlreich, da die Anforderungen vielfältig sind.

Die erste Funktion einer BMA ist das Erkennen der Brandphänomene. Hierzu gehören die automatische sowie die manuell eingeleitete Detektion und die Brandmeldung. Die zweite Funktion ist die Bedien- und die Anzeigefunktion der BMA, die direkt mit der dritten Funktion, der Steuerungsfunktion, verknüpft ist. Die Bedien- und die Anzeigefunktion einer BMA wird im Wesentlichen an der Brandmelderzentrale (BMZ) ausgeführt. Als vierte und fünfte Funktionen sind die lokalen und abgesetzten Funktionen zu nennen. Die sechste und letzte

## Brandmeldeanlage

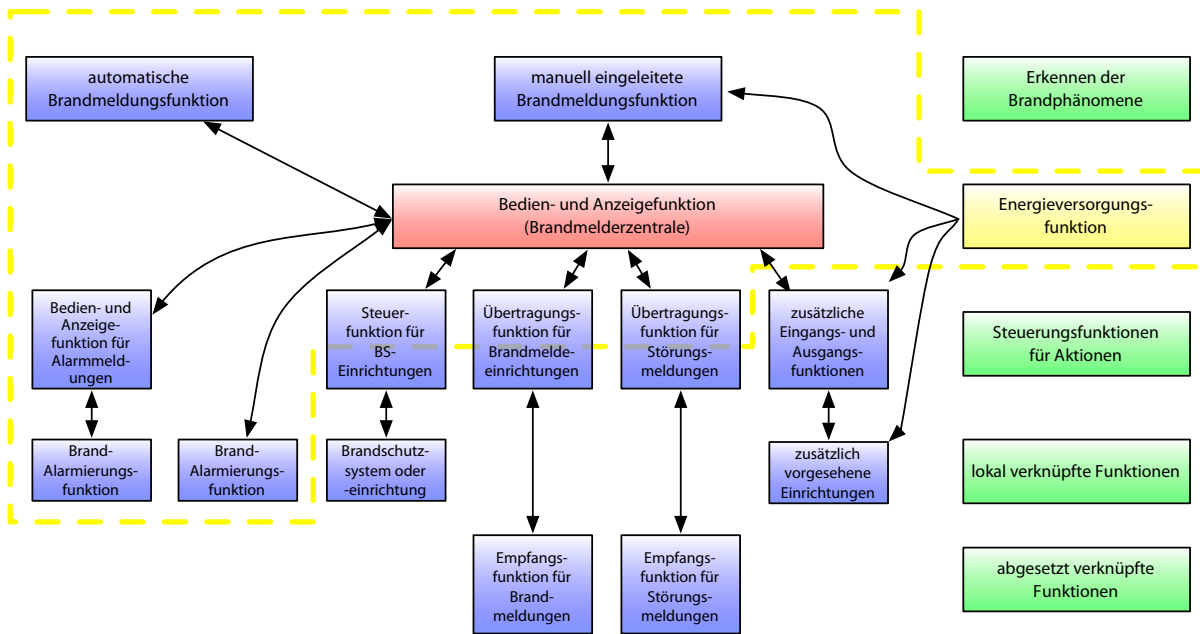


Abbildung 3.8: Funktionen der BMA mit Subsystemen in Anlehnung an [183]

Funktion ist die Energieversorgungsfunktion, welche die Energieversorgung bestimmter Elemente der BMA und ihrer Subsysteme gewährleistet. Andere Elemente haben dagegen eine separate Stromversorgung.

Um eine Brandmeldeanlage mit den jeweiligen Subsystemen zu errichten und zu betreiben, werden gewöhnlich Phasen durchlaufen. In Abbildung 3.9 sind die Phasen für Aufbau und Betrieb einer BMA dargestellt [176].

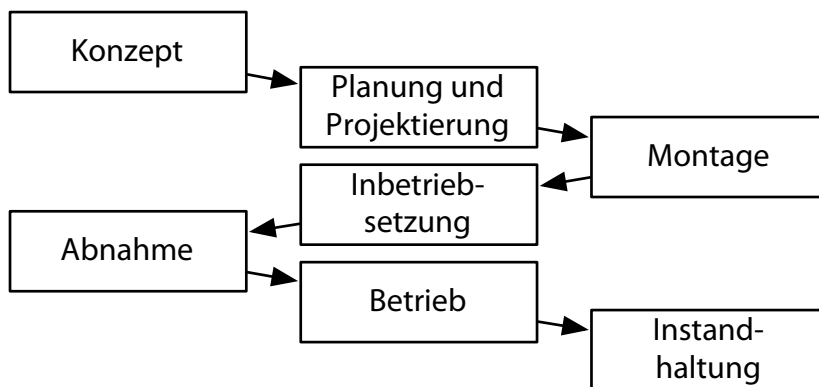


Abbildung 3.9: Phasen für Aufbau und Betrieb von BMA

Zunächst wird die BMA für das jeweilige Gebäude oder Bauwerk konzipiert. In dieser Phase werden die Anforderungen an die BMA festgehalten, die erforderlich sind, um die gestellten

Komponente	Anforderung nach
Automatischer Brandmelder	DIN EN 54-5, -7, -10, -12, -15, -20
Brandmelderzentrale	DIN EN 54-2
Alarmierungseinrichtung, Sprachalarmanlagen	DIN 14675, DIN EN 54-3, DIN EN 54-16, DIN EN 54-24, DIN 33404 Teil 3, DIN VDE 0833-4
Handfeuermelder	DIN EN 54-11
Übertragungseinrichtung (ÜE) für Brandmeldungen	DIN 14675, VdS 2465, DIN VDE 0833-3, DIN EN 50136-1-2, -1-3
Empfangseinrichtung für Brandmeldungen	DIN EN 50136
Steuereinrichtung für automatische Brandschutzeinrichtung	VdS 2095, VdS 2496, DIN 14675, DIN EN 12094-1
Automatische Brandschutzeinrichtung	VdS 2095, bzw. DIN VDE 0833-2, VdS 2496, DIN 14675
Übertragungseinrichtung für Störungsmeldungen	DIN 14675, VdS 2465
Empfangszentrale für Störungsmeldungen	DIN EN 50136
Energieversorgungseinrichtung (EV)	DIN EN 54-4, VdS 2095, bzw. DIN VDE 0833-2, DIN VDE 0833-1

*Tabelle 3.2: Exemplarische Komponenten einer Brandmeldeanlage und die jeweiligen Anforderungen*

Schutzziele zu erreichen. Im Anschluss an die Konzeptphase wird die Anlage geplant und projiziert. Danach folgen die Montage und die Inbetriebsetzung mit internen Errichterprüfungen. Nachfolgend finden Abnahmen der BMA statt, bei denen die wichtigsten Funktionen überprüft werden. Während der Abnahmen werden in der Regel die Funktionen nicht vollständig, sondern stichprobenartig überprüft. Auf die Abnahme folgt der Betrieb der BMA mit wiederkehrenden Prüfungen und der Instandhaltung. Unter Umständen durchläuft die BMA noch eine Phase der Außerbetriebnahme.

Um die Anforderungen an die BMA erfüllen zu können und gleichzeitig die Möglichkeiten auszuschöpfen, müssen viele Vorschriften beachtet werden. Die wichtigsten Vorschriften für die jeweiligen Komponenten sind in Tabelle 3.2 in Anlehnung an DIN EN 54-1 dargestellt [183].

Derzeit werden die meisten BMA in ringförmigen Strukturen ausgebildet. Daher werden zusätzliche Komponenten mit den jeweiligen Anforderungen, die in Tabelle 3.3 dargestellt sind, erforderlich.



Komponente	Anforderung nach
Zusatz-Energieversorgungseinrichtung, abgesetzt	DIN EN 54-4
Eingangsbaustein	DIN EN 54-18
Ausgangsbaustein	DIN EN 54-18
Kurzschlussisolator	DIN EN 54-17
Eingangs-/Ausgangsbaustein	DIN EN 54-18
Anzeige- und Bedieneinrichtung	DIN EN 54-2
Redundante Struktur bidirektionaler Übertragungswege	VdS 2095 bzw. DIN VDE 0833-2
Unabhängige Übertragungswege für Energie und Störungssignal nach DIN EN 54-4	DIN EN 54-2, -4
Zusätzliche Energieversorgungsleitungen	DIN EN 54-2
Alarmkontakt (z. B. Löschanlage)	VdS 2496, VdS CEA 4001

*Tabelle 3.3: Exemplarische zusätzliche Komponenten einer ringförmigen Brandmeldeanlage und die jeweiligen Anforderungen*

### 3.4.3 Brandmelder

Brandmelder sind als ein wichtiger Bestandteil einer BMA dafür vorgesehen, möglichst frühzeitig einen Brand zu detektieren.

Der Begriff Brandmelder ist in der Produktnorm DIN EN 54-1 wie folgt definiert:

**Definition: Brandmelder**

*„Bestandteil einer Brandmeldeanlage, das mindestens einen Sensor enthält, der ständig oder in periodischen Zeitabständen mindestens eine geeignete physikalische und/oder chemische Kenngröße (Brandkenngröße) überwacht, die im Gefolge eines Brandes auftritt, und der mindestens ein entsprechendes Signal für die Brandmelderzentrale zur Verfügung stellt“ [183].*

Aus der Definition wird ersichtlich, dass lediglich die automatischen Brandmelder gemeint sind. Neben diesen gibt es noch die sogenannten Handfeuermelder (Druckknopfmelder), die von Personen im Brandfall manuell betätigt werden. Diese wirken zwar nicht automatisch, können aber im weitesten Sinne ebenfalls den Sensoren zugeordnet werden.

Im Allgemeinen können die Brandmelder auf verschiedene Arten differenziert werden, die im Weiteren vorgestellt werden.

### **3.4.3.1 Meldearten**

Brandmelder als Sensoren einer Brandmeldeanlage können zunächst nach ihrer Funktionsweise in automatische und nicht automatische unterteilt werden. Bei den nicht automatischen Brandmeldern handelt es sich um Melder, die von Menschen manuell betätigt werden, um einen Brandalarm abzusetzen bzw. weitergehende Interaktionen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen auszulösen. Die Meldung erfolgt meist mit einem sogenannten Druckknopfmelder, indem eine Taste gedrückt wird. Hierbei rastet die Taste des Druckknopfmelders ein, wodurch die Person eine haptische Rückmeldung erhält, dass die Brandmeldung erfolgt ist. Im Weiteren werden zunächst die nichtautomatischen und anschließend die automatischen Brandmelder vorgestellt.

### **3.4.3.2 Handfeuermelder**

Die nicht automatischen Brandmelder werden auch als Handfeuermelder bezeichnet. Dies sind z. B. Handfeuermelder nach DIN EN 54-11. Diese Melder werden von Hand betätigt und können sowohl eine Brandmeldung als auch automatische Steuerungen auslösen. Die Handfeuermelder werden meistens an wichtigen Haupteintrittswegen oder Knoten eines Gebäudes installiert. Hierzu gehören Gänge, Fluchtwege, Treppenträume und Ausgänge an gut sichtbaren und zugänglichen Stellen und Brand-Risikobereichen.

Die Anbringung an diesen Stellen soll dazu dienen, dass Menschen, die im Brandfall das Gebäude verlassen, zwangsläufig an den Handfeuermeldern vorbeikommen und die Möglichkeit haben, eine Meldung abzusetzen. Damit die Handfeuermelder als solche wahrgenommen werden, sind diese meist in einer auffälligen Farbe, z. B. Rot, gestaltet und entsprechend beschriftet. In der Produktnorm DIN EN 54-11:2001-10 sind die Geräteanforderungen für Handfeuermelder festgelegt, die als Bestandteile von Brandmeldesystemen (BMS) bzw. in Brandmeldeanlagen (BMA) installiert werden.

Das Signal eines Handfeuermelders darf nicht verzögert werden. Zwischen der Auslösung eines Handmelders und der Alarmauslösung über die Brandmelde- und Steuerzentrale dürfen maximal 10 Sekunden vergehen. Der Grund hierfür ist, dass die Betätigung eines Handfeuermelders, abgesehen von bewussten Fehlbetätigungen, eine sehr sichere Möglichkeit darstellt, einen Brand zu melden und weitere Interaktionen einzuleiten.

### Dynamische Ansteuerungen

Bei der Meldung durch einen Handfeuermelder handelt es sich um eine einmalige Aktion, die evtl. auch nicht in unmittelbarer Nähe zum Brandort oder sogar bei einem Missbrauch auch ohne einen tatsächlichen Brandfall stattfinden kann. Für die Person, die den Melder betätigt, bleibt meist unklar, welche Interaktionen nach der Auslösung stattfinden.

Für dynamische Steuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen können Handfeuermelder daher nicht eingesetzt werden. In der Regel werden durch die Auslösung eines Handfeuermelders nicht lokale, sondern externe und gebäudeweite Interaktionen, wie z. B. die Alarmierung der Feuerwehr oder der Personen vor Ort ausgelöst.

#### 3.4.3.3 Automatische Brandmelder

Automatische Brandmelder ermöglichen die Erkennung von Bränden auch ohne die Anwesenheit von Personen. In den Brandmeldern werden hierfür eine oder mehrere Brandkenngrößen erkannt. Die in den automatischen Brandmeldern am häufigsten vorkommenden Erkennungsgrößen sind Rauchpartikel, Trübung der Raumluft, Temperatur, Ultraviolett- oder Infrarot-Strahlung sowie Rauchgaskonzentrationen. In Abbildung 3.10 ist die systematische Einteilung von Brandmeldern dargestellt.

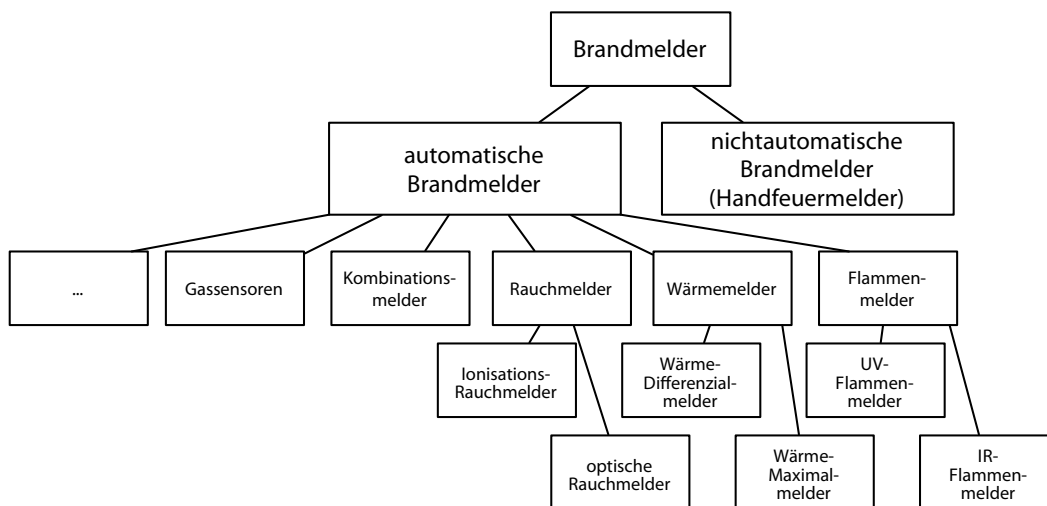


Abbildung 3.10: Einteilung von Brandmeldern (vgl. hierzu [48])

Die automatischen Brandmelder werden nach ihrem Aufbau, ihrer Funktionsweise oder nach der zu delektierenden Brandkenngröße unterteilt.

Zunächst lassen sich die Brandmelder, wie bereits erläutert, in automatische und nichtautomatische Brandmelder unterteilen. Die automatischen Brandmelder werden oft zunächst nach der zu detektierenden Brandkenngröße und weiter nach dem physikalischen Funktionsprinzip unterteilt. Bei den Rauchmeldern gibt es die Ionisations- und die optischen Rauchmelder. Die Rauchmelder spielen unter den Brandmeldern eine wichtige Rolle, da die Detektion der Kenngröße Rauch unter geeigneten Randbedingungen bereits in einer frühen Brandentstehungsphase erfolgen kann. Bei den Wärmemeldern unterscheidet man die Wärme-Differenzial- und die Wärme-Maximalmelder. Die Flammenmelder lassen sich in die UV- (Ultraviolett) und die IR- (Infrarot) Melder unterteilen.

Alle automatischen Brandmelder weisen unter bestimmten Randbedingungen Vor- und Nachteile auf. Um die Nachteile auszugleichen oder die Vorteile besser auszunutzen, werden häufig mehrere Brandmelder zu sogenannten Mehrkriterienmeldern kombiniert. Diese Brandmelder sollen die entstehenden Brandkenngrößen redundant detektieren.

Neben üblichen automatischen Brandmeldern (vgl. Abbildung 3.10) gibt es auch automatische Brandmelder, die Bestandteil eines spezialisierten Branddetektionssystems sind. Zu den besonderen Brandmeldern bzw. spezialisierten Branddetektionssystemen gehören z. B.:

- Rauchansaugsystem
- Linear-Rauchmelder
- Linienförmige Wärmemelders
- Rauchmelder zur Überwachung von Lüftungsleitungen
- CO-Melder
- Räumliche Brandmelder auf Basis der Auswertung von Videoaufnahmen
- ...

Diese können entweder in autarken Systemen oder als Sensoren einer Brandmeldeanlage zum Einsatz kommen.

### **Zuverlässigkeit der Detektion**

Automatische Brandmelder sind wichtige Bestandteile von Brandmeldeanlagen. Aus diesem Grund wird der Entwicklung von diesen Komponenten eine große Bedeutung beigemessen und die Sensoren werden kontinuierlich weiterentwickelt. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt in erster Linie auf der Zuverlässigkeit einer Detektion zu einem möglichst frühen Zeitpunkt,

wobei eine geringe Quote von Falschalarmen ebenfalls wichtig ist. Die Entwicklungen basieren auf Erfahrungen mit den jeweiligen Meldern/Meldertypen im praktischen Einsatz und den im Vorfeld stattfindenden und z. T. umfangreichen Laborprüfungen.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Die wichtigste Größe für die Minimierung des Schadens bei einem Brand ist die Zeit vom Brandbeginn bis zur Brandmeldung bzw. bis zum Beginn der Rettung von Personen und der Löschmaßnahmen. Diese Zeit zu verkürzen ist das Ziel aller Bemühungen bei der Erarbeitung von neuen automatischen Brandmeldern. Diese Brandmelder stellen als Sensoren einer BMA den wichtigsten Input für die Branddetektion und anschließende Auslösung von Interaktionen dar. Die verfügbare Vielfalt von Brandmeldern ermöglicht es, diese unter nahezu allen Umwelt- und Randbedingungen einzusetzen.

Während der Zuverlässigkeit der Detektion eine große Rolle beigemessen wird, spielt die Zuverlässigkeit und Sicherheit des automatischen Brandmelders jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Einer der Gründe hierfür ist, dass die Hersteller auf die branchenübliche Vorgehensweisen und Normen verweisen und z. T. Neuentwicklungen, wie etwa den Methoden der funktionalen Sicherheit (vgl. Abschnitt 2.3.2) skeptisch gegenüberstehen. Um jedoch insgesamt sichere und dynamisch steuerbare Systeme zu erhalten, ist es zwingend notwendig, einzelne Komponenten auf die wichtigsten sicherheitsrelevanten Aspekte (vgl. Abschnitt 2.3 auf Seite 15) zu untersuchen. Hier reicht es nicht, sich auf die Erfahrungswerte der Hersteller und Anwender mit automatischen Brandmeldern zu verlassen. Vielmehr ist eine systematische sicherheitstechnische Betrachtungsweise dieser wichtigen Komponente des Gesamtsystems notwendig.

Sobald die Forderungen nach der Sicherheit und Zuverlässigkeit erfüllt sind, ist es vorstellbar, dass die automatischen Brandmelder nicht nur einmalig ein Brandalarmsignal geben, sondern auch im Brandfall weiter verwertbare Daten wie etwa Temperatur, Rauchgaskonzentrationen und optische Rauchdichte zur Verfügung stellen. Anhand dieser Daten können den Einsatzkräften Prognosen zur Dynamik der Rauchausbreitung und entsprechende Fluchtwegsteuerungen oder präzisere Informationen zur Verfügung gestellt werden.

#### **3.4.3.4 Anschluss der Melder an BMA**

Brandmelder werden in der Regel mithilfe von Ringleitungen, aber auch mit Stichleitungen an die Brandmelderzentrale angeschlossen. Dabei werden Melder in sogenannte Meldebereiche zusammengefasst. Der Begriff des Meldebereichs/Zone wird gemäß DIN EN 54-2:1997 wie folgt definiert:

***Definition: Meldebereich***

*„Geographische Unterteilung des Sicherungsbereiches, in dem ein oder mehrere Punkte installiert sein können, die als Meldergruppe(n) bezeichnet werden und für die eine eigene gemeinsame Anzeige an der BMZ vorgesehen ist.“*

Dies bedeutet, dass die ausgelösten Brandmelder desselben Typs innerhalb eines Meldebereichs dieselbe Interaktion auslösen. Dagegen können die Interaktionen je nach Meldertyp, obwohl sie sich im selben Meldebereich befinden, voneinander abweichen. So unterscheiden sich die Interaktionen von automatischen Brandmeldern von denen der manuellen Melder. Die Interaktionen nach der Detektion werden in der Steuermatrix festgelegt und von der BMA ausgelöst. Diese Zusammenhänge werden in entsprechenden Unterabschnitten erläutert.

#### **3.4.4 Brandmelderzentralen**

Der Begriff der BMZ wird gemäß DIN EN 54-1 wie folgt definiert:

***Definition: Brandmelderzentrale***

*„Bestandteil einer Brandmeldeanlage, durch welches andere Bestandteile mit Energie versorgt werden können, und welches*

*a) dazu dient:*

- 1. die Signale der angeschlossenen automatischen Melder und/oder Handfeuermelder aufzunehmen;*
- 2. festzustellen, ob diese Signale eine Brandmeldung bedeuten;*
- 3. jede Brandmeldung akustisch und optisch anzuzeigen;*
- 4. den Ort der Gefahr anzuzeigen.*

*b) dazu dient, das System auf ordnungsgemäße Funktion zu überwachen und sichtbare und*

*hörbare Anzeigen bei jeder Störung zu geben (z. B. bei Kurzschluss, Drahtbruch oder Störungen in der Stromversorgung); und, wenn notwendig, in der Lage ist, die Störungsmeldung über die Übertragungseinrichtung für Störungsmeldungen an die Empfangszentrale für Störungsmeldungen weiterzuleiten.*

*c) wenn gefordert, in der Lage ist, die Brandmeldesignale weiterzuleiten; zum Beispiel:*

- zu akustischen oder optischen Alarmierungseinrichtungen oder zu einem Sprachalarmierungssystem;*
- über die Übertragungseinrichtung für Brandmeldungen an eine Alarmempfangszentrale;*
- zur Steuerfunktion für automatische Brandschutzeinrichtungen oder -systeme;*
- zum Feuerwehr-Bedienfeld;*
- zu anderen Systemen oder Einrichtungen, die nicht in den Anwendungsbereich der EN 54 fallen“ [183].*

Die Brandmelderzentrale bildet somit den Kern einer jeden Brandmeldeanlage bzw. eines Brandmeldesystems. Die Steuerungsfunktion wird, zumindest auf der Ebene der Brandmeldeanlage, von der verarbeitenden Einheit der Brandmelderzentrale übernommen. Andere autarke gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen werden in der Regel ebenfalls zunächst von der Brandmelderzentrale aktiviert, wobei die weiteren Steuerungen innerhalb dieser Anlagen davon unabhängig erfolgen können.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Die Umsetzung neuer dynamischer Steuerungen würde den dargestellten Aufbau nicht durchbrechen. Die dynamischen Steuerungen könnten weiterhin von der Brandmelderzentrale übernommen werden, sofern die einzelnen Komponenten dafür ausgelegt sind. Falls eine Brandmeldeanlage jedoch nicht die geforderten Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit erfüllt, können spezialisierte Steuerungen diese Funktion übernehmen. In diesem Fall verbleibt die Kernaufgabe (Brandfeststellung) bei der Brandmeldeanlage, während die quantifizierbar sicheren Steuerungen, wie sie etwa in der Prozessindustrie bereits verwendet werden, die eigentlichen Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen übernehmen.

#### **3.4.4.1 Zustände von Brandmeldeanlagen**

Eine Brandmelderzentrale kann sich zu einem Zeitpunkt in unterschiedlichen Zuständen befinden. Die DIN EN 54-2 gibt folgende mögliche Zustände einer Brandmelderzentrale an:

- Brandmeldezustand, wenn eine Brandmeldung angezeigt wird;
- Störungmeldezustand, wenn eine Störung angezeigt wird;
- Abschaltzustand, wenn die Abschaltung von Funktionen angezeigt wird;
- Prüfzustand, wenn die Prüfung von Funktionen angezeigt wird;
- Betriebsbereitschaftszustand, wenn die BMZ von einer Energieversorgung entsprechend EN 54-4 mit Energie versorgt und kein anderer Betriebszustand angezeigt wird.

Die Brandmelderzentrale befindet sich in der Regel im Betriebsbereitschaftszustand und geht im Falle einer Detektion in den Brandmeldezustand über. In diesem Zustand werden auch die Interaktionen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen oder auch anderer Anlagen ausgelöst. Steuerungen von Anlagen erfolgen dabei entweder zeit- oder ereignisbezogen. Die Anlagen können während dieses Steuerungsvorgangs in unterschiedlichen Zuständen sein, wobei mit den Steuerungsvorgaben andere Zustände für diese Anlagen vorgegeben werden.

#### **3.4.4.2 Verteilte Systeme**

Für größere bauliche Anlagen werden häufig mehrere BMZ einer BMA vorgesehen. Solche Brandmeldeanlagen werden, topologisch betrachtet, häufig auf sogenannten Ringleitungen aufgebaut. In Abbildung 3.11 ist ein Beispiel für die Vernetzung von Komponenten des verteilten Brandmeldesystems dargestellt.

Auf der Ringleitung werden unterschiedliche Elemente, wie z. B. Bedienfelder und Brandmelderzentralen, angeordnet. Dabei muss eine der BMZ die sogenannte übergeordnete Brandmelderzentrale sein. In ihr laufen die Informationen der übrigen, untergeordneten BMZ zusammen und können dort zentral verarbeitet werden. Neben der Anordnung der Elemente der BMA auf Ringleitungen gibt es auch sogenannte Stichleitungen, auf denen ebenfalls Elemente angeordnet werden können.

Für dynamische Brandfallsteuerungen ist der Aufbau bzw. die Topologie der Vernetzung von verteilten und nicht verteilten Brandmeldesystemen nachrangig. Sowohl mit Stich- als auch



mit Ringleitungen lassen sich dynamische Brandfallsteuerungen umsetzen.

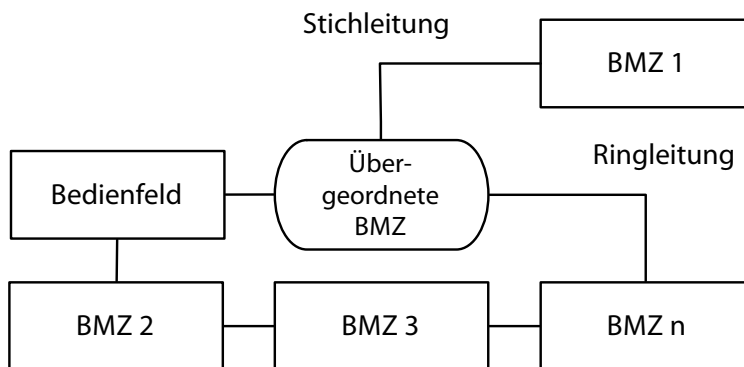


Abbildung 3.11: Beispiel der Vernetzung (Topologie) eines verteilten Brandmeldesystems

### 3.4.4.3 Übertragungssicherheit, Übertragungswege und Funktionserhalt von Leitungsanlagen

Für das zuverlässige Funktionieren von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Brandfall sind die Übertragungssicherheit von Informationen wie Steuerbefehlen und der Funktionserhalt von Übertragungswegen von großer Bedeutung. Der Übertragungsweg ist in DIN EN 54-1 wie folgt definiert:

**Definition: Übertragungsweg**

„Verbindung zwischen den Bestandteilen einer Brandmeldeanlage zur Übertragung von Informationen und/oder Energie“ [183].

Bei der Übertragung von Informationen spielt die Übertragungssicherheit eine große Rolle. Die Übertragungssicherheit wird im Wesentlichen mithilfe von redundanten Übertragungswegen und der Einhaltung von Normen, Vorschriften und Aufschaltbedingungen der jeweiligen Feuerwehr gewährleistet. Alle diese Anforderungen sind jedoch überwiegend qualitativer Natur, sodass das tatsächlich erreichte Sicherheitsniveau in der Regel nicht angegeben werden kann.

### Dynamische Ansteuerungen

Für dynamische Steuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen ist die Bedeutung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Übertragung von Informationen von noch größerer Bedeutung als bei statischen Anlagen, die tendenziell in einem sicheren Zustand

verbleiben, wenn der Übertragungsweg unterbrochen ist. Daher ist hier ein System zur quantitativen Beurteilung der Sicherheit und der Zuverlässigkeit der Übertragung zu präferieren.

### **3.5 Andere gebäudetechnische Komponenten mit Brandschutzfunktionen**

Die Vielfalt von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen ist sehr groß. Fortlaufend werden gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen neu- und weiterentwickelt, um die steigenden Anforderungen abzudecken. Außer der bereits vorgestellten Brandmeldeanlage werden daher einige wichtige weitere Einrichtungen vorgestellt und hinsichtlich ihrer dynamischen Steuerungsmöglichkeiten und Sicherheit diskutiert. Die Gliederung dieses Abschnitts orientiert sich dabei weitestgehend an der Zusammenstellung von Brandschutzeinrichtungen nach VDI 6010 Blatt 2 2011, die vom Verband Deutscher Ingenieure (VDI) herausgegeben wird [217].

#### **3.5.1 Feuerschutz- und Rauchschutzabschlüsse**

An umschließende Bauteile wie Decken und Wände werden gemäß dem Abschottungsprinzip des vorbeugenden baulichen Brandschutzes Brandschutzanforderungen gestellt. Öffnungen in diesen Bauteilen sind, um dieses Prinzip nicht zu verletzen, mit geeigneten Systemen in entsprechender brandschutztechnischer Qualität zu verschließen. Übliche Feuerschutz- und Rauchschutzabschlüsse sind Türen, Tore oder Brandschutzklappen. Die Anforderung an Feuerschutz- und Rauchschutzabschlüsse wird durch den Einbau von automatischen Feststellanlagen erreicht [217]. Die Feststellanlagen werden laut DIBt-Richtlinie für Feststellanlagen wie folgt definiert:

***Definition: Feststellanlagen***

*„Feststellanlagen sind Geräte oder Gerätekombinationen, die geeignet sind, die Funktion von Schließmitteln kontrolliert unwirksam zu machen.“*

Eine Feststellanlage besteht dabei aus mindestens einem Brandmelder, einer Auslöse- und Feststellvorrichtung und einer Energieversorgung.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Für die Feststellanlagen gibt es mehrere Bauarten. Für die Möglichkeit der Ansteuerung sind in erster Linie solche Feststellanlagen interessant, die über die BMA zentral, zumindest optional, angesteuert werden können. Vollkommen autarke, also nicht über die BMA zu steuernde Feststellanlagen werden daher hier nicht weiter betrachtet.

Die Ansteuerung von Feststellanlagen ermöglicht es der BMA, Öffnungen in brandschutztechnisch qualifizierten Bauteilen mithilfe von z. B. Türen oder Rolltoren ereignis- und/oder zeitbezogen, also dynamisch zu verschließen. Das Ergebnis einer solchen Ansteuerung kann aber nicht nur ein Verschluss sein, sondern auch z. B. die Schaffung von bestimmten Abschlüssen, die in Kombination mit anderen Anlagen, wie z. B. der Lüftungsanlage, für bestimmte Druckverhältnisse innerhalb eines Gebäudeabschnitts sorgen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Feststellanlagen sich auch in Kombination mit anderen Anlagen für dynamische Steuerungen gut eignen. Die Interaktionen von Anlagen müssen jedoch sorgfältig geplant werden. Erfahrungen in der Praxis zeigen, dass solche Ansteuerungen bereits Verwendung finden.

### **3.5.2 Lüftungsanlagen**

Raum-Luft-Technische-Anlagen (RLT-Anlagen), Kälte- und sonstige Anlagen sind für die Erzeugung eines bestimmten Raumklimas in modernen Gebäuden Standard. Die Leitungen dieser Anlagen durchdringen meistens unterschiedliche raumabschließende und brandschutztechnisch qualifizierte Bauteile, um das jeweilige Trägermedium wie etwa Luft oder Flüssigkeiten an den vorbestimmten Ort zu transportieren und dort für ein bestimmtes Raumklima zu sorgen. Zur Gewährleistung des Abschottungsprinzips sind auch bei diesen Anlagen bestimmte Abschottungssysteme sowie Abschaltsteuerungen für den Brandfall vorgesehen.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Die hier beschriebenen Anlagen und dabei in erster Linie die RLT-Anlagen werden in der Regel nicht für den Brandfall ausgelegt und daher häufig komplett abgeschaltet [217]. Die RLT-Anlagen bzw. Komponenten dieser Anlagen können jedoch im Brandfall auch unterstützend angesteuert werden, um z. B. mit einem Aufbau von bestimmten Druckverhältnissen der Verrauchung von Gebäudeabschnitten entgegenzuwirken [25, 165]. Je nach Auslegung von

RLT-Anlagen können dabei ggf. die Zu- und Abluftanlagen unterschiedlich angesteuert werden. Eine dynamische Ansteuerung der Anlagen wird dabei in der Regel möglich sein, wobei die RLT-Anlagen eines Gebäudes mit den jeweiligen Komponenten, wie z. B. dem Kanalnetz, der Lage der Ventilatoren und unterschiedlicher Klappen, Öffnungen usw., jeweils detailliert in dieser Hinsicht zu betrachten sind. Auch die Auswirkungen sowie die Wechselwirkungen solcher Ansteuerungen von im Brandfall betriebenen RLT-Anlagen auf andere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen wie z. B. Sprinkleranlage oder eine Entrauchungsanlage sind zu betrachten [213].

Brandschutzklappen in Kanälen von RLT-Anlagen können im Brandfall entweder über ein Schmelzlot beim Erreichen einer Temperatur oder motorisch angetrieben angesteuert werden. Bei motorisch angetriebenen Klappen kann dabei die Steuerung im Sinne dieser Arbeit dynamisch erfolgen und bestimmten Schutzzielen dienen.

Klappen mit Sonderfunktionen, wie z. B. Entrauchungsklappen, können für dynamische Steuerungen genutzt werden, sofern sie über aktiv anzusteuernde Komponenten (Aktoren), wie z. B. Stellmotoren, verfügen und eine Anbindung an eine Steuereinheit haben.

Die Ansteuerungen von Komponenten von RLT-Anlagen im Brandfall sollten stets mit größter Sorgfalt geplant werden, da Fehler in diesem Bereich zum Teil gravierende Auswirkungen auf das Rauchmanagement in einem Gebäude haben können.

### **3.5.3 Entrauchungsanlagen**

Bei den Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) unterscheidet man zwischen drei Prinzipien des Rauchmanagements. Zum einen gibt es das Prinzip der natürlichen Rauch- und Wärmeabführung. Hierbei handelt es sich um Anlagen wie natürliche Rauchabzugsanlagen NRA oder Wärmeabzüge WA, die in der äußeren Gebäudehülle während eines Brandfalls Öffnungen für die Rauchabführung sowie Zuluft schaffen. Weiterhin gibt es die maschinellen Anlagen, wie die maschinelle Rauchabzugsanlage MRA und die Rauch-Differenzdruckanlage RDA. Die MRA führt die Rauchgase im Brandfall mithilfe von Ventilatoren direkt oder über Kanalsysteme ab. Die Zuluft kann dabei über vergleichbare Kanalsysteme und Ventilatoren oder über Zuluftöffnungen ohne Ventilatoren nachströmen. Die RDA sorgt im Brandfall für bestimmte Druckverhältnisse innerhalb eines Bereiches in einem Gebäude. Im Weiteren werden die o. g. Anlagen vorgestellt und deren dynamische Ansteuerungsmöglichkeiten bewertet.

### **3.5.3.1 NRA**

Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) mit Ab- und Zuluftflächen können im Brandfall entweder automatisch oder manuell ausgelöst werden. Diese Anlagen haben sich seit langer Zeit bewährt und sind fester Bestandteil von Entrauchungskonzepten in Gebäuden.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Hinsichtlich der Ansteuerungsfähigkeit der NRA sind nur solche geeignet, die nicht autark agieren, sondern an zentrale Steuerungseinrichtungen wie z. B. die BMA gekoppelt sind. Auf natürliche Wärme- und Rauchabzugsanlagen können jedoch, wie auch auf andere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen, Störgrößen wie z. B. Witterungseinflüsse einwirken [85], [160]. Um diesen Störgrößen entgegenzuwirken, benötigt man die Möglichkeit der dynamischen witterungs- und windabhängigen Steuerung dieser Anlagen [226]. Diese Möglichkeit wird in Abschnitt 5 anhand von Simulationen eines Beispielgebäudes ausführlich diskutiert.

### **3.5.3.2 MRA**

Maschinelle Entrauchungsanlagen dienen besonders bei Gebäuden mit komplexer Geometrie dazu, die Entrauchung während eines bestimmten Zeitraums im Brandfall zu gewährleisten [186]. Im Gegensatz zu natürlichen Wärme- und Rauchabführungsanlagen sind maschinelle Entrauchungsanlagen weitestgehend witterungsunabhängig und nutzen unterschiedliche Prinzipien zur Rauchableitung. Zu diesen Prinzipien können die Verdünnung und die Schichtung gezählt werden, die mit unterschiedlichen Anlagen zu realisieren sind [217, 223].

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Maschinelle Entrauchungsanlagen können im Brandfall entweder automatisch oder manuell ausgelöst werden [177]. Der Betrieb solcher Anlagen muss auch andere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen, wie z. B. Sprinkleranlagen, berücksichtigen, damit die Wirkung dieser Anlagen sich nicht gegenseitig negativ beeinflusst. Daher sind der Wirkbereich und der Zeitpunkt des Betriebes der Anlage zu prüfen und ggf. dynamisch an andere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen anzupassen.

Maschinelle Entrauchungsanlagen können bei entsprechender sorgfältiger Planung und Auslegung sehr gut zeitlich und räumlich in ihrer Wirkung gesteuert und somit gemäß den gestellten Schutzziele kontrolliert werden [224]. So können z. B. der Zeitpunkt der Ein- und Abschaltung,

die Strömungsrichtung oder die Leistung der Entrauchungsventilatoren je nach Brandszenario wirkungsvoll eingesetzt werden, um vorher definierte Schutzziele sicher zu erreichen. Möglichkeiten solcher dynamischer Steuerungen werden in Abschnitt 5 anhand von Simulationen einer Verkehrstunnelanlage diskutiert.

### **3.5.3.3 RDA**

Die Rauch-Differenzdruck-Anlage (RDA) oder Druckbelüftungsanlage dient der Rauchfreihaltung von Gebäudeteilen, wie z. B. von Sicherheitstreppe nräumen oder von Aufzugsfahr schächten.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

RDA werden in der Regel als eigenständige Anlagen konzipiert und errichtet. Diese Anlagen können als ein in sich geschlossenes Subsystem mit eigener Sensorik und Aktorik verstanden werden. Die Schnittstelle einer Druckbelüftungsanlage zur BMA besteht zum einen darin, dass die BMA bei Brandalarm die RDA startet, sofern dies in der Brandfallsteuermatrix für die Detektion in einem konkreten Meldebereich vorgesehen ist. Genauer sind die Funktionen von RDA sowie die Schnittstellen zu anderen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen in [206], [137] und in [187] beschrieben.

Nach dem Auslösen der Druckbelüftungsanlage über die BMA oder manuell funktioniert diese weitestgehend autark und unabhängig von anderen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen. Den Steuerungsmöglichkeiten einer Druckbelüftungsanlage sind daher enge Grenzen gesetzt, da die Anlage ein autarkes, in sich dynamisches, selbstregulierendes Subsystem ist. Die Schnittstellen und Interaktionen zu anderen Anlagen, wie etwa zu Entrauchungsanlagen in benachbarten Meldebereichen eines Gebäudes, sind jedoch zu beachten und zu berücksichtigen.

Manuelle Steuerungen der RDA hinsichtlich des Ein- und Ausschaltungszeitpunktes sind in der Regel durch die Rettungskräfte möglich.

### 3.5.4 Automatische Löschesysteme

Automatische Löschesysteme sind geeignet, entstehende Brände entweder zu löschen oder zu unterdrücken. Damit werden Anlagen, Räume oder Gebäude vor Bränden und deren Folgen geschützt [78]. Löschesysteme sind daher ein entscheidender Bestandteil eines ganzheitlichen Schutzkonzeptes [124]. In automatischen Löschesystemen werden folgende Löschesmedien verwendet:

- Wasser
- Schaum
- Pulver
- Gase

Bei den vielfältigen automatischen Löschesystemen können im Wesentlichen folgende unterschieden werden:

- Wasserlöschanlagen
  - Sprinkleranlagen
  - Sprühwasserlöschanlagen
  - Wassernebellöschanlagen
- Schaumlöschanlagen
- Pulverlöschanlagen
- Gaslöschanlagen

Aufgrund der Vielfalt von o. g. Anlagen gibt es dazu zahlreiche Vorschriften, die bei der Planung, Errichtung und Wartung zu beachten sind. Eine Übersicht hierzu findet sich z. B. in [55, 78].

#### 3.5.4.1 Sprinkleranlagen

Sprinkler einer Sprinkleranlage werden individuell und automatisch ausgelöst, wenn die Temperatur am Sprinklerkopf während eines Brandereignisses einen kritischen Wert überschreitet. Durch die üblicherweise vorhandene Kopplung der Sprinkleranlage an die Brandmeldeanlage kann eine Sprinkleranlage somit auch nachfolgende Brandfallsteuerungen und Alarmierungen auslösen [124].

### **Dynamische Ansteuerungen**

Die Dynamik einer Sprinkleranlage besteht darin, dass bei Brandausbreitung bis zu einer gewissen Größe und Brandintensität Sprinklerköpfe bedarfsorientiert aktiviert werden und somit dem Brandgeschehen angepasst entgegenwirken.

Der Eingriff in eine aktivierte Sprinkleranlage im Brandfall hinsichtlich der dynamischen Steuerung ist nicht möglich, da die Sprinkleranlage eine autarke Anlage ist. Die Anlage reagiert aber von sich aus ereignisbezogen. Der Ereignisbezug richtet sich nach dem Brandort und der kritischen Brandtemperatur.

Nach der Auslösung der Sprinkleranlage wird, etwa über die Alarmventile, diese Information an die BMA weitergegeben und ein Brandalarm mit entsprechenden Interaktionen ausgelöst. Für die Rettungskräfte gibt es daher lediglich die Möglichkeit die Sprinkleranlage im Bedarfsfall ganz abzuschalten.

#### **3.5.4.2 Sprühwasser- und Wassernebellöschanlagen**

Im Gegensatz zu Sprinkleranlagen werden Sprühwasser- und Wassernebellöschanlagen, die ebenfalls zu den Wasserlöschanlagen zählen, selektiv in den jeweiligen Löschbereichen ausgelöst. Die Anlagen sind hierfür mit offenen Sprinklerköpfen bzw. -düsen ausgestattet. Diese Anlagen sind in der Regel über eine Zweimelderabhängigkeit an die BMA gekoppelt [124].

### **Dynamische Ansteuerungen**

Nach der Detektion durch einen Melder der BMA können gemäß den Festlegungen von Brandfallsteuerungen dynamische Interaktionen erfolgen. Zum Beispiel können dabei etwa noch vor der Auslösung der Wasserlöschanlage EDV-Systeme oder andere elektrische Verbraucher abgeschaltet werden [78].

Insgesamt können die Sprühwasser- und Wassernebellöschanlagen dynamisch also sowohl zeit- als auch ereignisbezogen gesteuert werden. Die Ansteuerung kann bei Bedarf bis auf einen einzelnen Sprinklerkopf bzw. -düse präzisiert werden. Hinsichtlich des Ereignisbezugs ist es für die Ansteuerung von Sprühwasser- und Wassernebellöschanlagen wichtig, ein geeignetes und zuverlässiges Branddetektionssystem, falls notwendig, mit Spezialbrandmeldern vorzusehen.



### **3.5.4.3 Schaum-, Pulver- und Gaslöschanlagen**

Hinsichtlich der Steuerung ähneln Schaum-, Pulver- und Gaslöschanlagen den Sprühwasser- und Wassernebellöschanlagen. Auch diese Anlagen werden nach der Detektion über ein geeignetes Brandmeldesystem ausgelöst. Sofern in den jeweiligen Löschbereichen eine Gefahr durch das Löschmittel für Personen besteht, werden jedoch erhöhte Anforderungen an die Ausfallsicherheit von Komponenten und die Voralarmierung gestellt [136]. Ferner sind die anlageninternen Steuerungen, etwa von Druckentlastungsklappen und anderen Komponenten, in der Regel komplexer als bei Wasserlöschanlagen.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Die dynamischen Steuerungen von Schaum-, Pulver- und Gaslöschanlagen funktionieren analog zu den Steuerungen von Sprühwasser- und Wassernebellöschanlagen. Die dynamischen Steuerungen können sowohl zeit- als auch ereignisbezogen lokalisiert erfolgen.

### **3.5.5 Inertisierungs- und Sauerstoffreduzierungsanlagen**

Die Inertisierungs- und Sauerstoffreduzierungsanlagen dienen der kontinuierlichen oder der brandfallausgelösten Inertisierung- bzw. der Sauerstoffreduzierung in Räumen oder umschlossenen Bereichen. Diese Anlagen haben die Aufgabe, durch Hinzugabe von Inertgasen, wie z. B. Stickstoff und Edelgasen, die Entstehung bzw. die Ausbreitung von Bränden zu verhindern (hier und weiter [227]).

Eine Inertisierungs- oder Sauerstoffreduzierungsanlage besteht im Wesentlichen aus Inertgas-Behältern, Verdampfer bzw. einer Inertgaserzeugung und Ventilen, Druckminderer, einem fest verlegten Rohrleitungsnetz mit im Schutzbereich zweckmäßig verteilten Düsen/Austrittsöffnungen sowie Einrichtungen zur Detektion von Gefahrenkenngrößen, Alarmierung, Überwachung der Inertgas-/Sauerstoffkonzentration, Ansteuerung und Auslösung.

Die Auslösung der Inertisierung erfolgt in der Regel automatisch und in Ausnahmefällen manuell. Die automatische Ansteuerung und Auslösung erfolgt bei der Detektion von Gefahrenkenngrößen etwa durch eine Brandmeldeanlage nach Erreichen von festgelegten Alarmschwellen. Innerhalb der Inertisierungszeit wird der Schutzbereich inertisiert. Die Inertisierungs- und Sauerstoffreduzierungsanlage kann mit automatischen Einrichtungen ausgerüstet sein, um etwa Maschinen und andere Anlagen abzuschalten sowie Brandschutztüren und andere Ein-

richtungen zu schließen, mit dem Ziel, die erforderliche Inertgaskonzentration aufbauen und halten zu können.

### **Dynamische Ansteuerungen**

In der Regel werden die Inertisierungs- oder Sauerstoffreduzierungsanlagen als autarke Anlagen geplant, um bestimmte Schutzziele zu erreichen. Dabei spielt die Bevorratung der eingesetzten Gase bei der Anlagenauslegung eine besondere Rolle, die es den Anlagen in der Regel ermöglicht, auf ein Brandereignis nur ein Mal zu reagieren. Dies bedeutet, dass die Anlagen ereignisbezogen auf ein Brandereignis reagieren und in sich eine dynamische Reaktion aufweisen, indem etwa vor der Auslösung des Flutvorgangs die Personen zum Verlassen des Bereiches aufgefordert werden oder die Anlagen auf bestimmte Sauerstoffkonzentrationen einreguliert werden.

Die dynamischen Steuerungen von Inertisierungs- oder Sauerstoffreduzierungsanlagen funktionieren analog zu den Steuerungen von Sprühwasser- und Wassernebellöschanlagen bzw. zu den Schaum-, Pulver- und Gaslöschanlagen. Die dynamischen Steuerungen können sowohl zeit- als auch ereignisbezogen lokalisiert erfolgen.

### **3.5.6 Gefahren-Informations-Management-System**

Gefahren-Informations-Management-Systeme oder Gefahren-Management-Systeme (GMS) werden bei komplexen Großobjekten eingesetzt, um zentral Informationen über das Objekt zusammenzuführen und in geeigneter Weise darzustellen [217]. Ferner können bestimmte Systeme und Anlagen des Objektes z. T. von dem GMS manuell oder automatisiert gesteuert werden. Die auflaufenden Alarme dieser Systeme können mithilfe von GMS ebenfalls auf einer visuell und ergonomisch gestalteten Bedienoberfläche verfolgt werden. Diese wichtigen und umfangreichen Informationen können nicht nur dem technischen Personal, sondern ebenfalls den Rettungskräften in geeigneter Weise zur Verfügung gestellt werden.

Der Vorteil solcher Systeme liegt darin, dass der aktuelle Status und die Steuerungen von Anlagen gut visuell dargestellt und beobachtet werden können. Dies ist insbesondere bei komplexen Gebäuden wichtig, um bei größeren Störfällen den Überblick behalten zu können [110]. Ein Zusammenwirken der GMS und z. B. der Brandmeldeanlage erfordert jedoch eine detaillierte Planung und Kenntnis der jeweiligen Anlagen.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Aufgrund der visuell ansprechenden und ergonomischen Gestaltungsmöglichkeiten von Bedienoberflächen des GMS ist es möglich, mithilfe von GMS auch die dynamische Entwicklung eines Brandereignisses zu verfolgen und darauf entsprechend mit manuellen oder automatisierten Steuerungen von Anlagen zu reagieren. Damit ist eine Kombination von automatisch ablaufenden Steuerungen und gezielten manuellen Eingriffen, etwa nach zuvor festgelegten Szenarien, möglich. Wichtig hierbei ist die Festlegung, zu welchen Zeitpunkten des Brandereignisses welche Stelle, z. B. Betreiber des GMS oder Rettungskräfte, die Kontrolle über die Anlagen des betroffenen Gebäudes ausüben kann.

Erfolgreich kommen solche Systeme bereits z. B. am Flughafen Düsseldorf zum Einsatz [167]. Das dort eingesetzte System ermöglicht es der Feuerwehr, im Einsatzfall Brandfallsteuerungen von einem zentralen und ergonomischen Tableau in großen Bereichen des Flughafens vorzunehmen.

Auch in der Forschung werden solche und ähnliche Systeme untersucht und Prototypen mit neuen Möglichkeiten entwickelt. Als Beispiel sei hier das Forschungsvorhaben Hermes genannt, bei dem ein Evakuierungsassistent für den Krisenfall bei Großveranstaltungen entwickelt und erfolgreich erprobt wurde [62]. Die Kernidee des Evakuierungsassistenten besteht darin, die Anwender von Sicherheitsbehörden mit Echtzeitinformationen und Prognosen zum untersuchten Gebäude und dem Zustand von Flucht- und Rettungswegen zu versorgen. Hierin fließen u. a. auch die Informationen aus dem GMS des Gebäudes ein. Diese Informationen werden in einem Kommunikationsmodul zusammengeführt und anschaulich dargestellt, um den Anwendern die zügige Entscheidungsfindung auf Basis von fundierten Informationen zu erleichtern.

### **3.5.7 Fluchtwegsteuerungen**

Die Kennzeichnung des Fluchtweges mithilfe von unterschiedlichen optischen und akustischen Elementen ermöglicht den Personen bei einer Evakuierung auf dem kürzesten Weg das Aufsuchen sicherer Bereiche oder des Freien. Hinterleuchtete Fluchtwegpiktogramme werden von Personen auch in bereits verrauchten Bereichen besser erkannt. Aus diesem Grund sollten solche Piktogramme bevorzugt eingesetzt werden. Allgemein können Fluchtwegkennzeichnungen nach ihrer Veränderbarkeit in statische und dynamische Systeme und nach der Wahrnehmung in visuelle und akustische Systeme unterschieden werden.

### **3.5.7.1 Dynamische Rettungswegbeschilderung**

Übliche Fluchtwegpiktogramme zeigen die Fluchtwegrichtung statisch an. Dies bedeutet, dass die Fluchtwegrichtung für alle Evakuierungs- und Brandereignisse identisch bleibt [217].

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Bei dynamischer Fluchtwegführung kann dagegen die Evakuierungsrichtung bezogen auf den Brandfall abhängig vom Detektionsort, Verrauchung etc. automatisch oder manuell angepasst werden [83]. In der Regel können durch die dynamische Fluchtwegführung mindestens zwei oder mehr unterschiedliche Fluchtrichtungen sowie ggf. versperrte Bereiche angezeigt werden. Bei großen und ausgedehnten Gebäudekomplexen, wie z. B. dem Flughafen Düsseldorf, wird die dynamische Fluchtwegführung bereits erfolgreich eingesetzt [167]. Die Dynamik der Fluchtwegsteuerung erfolgt dabei sowohl zeit- als auch ereignisbezogen.

### **3.5.7.2 Blitzleuchten**

Zur Kennzeichnung von Ausgängen in größeren Räumen werden grüne Blitzleuchten eingesetzt. Diese bleiben, solange diese Bereiche als Fluchtwege zur Verfügung stehen, eingeschaltet.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Falls alternative Fluchtwege in ausreichender Anzahl und Entfernung zur Verfügung stehen, können diese Anzeigeelemente dynamisch abgeschaltet werden, um die fliehenden Personen in sichere Bereiche zu leiten. Erstmals wurden die Blitzleuchten am Flughafen Düsseldorf im Zuge der Neugestaltung nach der Brandkatastrophe eingebaut [167].

### **3.5.7.3 Akustische Führungen**

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Fluchtwegführungen über akustische Signale können ebenfalls zum Einsatz kommen, um Personen im Gefahrenfall dynamisch aus geometrisch komplexen Gebäuden zu leiten. Solche Systeme ermöglichen neben der akustischen Personenführung zum Teil auch eine Kommunikation zwischen der Leitzentrale und dem Raum, in dem im Brandfall eine Detektion stattgefunden hat [229]. Bei der Umsetzung solcher Systeme ist auf mögliche Störeinflüsse, wie

z. B. Betriebsgeräusche etc., zu achten. Beispiele für den erfolgreichen Einsatz solcher Systeme finden sich z. B. in [61].

Wie bei der dynamisch-optischen Fluchtwegbeschilderung ist auch bei den akustischen Führungen der Einsatz dynamischer Steuerungen bestens möglich und bildet sogar den Kern dieser Anlagen.

#### **3.5.7.4 Visuelle Alarmierung**

Die visuelle oder optische Alarmierung wird in Fällen angewendet, in denen die akustische Alarmierung nicht ausreicht oder in denen die visuelle Alarmierung besondere Vorteile bietet. Dies kann z. B. in Produktionsstätten mit hohem Geräuschpegel der Fall sein. Optische Alarmgeber wie z. B. Blitzleuchten oder andere optische Anzeigeelemente alarmieren Personen, die sich in den betreffenden Gebäuden aufhalten. Oftmals wird die visuelle Alarmierung ergänzend zu der elektroakustischen Alarmierung verwendet.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Die Besonderheit der visuellen Alarmierung besteht darin, dass im Gegensatz zur elektroakustischen Alarmierung, Informationen gezielter an Personen weitergegeben werden können. Diese Informationen können dynamisch angepasst an den Brandverlauf oder je nach zuvor festgelegtem Szenario flexibel und risikoangepasst verändert werden. So können z. B. je nach Szenario unterschiedliche Fluchrichtungen mit Lauflichtern vorgegeben werden. Weitere Informationen und Verhaltensanweisungen können z. B. über vorhandene Monitore im Brandfall eingeblendet werden. Die Informationen können dabei in Text-, Bildform oder in animierten Darstellungen dargeboten werden. Vorhandene Monitore werden derzeit in der Praxis zunehmend auch für die Darstellung von Informationen und des Verhaltens im Brandfall vor dem Ereignis als Bestandteil des organisatorischen Brandschutzes eingesetzt. Als Erweiterung dieses Informationssystems können wichtige aktuelle und zielgerichtete Informationen auch im Gefahrenfall dargestellt werden.

### **3.5.8 Akustische Alarmierungsanlagen**

Die Alarmierung der Personen vor Ort im Brandfall kann sowohl über akustische als auch über optische Signalgeber erfolgen. Bei den akustischen Signalen wird im Wesentlichen zwischen Tönen, etwa Sirenen, und der Sprachalarmierungsanlage unterschieden. Die Alarmierungsanlage ist, im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.5.7 auf Seite 71 vorgestellten separaten Systemen, normativ enger an die Brandmeldeanlage gekoppelt [217].

Die wichtigsten Festlegungen zur Steuerung dieser Systeme sind in DIN 14675 Anhang B festgehalten [176]. Die Festlegungen betreffen in erster Linie elektrotechnische Vorgaben an die Ansteuerung, wie z. B. Vorgaben für den Übertragungsweg. Des Weiteren wird am Feuerwehr-Bedienfeld (FBF) die Möglichkeit gegeben, akustische Signale dieser Anlagen manuell abzustellen und wieder einzuschalten. Den Signalgeber betreffend sind in der Norm Festlegungen u. a. bezüglich Ausfallsicherheit, Wahrnehmbarkeit des Signals etc. enthalten.

Töne eignen sich insbesondere dafür, die Aufmerksamkeit von Personen zu erhöhen. Dabei übermitteln Töne nur dann Informationen zu einer Gefahr wie z. B. einem Brand, wenn Personen mit diesen akustischen Signalen vertraut sind.

Sprachalarmanlagen können entweder als in BMA integrierte Anlagen oder als eigenständige und separate Anlagen ausgeführt werden. Hierbei sind Produktnormen und Interaktionen zu anderen Anlagen wie z. B. der allgemeinen Beschallungsanlage, die im Alarmierungsfall abzustellen ist, zu beachten.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Sprachdurchsagen eignen sich im Gegensatz zu Tönen in besonderer Weise, um Informationen an Personen zu übermitteln. Die Abfolge dieser Informationen z. B. in Form von vorangehenden Tonsignalen und nachfolgenden Sprachdurchsagen und Handlungsanweisungen kann dabei nach zuvor festgelegten Szenarien erfolgen. Bei Sprachalarmierung können, im Gegensatz zu Tönen, mehr Informationen an die Personen weitergegeben werden. Das Verhalten von Personen kann dadurch gezielter beeinflusst werden. Somit sind risikoangepasste und dynamische Evakuierungen sehr gut möglich. Für ausgedehnte Objekte wie z. B. Hochhäuser wird eine abschnittsweise gestaffelte Alarmierung empfohlen und z. T. bereits eingesetzt [217]. Es handelt sich dabei um eine dynamische Alarmierung im Sinne dieser Arbeit.

### **3.5.9 Übertragungseinrichtung**

Alarmer von Brandmeldeanlagen, wie auch Alarmer von anderen Gefahrenmeldeanlagen, werden entweder an eine behördlich festgelegte, Alarm auslösende Stelle, wie z. B. die örtliche Feuerwehr, oder an private Empfangszentralen weitergeleitet. An die Übertragungssysteme werden dabei besondere Anforderungen gestellt [176, 217].

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Bei den derzeit vorgesehenen Funktionen von Übertragungseinrichtungen bestehen in der Regel keine Möglichkeiten von dynamischen Steuerungen, da dieses Subsystem im Wesentlichen nur eine Funktion, nämlich die einfache Alarmübertragung, aufweist.

Moderne Kommunikationskanäle erlauben es, Informationen in vielfältigster Art und Weise zu übertragen. Mit neuen Arten von Brandfallsteuerungen ist es vorstellbar, dass die Informationen über den Alarm bzw. über den aktuellen Gebäudezustand im zeitlichen Verlauf aktualisiert und entsprechend laufend an die Rettungskräfte weitergegeben werden. Dabei können die Informationen über den Gebäudezustand unterschiedlich, je nach Ort, Zielgruppe und Zeit, in geeigneter Form übermittelt werden. Mithilfe der Erweiterung der Funktionalität der Übertragungseinrichtung ist es daher möglich, in Zukunft die dynamischen Informationen über den Zustand des Gebäudes im Brandfall weiterzuleiten.

### **3.5.10 Einbruchmelde- und Videoüberwachungsanlagen**

Einbruchmeldeanlagen, Zutrittskontrollanlagen und Videoüberwachungsanlagen dienen dazu, unberechtigtes Eindringen zu verhindern bzw. zu registrieren und den Alarm an die entsprechende Stelle zu leiten [217]. Diese Anlagen werden im regulären Betrieb anders als im Brandfall betrieben, wobei bei Planungen von diesen Anlagen stets darauf zu achten ist, dass der Brandfall das Sicherheitskonzept nicht aufhebt.

Auch wenn im Brandfall die Funktionen von Einbruchmeldeanlagen und Zutrittskontrollanlagen nicht aufgehoben werden sollen, müssen die Ansteuerungen von Komponenten dieser Anlagen, wie etwa Türen in Fluchtwegen, die im Brandfall ebenfalls relevant sind, gesondert geplant werden. Hierbei sollte für jedes Element, etwa mithilfe von Szenarien für festgelegte Brandereignisse, betrachtet werden, wie die Systeme im Brandfall re- und interagieren.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Videüberwachungsanlagen können im Brandfall der Informationsbeschaffung und der Dokumentation von Vorgängen dienen. Es ist daher sinnvoll, die Videüberwachungsanlage im Brandfall automatisch und ereignisgesteuert in Bereiche mit Detektion und in benachbarte Bereiche zu schalten. Die Bilder der Kameras sollten dabei automatisch auf die Alarmmonitore aufgeschaltet und aufgezeichnet werden.

Die dynamischen Steuerungsmöglichkeiten von Einbruchmeldeanlagen, Zutrittskontrollanlagen und Videüberwachungsanlagen im Brandfall sind möglich. Die Planung von solchen Steuerungen sollte jedoch gewerkeübergreifend erfolgen. Hierbei sind die Interessen und Ziele der Anlagen auch für den Brandfall gegeneinander abzuwägen.

### **3.5.11 Abschaltungen von Energieverbrauchern**

Technische Defekte sind häufige Ursachen für Brände. Eine besondere Rolle hierbei spielen Defekte in elektrischen Einrichtungen und die dort in der Regel großen Energiemengen, die zur Brandentstehung beitragen können. Es ist daher aus sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gründen sinnvoll, im Brandfall möglichst viele Energieverbraucher automatisch abzustellen. Solche Abschaltkonzepte sollten bereits in der Planungsphase ausgearbeitet werden und in übergeordnete Brandfallsteuerungen einfließen. Die Schnittstellen und Interdependenzen zwischen den sicherheitsrelevanten und anderen Steuerungen sind gesondert und möglichst frühzeitig zu betrachten. Bei diesen Betrachtungen ist stets darauf zu achten, welche Konsequenzen die Abschaltungen für welche sicherheitsrelevanten Anlagen haben [217]. Die Wiederinbetriebnahme von Verbrauchern nach einem Brandfall ist ebenfalls zu betrachten. Sowohl die Ab- als auch die Einschaltungen von Verbrauchern sind etwa hinsichtlich der Priorität, des Verbrauchs und der Reihenfolge zu planen. Diese Aussagen treffen dabei ebenfalls auf Netzersatzanlagen zu.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Hinsichtlich der dynamischen Steuerungsmöglichkeiten von Energieverbrauchern ist festzustellen, dass diese sehr vielfältig sein können und in der Regel gut realisiert werden können. Die Steuerungsmöglichkeiten können dabei sowohl zeit- als auch ereignisbezogen erfolgen.



## **3.5.12 Aufzüge und Fahrtreppen**

### **3.5.12.1 Aufzüge**

Aufzugsanlagen dienen der vertikalen Beförderung von Personen und Gütern zwischen den Ebenen eines Bauwerks. Im Brandfall besteht die Gefahr, dass Personen durch die Benutzung bzw. Fehlfunktion des Aufzuges in das Brandgeschoss gelangen. Aus diesem Grund werden Aufzüge in Abhängigkeit des Detektionsortes dynamisch evakuiert, indem der Aufzug eine sogenannte dynamische Evakuierungsfahrt ausführt [84]. Die technischen Festlegungen zur dynamischen Evakuierungsfahrt von Aufzügen sind der VDI 6017 zu entnehmen [219].

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Für die dynamische Evakuierungsfahrt wird, vereinfacht betrachtet, die Festlegung einer sicheren Brandfallhaltestelle in Abhängigkeit vom Ort der Branddetektion und vom aktuellen Zustand und der Position des Aufzuges getroffen. Bei der Dynamik handelt es sich um einen Ereignisbezug, bei dem auf der einen Seite das Brandgeschoss festgestellt und auf der anderen ein sicheres, vom Brand nicht betroffenes Zielgeschoss nach einem zuvor definierten Algorithmus festgelegt wird. Die Festlegung von Brandfallhaltestellen für ein konkretes Bauwerk erfolgt bereits bei der Planung in der Steuermatrix.

Alternativ zu der sofortigen Evakuierungsfahrt gibt es Entwicklungen, die Aufzüge bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen wie Sicherheit, baulicher Ausbildung etc. für eine bestimmte Zeit nach Brandbeginn für die Evakuierung zu nutzen [220]. Dies ist jedoch derzeit in Deutschland aufgrund von bauordnungsrechtlichen Regelungen nur in Sonderfällen zulässig [82].

Ähnlich wie die Druckbelüftungsanlagen sind auch Aufzugsanlagen weitestgehend als autarke Anlagen zu bewerten. Anders ausgedrückt können die Aufzugsanlagen als eigenständig funktionierende dynamische Subsysteme verstanden werden. Die Berücksichtigung der eigenständigen Dynamik eines solchen Subsystems muss aber trotz der Eigenständigkeit in der Betrachtung des Verhaltens anderer Subsysteme und des Gesamtsystems erfolgen.

Neben gewöhnlichen Aufzugsanlagen für Personen gibt es noch spezielle Feuerwehraufzüge, die im Einsatzfall den Rettungskräften zur Verfügung stehen. Da diese Aufzüge besonders durch brandschutztechnische Qualitäten von Bauteilen, Druckbelüftung usw. geschützt sind, können diese auch im Brandfall von Rettungskräften benutzt werden. Die Ansteuerung dieses Subsystems erfolgt in der Phase bis zum Eintreffen der Rettungskräfte automatisch. Nach dem

Eintreffen der Rettungskräfte können anschließend manuelle Steuerungen vorgenommen werden. In dieser Phase kann daher keine automatische dynamische Steuerung vorgenommen werden. Jedoch kann der Feuerwehraufzug in dieser Phase je nach Anforderung der Einsatztaktik der Feuerwehr manuell und dynamisch gesteuert werden [25]. Das dynamische Steuerungsmodul ist in diesem Fall die bedienende Rettungskraft selbst. Diese dynamische Steuerung entspricht somit am besten den einsatztaktischen Anforderungen der Rettungskräfte.

### **3.5.12.2 Fahrtreppen und Fahrsteige**

Fahrtreppen und Fahrsteige dienen einer schnelleren horizontal-vertikalen Beförderung von Personen. Die Steigung von Fahrtreppen ist in der Regel höher als die von üblichen Treppen. Da im Evakuierungsfall auf Fahrtreppen erhöhte Sturzgefahr besteht und Personen ggf. in einen Gefahrenbereich geführt werden können, werden diese Anlagen im Brandfall in der Regel entweder sofort oder, sobald eine Entleerung stattgefunden hat und keine Personen nachströmen, abgeschaltet. Im Falle der Abschaltung der Anlagen fliehen Personen über anderweitige Flucht- und Rettungswege in einen sicheren Bereich.

#### **Dynamische Ansteuerungen**

Falls jedoch nicht ausreichend viele Flucht- und Rettungswege zur Verfügung stehen, können sowohl ruhende, also abgeschaltete, als auch fahrende Fahrtreppen und Fahrsteige als Fluchtwege angesetzt werden. Hierbei ist darauf zu achten, ob eventuell mitgenommene Gepäckwagen die Fluchtwege versperren können [217].

Im Falle von Fahrtreppen und Fahrsteigen in Betrieb können diese dynamisch, also z. B. ereignisbezogen, in die jeweilige Fluchtrichtung, etwa vom Brandort weg, betrieben werden, um so die Evakuierung zu unterstützen. Des Weiteren können diese Anlagen bei bestimmten Ereignissen, wie z. B. Rauchdetektion in weiteren Bereichen, abgeschaltet werden. Insgesamt ist die dynamische Ansteuerung dieser Anlagen unter Umständen möglich.

### **3.5.13 Gebäudeautomation**

Anlagen der Gebäudeautomation sind ein wichtiger Hauptknotenpunkt für viele technische Systeme eines Gebäudes [159, 211]. Zwischen den Anlagen der Gebäudeautomation und den klassischen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen, wie z. B. der BMA, gibt es in der

Regel sehr viele Schnittstellen. Zum Teil übernehmen Anlagen der Gebäudeautomation Teilaufgaben von Brandfallsteuerungen, indem beispielsweise Brandschutzklappen geschlossen und Lüftungsanlagen abgeschaltet werden [86, 100]. Diese komplexen Zusammenhänge führen so weit, dass zum Teil schwierig zu unterscheiden ist, welche Systeme Subsysteme von anderen Systemen sind, welche Vorschriften z. B. für die Funktionsverkabelung, Ausfallsicherheit etc. zu beachten sind und welche Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen den Systemen sich bei unterschiedlichen Zuständen einstellen.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Gegenüber Herausforderungen zur Beherrschung dieser Komplexität bestehen aber auch Chancen, über die zentralen Anlagen der Gebäudeautomation intelligente und dynamische Steuerungen für den Brandfall zu realisieren, um bestimmte Schutzziele zu erreichen und um letztlich dem Gebäudenutzer einen Mehrwert zu bieten [95].

Wie auch bei der Umsetzung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen ist dies nur möglich, sofern die Grundlagen der Sicherheit von Anlagen, die in Abschnitt 2.3 vorgestellt werden, beachtet und in der Anlagentechnik umgesetzt werden. Aufgrund der Komplexität wird empfohlen, nach der anlagentechnischen Umsetzung sogenannte Vollprobetests von Anlagen durchzuführen, um unter realistischen Bedingungen zu zeigen, dass die Gesamtheit der Anlagen eines Gebäudes unter vorher definierten Randbedingungen sicher funktioniert und diese, wie vorgesehen, zusammenwirken [217, 218, 222].

### **3.5.14 Feuerwehrperipherie**

Anlagen als Einsatzhilfsmittel für die Feuerwehr in einem Gebäude müssen vielfältigen Anforderungen, wie z. B. der Einsatztaktik der jeweiligen Feuerwehr, genügen. Aus diesem Grund werden diese Anlagen in der Regel im Planungsprozess mit der lokalen Feuerwehr abgestimmt. Die Zuordnung der Systeme ausschließlich für die Feuerwehr kann dabei nicht scharf durchgeführt werden, da im Brandfall vielfältige Anlagen und gebäudetechnische Einrichtungen für den Einsatz der Feuerwehr relevant sein können. Im Folgenden werden daher nur einige Anlagen, die der Feuerwehrperipherie zuzuordnen sind, dargestellt und hinsichtlich der dynamischen Ansteuerung beurteilt.

Zu der Feuerwehrperipherie können u. a. folgende Anlagen gezählt werden:

- Feuerwehrbedienfeld (DIN 14661)
- Feuerwehranzeigetableau (DIN 14662)
- Feuerwehrschlüsseldepot (VdS 2350)
- Freischalteinrichtung (VdS 2350)
- Blitzleuchte für die Feuerwehr (EN 54-23)

**Definition: Feuerwehrbedienfeld**

„Gerät zum Anschluss an die Brandmeldezentrale, das bestimmte Betriebszustände der Brandmeldeanlage in einheitlicher Erscheinungsform anzeigt und den Einsatzkräften der Feuerwehr auch ohne die Mitwirkung des Betreibers der BMA eine ergonomische und einheitliche Betätigung im Alarmfall und bei Funktionsprüfungen ermöglicht“ [173]

**Definition: Feuerwehranzeigetableau**

„Gerät zum Anschluss an die Brandmeldezentrale, das bestimmte Betriebszustände der Brandmeldeanlage in einheitlicher Erscheinungsform anzeigt und den Einsatzkräften der Feuerwehr auch ohne die Mitwirkung des Betreibers der BMA einheitliche Informationen im Alarmfall ermöglicht“ [174]

Das Feuerwehrbedienfeld bzw. das Feuerwehranzeigetableau sind Mensch-Maschine-Schnittstellen mit einer einheitlichen Bedien- und Anzeigefläche für die Feuerwehr. Diese Elemente sind als abgesetzte Teile der BMZ zu verstehen, sodass die BMZ und die o. g. Bedienelemente und Anzeigetableaus örtlich voneinander getrennt sein können [217].

Die Einheitlichkeit der Bedien- und der Anzeigetableaus erlaubt es den Feuerwehren, unabhängig vom jeweiligen Hersteller der BMA, mit dieser zu kommunizieren und standardisierte manuelle oder automatisierte Brandfallsteuerungen vorzunehmen. Die Einheitlichkeit von standardisierten Tableaus hat viele Vorteile, schränkt aber die Möglichkeiten von speziellen z. B. dynamischen Steuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen z. T. ein. Die Gründe hierfür sind, dass zum einen die Standardschalter auf den Tableaus gebäudespezifische Steuerungen nur stark eingeschränkt ermöglichen. Zum anderen müssten die Feuerwehrangehörigen sich bei manuellen Eingriffen in automatische Steuerungen mit den Besonderheiten der jeweiligen Anlage auskennen.

Dieser Konflikt zwischen der Einheitlichkeit von Bedienelementen und der Möglichkeit gebäudespezifischer Steuerungen kann dadurch beseitigt werden, dass zum einen die Feuerwehren

bei der Entwicklung von gebäudespezifischen Steuerungen involviert werden und zum anderen solche gebäudespezifischen, aber oft vorkommenden Steuerungen langfristig in die Normen einfließen. Die Notwendigkeit der Erarbeitung neuer Bedienkonzepte für die manuellen Brandfallsteuerungen durch die Feuerwehr ist bereits dadurch gegeben, dass die Anlagentechnik moderner Gebäude zunehmend komplexer wird, die Interdependenzen zwischen den Anlagen zunehmen und dies auch für den Feuerwehreinsatz relevant ist [73, 110].

Für eine effiziente Ansteuerung gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen durch die Feuerwehr ist es zum einen wichtig, dass die Feuerwehrleute sich mit den Anlagen generell und im jeweiligen Gebäude speziell auskennen. Zum anderen müssen die Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen so ausgelegt sein, dass die Informationen über die Zustände der Anlagen zum jeweiligen Zeitpunkt korrekt angezeigt werden und die Steuerbefehle der Feuerwehr zuverlässig in den Anlagen ausgeführt werden.

Außerdem ist es wichtig, dass die Steuerungsmöglichkeiten möglichst ergonomisch gestaltet werden, damit an dieser Stelle die Risiken einer möglichen Fehlbedienung reduziert werden [107]. Dem Bediener müssen die Konsequenzen der Steuerbefehle klar erkennbar sein. Das System der Steuerungen sollte so gestaltet werden, dass bei manuellen Ansteuerungen mit weitreichenden Konsequenzen, wie z. B. der Abschaltung einer Entrauchungsanlage, der Bediener diese nicht unbeabsichtigt durchführen kann. Vor dem Eingriff in die Anlagen durch die Feuerwehr sollte das Gesamtsystem daher bereits in einem möglichst sicheren Zustand sein.

Das Feuerwehrschlüsseldepot (FSD) ermöglicht der Feuerwehr einen jederzeitigen gewaltfreien Zugang zu durch die BMA überwachten oder mit Löschanlagen geschützten Bereichen des jeweiligen Gebäudes [192].

Dies wird dadurch ermöglicht, dass etwa im Feuerwehrschlüsseldepot ein oder mehrere Schlüssel des jeweiligen Objektes hinterlegt werden. Aufgrund der verhältnismäßig einfachen Funktion des Feuerwehrschlüsseldepots werden derzeit keine Möglichkeiten der dynamischen Ansteuerungen dieses Elementes gesehen.

Eine Freischalteinrichtung bietet der Feuerwehr die Möglichkeit, noch bevor sie in das Gebäude gelangt ist, einen Alarm auszulösen und das Feuerwehrschlüsseldepot somit freizugeben. Gleichzeitig können Ansteuerungen weiterer Anlagen, wie z. B. der Videoüberwachungsanlagen, erfolgen. Diese Ansteuerungen wären jedoch aufgrund eines fehlenden vorherigen Brandalarms nicht brandfallspezifisch und daher für weitere Betrachtungen dieser Arbeit von

untergeordneter Rolle.

Blitzleuchten dienen der Orientierung für die Feuerwehr zum Auffinden von Zugängen zum Gebäude. Aufgrund der technischen Einfachheit von Blitzleuchten werden derzeit keine dynamischen Steuerungsmöglichkeiten dieser Anlagen gesehen.

### **Dynamische Ansteuerungen**

Wie vorstehende Ausführungen zeigen, kann die Feuerwehrperipherie hinsichtlich dynamischer Steuerung gesamtheitlich nicht eindeutig beurteilt werden. Aus diesem Grund sind die Anlagen jeweils einzeln und gebäudespezifisch zu betrachten. Für Anlagen wie das Feuerwehrbedienfeld und das Feuerwehranzeigetableau eröffnen sich jedoch im Falle einer Weiterentwicklung Chancen für dynamische Brandfallsteuerungen [167].

### **3.5.15 Sonstige Anlagen**

Moderne Gebäude beinhalten eine Fülle von Anlagen, die im Brandfall eine Rolle spielen können. Die vorstehenden Abschnitte benennen die wichtigsten, wenn auch aufgrund der Fülle nicht alle Anlagen, die für Steuerungen im Brandfall zu betrachten sind. Im Lebenszyklus eines Gebäudes können aber auch je nach Anforderungen der Nutzer, Eigentümer etc. aus Schutzzielen und je nach Stand aktueller Vorschriften weitere Anlagen für die Brandfallsteuerungen relevant werden. Es empfiehlt sich daher, in regelmäßigen Abständen oder nach Veränderungen in einem Gebäude, die Brandfallsteuerungen und die zugehörigen anlagentechnischen Komponenten genauso wie die Schnittstellen zwischen diesen zu überprüfen und bei Bedarf an die aktuelle Situation anzupassen.

## **3.6 Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen und deren Zusammenwirken**

### **3.6.1 Allgemeine Schutzziele des Brandschutzes**

Die allgemeinen Schutzziele bezüglich baulicher Anlagen sind in Deutschland in den jeweiligen Landesbauordnungen benannt. Als Beispiel seien hier die allgemeinen Anforderungen aus der

Musterbauordnung (MBO), die gewissermaßen einen länderübergreifenden Konsens darstellt, aufgeführt. In dem § 3 Abs. 1 der MBO sind die allgemeinen Anforderungen angegeben (vgl. auch Abschnitt 3.1).

### **Allgemeine Anforderungen**

*„(1) Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.“ [203]*

Den Brandschutz betreffend werden die Schutzanforderungen in § 14 der MBO etwas genauer spezifiziert.

### **Brandschutz**

*„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“ [203]*

Aus § 14 der MBO können daher folgende Schutzziele direkt und weitere gesellschaftliche Belange im Zusammenhang mit dem Brandschutz indirekt abgeleitet werden:

- Schutz von Leben und Gesundheit von Menschen
- Schutz von Sachwerten und Tieren
- Schutz der Umwelt (Luft, Wasser, Erdreich und Vermeidung von Brandschutt)
- Einsatzmöglichkeiten und Sicherheit der Feuerwehren:
  - Einsatzgrenzen der Feuerwehren
  - Persönliche Sicherheit der Rettungskräfte
  - Einsatzgrenzen aufgrund der Löschwasserversorgung
- Versicherbarkeit

Neben den aufgeführten Schutzzielen können weitere Schutzziele definiert werden. Die Schutzziele sind voneinander nicht unabhängig, sodass die Ziele sich überlagern oder sich gegenseitig ergänzen können [9].

### **3.6.2 Besondere Schutzziele des anlagentechnischen Brandschutzes**

Anlagentechnischer Brandschutz bildet eine wichtige Komponente des ganzheitlichen Brandschutzes, die der Erreichung von allgemeinen Schutzziele und der Risikobeherrschung dient (siehe Abschnitt 3.1 auf Seite 39). Aus den allgemeinen Schutzziele leiten sich daher auch die Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen ab, die in geeigneter Weise miteinander kombiniert werden, um gesetzliche Auflagen und die geforderten Schutzziele zu erreichen. Auch Merkmale, die diese Anlagen erfüllen müssen, werden aus den Schutzziele abgeleitet. Anhand der Schutzziele, der normativ-rechtlichen und auch anderer Vorgaben, werden die Anlagen geplant und errichtet. Die Schutzziele geben somit übergeordnet vor, mit welchen anlagentechnischen und anderen Mitteln diese Schutzziele zu erreichen sind [75].

Spezielle Schutzziele werden mit dem Einsatz einer BMA erreicht, die eine der wichtigsten gebäudetechnischen Einrichtungen ist. Nachfolgend sind Ziele und Aufgaben einer BMA aus DIN 14675 2003 aufgeführt:

- Entdeckung von Bränden in der Entstehungsphase;
- schnelle Information und Alarmierung der betroffenen Menschen;
- automatische Ansteuerung von Brandschutz- und Betriebseinrichtungen;
- schnelle Alarmierung der Feuerwehr und/oder anderer hilfeleistender Stellen;
- eindeutiges Lokalisieren des Gefahrenbereiches und dessen Anzeige. [176]

Andere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen dienen dazu, z. T. ähnliche und weitergehende Aufgaben zu erfüllen.

### **3.6.3 Anforderung aus baurechtlicher Sicht**

Um die zuvor dargestellten Schutzziele zu erreichen, werden vielfältige Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen formuliert. Zunächst sind dies Anforderungen aus baurechtlicher Sicht.

Die Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen aus baurechtlicher Sicht sollen anhand der MBO, der Bauvorschriften sowie der Sonderbauvorschriften von Nordrhein-Westfalen erläutert werden [207].

Im Allgemeinen hängen die anlagentechnischen Anforderungen der Baurechtsvorschriften



vom Gebäudetyp und der Größe (in der Regel Grundfläche) des Gebäudes/Bauwerks ab. Je nach Gebäudetyp und seiner Größe wird die Installation bestimmter gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen gefordert [212]. Besonders deutlich geht dies aus den Sonderbauvorschriften der jeweiligen Bundesländer hervor, in denen je nach Typ des Sonderbaus unterschiedliche gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen gefordert werden.

Als Beispiel sollen hier gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen und weitere sicherheitsrelevante Anlagen einer Versammlungsstätte aufgeführt werden, die in Abhängigkeit von der Fläche und der Anzahl von Personen erforderlich werden [207].

- Sicherheitsstromversorgungsanlage § 14
- Blitzschutzanlage § 14
- Sicherheitsbeleuchtung § 15
- Entrauchungsanlagen § 16
- Wandhydranten § 19
- automatische Feuerlöschanlagen § 19
- Brandmeldeanlage § 20
- Alarmierungsanlagen § 20
- Brandmelder- und Alarmzentrale § 20
- Aufzüge mit Brandfallsteuerung § 20
- Übertragung von Brandmeldungen an die Leitstelle § 20
- Schutzvorhang § 23
- Sprühwasserlöschanlage § 24
- Videoanlage § 26
- Behördenfunkanlage § 26
- ggf. weitere Anlagen je nach Schutzzielen

Neben der Forderung nach Installation bestimmter gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen werden bauordnungsrechtlich ebenfalls Fristen für wiederkehrende Prüfungen von diesen Einrichtungen durch Sachverständige bzw. Sachkundige vorgegeben. Diese Prüfungen sollen die Betriebswirksamkeit und Sicherheit der Anlagen gewährleisten und dokumentieren.

Da die oben genannten Vorschriften sehr allgemein formuliert sind, können hieraus keine konkreten Forderungen hinsichtlich Sicherheit, Steuerung und Interaktionen von gebäudetechni-

schen Brandschutzeinrichtungen abgeleitet werden. Hierzu werden daher weitere Vorschriften mit normativem Charakter benötigt.

### **3.6.4 Anforderung aus normativer Sicht**

Normative Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen sind, wie die Anlagen selbst, sehr vielfältig (vgl. hierzu z. B. Abschnitt 3.4.2 auf Seite 50). Das Ziel dieser normativen Dokumente, wie z. B. Richtlinien, Normen usw., ist es, die technischen Beschaffenheiten von Anlagen möglichst präzise nach dem Stand der Technik zu beschreiben und Standards vorzugeben.

Die Sicherheit gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen wird in diesen Dokumenten jedoch derzeit überwiegend qualitativ, d. h. ohne Aussagen zu konkreten Werten wie z. B. der maximal zulässigen Ausfallwahrscheinlichkeiten im Anforderungsfall beschrieben [169]. Auch andere umfassende Ansätze zur Gewährleistung der Sicherheit, wie die funktionale Sicherheit, fehlen derzeit für gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen vollständig oder befinden sich erst in der Anfangsphase der Entwicklung [195].

Hinsichtlich der Steuerungen im Brandfall wird in der Regel zunächst eine einzelne Anlage betrachtet. Hierbei kommt es vor, dass Steuerungen von einzelnen Anlagen, wie z. B. Aufzügen, bereits dynamische Komponenten, also dynamische Steuerungen haben. Dies ist jedoch, wie gezeigt wurde, für alle gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen betrachtet nur selten der Fall. Im Allgemeinen sind für anlagenübergreifende Schnittstellen und Steuerungen Angaben in Normen nur unzureichend vorhanden [228].

Für anlagenübergreifende Steuerungen und Interaktionen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen existieren nur wenige Vorschriften. Als Beispiel kann an dieser Stelle die VDI 6010 genannt werden. Hinsichtlich dynamischer Steuerungen in Kombination mit anlagenübergreifenden Interaktionen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen werden derzeit jedoch in kaum einer Vorschrift Aussagen getroffen. Die normativen Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinwirkungen und deren Zusammenwirken sind daher in Zukunft von Normungsgremien zu erarbeiten.

### **3.6.5 Anforderung aus Sicht der Gebäudenutzer**

Die von einem Brand in einem Gebäude Betroffenen können im Wesentlichen in die zwei Gruppen der direkt und der indirekt betroffenen Personen unterteilt werden. Beide Gruppen stellen bewusst oder unbewusst unterschiedliche Anforderungen an die im Gebäude vorhandenen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen. Diese Personen sollen im weitesten Sinne hier als Gebäudenutzer bezeichnet werden.

Zur Gruppe der direkt betroffenen Personen zählen jene, die auf den Betrieb und die Funktionsfähigkeit der gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen angewiesen sind, jedoch keinen aktiven Einfluss auf den Betrieb dieser Anlagen nehmen können oder sollen. Als Beispiel können hier die aus einem Gebäude fliehenden Personen genannt werden, die eventuell den Brandalarm manuell auslösen, jedoch keine weiteren Eingriffe in die automatischen Interaktionen nehmen können. Diese Personengruppe stellt in der Regel keine besonderen Anforderungen an die in einem Gebäude vorhandenen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen. Oftmals haben Personen aus dieser Gruppe nur unzureichende Kenntnisse über die vorhandenen Einrichtungen. Die Anforderungen an die Anlagen aus Sicht dieser Personengruppe werden daher übergeordnet vom Gesetzgeber in Vorschriften und in anderen z. B. normativen Dokumenten formuliert.

Die zweite Gruppe besteht aus indirekt betroffenen, jedoch aktiven Personen. Personen, die in diese Gruppe eingeordnet werden können, sind z. B. die Feuerwehrleute und der Betreiber des Gebäudes. Dieser Personenkreis hat besondere Anforderungen an die installierten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen. Diese Anforderungen unterteilen sich in die Anforderungen im Betriebszustand und die im Brandfall.

#### **Betriebs- oder Überwachungszustand**

Die Anforderungen im Betriebs- oder Überwachungszustand sind in erster Linie für den Betreiber und letztlich den Eigentümer des Gebäudes besonders wichtig. Einige dieser Anforderungen sind nachfolgend aufgeführt.

- Wirtschaftlichkeit/Kostenminimierung
- Zuverlässigkeit im Überwachungszustand
- Verfügbarkeit
- Fehlersicherer Betrieb

- Systemintegrität
- Systemwiederherstellung bei auftretenden Fehlern
- Wartbarkeit
- Verlässlichkeit
- leichte Bedienbarkeit
- Minimierung von Versicherungskosten
- Langlebigkeit von Anlagen
- Verringerung der Anzahl von Falschalarmen

Zum Teil decken sich die Anforderungen dieser Gruppe mit den allgemeinen Anforderungen an sicherheitstechnische Anlagen (vgl. Abschnitt 2.3.1 auf Seite 16).

Die aufgeführten Anforderungen unterliegen einem Wandel und können von den Personen über den gesamten Lebenszyklus der gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und des Gebäudes hinweg betrachtet werden.

Als besonders wichtig werden von Gebäudeeigentümern häufig Kosten von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen genannt. In Abbildung 3.12 sind einige wichtige und typische Quellen von Kosten am Beispiel einer BMA dargestellt.

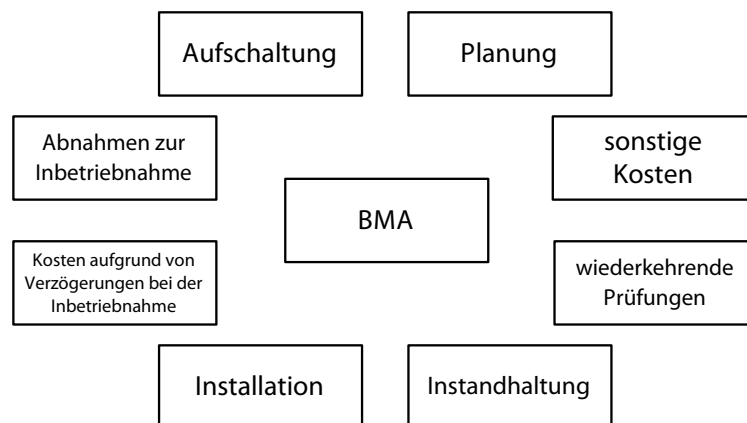


Abbildung 3.12: Exemplarische Quellen von Kosten einer BMA

Wie aus der Abbildung hervorgeht, fallen die dargestellten Kosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Lebenszyklus eines Gebäudes an. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen einem Wandel unterliegen und daher für jede Lebenszyklusphase des Gebäudes zu betrachten sind.

## Brandfall

Die Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen im Brandfall werden aus der aktiven Nutzergruppe sowohl von der Feuerwehr als auch vom Betreiber gestellt. In diesem Zustand gibt es folgende Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen:

- Erfüllung von Schutzzielen
- Sicherheit/Zuverlässigkeit
- Minimierung des Schadens
- flexible Eingriffsmöglichkeiten
- Ergonomie

Die hier aufgeführten wichtigsten Anforderungen sind nicht unabhängig voneinander und können zum Teil zueinander im Widerspruch stehen. Darüber hinaus können weitere hier nicht aufgeführte Anforderungen ebenfalls eine Rolle spielen.

### 3.6.6 Zusammenwirken gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen mit anderen Systemen

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen und hier in erster Linie die Brandmeldeanlage wechselwirken mit zahlreichen anderen technischen Systemen eines Gebäudes. In Abbildung 3.13 sind Wechselwirkungen und Ansteuerungen von einigen eigenständigen Systemen und Anlagen durch die Brandmeldeanlage dargestellt.

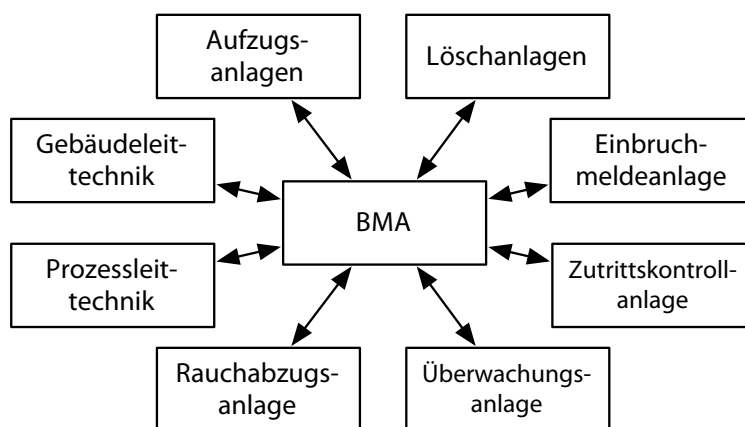


Abbildung 3.13: Wechselwirkungen und Ansteuerungen eigenständiger Systeme/Anlagen von der BMA

Das Zusammenwirken von sicherheitstechnischen Einrichtungen und deren systemübergreifende Funktionen können nach VDI 6010 geplant werden (siehe hier und weiter [216]). Die wichtigsten Begriffe der Norm für die Planung systemübergreifender Funktionen sind die Schnittstellenmatrix und die Funktionsmatrix. Unter Schnittstellenmatrix versteht die Norm:

**Definition: Schnittstellenmatrix**

*„Darstellung der Kommunikationsbeziehungen der einzelnen sicherheitstechnischen Einrichtungen zum Managementsystem oder untereinander (mit Kommunikationseinrichtung).“*

In Tabelle 3.4 ist eine exemplarische Schnittstellenmatrix dargestellt.

Die dargestellte Schnittstellenmatrix umfasst bei Weitem nicht alle möglichen Anlagen eines modernen Gebäudes. In der Regel ist die Schnittstellenmatrix umfangreicher.

Die Schnittstellenmatrix dient als Hilfsmittel, um die Schnittstellen von sicherheitstechnischen Einrichtungen (u. a. gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen) untereinander zu bestimmen. Dabei wird zwischen Systemen unterschieden, die Daten aussenden, und solchen, die diese empfangen. Für jedes System, das Daten aussendet, ist eine Schnittstellenmatrix aufzustellen.

Die Definition der Funktionsmatrix in der Norm ist:

**Definition: Funktionsmatrix**

*„Darstellung der Anforderungen an die jeweils betrachtete sicherheitstechnische Einrichtung auf Basis der zuvor festgestellten Kommunikationsbeziehung aus der Schnittstellenmatrix.“*

In Tabelle 3.5 ist eine exemplarische Funktionsmatrix einer Brandmeldeanlage in Anlehnung an [216] dargestellt.

Die Funktionsmatrix besteht aus Tabellen, in denen die Mindest- und optionale Anforderungen an die Kommunikationsbeziehungen zwischen den gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen festgelegt werden. Beispiele von Funktionsmatrizen für unterschiedliche Anlagen finden sich in der Norm [216]. Neben der VDI 6010 sind weitere Vorschriften wie z. B. die VdS 2815 für das „Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen“ zu beachten [225].

Bei der Planung von sicherheitstechnischen Systemen ist es für die Beteiligten sehr wichtig, die systemübergreifenden Funktionen aller Anlagen eines Gebäudes zu kennen. Durch diese

<b>Schnittstellenmatrix</b> Informationsfluss vom System: ... ausgehend	Empfangendes System															
	Sicherheits- und Informationseinr.	Managementsystem	Brandmeldeanlage Nr.	Einbruchmeldeanlage Nr.	Zutrittskontrollanlage Nr.	Türsteuerungs- und Überwachungsseinr.	Video-Überwachungsanlage Nr.	Elektroakustische Lautsprecheranlage	Fluchtweg-Lenkungssystem	Löscheinrichtungen	Sprinkleranlage Nr.	Gas-Löschanlage Nr.	Betriebstechnische Einr.	Lüftungsanlage Nr.	Förderanlagen	Aufzug Nr.
<b>Ausgesendete Daten</b>																
<b>Ereignisorientierte Abläufe</b>																
Alarmmeldungen																
Technische Gefahremeldungen																
Zustandsmeldungen																
Steuerungen																
Rückmeldungen																
<b>Manuelle Eingriffe</b>																
Ab-/Zuschaltung (Meldungen/Steuerungen)																
Quittiersignal																
Rücksetzsignal																
Inspektionsschaltungen																
<b>Systembedingte Abläufe</b>																
System-Störungsmeldungen																
Änderungsdaten																

Tabelle 3.4: Beispiel einer Schnittstellenmatrix

Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3		Ebene 4		Richtung		Informations-Hierarchie		
Code	Information	Code	Information	Code	Information	Code	Information			1	2	3
								Meldung (Eingänge)	Befehl (Ausgänge)	erforderlich	Option 1	Option 2
0	Betrieb	0		0		0	keine Meldung					
1	Betriebszustand	0	eingeschränkt	1	Abschaltung	0	Sammelmeldung: Abschaltung	X		X		
						1	Meldergruppe abgeschaltet	X			X	
						2	Steuerung abgeschaltet	X			X	
						3	...					
				2	Revision	0	Sammelmeldung: Revision	X		X		
		1	...									
		1	Störung	0		0	Sammelmeldung: Störung	X		X		
				1	Melderperipherie	0	...					
2	Alarm	0	Meldung	1	Brand	0	Sammelmeldung: Feuersalarm	X		X		
						1	...					

Tabelle 3.5: Beispiel einer Funktionsmatrix einer Brandmeldeanlage

Kenntnis wird den Beteiligten klar, welche Funktionalität welcher Anlagen an welcher Schnittstelle zur Verfügung stehen muss. Bei den Abnahmen von Systemen und bei anschließender Nutzung sind die Festlegungen und die entsprechende Dokumentation unerlässlich, um einen effizienten Betrieb der Anlagen zu ermöglichen [221]. Ferner bilden diese Maßnahmen eine der wichtigsten Voraussetzungen, um die geforderte Sicherheit und die gestellten Schutzziele in angestrebter Qualität erreichen zu können.

Neben der umfassenden Betrachtung von systemübergreifenden Funktionen sicherheitstechnischer Einrichtungen lässt die VDI 6010 den zeitlichen Aspekt von Kommunikationsbeziehungen von Anlagen außer Betracht. Dies führt dazu, dass es bei nicht hinreichend genauer Betrachtung von systemübergreifenden Funktionen und deren zeitlichen Aspekten, wie z. B. im Brandfall, zu aufhebender Wirkung oder gegenseitiger Behinderung im Anlagenbetrieb kommen kann. Um dieses Problem zu lösen, wird in Abschnitt 4 ein Modell zur Berücksichtigung der dynamischen Zusammenhänge entwickelt.



### **3.6.7 Sicherheit gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen**

Die wichtigsten Eigenschaften von sicherheitsgerichteten Systemen wurden in Abschnitt 2.3.1 beschrieben. Hierzu gehören die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit, der fehlersichere Betrieb, die System- und Datenintegrität, die Systemwiederherstellung, die Wartbarkeit und die Verlässlichkeit von Anlagen. Bei Einhaltung von Anforderungen und Vorschriften, die sich aus diesen Begriffen ableiten, spricht man von sicheren Anlagen. Auch gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen gehören zu den auf die Sicherheit ausgerichteten Systemen.

Im Weiteren wird ein Überblick über die derzeit üblichen Herangehensweisen zur Beurteilung der Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen erst einzeln und dann im Verbund gegeben.

#### **3.6.7.1 Sicherheit der Komponenten von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen**

Die Beurteilung der Sicherheit von den in den Abschnitten 3.4 auf Seite 47 und 3.5 auf Seite 62 vorgestellten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen kann, da die Einrichtungen sehr unterschiedlich sind und die Sicherheit von sehr vielen Faktoren abhängt, nicht allgemeingültig erfolgen. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle Gemeinsamkeiten in der Beurteilung und die üblichen Herangehensweisen dargestellt.

Bislang werden gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen, die bauaufsichtlich für Gebäude verlangt werden, hinsichtlich der Sicherheit häufig aus normativer Sicht und im Hinblick auf die Einhaltung von gesetzlichen Auflagen, wie etwa den wiederkehrenden Prüfzyklen, beurteilt. Auf den Ebenen der Beurteilung der Sicherheit einzelner Bauteile oder Komponenten von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen gibt es zahlreiche Produktnormen, die hierfür einzuhalten sind.

Die Ursachen für die Betrachtung der Komponenten als allein für sich stehende Elemente hat zum einen historische Gründe. Traditionell werden die Leistungen zur Errichtung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen getrennt vergeben und von unterschiedlichen Errichtern ausgeführt. Außerdem fehlt die normative Basis für die Betrachtung von zusammenhängenden Systemen unterschiedlicher Gewerke. Zum anderen ist die Betrachtung von Gesamtsystemen komplexer als die Betrachtung von einzelnen Subsystemen. Häufig wird der Schluss gezogen, dass dann, wenn die einzelnen Anlagen hinreichend sicher und zuverlässig

funktionieren, das Gesamtsystem ebenfalls im selben Maße sicher und zuverlässig ist. Somit findet derzeit eine in erster Linie qualitative Beurteilung der Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen statt.

Die Beurteilung der Sicherheit (im Sinne von „safety“) von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen in Bauwerken wie auch von anderen Eigenschaften durch Prüfsachverständige ist, wie die Beurteilung von Komponenten nach Produktnormen, fast ausschließlich qualitativer Natur. Darüber hinaus prüfen die Sachverständigen überwiegend stichprobenartig, was dazu führt, dass eine umfassende Beurteilung der Sicherheit nicht stattfindet [36]. Nicht zuletzt wird das Problem dadurch deutlich, dass bei sehr vielen Anlagen und regelmäßig sowohl in Bestands- als auch Neubauten zahlreiche sicherheitskritische Mängel aufgedeckt werden [20]. Ferner findet eine Beurteilung der Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Sinne von „security“ derzeit praktisch nicht statt [108].

Als Ausweg aus der Problematik der rein qualitativen Beurteilung der Sicherheit können quantitative Verfahren zur Beurteilung der Sicherheit herangezogen werden [118]. Solche Ansätze, wie der Ansatz der funktionalen Sicherheit, der in den Abschnitten 2.3.4 auf Seite 25 bis 2.3.6 auf Seite 34 vorgestellt wird, können, wie bereits in anderen Branchen geschehen, zu einer nachhaltigen Verbesserung des Sicherheitsniveaus von Anlagen führen. Des Weiteren können Vollprobetests in Gebäuden zu einer Verbesserung der Sicherheit führen [218].

Ferner kann der Ansatz der gemeinsamen Berücksichtigung von Sicherheit im Sinne der „safety“ und „security“ im Lebenszyklus von Gebäuden helfen, die Ziele, die an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen gestellt werden, besser als derzeit zu erreichen [108].

### **3.6.7.2 Bewertung der Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Verbund**

Die Bewertung der Sicherheit und der Zuverlässigkeit von einzelnen Komponenten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen erfordert zum Teil detaillierte Untersuchungen von mechanischen, elektronischen und softwaretechnischen Bestandteilen dieser Anlagen.

Wesentlich komplexer wird die Analyse und die Bewertung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen eines Gebäudes dann, wenn diese vernetzt sind, im Verbund wirken und sich zum Teil gegenseitig beeinflussen [184]. Die Quantifizierung der Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen ist jedoch trotz oder gerade wegen der Komplexität

erforderlich. Das Ziel solcher Analysen ist es, Schwachstellen in der Sicherheit der einzelnen Anlagen und die Sicherheit der Anlagen im Verbund, wie z. B. bei Ausbildung von Übertragungswegen zwischen den Anlagen, aufzudecken und Lösungsvorschläge für die Beseitigung der entdeckten Schwächen zu erarbeiten [175].

Sowohl die Betrachtung der Sicherheit von Einzelkomponenten als auch die Betrachtung des Gesamtsystems sind notwendig, um das angestrebte Sicherheitsniveau gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen eines Gebäudes erreichen zu können [168]. Eine solche geeignete Methode für die ganzheitliche Betrachtung der Sicherheit ist der Ansatz der funktionalen Sicherheit, bei der die sicherheitsgerichteten Systeme eines Gebäudes einer ganzheitlichen Untersuchung unterzogen werden [133].

### **3.7 Brandfallsteuerungen und die Steuermatrix**

Bei der Erarbeitung von Brandfallsteuerungen eines Gebäudes kommt eine besondere Rolle der Aufstellung von Brandfallsteuermatrizen (Steuermatrizen) zu. Im folgenden Unterabschnitt werden als Erstes Definitionen der Brandfallsteuerung und der Brandfallsteuermatrix gegeben. Ferner werden Eigenschaften sowie Funktionen der Steuermatrix beschrieben. Des Weiteren werden überwiegend statische Eigenschaften von Brandfallsteuerungen mit zugehörigen Brandfallsteuermatrizen herausgestellt sowie der Prozess der Aufstellung in der Praxis aufgezeigt. Am Ende des Unterabschnitts werden Aspekte des Umsetzungsprozesses von Brandfallsteuermatrizen in Anlagen dargestellt.

#### **3.7.1 Ziele von Brandfallsteuerungen**

Brandfallsteuerungen dienen der Erfüllung von zuvor formulierten Schutzziele (vgl. Abschnitt 3.6.1 auf Seite 82 allgemein und Abschnitt 3.6.2 auf Seite 84 speziell).

Der Begriff Brandfallsteuerung(en) wird in Vorschriften zum Teil unterschiedlich definiert. Die DIN 14661 versteht unter Brandfallsteuerung:

***Definition: Brandfallsteuerung***

*„Alle Steuerungen, die infolge eines Alarms der BMZ vorgenommen werden.*

*BEISPIEL: Auslösen von Brandschutzeinrichtungen, wie automatische Löschanlagen, Brandschutzklappen, Rauchabzugsanlagen, zwangsgesteuerte Aufzugsanlagen usw. Abschalten von Lüftungsanlagen, EDV oder anderen Betriebsmitteln.*

*ANMERKUNG: Zu Brandfallsteuerungen gehören z. B. nicht: örtliche akustische und optische Alarmierungseinrichtungen, zusätzliche Anzeige- und Informationseinrichtungen (Feuerwehr-Anzeigetableau (FAT), Feuerwehrschlüsseldepot (FSD), Blitzleuchten usw.)“ [173].*

In VDI 6010 Blatt 2 2011 wird die Brandfallsteuerung weiter gefasst definiert:

*„Ansteuerung von Komponenten eines Gebäudes bei einem Brandfall inklusive zugehöriger Steuerungskomponenten und Verknüpfungsfunktionen“ [217].*

In dieser Arbeit soll die etwas weiter gefasste Definition von Brandfallsteuerungen aus VDI 6010 Blatt 2 übernommen werden. In diesem Sinne können unter Brandfallsteuerungen im Allgemeinen alle Interaktionen von Anlagen eines Gebäudes verstanden werden, die im Falle einer automatischen oder manuellen Auslösung eines (Brand-)Alarms vorgenommen werden (vgl. [25]).

Brandfallsteuerungen eines Gebäudes werden in der sogenannten Steuermatrix festgelegt. In VDI 3819 Blatt 3 2009 wird unter dem Begriff Steuermatrix Folgendes verstanden:

***Definition: Steuermatrix***

*„Die Steuermatrix umfasst alle Steuerungen, die im Brandfall gemeinsam genutzt werden. Der Verknüpfungsplan, nach DIN VDE 0833-2 kann Bestandteil der Steuermatrix sein“ [214].*

In VDI 6010 Blatt 2 2011 wird die Steuermatrix wie folgt beschrieben:

*„Die Steuermatrix beschreibt den funktionalen Zusammenhang aller brandschutztechnischen Komponenten. Es betrifft dies sowohl die Komponenten der TGA als auch steuerbare bauliche Einrichtungen, z. B. Türen und Tore. Die Steuermatrix beschreibt für jeweils einen Alarmierungsbereich die Interaktionen zwischen Meldern und Aktoren, bzw. Quelle und Senke, in detaillierter Form und unter Benennung der konkreten Gerätekomponente (z. B. Ventilator, Aufzug, Ventilationsfenster) oder einer funktional zusammenhängenden Gerätegruppe (z. B. alle Rauchmelder eines Raums, alle Rettungswegpiktogramme einer Etage)“ [204, 217].*

### 3.7.2 Erstellung von Steuermatrizen

Nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) werden im Bauprozess eines Gebäudes insgesamt neun Leistungsphasen unterschieden [208]. Diese beginnen mit der Grundlagenermittlung (Leistungsphase 1 (LP1)) und schließen mit der Leistungsphase 9 (Objektbetreuung und Dokumentation) ab. In der HOAI werden die Leistungen hinsichtlich der Planung des Brandschutzes jedoch nur unzureichend spezifiziert.

Für die Beschreibung von Leistungen im Zusammenhang mit der Erstellung von Steuermatrizen oder allgemeiner Brandfallsteuerungen wird daher das Heft Nr. 17 „Leistungen für Brandschutz“ von der AHO-Fachkommission „Brandschutz“ verwendet [202]. Die Leistungsphasen des Heftes Nr. 17 sind an die Leistungsbilder im Brandschutz angepasst und beinhalten dieselben neun Leistungsphasen wie auch die HOAI.

Spezielle Leistungen im Zusammenhang mit Brandfallsteuerungen werden nachfolgend gegliedert nach den Leistungsphasen gemäß Heft Nr. 17 dargestellt [202]:

- Vorplanung (LP 2):
  - Erarbeitung von Grundlagen für anlagentechnische Maßnahmen
- Entwurfsplanung (LP 3):
  - Erarbeitung des Brandschutzkonzeptes unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen
  - *Besondere Leistungen: Festlegung der maßgeblichen Brandszenarien und numerische Brandsimulationen/ingenieurmäßige Methoden*
- Genehmigungsplanung (LP 4):
  - Darstellung von anlagentechnischen Maßnahmen
- Ausführungsplanung (LP 5):
  - Mitwirken an der Koordination der Fachplanung an brandschutzrelevanten Schnittstellen
  - *Besondere Leistungen: Prüfen von Funktionsbeschreibungen des anlagentechnischen Brandschutzes; Mitwirkung bei der Erstellung der Steuermatrix*

- Objektüberwachung (Bauüberwachung) (LP 8):
  - Prüfen der Plausibilität der Sachverständigen- oder Sachkundigennachweise für die brandschutzrelevanten Anlagen auf Schnittstellen
  - *Besondere Leistungen: Mitwirken bei der fachtechnischen Abnahme von Sonderbauteilen, Anlagen und Einrichtungen zur Feststellung von Mängeln; Mitwirken bei der Prüfung der Steuermatrix*

Leistungen, die über das übliche Maß hinausgehen, werden im Heft Nr. 17 als besondere Leistungen bezeichnet. Diese sind in der vorstehenden Auflistung kursiv hervorgehoben.

Erste Festlegungen, welche die Brandfallsteuerungen betreffen, werden bereits in der Vorplanung (LP 2) eines Projektes getroffen. In dieser Phase wird unter anderem vorab ermittelt und festgelegt, welche brandschutztechnisch relevanten Anlagen in ein Gebäude installiert werden. Im weiteren Prozess der Erarbeitung von Brandfallsteuerungen findet eine zunehmende Konkretisierung des Zusammenwirkens gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen statt.

In der Entwurfsplanung (LP 3) werden in einem Brandschutzkonzept, im Sinne des ganzheitlichen Brandschutzes, die Wechselwirkungen zwischen baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen geplant. Zu den besonderen Leistungen in dieser Leistungsphase gehören Festlegungen zu maßgeblichen Brandszenarien sowie die Verwendung von ingenieurmäßigen Methoden. Für große und komplexe Bauten sind diese Festlegungen unerlässlich und sollten in jedem Fall ausgeführt werden.

In der Genehmigungsphase (LP 4) erfolgt die Darstellung von anlagentechnischen Maßnahmen, einschließlich der gegenseitigen Abhängigkeiten (qualitative Steuermatrix). In der Leistungsphase 5 der Ausführungsplanung (LP 5) erfolgt in der Grundleistung die Fachplanung an brandschutztechnischen Schnittstellen. Als besondere Leistungen gelten die Prüfung von Funktionsbeschreibungen des anlagentechnischen Brandschutzes und die Mitwirkung bei der Erstellung der quantitativen Steuermatrix. Wie in der Entwurfsplanung (LP 3) sollten die besonderen Leistungen bei komplexen Bauten ebenfalls erbracht werden. Darüber hinaus sollten die Grundfunktionen und grundsätzliche Festlegungen zu Brandfallsteuerungen bereits zu der Genehmigungsphase (LP 4) bekannt sein. Dies ermöglicht die rechtzeitige Berücksichtigung von gebäudespezifischen Brandfallsteuerungen.

In der Phase der Objekt- bzw. Bauüberwachung (LP 8) erfolgt in der Grundstufe die Prüfung der Plausibilität der Nachweise für die brandschutzrelevanten Anlagen hinsichtlich der Schnitt-

stellen. Zu den besonderen Leistungen zählen dabei die Mitwirkung bei den Abnahmen von Anlagen sowie die Funktionsprüfungen der Steuermatrix.

Um die korrekte Funktion von Brandfallsteuerungen feststellen zu können, sollten diese besonderen Leistungen erbracht werden. Darüber hinaus ist ein Vollprobetest und/oder ein sogenannter Black-Building-Test für die Erbringung eines gewerkeübergreifenden Funktionsnachweises für sicherheitsrelevante Anlagen zu empfehlen [217]. Der Vollprobetest ermöglicht, im Gegensatz zu den üblichen stichprobenhaften Steuermatrixprüfungen, die umfassende Funktionsüberprüfung aller Interaktionen sicherheitsrelevanter Anlagen eines Gebäudes [218]. Diese Leistung ist ebenfalls notwendig, um in der Leistungsphase 9 (LP 9) eine zusammenfassende und vollständige Darstellung der Ergebnisse der vorausgehenden Leistungsphasen in einem Erläuterungsbericht zusammenstellen zu können.

Nach der Leistungsphase 9 enden die Vorgänge zu den Brandfallsteuerungen vorläufig. Wie die Erfahrung in der Praxis zeigt, werden jedoch sehr häufig Modifikationen unterschiedlichen Umfangs an Brandfallsteuerungen während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes vorgenommen. Diese sind oft notwendig, um auf die baulichen und anlagentechnischen Veränderungen in einem Gebäude auch hinsichtlich Brandfallsteuerungen reagieren zu können. Oftmals werden kleinere oder auch größere Veränderungen in Eigenregie ohne das Einbeziehen der Bauaufsicht vom Betreiber/Eigentümer/Mieter vorgenommen. Da es derzeit keine gesetzlichen und normativen Regelungen gibt, die wiederkehrende Prüfungen von Brandfallsteuerungen regeln, kommt es in der Praxis häufig dazu, dass sich Fehler in Brandfallsteuerungen über die Zeit „einschleichen“. Dies wird, wie zahlreiche Fälle zeigen, von abnehmenden Sachverständigen für einzelne Anlagen häufig, jedoch nie umfassend für alle Anlagen festgestellt. Eine Bestätigung, dass eine Anlage betriebswirksam und sicher funktioniert, ist selbstverständlich, reicht jedoch nicht aus, um das korrekte und sichere Zusammenwirken aller Anlagen im Verbund zu bestätigen.

Aus diesem Grund ist zu empfehlen die Funktion, die Sicherheit und die anlagentechnische Umsetzung von Brandfallsteuerungen zumindest bei Sonderbauten in wiederkehrenden Prüfungen ca. alle 2 bis 3 Jahre oder nach Umbaumaßnahmen zu überprüfen und durch abnehmende Sachverständige (Steuermatrixbeauftragte) feststellen zu lassen. Da dies selten auf einer freiwilligen Basis geschieht, sollten diese Prüfungen für Sonderbauten gesetzlich festgelegt werden.

### 3.7.3 Struktur von Steuermatrizen

Als Koordinator für Abstimmungen und Festlegungen von Brandfallsteuerungen fungiert oft der beteiligte Brandschutzsachverständige. Die Ergebnisse der Abstimmungen von diesem mit anderen Projektbeteiligten werden in der Dokumentation der Steuermatrix festgehalten.

Die Erstellung der Dokumentation der Steuermatrix erfolgt zumeist in mehreren Stufen. In VDI 6010 Blatt 2 werden dabei drei Stufen unterschieden [217]. In der ersten Stufe wird die funktionale Steuermatrix erstellt. Hierfür werden u. a. folgende Festlegungen getroffen:

- Alarmierungsbereiche
- Alarmierungs- und Evakuierungsabfolgen für Alarmierungsbereiche
- Aktivierungsreihenfolgen von Netzersatz-Verbrauchern

Die erste Stufe der Steuermatrix wird in einer allgemein gehaltenen deskriptiven Form, der sogenannten funktionalen Steuermatrix, aufgestellt. Auf Grundlage dieser Beschreibungen erfolgen die Ausführungsplanung und Abstimmungen mit allen Projektbeteiligten und den Behörden.

In der zweiten Stufe wird die qualitative Steuermatrix aufgestellt. Hierbei werden die allgemeinen Vorgaben aus der ersten Stufe detaillierter beschrieben und in einer Matrixdarstellung für jeden Meldebereich zusammengestellt. Eine exemplarische tabellarische Steuermatrix findet sich in der Tabelle 3.6.

Bei der gewählten Beispieldarstellung bilden die Zeilen die unterschiedlichen Sensoren oder Melder (Quellen) ab. Die Spalten stellen die Aktoren (Senken) dar. Die festgelegten Verknüpfungen werden durch X gekennzeichnet. Des Weiteren kann es je nach Komplexität der Steuermatrix weitere Felder für Funktionsbeschreibungen und Anmerkungen sowie Beschreibungsfelder für Interaktionen in benachbarten Meldebereichen geben [217].

Andere Darstellungsformen der tabellarischen Steuermatrix sind ebenfalls gängig [25]. Dabei werden etwa die Sensoren in Spalten und die Aktoren in Zeilen dargestellt. Ergänzend zu den tabellarischen Darstellungen werden bei komplexen Steuermatrizen Pläne mit den dargestellten Meldebereichen angefertigt.

In der dritten und letzten Stufe wird die quantitative Steuermatrix aufgestellt. Hierbei werden die Festlegungen der ersten beiden Stufen einzelnen Elementen aller angesteuerten Anlagen



Steuermatrix für Meldebereich ...	Aktoren (Senken)	Brandalarm	Alarm Feuerwehr	Alarm Sicherheitszentrale	ELA	Evakuierungsdurchsage	Lüftungsanlagen	Lüftungsanlage	Brandfall-Lüftung	Maschinelle Entrauchung	Ventilator(en) Entrauchung	öffnen	Druckbelüftung	Ventilator(en) Treppenträume	Vent. Feuerwehraufzug	Aufzüge	Brandfallsteuerung Aufzüge	auslösen	weitere Anlagen ...
	Funktion																		
			auslösen	melden	aktivieren	ausschalten	einschalten		einschalten										
		Brandalarm																	
		Alarm Feuerwehr	X	X															
		Alarm Sicherheitszentrale	X	X															
		ELA			X														
		Evakuierungsdurchsage			X														
		Lüftungsanlagen																	
		Lüftungsanlage																	
		Brandfall-Lüftung							X										
		Maschinelle Entrauchung																	
		Ventilator(en) Entrauchung																	
		öffnen																	
		Druckbelüftung																	
		Ventilator(en) Treppenträume																	
		Vent. Feuerwehraufzug																	
		Aufzüge																	
		Brandfallsteuerung Aufzüge																	
		auslösen																	
		weitere Anlagen ...																	

Tabelle 3.6: Beispiel einer Steuermatrix

zugeordnet. Diese Festlegungen ermöglichen die anschließende Programmierung der Steuerungstechnik in der BMA und/oder in den Steuerungsmodulen einzelner Anlagen.

Die fertiggestellte Steuermatrix und die dazugehörige Dokumentation bilden eine Grundlage für die stetige Fortschreibung von Brandfallsteuerungen, die im Lebenszyklus eines jeden Gebäudes erforderlich werden. Daher ist es zwingend erforderlich, die Steuermatrix stets aktuell zu halten. Die Fortschreibung ist ebenfalls für die empfehlenswerten, regelmäßig und wiederkehrend durchzuführenden Prüfungen von Interaktionen erforderlich.

### **3.7.4 Statische Eigenschaften von Brandfallsteuerungen als Regelfall**

Steuermatrizen stellen eine Möglichkeit dar, Interaktionen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und anderer Anlagen zu planen und anschaulich darzustellen [168]. Bei der Darstellung von Steuermatrizen werden, wie zuvor erläutert, häufig Matrixdarstellungen verwendet, die in der Regel nur einen Ablauf bzw. eine Interaktion im Brandfall abbilden. Dies verdeutlicht den statischen Charakter von derzeit verwendeten Steuermatrizen oder allgemeiner von Brandfallsteuerungen. Als statische Eigenschaften von derzeit üblichen Brandfallsteuerungen lassen sich folgende benennen:

- Je Detektion werden fast ausschließlich bestimmte, einmalige Interaktionen ausgeführt.
- Der zeitliche Ablauf und die Reihenfolge von Interaktionen der GB werden selten berücksichtigt.
- Die Dauer von Interaktionen, d. h. Verzögerung, Beginn, Entwicklung und volle Wirkung, werden selten berücksichtigt.
- Interaktionen von GB werden nicht hinreichend berücksichtigt.
- Prioritäten von Interaktionen werden selten festgelegt.
- Die sich gegenseitig beeinflussenden Interaktionen werden unzureichend betrachtet.
- Die interne und externe Dynamik des Gesamtsystems wird nicht oder kaum berücksichtigt.

Für die bislang übliche Nichtbetrachtung der Dynamik in Brandfallsteuerungen können dabei exemplarisch folgende Gründe aufgeführt werden:

- Es wird keine Notwendigkeit gesehen, Brandfallsteuerungen dynamisch zu gestalten.

- Dynamische Abläufe lassen sich tabellarisch schlechter als einmalige Aktionen darstellen.
- Unterschiedliche Brandszenarien und Abläufe müssen separat betrachtet und in geeigneter Form dargestellt werden.
- Die Komplexität und der Aufwand zur Berücksichtigung von dynamischen Abläufen ist im Vergleich zu statischen in der Regel größer.
- Die anlagentechnische Umsetzung von dynamischen Steuerungen ist gegenüber üblichen Steuerungen schwieriger.

### **3.7.5 Probleme bei der Umsetzung der Vorgaben der Steuermatrix**

Die Umsetzung der Vorgaben der Steuermatrix in der BMA und anderen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen kann als ein Prozess betrachtet werden.

Nachdem die Steuermatrix aufgestellt ist und die Installationen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen weitestgehend abgeschlossen sind, werden die Steuerungsvorgaben zu Brandfallsteuerungen aus der Steuermatrix in die jeweiligen Steuerungsmodule von Anlagen programmiert.

In dieser Phase, meist kurz vor der Inbetriebnahme des Gebäudes, werden die letzten Abstimmungen zwischen den Beteiligten geführt und sowohl die Steuermatrix fortgeschrieben als auch die zugehörige anlagentechnische Umsetzung laufend angepasst. Die jeweiligen Anlagenerrichter setzen zunächst die für ihr System vorgesehenen Auflagen und Steuerungen um. Nach der Implementierung werden zunächst die internen, auf eine Anlage beschränkten Steuerungen geprüft. Anschließend finden gewerkeübergreifende Tests von Interaktionen aller Anlagen statt. Diese Interaktionsprüfungen, die überwiegend stichprobenartig durchgeführt werden, decken häufig zahlreiche Unzulänglichkeiten auf, die meist unter hohem Zeitdruck beseitigt werden.

Anschließend oder auch zeitgleich finden Prüfungen von bestimmten sicherheitsrelevanten Anlagen durch Sachverständige bzw. Sachkundige statt. Diese Prüfungen sind bauaufsichtlich gefordert und dürfen nur von zugelassenen Personen vorgenommen werden. Die Prüfungen erfolgen unter Beachtung von Prüfgrundsätzen (siehe z. B. Prüfgrundsätze NRW) [196].

Die dabei auftretenden Probleme lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Aufgrund von stichprobenhaften und lokalen Überprüfungen von Brandfallsteuerungen kann nicht die vollumfängliche Funktion aller Steuerungen bestätigt werden.
- Es gibt keinen Zeitpunkt, an dem die Änderungen an Brandfallsteuerungen abgeschlossen sind und danach nicht mehr verändert werden.
- Die Dokumentation von Brandfallsteuerungen ist demnach nur selten vollständig.
- Nach der Inbetriebnahme geht meistens die Verantwortung von den Anlagenerrichtern auf den Betreiber über. Bei diesem Übergang geht oftmals viel Wissen über die Anlagen und deren Steuerungen verloren.
- Nach der Inbetriebnahme werden Brandfallsteuerungen nur in seltenen Fällen und nur unregelmäßig einer ganzheitlichen Prüfung unterzogen.
- Brandfallsteuerungen werden nicht immer an die Veränderungen im Lebenszyklus eines Gebäudes angepasst.
- Die bauaufsichtlich geforderten Prüfungen durch Sachverständige/Sachkundige zur Inbetriebnahme und bei wiederkehrenden Prüfungen betrachten meistens nur separate Anlagen. Gewerkeübergreifende Prüfungen von Interaktionen von Anlagen werden bauaufsichtlich nur selten gefordert.

Neben den aufgeführten praktischen Problemen bei der Umsetzung von Brandfallsteuerungen sind auch mittel- und langfristige Entwicklungen zu beobachten, die zu Unzulänglichkeiten von Brandfallsteuerungen führen können [97]. Zum einen gehört dazu die stetige Verschmelzung von z. B. Anlagen der GLT und der sicherheitstechnischen Anlagen [132]. Die Anreize für das Zusammenführen von diesen Anlagen bestehen darin, dass durch die einheitlichen Bedien- und Steuerungsmöglichkeiten ein Mehrwert für den Kunden entsteht. Auf der anderen Seite steigt durch diese Verschmelzung die Komplexität von Anlagen, die beherrscht werden muss, um die geforderten Schutzziele erreichen zu können. Des Weiteren muss eine Rückwirkungsfreiheit zwischen den übergeordneten Managementsystemen und den sicherheitsrelevanten Anlagen bestehen, damit die nicht sicherheitsrelevanten Systeme die sicherheitsrelevanten nicht negativ beeinflussen. Hieraus ergeben sich auch erhöhte Anforderungen an die System- und Komponentensicherheit der GLT.

### **3.8 Zusammenfassende Bewertung der Eignung von Komponenten für dynamische Steuerungen**

Die Eignung von unterschiedlichen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und einiger anderer im Brandfall relevanter Anlagen hinsichtlich der dynamischen Ansteuerung ist qualitativ in Tabelle 3.7 dargestellt. Die Beschreibung und die Begründung der Eignung der einzelnen Anlagen sind den jeweiligen Abschnitten der Arbeit zu entnehmen.

Bei der Beurteilung der Eignung der in der Tabelle aufgeführten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und weiterer Anlagen für dynamische Ansteuerungen spielen folgende Punkte eine Rolle:

- Flexibilität der Ansteuerungen von Aktoren der jeweiligen Anlage/Einrichtung im zeitlichen oder ereignisbezogenen Kontext (Bsp.: Kann die Ansteuerung im Brandverlauf geändert werden, sofern dies sinnvoll ist?)
- Trägheit der Reaktion der Anlage/Einrichtung auf Ansteuerungen
- Anlage/Einrichtung autark oder zentral gesteuert
- Anlage/Einrichtung mit/ohne eigene Sensorik und Steuerungseinheit
- momentaner technischer Entwicklungsstand und Funktion der Anlage/Einrichtung
- Ansteuerungsmöglichkeiten der Anlage/Einrichtung manuell und/oder automatisch

<b>Bezeichnung der gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtung und anderer relevanter Anlagen</b>	<b>++ sehr geeignet + geeignet 0 evtl. geeignet - weniger geeignet -- nicht geeignet</b>	<b>Beschreibung/ Hinweise siehe Abschnitt(e)</b>
BMA	++	3.4
MRA	++	3.5.3.2
automatische Löschsysteme	++	3.5.4.2 und 3.5.4.3
Inertisierungs- und Sauerstoffreduzierungsanlagen	++	3.5.5
Fluchtwegsteuerungen	++	3.5.7
Akustische Alarmierungsanlagen	++	3.5.8
Einbruchmelde- und Videoüberwachungsanlage	++	3.5.10
Information für die FW	+	3.5.14
Steuerung durch die FW	+	3.5.14
Feuerschutz- und Rauchschutzabschlüsse	+	3.5.1
Lüftungsanlagen	+	3.5.2
NRA	+	3.5.3.1
Übertragungseinrichtung	+	3.5.9
Abschaltung Energieverbraucher	+	3.5.11
Personenaufzüge	+	3.5.12.1
Gebäudeautomation	+	3.5.13
Gefahren-Informations-Management-System	+	3.5.6
RDA	0	3.5.3.3
Feuerwehrperipherie	0	3.5.14
Fahrtreppen und Fahrsteige	0	3.5.12.2
Sprinkleranlagen	--	3.5.4.1

Tabelle 3.7: Zusammenfassung der Eignung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und anderer Anlagen zur dynamischen Ansteuerung (qualitativ)

### 3.9 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde zunächst der anlagentechnische Brandschutz in das Gesamtsystem des Brandschutzes eingeordnet und ein Überblick über die aktuellen Tendenzen des anlagentechnischen Brandschutzes gegeben. Danach wurden die Elemente von brandschutztechnischen Anlagen in Sensoren, verarbeitende Einheit und Aktoren unterteilt und deren grundsätzliche Funktion sowie die Prinzipien des Zusammenwirkens beschrieben. Ferner wurden die Eigenschaften und der Aufbau von Brandmeldeanlagen ausführlich erläutert. Neben dieser wichtigsten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtung wurden zahlreiche andere wichtige Anlagen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur dynamischen Brandfallsteuerung untersucht.

Nach der Vorstellung einzelner gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen wurden Anforderungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln an diese Einrichtungen sowie deren Zusammenwirken diskutiert. Hierbei spielt die Sicherheit gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen eine besondere Rolle. Es zeigt sich, dass die derzeit fast ausschließlich qualitativ und heuristisch stattfindende Beurteilung der Sicherheit gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen nicht ausreicht und neue quantitative Ansätze und Methoden ebenfalls zur Beurteilung herangezogen werden sollten [74].

Im Unterabschnitt zu Brandfallsteuerungen wurden die wichtigsten Definitionen sowie die prinzipiellen Eigenschaften von momentan in der Praxis verwendeten Brandfallsteuerungen gegeben. Hier wurden Unzulänglichkeiten beim derzeitigen Vorgehen zur Erstellung von Brandfallsteuerungen sowie die statischen Eigenschaften von Steuerungen aufgezeigt.

Am Ende des Abschnittes wurden die einzelnen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen aufgeführt und hinsichtlich ihrer Eignung zur dynamischen Steuerung qualitativ zusammenfassend dargestellt.

Aufbauend auf den Bewertungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und den Prozessen der Erstellung von Brandfallsteuerungen wird im folgenden Abschnitt ein Schwerpunkt auf die Dynamik von Brandfallsteuerungen gelegt.





## 4 Entwicklung dynamischer Steuerungen

In den Abschnitten 2 und 3 wurden Eigenschaften komplexer technischer Systeme und die wichtigsten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen vorgestellt und Letztere hinsichtlich der dynamischen Steuerungsfähigkeit und Sicherheit beurteilt. Die Komplexität und die ständig steigenden Anforderungen machen solche Steuerungen dieser Systeme, angepasst an das dynamische Brandgeschehen, unabdingbar. In diesem Abschnitt wird zunächst ein systemtheoretischer Ansatz vorgestellt, mit dem man das System gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und ihrer Umwelt darstellen und untersuchen kann. Darauf aufbauend werden ein Modell und Darstellungsformen präsentiert, mit deren Hilfe man dynamische Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen planen und grafisch darstellen kann. Das Modell wird aus unterschiedlichen Blickwinkeln bewertet. Als eine besondere Subroutine des übergeordneten Modells wird ein weiteres probabilistisches Modell des individuellen Risikos unter Berücksichtigung von Branddynamik, Steuerungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen entwickelt und bewertet. Beide Modelle zusammengekommen erlauben eine ganzheitliche brandschutztechnische Planung und Bewertung von Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen eines Gebäudes.

### 4.1 Dynamische Systeme

Der Begriff des Systems wurde in Abschnitt 2.1 auf Seite 6 eingeführt und erläutert. Ferner wurden in diesem Abschnitt Eigenschaften komplexer Systeme dargestellt. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass moderne technische Systeme häufig Eigenschaften komplexer Systeme aufweisen.

Neben der Komplexität, die ein System aufweisen kann, kann das System sich zusätzlich dynamisch verhalten. In diesem Fall bezeichnet man das System als ein dynamisches System.

In Abbildung 4.1 ist ein dynamisches System schematisch dargestellt.

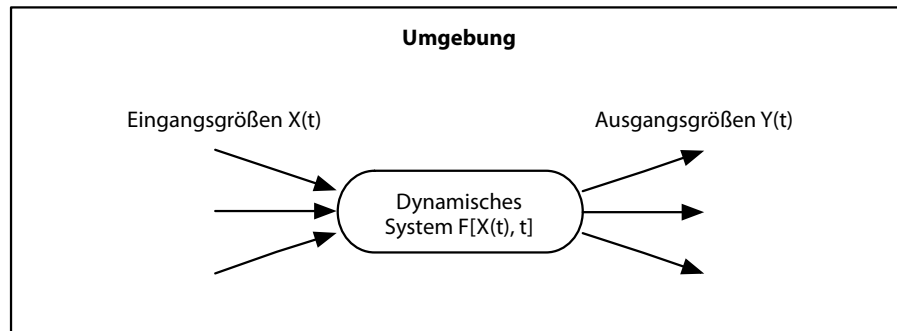


Abbildung 4.1: Dynamisches System

Wie in Abschnitt 2.1 für komplexe Systeme gezeigt wurde, wirken auch auf ein dynamisches System Eingangsgrößen aus der Umgebung ein. Dieses reagiert auf die Eingangsgrößen und wirkt auf die Umgebung über die Ausgangsgrößen. Das systeminterne Verhalten weist jedoch, in Abgrenzung zu anderen Systemen, dynamische und oftmals nichtlineare Zusammenhänge zwischen den Elementen des Systems auf [18]. Ferner können die Elemente sich selbst dynamisch verändern (vgl. Definition der Dynamik in 2.2). Ein dynamisches System kann wie folgt definiert werden:

**Definition: Dynamisches System**

*Ein dynamisches System enthält eine oder mehrere Größen bzw. Elemente, die sich mit der Zeit ändern (in Anlehnung an [7, 31, 156]).*

Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass sich bei einem statischen System im betrachteten Zeitraum keine relevanten Zustandsänderungen ergeben. Dagegen verändert das dynamische System seinen Zustand über die Zeit [129]. Mathematisch ausgedrückt kann man für den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen  $X$  und den Ausgangsgrößen  $Y$  mithilfe des Operators  $F$  angeben:

$$\text{für statische Systeme: } Y = F(X) \tag{4.1a}$$

$$\text{für dynamische Systeme: } Y(t) = F[X(t), t] \tag{4.1b}$$

Wobei  $t$  allgemein für die Zeit als Variable steht. Der Operator  $F$  ist ein Algorithmus, im Sonderfall eine bekannte Funktion, mithilfe dessen die Eingangsgrößen  $X$  in die Ausgangsgrößen  $Y$  im System umgewandelt werden [129].

Definitionsbereich	(zeit-) kontinuierlich	(zeit-) diskret, diskontinuierlich
<b>Wertebereich</b>	wertkontinuierlich (wert-) beschränkt	wertdiskret, amplitudendiskret nicht beschränkt
<b>weitere Eigenschaften</b>	linear zeitinvariant kausal stabil dynamisch (mit Gedächtnis) deterministisch	nicht linear zeitvariant nicht kausal nicht stabil statisch (gedächtnislos) stochastisch

*Tabelle 4.1: Eigenschaften von Systemen nach [44]*

Falls der Zustand eines dynamischen Systems gegenüber dem Ist-Zustand für nachfolgende Zeitpunkte eindeutig z. B. mit Gleichungen beschrieben werden kann, handelt es sich um eine deterministische Dynamik. Kann man dagegen nur Wahrscheinlichkeiten für künftige Zustände des Systems angeben, handelt es sich um probabilistische oder stochastische Dynamik [156].

Hinsichtlich der zeitlichen Eigenschaften, die das dynamische Verhalten eines solchen Systems prägen, können Systeme generell in zeitkontinuierliche und in diskrete, also diskontinuierliche Systeme unterteilt werden. In Tabelle 4.1 sind einige wichtige Eigenschaften dieser beiden Arten von Systemen dargestellt.

Diese Unterteilung differenziert Systeme, in denen Prozesse sich hinsichtlich der Zeit kontinuierlich bzw. diskontinuierlich verhalten. Die Unterscheidung hinsichtlich dieser Eigenschaft kann jedoch nicht scharf erfolgen, da je nach Betrachtungsweise ein unterschiedlicher Zeitraum eine Rolle spielt [27].

Bei der Betrachtung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen spielt die zeitliche Komponente sowohl vor einem Brandereignis (Lebenszyklus) als auch im Falle eines Brandereignisses eine besonders große Rolle. Bei beiden Betrachtungsweisen können gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen als dynamische und komplexe Systeme angesehen werden (vgl. Tabelle 4.3). Systemtheoretische Klassifizierungen und Ansätze eignen sich daher, um gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen zu analysieren [72].

In der Abbildung 4.2 ist allgemein eine GB als ein dynamisches System dargestellt.

Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen eines Gebäudes können als ein dynamisches, komplexes System mit Subsystemen oder als interagierende Systeme mit vergleichbaren Eigen-

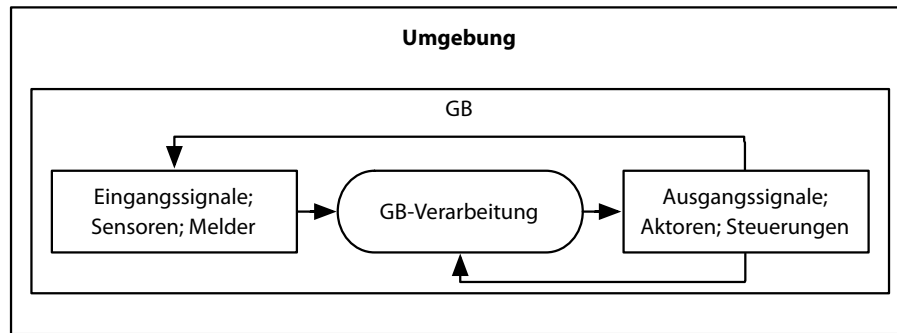


Abbildung 4.2: GB als dynamisches System

schaften verstanden werden [69]. Dies trifft vor allem auf die Eigenschaften und das Verhalten von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Brandfall zu. Die Dynamik begründet sich aus der Tatsache, dass die Aktoren von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Brandverlauf auf andere Anlagen und Einrichtungen bzw. ihre Komponenten und die Verarbeitungseinheiten einwirken und diese in ihrem Verhalten beeinflussen können. Dabei können häufig gegenseitige physikalische Beeinflussungen festgestellt werden, bei denen enge zeitliche und kausale Zusammenhänge bestehen. Sowohl bei Ein- als auch bei Ausgangssignalen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen können Eigenschaften festgestellt werden, die das dynamische Verhalten verdeutlichen.

Beispiele für Eingangssignale gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und deren Eigenschaften sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Eingangssignal	Eigenschaft	Beispiel
<b>kontinuierlich</b>	stetige Entwicklung im betrachteten Zeitraum	Temperaturanstieg; Entwicklung der Rauchgaskonzentration
<b>diskontinuierlich</b>	sprunghafte Entwicklung im betrachteten Zeitraum	Betätigung des Druckknopfmelders; Branddetektion

Tabelle 4.2: Eigenschaften von Eingangssignalen mit Beispielen

Bei den Eingangssignalen kann nach kontinuierlichen und diskontinuierlichen Signalen unterschieden werden. Beide Arten von Eingangssignalen können, wie die Beispiele in der Tabelle 4.2 zeigen, in Brandmelde- und anderen Brandschutzeinrichtungen sowie generell bei Bränden vorgefunden werden.

In Tabelle 4.3 sind die unterschiedlichen Ausgangssignale mit Beispielen aus gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und Vorgängen bei Bränden aufgelistet.

<b>Ausgangssignal</b>	<b>Eigenschaft</b>	<b>Beispiel</b>
<b>kontinuierlich</b>	stetige Entwicklung im betrachteten Zeitraum	Entrauchungsleistung; Personenfluss bei Evakuierung
<b>diskontinuierlich</b>	sprunghafte Entwicklung im betrachteten Zeitraum	Übermittlung der Brandmeldung an FW; Schließen von Brandschutzabschlüssen
<b>ereignisbezogen</b>	Eintritt bei bestimmtem Ereignis	Brandmeldung bei Detektion durch zwei autom. Brandmelder
<b>zeitbezogen</b>	Eintritt nach bestimmter Zeit	Auslösung einer Gaslöschanlage nach einer bestimmten Zeit in einem MB

*Tabelle 4.3: Eigenschaften von Ausgangssignalen mit Beispielen*

Neben den zuvor bei den Eingangssignalen genannten kontinuierlichen und diskontinuierlichen Signalen können die Ausgangssignale zusätzlich in ereignis- und zeitbezogene Signale unterschieden werden. Die Beispiele der Tabelle 4.3 zeigen, dass bei gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen die beiden letzteren Typen ebenfalls häufig vorkommen.

Die Betrachtungsweise von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen mit Methoden der Systemtheorie erlaubt es, solche dynamischen und komplexen Systeme besser zu verstehen, um sie besser planbar zu machen und sie effizienter z. B. hinsichtlich der Steuerung einsetzen zu können. Diese Sicht, nicht nur auf der Ebene von Komponenten, führt zu einem Verständnis des Gesamtsystems und kann das Systemverhalten besser beschreiben und voraussagen.

## 4.2 Definition und Eigenschaften dynamischer Steuerungen

Übliche Definitionen von Brandfallsteuerungen sind im Abschnitt 3.7.1 auf Seite 95 gegeben. Dynamische Brandfallsteuerungen werden in dieser Arbeit wie folgt definiert:

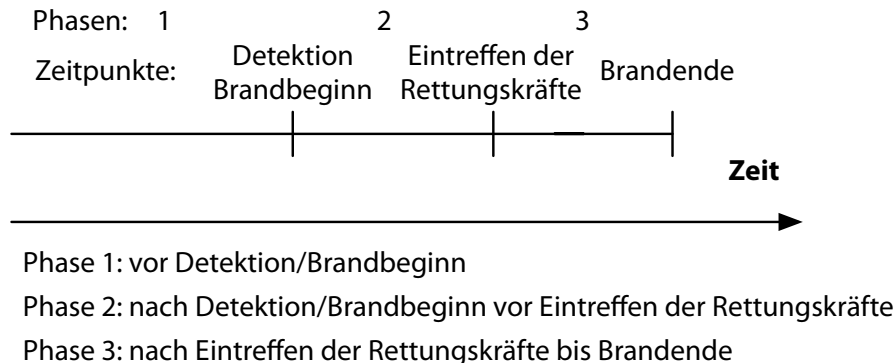
**Definition: Dynamische Brandfallsteuerungen**

*Unter dynamischen Brandfallsteuerungen werden Steuerungen und Interaktionen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und anderer technischer Anlagen verstanden, die ereignis- und/oder zeitbezogen stattfinden und bei denen das zeitliche Verhalten berücksichtigt wird.*

Die Eigenschaften dynamischer Brandfallsteuerungen und deren anlagentechnische Umsetzung gemäß dieser Definition sind vielfältig und müssen eine Fülle von Anforderungen abdecken. Die wichtigsten Eigenschaften und Anforderungen an dynamische Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen sind:

- Sicherheit von Steuerungen
- Anpassungsfähigkeit von Steuerungen
- Möglichkeit manueller oder automatisierter Auslösungen von Steuerungen, z. B. durch Feuerwehr oder Betreiber
- Protokollierung von manuellen Eingriffen und Steuerungen aller Systeme

Dynamische Brandfallsteuerungen können zeitlich in unterschiedliche Phasen anhand von brandschutzrelevanten Zeitpunkten eingeteilt werden. In Abbildung 4.3 sind die Phasen und die Zeitpunkte dargestellt.



*Abbildung 4.3: Phasen dynamischer Brandfallsteuerungen*

In der ersten Phase befinden sich die gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Bereitschaftsmodus. In dieser Phase werden keine Brandfallsteuerungen ausgeführt. Ab Brandbeginn bzw. ab der Detektion eines Brandereignisses beginnt die zweite Phase. Diese Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass die Rettungskräfte oder anderes Fachpersonal, welches gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen bedienen kann, noch nicht vor Ort ist. In dieser Phase sollten sämtliche Brandfallsteuerungen dynamisch, sicher und automatisch stattfinden.

In der dritten Phase können, nach dem Eintreffen der Rettungskräfte, die automatischen Brandfallsteuerungen weiter ablaufen. Zusätzlich besteht für die Rettungskräfte die Möglichkeit, automatisierte oder manuelle Steuerungen an gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen vorzunehmen. Wenn die von Menschen vorgenommenen Steuerungen dynamische Interaktionen auslösen, müssen dem Bedienpersonal die Konsequenzen der Eingriffe bewusst sein.

Die Unterschiede zwischen statischen und dynamischen Ansteuerungen werden exemplarisch anhand der Ansteuerung eines Ventilators nachfolgend erläutert. In Abbildung 4.4 sind die statische und die dynamische Ansteuerung in Abhängigkeit der Ansteuerungsstufen über die Zeit dargestellt.

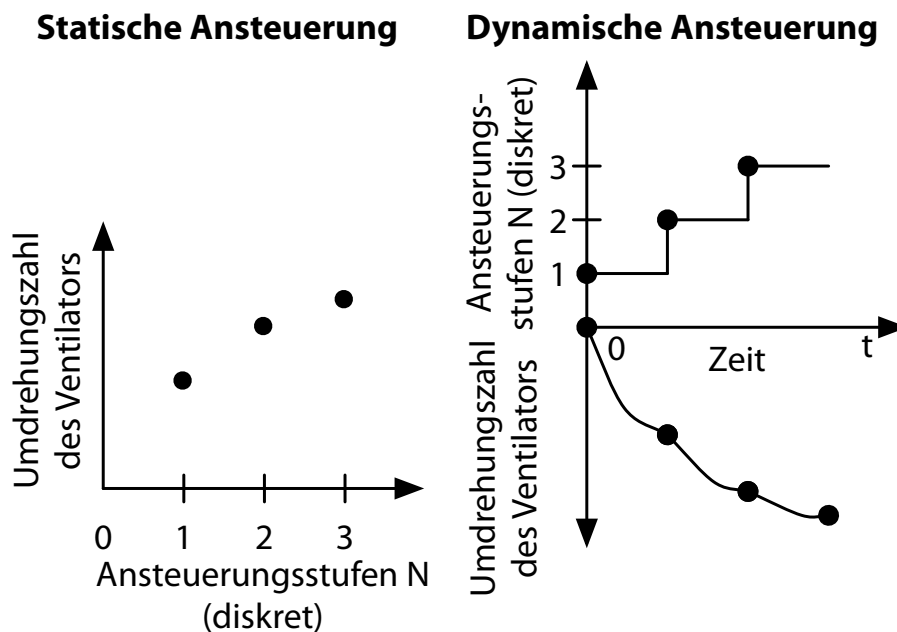


Abbildung 4.4: Exemplarische Darstellung der statischen und dynamischen Ansteuerung eines Ventilators

Im Falle der statischen Ansteuerung eines Ventilators werden den diskreten Ansteuerungsstufen N vereinfachend die jeweiligen Umdrehungszahlen zugeordnet. Dies bedeutet, dass bei der statischen Ansteuerung die zeitliche Komponente keine Rolle spielt. Bei den dynamischen Ansteuerungen wird dagegen das Verhalten des Ventilators bei Einschaltung von diskreten Ansteuerungsstufen N berücksichtigt. Somit wird das Verhalten des Ventilators im Modell der dynamischen Ansteuerung realitätsnäher abgebildet.

## **4.3 Modell dynamischer Brandfallsteuerungen**

Brandschutzkonzepte integrieren üblicherweise bei komplexen Bauten, als festes Bestandteil des ganzheitlichen Brandschutzes, zahlreiche gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen (z. B. [82]). Um die gestellten Schutzziele zu erreichen, erfüllen diese Einrichtungen wichtige Funktionen und Aufgaben, die andere Komponenten, wie z. B. baulicher oder abwehrender Brandschutz, nicht oder nur unzureichend erfüllen können.

In den Abschnitten 2 und 3 wurde gezeigt, dass viele Brandfallsteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen bislang überwiegend statisch sind, obwohl dynamische Brandfallsteuerungen von solchen Anlagen diverse Vorteile bieten. Im Folgenden wird daher ein Modell zu dynamischen Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen vorgestellt.

### **4.3.1 Anforderungen an ein Modell zur Berücksichtigung von dynamischen Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen**

Das Brandgeschehen wird im Allgemeinen von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sich im zeitlichen Verlauf oder ereignisbezogen verändern. Das Ziel des Modells zur Berücksichtigung von dynamischen Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen ist, allgemeine Schritte und Vorgehensweisen zu demonstrieren, wie die Dynamik berücksichtigt und die Steuerungen von GB entsprechend geplant werden können. Das Modell muss dabei auf einer hohen Abstraktionsebene agieren, um die wichtigsten Einfluss nehmenden Parameter berücksichtigen zu können. Gleichzeitig muss das Modell es dem Anwender ermöglichen, in weitergehenden Untersuchungen fallbezogene und konkrete Fragestellungen betrachten zu können. Hierzu müssen genaue Informationen zum jeweiligen Gebäude vorhanden sein oder sinnvolle Annahmen getroffen werden, um das dynamische Verhalten von GB korrekt abzubilden.

Neben den zuvor genannten Faktoren muss das Modell die übergeordneten Schutzziele berücksichtigen und anhand einer Überprüfung deren Einhaltung feststellen. Unter Beachtung dieser Randbedingungen muss das Modell ebenfalls beantworten, bei welchen Kriterien die Dynamik und entsprechende Ansteuerungen zu berücksichtigen sind und welche Vorteile diese Steuerungen bieten.

Im Allgemeinen hat jedes Modell im Wesentlichen drei Merkmale. Zum einen bildet ein Modell



etwas ab (Abbildungsmerkmal). Das bedeutet, dass Modelle einen Teil des Originals oder eines anderen Modells abbilden. Zum anderen bilden Modelle nicht alle Attribute eines Originals ab und verkürzen aus diesem Grunde (Verkürzungsmerkmal). Das dritte Merkmal ist das des Pragmatismus. Dieses Merkmal betont, dass Modelle zur Verfolgung bestimmter Ziele dienen [114, 142].

### 4.3.2 Allgemeine Beschreibung der Eigenschaften und Elemente des Modells

In Abbildung 4.5 ist das Ablaufdiagramm des Modells zur Berücksichtigung des dynamischen Systemverhaltens und dynamischer Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen dargestellt.

Unter dynamischem Systemverhalten wird im Sinne dieses Modells die Reaktion des Systems aller GB des untersuchten Gebäudes auf zeitliche und ereignisbezogene Änderungen des Systems selbst oder auf Änderungen der Randbedingungen aus der Umgebung mit Relevanz für das Systemverhalten verstanden.

Das Modell in der Abbildung wurde mithilfe eines Programmablaufplans nach DIN 66001 erstellt [181]. Ein Programmablaufplan stellt allgemein die Verarbeitungsfolgen in einem Programm dar. Die Verbindungen zwischen den Verarbeitungseinheiten zeigen dabei die Reihenfolge der Verarbeitungen auf. Mithilfe eines Rechtecks werden Prozesse (einschließlich der Ein- und Ausgaben) dargestellt. Durch Rauten werden Verzweigungen, Entscheidungen oder Auswahlheiten wiedergegeben. Im Weiteren werden die Punkte des Ablaufdiagramms in der Abbildung 4.5 mithilfe von Ziffern in runden Klammern erläutert.

- (1) Für ein Gebäude werden zunächst die zu erfüllenden brandschutzrelevanten Schutzziele definiert [149]. Dies erfolgt auf Grundlage von gesetzlichen Vorgaben sowie von weiteren Anforderungen, z. B. solchen seitens des Gebäudeeigentümers oder -nutzers. Ferner erfolgen die zugehörigen Risikoanalysen und die Festlegung des SIL (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.2 auf Seite 19).
- (2) Sodann erfolgt eine Aufstellung erforderlicher GB bzw. die Erfassung von im Gebäude vorhandenen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen, sofern es sich um ein Bestandsgebäude handelt.
- (3) Das Gebäude ist in der Regel in Meldebereiche (MB) unterteilt. Jeder Meldebereich ist dadurch gekennzeichnet, dass darin unabhängig vom genauen Ort der automatischen

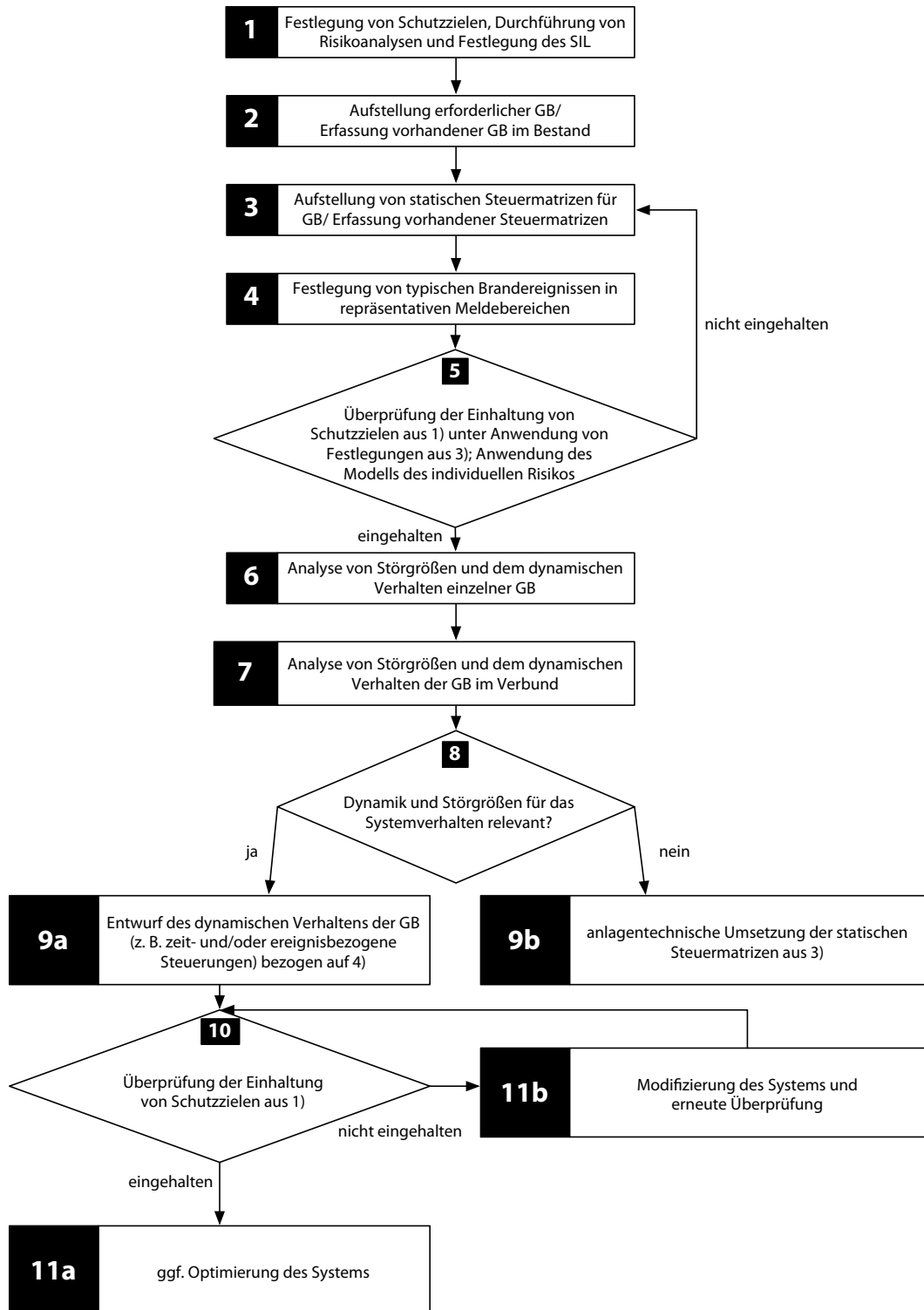


Abbildung 4.5: Ablaufdiagramm des Modells zur Berücksichtigung von dynamischen Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen

Branddetektion dieselben Interaktionen von GB ausgelöst werden. Die Interaktionen werden in zunächst statischen Steuermatrizen festgelegt bzw. liegen im Falle von Bestandsgebäuden in der Regel bereits vor [217].

- (4) Da das Gebäude in der Regel sehr viele Meldebereiche hat, können, um den Arbeitsaufwand zu verringern, repräsentative Meldebereiche aus allen vorhandenen für weitere Betrachtungen ausgewählt werden. Die Auswahl der Meldebereiche richtet sich nach der brandschutztechnischen Relevanz und Häufigkeit des Vorkommens im Gebäude. Die festgelegten typischen Brandereignisse entsprechen der Nutzung der ausgewählten Meldebereiche [26].
- (5) Für diese ausgewählten Meldebereiche findet dann, unter Berücksichtigung der Interaktionen von Brandschutzeinrichtungen, eine Überprüfung statt, ob die unter (1) gestellten Schutzziele eingehalten werden. Hierzu kann etwa das in Abschnitt 4.5 eigens entwickelte probabilistische Modell des individuellen Risikos unter Berücksichtigung der Branddynamik, der Steuerungen und der Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen verwendet werden.
- (6) Im Falle der Nichteinhaltung müssen die statischen Steuermatrizen erneut aufgestellt werden (vgl. (3)). Im Falle der Einhaltung der Schutzziele erfolgt eine Analyse von Störgrößen und dem dynamischen Verhalten einzelner Brandschutzeinrichtungen eines Gebäudes.
- (7) Darauf aufbauend erfolgt eine Analyse des dynamischen Verhaltens und des Verhaltens gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen im Verbund.
- (8) Unter dem dynamischen Systemverhalten wird im Sinne dieses Modells die Reaktion des Systems aller gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen des untersuchten Gebäudes auf zeitliche und ereignisbezogene Änderungen oder auf solche Änderungen der Randbedingungen aus der Umgebung mit Relevanz für das Systemverhalten und die Schutzziele verstanden. Auf Grundlage dieser Analysen wird festgestellt, ob die Dynamik und die Störgrößen für das Systemverhalten relevant sind [23].
- (9b) Wenn diese Größen nicht relevant sind, erfolgt die anlagentechnische Umsetzung der unter (3) aufgestellten statischen Steuermatrizen.
- (9a) Falls jedoch die Dynamik und/oder Störgrößen für das Systemverhalten im Brandfall relevant sind, erfolgt der Entwurf des dynamischen Verhaltens gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen (Planung dynamischer Brandfallsteuerungen) unter Berücksichtigung der unter (4) ausgearbeiteten typischen Brandereignisse in zuvor ausgewählten

repräsentativen Meldebereichen. Der Entwurf dynamischer Steuerung gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen kann dabei mithilfe der in Abschnitt 4.3.4 vorgestellten Visualisierungsmöglichkeiten erfolgen. Die Kriterien zur Entscheidungsfindung, ob die Dynamik bzw. die Störgrößen für das Systemverhalten relevant sind, werden im folgenden Abschnitt 4.3.3 diskutiert.

- (10) Nach Planung des dynamischen Systemverhaltens von Brandschutzeinrichtungen wird die Einhaltung der unter (1) aufgestellten Schutzziele überprüft.
- (11a) Im Falle der Einhaltung von Schutzziele wird das System ggf. noch optimiert.
- (11b) Bei Nichteinhaltung von Schutzziele wird das System hinsichtlich dynamischer Brandfallsteuerungen modifiziert und erneut einer Prüfung unterzogen.

### **4.3.3 Relevanz der Dynamik für die Ansteuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen**

Die Definitionen der Dynamik und dynamischer Brandfallsteuerungen im Kontext dieser Arbeit sind in Abschnitt 2.2 auf Seite 10 bzw. in Abschnitt 4.2 auf Seite 113 erfolgt. Demnach sind dynamische Brandfallsteuerungen solche Steuerungen und Interaktionen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und anderer technischer Anlagen, die ereignis- und/oder zeitbezogen stattfinden. Dabei ist der Bezug der Steuerungen im Brandfall zum dynamischen Brandgeschehen hinsichtlich der Abläufe im zeitlichen oder ereignisbezogenen Kontext besonders hervorzuheben.

In der Vergangenheit und Gegenwart werden die Reaktionen von GB auf das dynamische Brandgeschehen oftmals statisch, also ohne die Berücksichtigung des zeitlichen und/oder ereignisbezogenen Kontextes gestaltet (vgl. Abschnitt 3.7.4 auf Seite 102). Die statische Antwort des Systems aus GB auf das stets dynamische Brandgeschehen ist die einfachste mögliche und nicht immer die adäquate Variante von Ansteuerungen. Im vorgestellten Modell sollen die Dynamik des Brandgeschehens und mögliche Störgrößen auf das gesamte System zunächst erfasst und analysiert werden. Bei der Erfassung der Dynamik sind die möglichen zeitlichen und ereignisbezogenen Abläufe in festgelegten Szenarien ebenso wie die Anlauf- und Reaktionszeiten von GB zu betrachten.

Bei der Entscheidungsfindung, ob die Dynamik und die Störgrößen für das System relevant sind, sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Brandgeschehen im untersuchten Szenario
- Äußere Störgrößen auf das Brandszenario (z. B. Wind, Temperaturverteilung inner- und außerhalb des Gebäudes) und ihre mögliche Einwirkung
- Größe und Komplexität des Gebäudes und der GB
- Reaktionsdauer und Interaktionen von GB, d. h. Verzögerung, Beginn, Entwicklung und volle Wirkung
- gegenseitige Beeinflussung der Wirkung von GB im zeitlichen und ereignisbezogenen Kontext
- Sicherheit und Zuverlässigkeit der Ansteuerungen und der GB, die in Abhängigkeit der Ergebnisse der Risikoanalyse zu erreichen sind
- Analyse, wie sich das Gesamtsystem bei Ausfällen von GB verhält

Falls die Anzahl der zu untersuchenden Szenarien, die Größe und die Komplexität des Gebäudes sowie die Anzahl der GB gering sind, wird die Relevanz dynamischer Ansteuerungen von GB eine vernachlässigbare Bedeutung haben. In diesem Fall reichen die statischen Brandfallsteuerungen, wie sie bereits Stand der Technik sind, aus, da diese Ansteuerungen die Schutzzielerrreichung bereits vollumfänglich unterstützen. Ebenso verhält es sich mit der Sicherheit und der Zuverlässigkeit von Ansteuerungen und der GB. Sind die Anforderungen an die Sicherheit und die Zuverlässigkeit auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Risikoanalyse gering, können ohne weitere Betrachtungen übliche Systeme verwendet werden.

Wenn ein Teil der Punkte aus der Liste keine statischen Betrachtungen ermöglicht, sind die dynamischen Einflüsse weiter zu untersuchen, da diese relevant erscheinen. Dies wird üblicherweise dann der Fall sein, wenn die Anzahl der zu untersuchenden Szenarien, die Größe und die Komplexität des Gebäudes sowie die Anzahl der GB groß sind und höhere Ansprüche an die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Anlagen gestellt werden.

### **4.3.4 Möglichkeiten der Visualisierung**

Die Planung von Brandfallsteuerungen erfolgt überwiegend, wie bereits in Abschnitt 3.7 auf Seite 95 gezeigt wurde, mithilfe von tabellarischen Steuermatrizen.

Tabellarische Darstellungen sind jedoch für die Planung und Präsentation von dynamischen Ereignissen nur bedingt geeignet. Daher werden im Folgenden geeignete Darstellungsformen

der Dynamik von Brandfallsteuerungen vorgestellt. Diese Darstellungsformen sollen dem Verständnis und einer besseren Planbarkeit von dynamischen Brandfallsteuerungen dienen und somit den Planungsprozess unterstützen.

Programmablaufpläne eignen sich besonders dafür, nacheinander ablaufende Schritte eines Prozesses, in dem es Verzweigungen in der Verarbeitungslogik gibt, darzustellen [181]. In einem Programmablaufplan werden die Verarbeitungsfolgen eines Programmes oder eines Prozesses dargestellt. Die Verbindungen zeigen dabei die Reihenfolgen der Verarbeitungen auf. Diese Darstellungsform kann die Logik einer Brandfallsteuerung mit den vorhandenen Alternativen und Verzweigungen darstellen und dabei sowohl automatisch ablaufende Schritte und manuelle Eingriffe als auch Auswahleinheiten wiedergeben [32].

Abbildung 4.6 zeigt ein Beispiel eines Ablaufdiagramms für Steuerungen von Anlagen im Brandfall in allgemeiner Form.

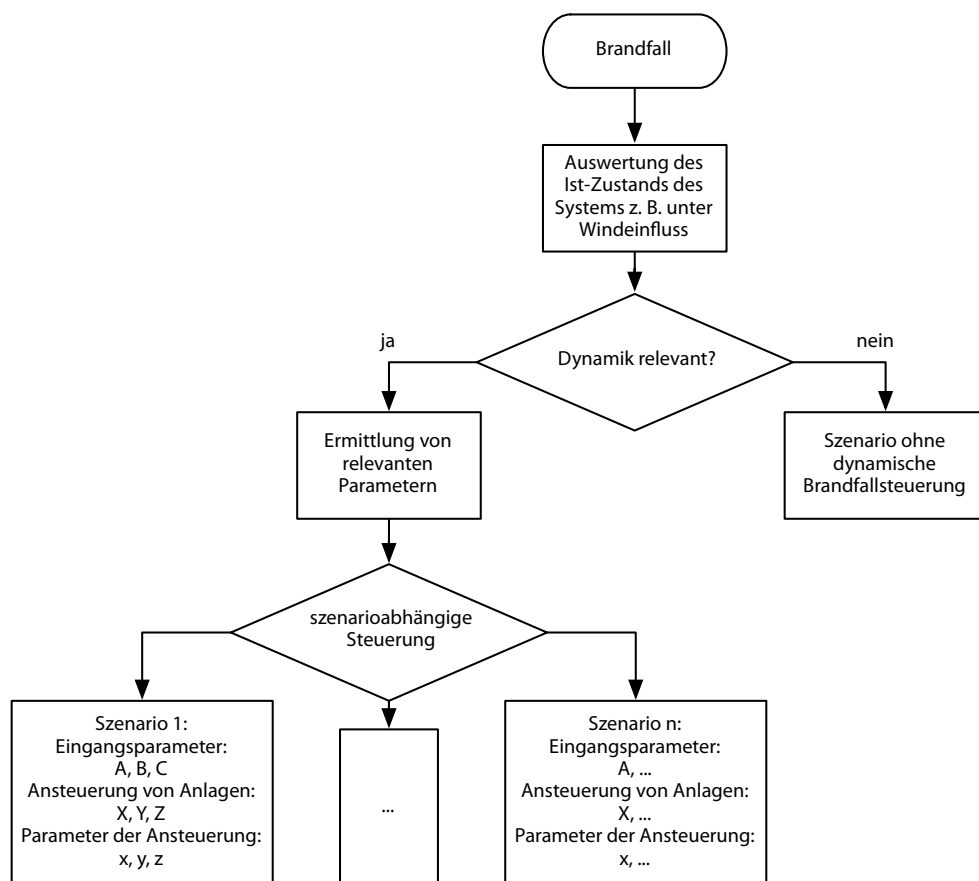


Abbildung 4.6: Beispiel eines Ablaufdiagramms für Steuerungen

Im Beispiel ist ein Ablaufdiagramm für dynamische Steuerungen einer exemplarischen natürlichen Entrauchungsanlage mit Berücksichtigung des Windeinflusses dargestellt. Im Falle der Auslösung der Entrauchungsanlage werden zunächst aktuelle Winddaten für einen zuvor festgelegten Zeitraum ausgewertet. Hierfür muss die entsprechende ausfallsichere Sensorik, wie z. B. Windmessgeber und Temperaturfühler, am Gebäude vorgesehen werden [29]. Nach der Auswertung der Daten erfolgt anhand einer zuvor festgelegten Logik die automatische Entscheidung darüber, ob der Wind für die Entrauchung relevant ist. Hierfür werden die zuvor fixierten Kriterien abgeprüft. Falls der Windeinfluss nicht relevant ist, können alle angesteuerten Rauchabzugsöffnungen und Nachströmöffnungen (NSÖ) geöffnet werden. Wenn der Windeinfluss relevant ist, werden dagegen die Parameter wie z. B. Windrichtung und Windstärke erfasst. Neben diesen wichtigsten Parametern könnten als Auswertungskriterien auch die Außen- und Innentemperaturen berücksichtigt werden. Nach der Auswertung der relevanten Parameter erfolgt die szenarioabhängige Steuerung. Hierbei werden z. B. die NSÖ nur auf den windabgewandten Seiten in dem notwendigen Querschnitt geöffnet oder andere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen angesteuert [90].

Analog ließen sich mit dieser Darstellungsform auch andere szenarioabhängige Steuerungen und andere logische Brandfallsteuerungen aufzeigen. Trägt man neben den sequenziell ablaufenden Schritten die Zeit auf einem Zeitstrahl auf, kann man den einzelnen Schritten noch eine zeitliche Dimension zuordnen.

Eine Alternative zum Ablaufdiagramm ist der sogenannte Balkenplan. Der Balkenplan ist ein grafischer Zeitplan, der es ermöglicht, die Vorgänge durch waagerechte Balken von zeitproportionaler Lage und Länge darzustellen [182]. Abbildung 4.7 zeigt ein Beispiel eines Balkenplans für ein Brandereignis.

Auf der horizontalen Achse kann die Zeit z. B. in Minuten eingetragen werden, während durch unterschiedlich gefärbte Balken die Zustände einzelner gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen wie etwa einer Sprinkleranlage oder einer maschinellen Entrauchungsanlage dargestellt werden können. Die Zustände gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen können dabei je nach Anlage z. B. den Ruhe- oder Überwachungszustand (Zustand 1 im Beispiel), manuelle Auslösung bzw. Aktivierung (Zustand 2) oder Abschaltung (Zustand 3) bedeuten.

Der Vorteil dieser Darstellungsform liegt darin, dass sowohl die Logik von Ereignissen und die Auslösezeitpunkte von ansteuerbaren Anlagen als auch die Dauer des jeweiligen Zustandes erkennbar und planbar wird. Darüber hinaus lässt sich erkennen, welche gebäudetechnischen

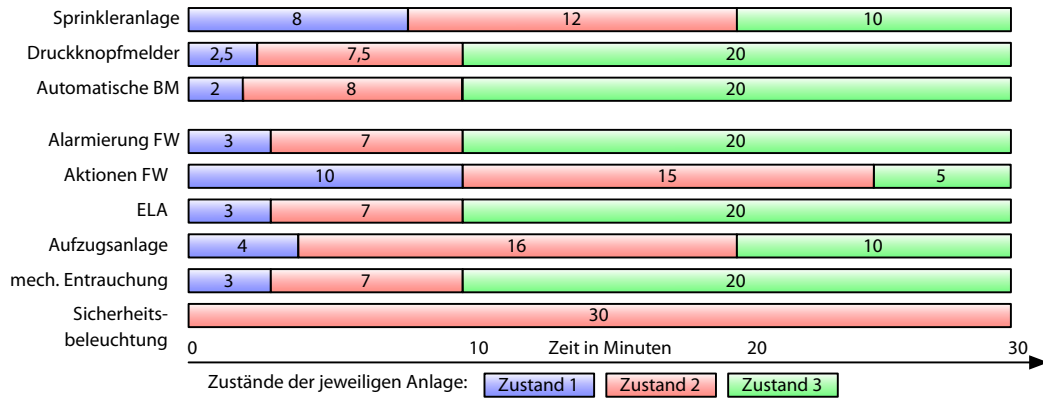


Abbildung 4.7: Beispiel eines Balkenplans für Steuerungen mit unterschiedlichen Zuständen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen

Brandschutzeinrichtungen gleichzeitig wirken. Daraus lassen sich leichter gegenseitige negative und positive Wechselwirkungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen erkennen.

#### 4.3.5 Umsetzung dynamischer Brandfallsteuerungen

Dynamische Brandfallsteuerungen werden in bestimmten autarken gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen, wie z. B. Aufzügen (siehe Abschnitt 3.5.12.1 auf Seite 77) oder Rauchschutzdruckanlagen (siehe Abschnitt 3.5.3.3 auf Seite 66) bereits verwendet, wie die Analyse einzelner Anlagen in Abschnitt 3 gezeigt hat. Für andere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen gibt es bislang solche dynamischen Steuerungen nicht.

Betrachtet man die Einführung neuer, z. B. dynamischer Steuerungen bei Anlagen generell, so lässt sich feststellen, dass häufig diese Neuerungen entweder nach großen Katastrophen oder aufgrund fortschreitender technischer Entwicklung über neue Normen oder Gesetze verpflichtend werden. Hierbei resultiert die Einführung neuer Steuerungen in der Regel aus objektiven Vorteilen. Im Falle der Einführung neuer Steuerungen nach einer Brandkatastrophe wird erst im Ernstfall, d. h. dann, wenn es bereits zu einem großen Personen- und/oder Sachschaden gekommen ist, erkannt, dass das Sicherheitsniveau nicht ausreichend ist und dass z. B. Steuerungen anzupassen sind.

Technisch gesehen können dynamische Brandfallsteuerungen bei diversen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen zur Anwendung kommen. In der Zukunft liegt die Basis hierfür in angepassten Normen oder anderen Vorschriften für die jeweiligen Einrichtungen. Kurzfristig



können auch bereits bei Bestandsanlagen durch den Einsatz von dynamischen Brandfallsteuerungen Vorteile für die Sicherheit und Effizienz von Anlagen erreicht werden. Hierfür müssen die gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und das jeweilige Gebäude gemäß dem im Abschnitt 4.3.2 auf Seite 117 beschriebenen Modell analysiert werden. Die konkrete technische Ausgestaltung der Anlagen und Steuerungen muss sich an den dort festgelegten Schutzziele und den allgemeinen Anforderungen an die Sicherheit orientieren (vgl. hierzu Abschnitt 2.3 auf Seite 15).

Bedingt durch die steigende Komplexität im Bereich der Gebäudetechnik allgemein und bei sicherheitsgerichteten Einrichtungen im Besonderen wird künftig auch die Komplexität der Brandfallsteuerungen zunehmen. Bereits jetzt wird es daher erforderlich, Brandfallsteuerungen für den gesamten Lebenszyklus komplexer Bauwerke in Spezialsoftware zu planen, zu dokumentieren und zu pflegen. Erste Implementierung und Praxiseinsätze für softwaretechnische Lösungen liegen bereits vor [97, 197].

Softwaretechnische Lösungen sollten die Prozesse der Planung von Brandfallsteuerungen unterstützen und dabei z. B. Aspekte der Datenkonsistenz anstreben sowie Änderungsverfolgungen ermöglichen. Für künftige Entwicklungen solcher Softwarelösungen sollten auch dynamische Brandfallsteuerungen und Methoden der funktionalen Sicherheit Berücksichtigung finden, um zum einen anlagentechnisch flexibler auf das dynamische Brandgeschehen reagieren zu können und zum anderen die Quantifizierbarkeit der Zuverlässigkeit von Brandfallsteuerungen und die Schutzzieleerreichung zu gewährleisten.

## **4.4 Chancen und Risiken des Einsatzes dynamischer Steuerungen**

Im Folgenden werden Gründe für und gegen den Einsatz von dynamischen Steuerungen aus unterschiedlichen Perspektiven dargestellt, diskutiert und bewertet. Zunächst erfolgt die Bewertung von dynamischen Steuerungen aus baurechtlicher und normativer Sicht, da dies die Grundlage und der Ausgangspunkt für weitere Betrachtungen ist. Ferner geschieht die Bewertung aus anlagentechnischer Sicht und schließlich aus Sicht des Gebäudeeigentümers. Diese Aufteilung deckt somit alle relevanten rechtlichen und technischen Aspekte ab und bezieht die wichtigsten Entscheidungsträger für die Umsetzung solcher Steuerungen mit ein.

#### **4.4.1 Bewertung aus baurechtlicher und normativer Sicht**

Die Beurteilung von neuartigen Steuerungen aus baurechtlicher und normativer Sicht ist bei Systemen, die in der Praxis noch wenig Anwendung gefunden haben, tendenziell schwierig [210]. Wenn dynamische Brandfallsteuerungen jedoch der Erhöhung von Sicherheit dienen und dabei weitere Vorteile bieten, können sich diese, mittel- und langfristig gesehen, zum Stand der Technik und Normung entwickeln oder sogar im Baurecht verankert werden.

Davor steht jedoch ein langer Prozess, in dem neue Vorschriften erarbeitet werden und sich die Systeme mit dynamischen Brandfallsteuerungen auch in der Praxis durchsetzen müssen. Gerade in der Anfangsphase der Einführung von dynamischen Steuerungen wird die Beurteilung in den Baugenehmigungsverfahren in Einzelfällen entschieden werden müssen, da es keine normative Basis und wenig Erfahrungen in der Praxis gibt und umfassende Vorschriften fehlen.

Für alle Beteiligten und Entscheidungsträger wird vor dem Hintergrund der steigenden Komplexität der Gebäudetechnik und der Einführung neuer technischer Ansätze, wie der dynamischen Steuerung von GB, die Beurteilung solcher Systeme zunehmend nur mit einem höheren Aufwand hinsichtlich der Qualifikation möglich sein. Dabei wird es von Vorteil sein, wenn die Baubranche im Bereich von Steuerungen auf Erfahrungen anderer Branchen, wie z. B. der Prozessindustrie, aufbauen kann [158, 91].

Bei der Bewertung der Einführung dynamischer Brandfallsteuerungen in der Vergangenheit kann als Beispiel die Entwicklung der dynamischen Evakuierungsfahrt von Aufzügen aufgeführt werden. In Deutschland wurde diese, wie es oft in der Sicherheitstechnik geschieht, leider erst nach einer Katastrophe, nämlich nach der Brandkatastrophe am Flughafen Düsseldorf im Jahre 1996 entwickelt [84]. Inzwischen hat sich die dynamische Evakuierungsfahrt von Aufzügen weltweit zum Stand der Technik entwickelt [219].

Um künftig solche Unglücksfälle vor dem Hintergrund anspruchsvollerer Architektur und gleichzeitiger rasanter Entwicklung in der Gebäudetechnik wirksam zu verhindern, sind die staatlichen und die normgebenden Akteure gefragt, sich auch mit den Fragen der Sicherheit und der Ansteuerungen der Anlagen in Gebäuden zu beschäftigen und adäquate Antworten auf die aktuellen technischen Entwicklungen zu geben. Diese müssen sich dabei an den gesellschaftlichen Anforderungen orientieren und das steigende Sicherheitsbedürfnis der Gesellschaft berücksichtigen [157].

Aus den Anforderungen der Gesellschaft hinsichtlich der Sicherheit in Gebäuden muss der Gesetzgeber im Idealfall quantifizierbare Schutzziele, insbesondere zur Personensicherheit, formulieren, zu deren Erreichen moderne, sichere und dynamisch gesteuerte GB beitragen werden. Eine unabdingbare Voraussetzung hierfür sind dabei normative Regelungen, die noch auszuarbeiten sind.

#### **4.4.2 Bewertung aus anlagentechnischer Sicht**

Dynamische und andere innovative Steuerungen von Anlagen werden, wie in Abschnitt 2.3 auf Seite 15 gezeigt wurde, bereits seit längerer Zeit in unterschiedlichen Bereichen anderer Branchen außerhalb der Gebäudetechnik erfolgreich eingesetzt. Es ist daher folgerichtig, dass bei der Projektierung innovativer gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen in Zukunft ebenfalls auf diese Steuerungsmöglichkeiten zurückgegriffen werden kann. Dies führt zu neuen Möglichkeiten und Innovationen in der Entwicklung von sicheren und intelligent gesteuerten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen.

Um jedoch sichere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen mit neuen Steuerungsmöglichkeiten realisieren zu können, ist stets eine detaillierte Planung dieser Anlagen für das konkrete Bauwerk notwendig. Die Planung muss sowohl die Anforderungen der Sicherheit als auch die Besonderheiten der dynamischen Steuerungen speziell für die Belange des Brandschutzes in dem jeweiligen Gebäude erfüllen. Beides kann nur unter Zuhilfenahme der Methoden der Qualitätssicherung erfolgen. Folgerichtig werden dann auch verstärkt Interaktionsprüfungen von Anlagen erforderlich. Ferner ist es zwingend notwendig, mittelfristig die normative Basis für die neuen Möglichkeiten der Steuerungen zu schaffen. Dynamische Brandfallsteuerungen müssen jedoch nicht zwingend bestehende statische Lösungen vollständig ersetzen, sondern werden diese in Gebäuden, wo es sinnvoll ist, ergänzen.

Das in Abschnitt 4.3 auf Seite 116 vorgestellte Modell ermöglicht es neben der detaillierten Betrachtung von dynamischen Brandfallsteuerungen ebenfalls, auf diese Art von Steuerungen zugunsten von statischen Steuerungen zu verzichten. Das erste Entscheidungskriterium bei einer Untersuchung gemäß dem dargestellten Ablaufdiagramm des Modells ist, ob die statischen Steuerungen bereits ausreichen, um die Schutzziele zu erreichen (vgl. Abbildung 4.5). Weiterhin sind mögliche Störgrößen zu untersuchen. Stellt man fest, dass die Dynamik und die Störgrößen für das Systemverhalten nicht relevant sind, so werden die Steuerungen gemäß den

zuvor ausgearbeiteten statischen Steuermatrizen ausgeführt. Dieses Vorgehen macht deutlich, dass der statische Fall eine Untermenge der übergeordneten dynamischen Steuerungen ist und die tendenziell komplexere dynamische Steuerung in diesem Fall nicht erforderlich ist. Gerade bei Gebäuden mit nur wenigen gebäudetechnischen GB, einer einfachen Geometrie, überschaubaren Gebäudeabmessungen und kalkulierbaren Brandrisiken werden die statischen Steuerungen in der Regel ausreichen, um die gestellten Schutzziele zu erreichen.

In anderen Fällen, wie etwa bei vielen voneinander abhängigen GB, komplexer Geometrie und großen Abmessungen des Gebäudes, sowie bei Vorliegen von Abhängigkeiten und dynamischen Einflüssen werden dynamische Steuerungen jedoch unverzichtbar sein, um die gestellten Schutzziele zu erreichen (vgl. Abbildung 4.5). Bei Verwendung solcher Steuerungen ist darauf zu achten, dass diese sinnvoll gestaltet, also robust, zuverlässig, sicher und schutzzielorientiert gestaltet werden.

Bei zunächst nur rein technischer Betrachtung sind dynamische Brandfallsteuerungen nicht nur sinnvoll, sondern auch in einigen Fällen erforderlich, um die gestellten Schutzziele zu erreichen. Beispiele hierzu werden im Abschnitt 5 dargestellt.

### **4.4.3 Bewertung aus Sicht des Gebäudeeigentümers**

Wie bereits gezeigt wurde, können dynamische Brandfallsteuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen in einem hohen Maße der Erreichung von gestellten Schutzziele dienen.

Aus Sicht des Gebäudeeigentümers kann die Einführung von dynamischen Brandfallsteuerungen jedoch bedeuten, dass zunächst einmal höhere Investitionen bei Planung und Anlagentechnik erforderlich werden.

Diesem potentiellen Nachteil stehen jedoch viele Vorteile gegenüber. Zum einen ist die höhere Sicherheit und Effizienz der Anlagen zu nennen, wenn die Planung von dynamischen Brandfallsteuerungen nach dem vorgestellten Modell vorgenommen wird. Des Weiteren sind Kostenreduktionen im Betrieb im Falle einer Anbindung dieser Anlagen an das Gebäudeleitsystem möglich. Diese Kostenreduktionen können durch eine kontinuierliche Überwachung und Kontrolle der sicherheitsrelevanten Anlagen realisiert werden, da die Beseitigung von Mängeln schneller erfolgt und die Kosteneffizienz im Betrieb bei der kontinuierlichen Überwachung schneller erreicht werden kann.

Ein weiterer Vorteil ist der höherwertige Objektschutz durch moderne, individuell an das Gebäude angepasste Sicherheitstechnik. Eine solche moderne Anlagentechnik kann gegebenenfalls zur Reduzierung des Beitrages für die Feuerversicherung oder im Rahmen eines Baugenehmigungsverfahrens und der Bewertung im ganzheitlichen Brandschutzkonzept zu Erleichterungen, etwa bei baulichen Brandschutzmaßnahmen, führen [82].

## **4.5 Probabilistisches Modell des individuellen Risikos unter Berücksichtigung von Branddynamik, Steuerungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen**

### **4.5.1 Einleitung**

Das in Abschnitt 4.3.2 auf Seite 117 beschriebene Modell beinhaltet unter Schritt 5 (vgl. Ablaufdiagramm in Abbildung 4.5 auf Seite 118) die Überprüfung der Einhaltung der zuvor festgelegten Schutzziele. Hierfür kann das nachfolgend vorgestellte probabilistische Modell des individuellen Risikos unter Berücksichtigung von Branddynamik, Steuerungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen verwendet werden.

In der Russischen Föderation wurde vom EMERCOM<sup>1</sup> im Jahre 2009 ein Nachweisverfahren zur rechnerischen Ermittlung von Brandrisikogrößen in Gebäuden unterschiedlicher Brandgefährdungen eingeführt [193] (vgl. hierzu auch [122]). Im Folgenden wird auf Basis dieses Nachweisverfahrens ein weiterentwickeltes Modell des individuellen Risikos unter Berücksichtigung von Branddynamik, Steuerungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen vorgestellt. Das Modell berücksichtigt dabei, neben den vorgenannten Aspekten, die zeitliche Komponente bezogen auf ein Brandereignis und den Lebenszyklus von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen. Mithilfe dieses Modells ist es möglich, im vorgestellten Modell zur Berücksichtigung von dynamischen Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen (vgl. Abschnitt 4.3.2 auf Seite 117) die Einhaltung von Schutzzielen quantitativ zu überprüfen.

---

<sup>1</sup>EMERCOM: The Ministry of the Russian Federation for Affairs for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Desasters

#### 4.5.2 Philosophie des Modells

Die Philosophie des Modells besteht darin, rechnerisch nachzuweisen, dass für einen Menschen in einem bestimmten Gebäude oder Gebäudeabschnitt während des Brandfalls ein maximales Risiko nicht überschritten wird. Folglich dient das Modell der Überprüfung der Einhaltung des Personenschutzziels.

Das individuelle Brandrisiko entspricht dabei dem maximal normativ zulässigen Brandrisiko, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$Q_I(t_n) \leq Q_I^N \quad (4.2)$$

$Q_I(t_n)$  ist das rechnerisch ermittelte individuelle Brandrisiko unter Berücksichtigung der normierten Zeit während eines Brandereignisses.

$Q_I^N$  ist das maximal zulässige und z. B. in [193] normativ vorgegebene individuelle Brandrisiko in der Höhe  $1 \cdot 10^{-6}$  pro Jahr und Person. Dieser Wert ist international vergleichbar und wurde etwa in den Niederlanden in einem gesellschaftlich-politischen Konsens festgelegt, wobei der Wert ungefähr dem durchschnittlichen und natürlichen Lebensrisiko entspricht [33, 154, 118, 155]. Dies bedeutet, dass bei entsprechendem Nachweis im Brandfall in dem betrachteten Gebäude für Personen keine höhere Gefahr besteht als das natürliche Lebensrisiko.

Der Nachweis nach dem Modell ist erbracht, wenn die Bedingung nach Gleichung 4.2 eingehalten ist. Dies bedeutet, dass für ein Gebäude oder einen Gebäudeabschnitt rechnerisch nachzuweisen ist, dass ein Mensch im Brandfall maximal dem Brandrisiko in der Höhe von einem Millionstel, und zwar auf ein Jahr bezogen, ausgesetzt werden darf.

Betrachtet man das tatsächliche Risiko einer Person, in Deutschland bei einem Brandereignis tödlich zu verunglücken, so liegt dieses mit ca. 500 Brandtoten pro Jahr und ca. 80 Millionen Einwohnern bei etwa  $6,25 \cdot 10^{-6}$  [19]. Im Vergleich dazu liegen die Risiken in den USA bei  $44 \cdot 10^{-6}$ , in Japan bei  $48 \cdot 10^{-6}$  und in Frankreich bei  $68 \cdot 10^{-6}$  [19, 139, 102]. Das bedeutet, dass das tatsächliche Risiko in Deutschland weitaus geringer ist als in zahlreichen anderen Ländern, aber trotzdem noch etwa sechsmal höher liegt als das nachzuweisende. Bei Einhaltung der Bedingung der Gleichung 4.2 wäre daher ein quantitativer Nachweis der Verbesserung des individuellen Risikos im Brandfall nicht nur hinsichtlich der Brandopfer, sondern auch hinsichtlich des Verletzungsrisikos erbracht.

Das Modell zielt dabei in erster Linie auf den Personenschutz. Mit der Erreichung des Ziels oder der verstärkten Annäherung an das Personenschutzziel wird jedoch häufig auch ein höherer Grad von nachgeordneten Schutzzielen, wie etwa dem Sachschutz, erreicht.

### 4.5.3 Normierte Zeit und Brandrisikogrößen

In Weiterentwicklung des von EMERCOM vorgestellten Nachweisverfahrens, welches das Brandereignis in der Zeit als ein punktuellereignis betrachtet, wird im hier entwickelten Modell eine normierte Zeit eingeführt, um die Vorgänge während eines Brandereignisses dynamisch betrachten zu können. Die normierte Zeit  $t_n$  beginnt bei Entstehung eines Brandes mit  $t_n = 0$  und endet bei  $t_n = 1$  mit dem Zeitpunkt, bei dem keine Evakuierung mehr möglich ist, da bestimmte Kriterien überschritten bzw. die Rettungswege versperrt sind. Dieser Zeitraum (Available Safe Egress Time (ASET)) wird in Anlehnung an die Vorschriften PD 7974-7 und BS 7974 eingeführt [170, 205]. Die wichtigsten Zeiträume und Zeitpunkte eines Brandereignisses sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

Mit der Einführung der normierten Zeit ist es erstmals möglich, unterschiedliche Brandereignisse unabhängig von der tatsächlich verstrichenen Zeit zu analysieren und miteinander zu vergleichen. Alle anderen Zeitpunkte und Zeiträume, wie etwa die Zeit bis zur Brandentdeckung oder die Evakuierungszeit, werden umgerechnet und liegen stets zwischen  $0 \leq t_n \leq 1$ .

Exemplarische Werte von Brandrisikogrößen, bei deren Überschreitung angenommen werden kann, dass keine eigenständige Evakuierung mehr möglich ist, sind in der Tabelle 4.4 dargestellt.

Die vorgestellten exemplarischen Brandrisikogrößen sind von sehr vielen Faktoren abhängig und sollten daher im Rahmen der Schutzzielfestlegung auf das jeweilige Gebäude im Rahmen der Risikoanalyse angepasst werden [4]. Die vorgestellten Werte von Brandrisikogrößen sind Gegenstand der aktuellen Forschung und Normung und müssen daher in Zukunft noch präzisiert werden [147]. Verlässliche Grenzwerte von Brandrisikogrößen in Kombination mit Expositionsdauern variieren in der Literatur aufgrund der Komplexität der Zusammensetzung der Rauchgase und deren unterschiedlicher Wirkungen auf den Menschen [115]. Ferner variieren die Angaben in der Literatur aufgrund unterschiedlicher Untersuchungsmethoden in diversen Disziplinen, die jeweils einen anderen Schwerpunkt setzen [146].

Neben der Betrachtung von einzelnen Werten aus Tabelle 4.4 sind ebenfalls mögliche, gleichzeitige Einwirkungen der dargestellten Größen auf Personen zu beachten. So können bei der

kritische Größe	Wert	Bemerkung	Expositions-dauer in Minuten	Bezeichnung des Zeitpunkts der Über- oder Unterschreitung
Optische Rauchdichte	$0,1 \text{ m}^{-1}$	maximal	30	$t_{kr}^{OD}$
$D_L$ [64, 119]	$0,15 \text{ m}^{-1}$	maximal	15	
eigene Annahme	$0,2 \text{ m}^{-1}$	maximal	5	
	$0,3 \text{ m}^{-1}$	maximal	s. e.	
Fractional Effective Dose (FED) [146, 198]	1	maximal	sobald erreicht (s. e.)	$t_{kr}^{FED}$
Fractional Effective Concentration (FEC) [146, 198]	1	maximal	s. e.	$t_{kr}^{FEC}$
$O_2$ [193]	$0,226 \text{ kg/m}^3$	minimal	s. e.	$t_{kr}^{O_2}$
$CO_2$ [193]	$0,11 \text{ kg/m}^3$	maximal	s. e.	$t_{kr}^{CO_2}$
CO [193]	$1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	maximal	s. e.	$t_{kr}^{CO}$
HCl [193]	$23 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$	maximal	s. e.	$t_{kr}^{HCl}$
Temperatur [193]	$70 \text{ }^\circ\text{C}$	maximal	s. e.	$t_{kr}^T$
Wärmestrom [193]	$1400 \text{ W/m}^2$	maximal	s. e.	$t_{kr}^W$
Sichtweite [64, 153, 193]	10 – 20 m	minimal	5 – 30	$t_{kr}^S$
auf Grundlage von festgelegten Schutzzielen	festzulegender numerischer Wert	minimal bzw. maximal	t	$t_{kr}^{\dots}$

Tabelle 4.4: Beispiele für Werte von Brandrisikogrößen



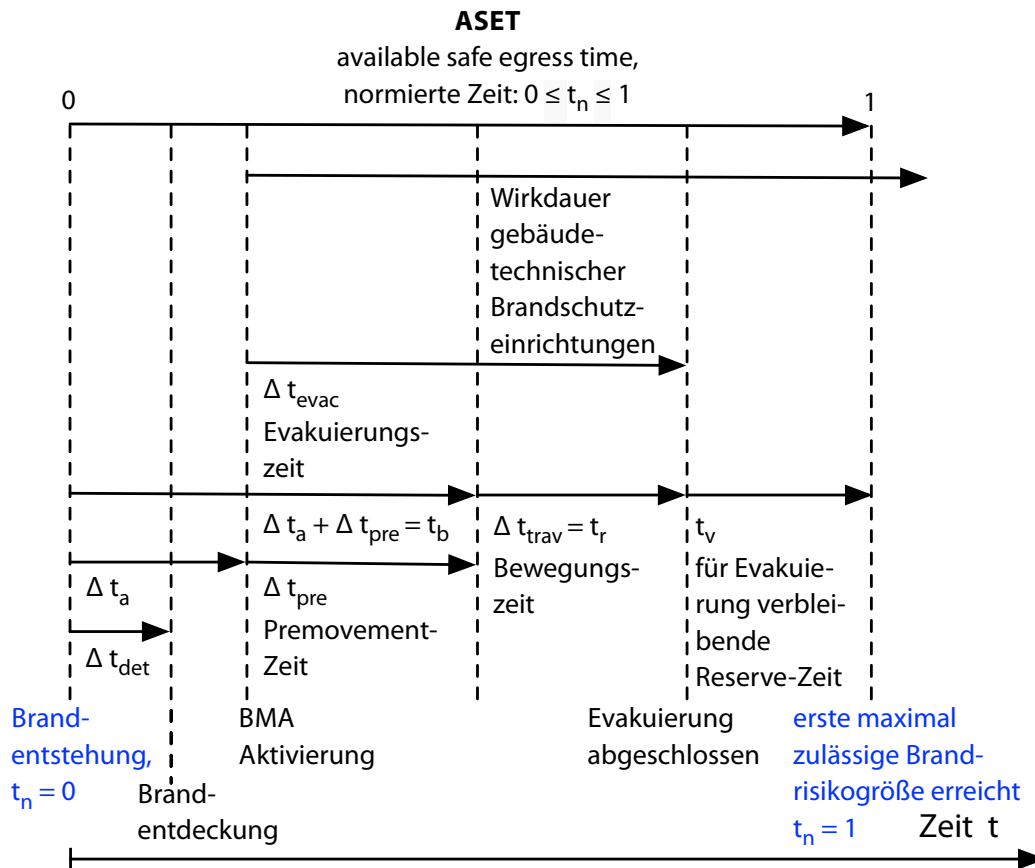


Abbildung 4.8: Zeitstrahl des Brandereignisses

Bestimmung der Evakuierungszeit die oben aufgeführten und andere Werte ebenfalls einen Einfluss auf die Bewegungsgeschwindigkeit von fliehenden Personen, etwa aufgrund der Einwirkung von reizenden Gasen, haben [119]. Ferner sind die zu untersuchenden Stellen, an denen die Werte für die Beurteilung zu bestimmen sind, festzulegen. Hierbei können z. B. die Kopfhöhe eines Erwachsenen, also etwa 1,7 m, oder die in Deutschland üblichen 2,5 m, und die Stellen unmittelbar vor dem Ausgang in eine sichere Zone angenommen werden [193].

Trotz des Bestehens eines erheblichen Forschungsbedarfs auf diesem Gebiet werden die Ansätze, wie FED oder einfachere Grenzwerte wie die optische Rauchdichte, bereits jetzt zur Bestimmung der zur Evakuierung verfügbaren Zeit (ASET) genutzt [68, 166]. Die Bestimmung der optischen Rauchdichte ist bei Verwendung von CFD-Simulationen sehr verbreitet, da trotz der meist nur hinreichend bekannten Rauchgaszusammensetzung diese Größe dennoch eine gute Abschätzung der Sichtbarkeit und damit zusammenhängend eine Abschätzung der Schadstoffkonzentration ermöglicht [40].

Somit bieten die dargestellten Brandrisikogrößen trotz der aufgezeigten Komplexität der Zusammenhänge die Möglichkeit, die Schutzziele zu quantifizieren und anhand von eigenen Berechnungen oder Abschätzungen deren Erreichungsgrad zu überprüfen [4, 166].

Die ermittelten Zeiten (vgl. Tabelle 4.4) bilden eine Menge  $\mathbf{M}$ , die zeitlich geordnet werden kann. Wobei alle Elemente  $t_{kr}^{\dots}$  dieser Menge  $\mathbf{M}$  angehören.

$$t_{kr}^{\dots} \in \mathbf{M} \quad (4.3)$$

Das Minimum  $t_n^*$  der Zeiten  $t_{kr}^{\dots}$  wird bestimmt aus:

$$t_n^* = \min \{ t_{kr}^{OD}, t_{kr}^{FED}, t_{kr}^{FEC}, t_{kr}^{O_2}, t_{kr}^{CO_2}, t_{kr}^{CO}, t_{kr}^{HCl}, t_{kr}^T, t_{kr}^W, t_{kr}^S, t_{kr}^{\dots} \} \quad (4.4)$$

wobei  $t_n^*$  ebenfalls der Menge  $\mathbf{M}$  angehört.

$$t_n^* \in \mathbf{M} \quad (4.5)$$

Für alle Elemente  $t_{kr}^{\dots}$  der Menge  $\mathbf{M}$  gilt mathematisch nach [125]:

$$\forall t_{kr}^{\dots} \in \mathbf{M}, t_n^* \leq t_{kr}^{\dots} \quad (4.6)$$

Die mathematischen Symbole stehen dabei für:

$\in$  : Element von und  $\forall$ : für alle.

$t_n^*$  hat die Dimension der Zeit und wird etwa in Minuten angegeben.

Alle übrigen Zeitpunkte bzw. Zeiträume  $t_i^*$  (vgl. Abbildung 4.8) können nun mithilfe von  $t_n^*$  normiert werden. Die im Rahmen des Modells relevanten Zeiträume liegen nach der Normierung zwischen den Werten 0 und 1.

$$t_i = \frac{t_i^*}{t_n^*}, 0 \leq t_i \leq 1 \quad (4.7)$$

Dies sei an einem Beispiel erläutert. Die Bewegungszeit  $t_r^*$  sei zu 5 Minuten bestimmt worden. Der Zeitpunkt der Überschreitung einer kritischen Brandrisikogröße  $t_n^*$  sei zu 10 Minuten bestimmt worden. Dann gilt für die normierte, also dimensionslose Bewegungszeit  $t_r$  nach

Gleichung 4.7:

$$t_r = \frac{t_r^*}{t_n^*} = \frac{5 \text{ Minuten}}{10 \text{ Minuten}} = 0,5 \quad (4.8)$$

In Gebäudeteilen mit Rauchausbreitung werden die kritischen Größen an unterschiedlichen Orten, zu unterschiedlichen Zeitpunkten über- bzw. unterschritten. Vereinfacht können daher diese Zeitpunkte an den Evakuierungsausgängen der jeweils betrachteten Gebäudeabschnitte untersucht werden [59]. Die Bestimmung des Zeitpunkts  $t_n^*$  kann für einfache Geometrien und Randbedingungen mithilfe analytischer Methoden oder Zonenmodelle bestimmt werden. Bei komplexen Begebenheiten sind Feldmodelle (engl.: computational fluid dynamics oder CFD) zu bevorzugen, da diese nicht über ganze Räume gemittelte, sondern je nach programmtechnischer Umsetzung Werte zu den o. g. Brandrisiko- und anderen Größen je Zelle liefern können.

Mithilfe eines CFD-Programms, wie z. B. Fire Dynamics Simulator (FDS), können die meisten in der Tabelle 4.4 angegebenen Werte mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden. Dieser Ansatz wird in den Beispielen des Abschnittes 5 verwendet.

#### 4.5.4 Bestimmung des individuellen Risikos

Das rechnerisch ermittelte individuelle Brandrisiko  $Q_I(t_n)$  wird für jedes betrachtete Gebäude oder in einem Gebäudeabschnitt nach folgender Gleichung in Anlehnung an [193] berechnet:

$$\underbrace{Q_I(t_n)}_{\substack{\text{vgl. diesen} \\ \text{Abschnitt}}} = \underbrace{Q_B}_{\substack{\text{vgl. diesen Abschnitt}}} \cdot \underbrace{(1 - P_L(t_n))}_{\substack{\text{vgl. diesen Abschnitt}}} \cdot \underbrace{P_A}_{\substack{\text{vgl. diesen Abschnitt}}} \cdot \underbrace{(1 - P_E)}_{\substack{\text{vgl. Abschnitt 4.5.5}}} \cdot \underbrace{(1 - P_B(t_n))}_{\substack{\text{vgl. Abschnitt 4.5.6}}} \quad (4.9)$$

individuelles Risiko über die normierte Zeit	Häufigkeit der Brandentstehung	Funktionszuverlässigkeit von automatischen Brandlöschanlagen	Häufigkeit des Aufenthalts von Personen im Gebäude	Wahrscheinlichkeit der Evakuierung	Funktionszuverlässigkeit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen
--	--------------------------------	--	--	------------------------------------	--

Hierbei ist  $Q_B$  die Häufigkeit der Brandentstehung in einem Gebäude (auf ein Jahr bezogen). Diese Größe wird auf der Grundlage von Statistiken für diverse Gebäudetypen ermittelt. Die relevanten Häufigkeiten sind in der Literatur je Person oder je Gebäudetyp und Jahr aufgeführt

[193, 19]. Die dort genannte Größe, z. B. für ein Hotel, beträgt  $2,81 \cdot 10^{-2}$  (je Gebäude und Jahr). Die aufgeführten Werte sind mit den bekannten internationalen Werten vergleichbar [22, 165]. Die Angaben aus Statistiken ermöglichen es, bei genauer Kenntnis der Personenzahlen in einem Gebäude die Berechnungen je Person und je Gebäudenutzung durchzuführen. Bei fehlender Statistik zu einem Gebäudetyp darf für die Häufigkeit der Brandentstehung von einem ebenfalls international vergleichbaren Wert von  $4 \cdot 10^{-2}$  ausgegangen werden [121, 193]. Der Vorteil des Ansatzes der statistisch ermittelten Häufigkeiten liegt darin, dass diese Werte realistisch für das jeweilige Gebäude und Land sind und auch aktuelle Entwicklungen erfassen.

$P_L(t_n)$  ist die Wahrscheinlichkeit einer effektiven Auslösung und Löschung (Funktionszuverlässigkeit) durch automatische Brandlöschanlagen über die normierte Zeit. Diese Größe geht in Abhängigkeit von der Zuverlässigkeit der jeweiligen Brandlöschanlage in die Gleichung ein und kann z. B. vom jeweiligen Hersteller angegeben werden. Bei fehlender Angabe kann der Wert von 0,9 angesetzt werden oder mithilfe von Analyseverfahren, wenn auch aufwendig, ermittelt werden [193, 38, 52, 104]. Falls keine automatischen Löschanlagen vorhanden sind, wird der Wert auf null gesetzt und der Term  $(1 - P_L(t_n))$  hat keine Auswirkung auf die Berechnung des individuellen Brandrisikos.

Mit Maßnahmen der Qualitätssicherung und bei Anwendung des Ansatzes der funktionalen Sicherheit kann der Wert  $P_L(t_n)$ , z. T. sogar quantifizierbar, deutlich über 0,9 erhöht werden [14, 80, 127, 150]. In diesem Fall kann zu Beginn des Brandereignisses berechtigt von einem höheren Wert ausgegangen werden, der sich jedoch im Brandverlauf unterschiedlich ändern kann. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 4.5.6 genauer eingegangen.

$P_A$  ist die Häufigkeit des Aufenthalts von Personen im Gebäude. Diese berechnet sich aus dem Verhältnis  $P_A = t_A/24$ , wobei  $t_A$  die Aufenthaltszeit von Personen in einem Gebäude in Stunden ist.

$P_E$  ist die Wahrscheinlichkeit der Evakuierung und  $P_B(t_n)$  ist die Funktionszuverlässigkeit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Brandfall und über die normierte Zeit. Berücksichtigt werden lediglich gebäudetechnische Einrichtungen, die auf die Verringerung der Gefahren im Evakuierungsfall ausgerichtet sind. Im Weiteren werden die eingeführten Größen  $P_E$  und  $P_B(t_n)$  erläutert.

#### 4.5.5 Wahrscheinlichkeit der Evakuierung

$P_E$  ist die Wahrscheinlichkeit der Evakuierung. Diese wird in Anlehnung an [193] wie folgt rechnerisch ermittelt:

$$P_E = \begin{cases} \frac{0,8 - t_r}{t_b} & \text{für } t_r < 0,8 \text{ und } t_r + t_b > 0,8 \\ 0,999 & \text{für } t_r + t_b \leq 0,8 \\ 0,000 & \text{für } t_r \geq 0,8 \end{cases} \quad (4.10)$$

Wobei  $t_r$  die rechnerische Evakuierungsdauer von Personen in Normalform ist.  $t_r$  entspricht der reinen Bewegungszeit  $\Delta t_{trav}$  (vgl. Abbildung 4.8).  $t_b$  ist die normierte Zeitspanne vom Brandbeginn bis zum Beginn der Evakuierung in Normalform ( $\Delta t_a + \Delta t_{pre}$ ) (vgl. Abbildung 4.8).

Die Evakuierungsdauer  $t_r$  kann nach mehreren Methoden, wie etwa dem vereinfachten analytischen Modell von Predtetschenski und Milinski oder etwa mithilfe von Simulationsprogrammen der Personenstromdynamik, zunächst etwa in Minuten, bestimmt und anschließend mithilfe von  $t_n^*$  normiert werden [193, 117]. Für  $t_b$  können, falls unbekannt, je nach vorhandenen Alarmierungsanlagen und weiteren Randbedingungen entsprechende Werte aus der Literatur, etwa in Minuten, entnommen und anschließend mithilfe von  $t_n^*$  normiert werden [193]. Die Normierung der Evakuierungsdauer  $t_r$  und der Zeitspanne vom Brandbeginn bis zum Beginn der Evakuierung  $t_b$  erfolgt durch die Division der beiden Werte in Minuten durch die Zeit  $t_n^*$  ebenfalls in Minuten.

Der Wert 0,8 fügt in die obige Gleichung eine Sicherheitsreserve ein. Die absolute Zeitdauer in Minuten vom Brandbeginn bis zur Unpassierbarkeit der Evakuierungswege ( $t_n^*$ ) infolge der Ausbreitung von kritischen Brandrisikogrößen (vgl. Abschnitt 4.5.3 auf Seite 131) kann entweder mithilfe von Brandverlaufssimulationen bestimmt oder mit anderen Methoden ermittelt werden.

Bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Evakuierung steht die Eigenrettung im Vordergrund. Bei Betrachtungen etwa in einem Krankenhaus kann jedoch bei der Berechnung oder Abschätzung der rechnerischen Evakuierungsdauer  $t_r$  auch die Notwendigkeit bestehen, zu berücksichtigen, dass die Evakuierung von bestimmten Personen im Standardfall mithilfe des Personals noch vor den Maßnahmen der eigentlichen Rettungskräfte erfolgt. Bei solchen und weiteren Sonderfällen sind daher fallbezogene Untersuchungen notwendig, um die für

die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Evakuierung erforderlichen Zeiten zu bestimmen. Berechnet man die Wahrscheinlichkeiten der Evakuierung für einige diskrete Wertepaare von  $t_r$  und  $t_b$  nach der Zeile 1 der Gleichung 4.10, ergeben sich die Werte, die in Tabelle 4.5 dargestellt sind.

$t_b \backslash t_r$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1	-	-	-	-	-	-	-	0,875	0,778
0,2	-	-	-	-	-	-	0,857	0,750	0,667
0,3	-	-	-	-	-	0,833	0,714	0,625	0,556
0,4	-	-	-	-	0,800	0,667	0,571	0,500	0,444
0,5	-	-	-	0,750	0,600	0,500	0,429	0,375	0,333
0,6	-	-	0,667	0,500	0,400	0,333	0,286	0,250	0,222
0,7	-	0,500	0,333	0,250	0,200	0,167	0,143	0,125	0,111

Tabelle 4.5: Wahrscheinlichkeiten der Evakuierung  $P_E$  für diskrete Wertepaare der normierten Evakuierungsdauer  $t_r$  und der normierten Zeit bis zum Beginn der Evakuierung  $t_b$  für die erste Zeile der Gleichung 4.10

Die in der Tabelle gestrichenen Felder sind aufgrund der zusätzlichen Bedingungen der Zeile 1 der Gleichung 4.10 nicht möglich und entfallen daher. Bemerkenswert ist, dass die Berechnung der angegebenen Wahrscheinlichkeiten nur möglich ist, da im vorgestellten Modell die normierte Zeit eingeführt wurde. Im Falle der Betrachtung der Zeitdauern etwa in Minuten würde sich praktisch eine unüberschaubare Zahl von Kombinationen von  $t_r$  und  $t_b$ -Werten ergeben, was einzelne Berechnungen der Wahrscheinlichkeiten erforderlich machen würde. In Abbildung 4.9 sind die annähernd kontinuierlich berechneten Wahrscheinlichkeiten der Tabelle 4.5 grafisch dargestellt.

Anhand der Abbildung ist festzustellen, dass mit zunehmender normierter Evakuierungsdauer  $t_r$  von 0,1 bis 0,7 und der zunehmenden normierten Zeit bis zum Evakuierungsbeginn  $t_b$  von 0,1 bis 0,9 die Evakuierungswahrscheinlichkeit gemäß der Erwartung abnimmt und gegen 0 geht (rechts unten). Umgekehrt gilt, je zeitlich kürzer die Evakuierungsdauer ( $t_r$ ) ist und je eher diese einsetzt, also je kürzer die Zeit bis zum Evakuierungsbeginn ( $t_b$ ) ist, desto eher geht die Wahrscheinlichkeit gegen 1 (oben). Einfacher ausgedrückt steigt die Wahrscheinlichkeit der Evakuierung, falls die Zeit bis zum Evakuierungsbeginn und die Evakuierungsdauer sinken und die fliehenden Personen, ohne dass hohe Personendichten auftreten, fliehen können.

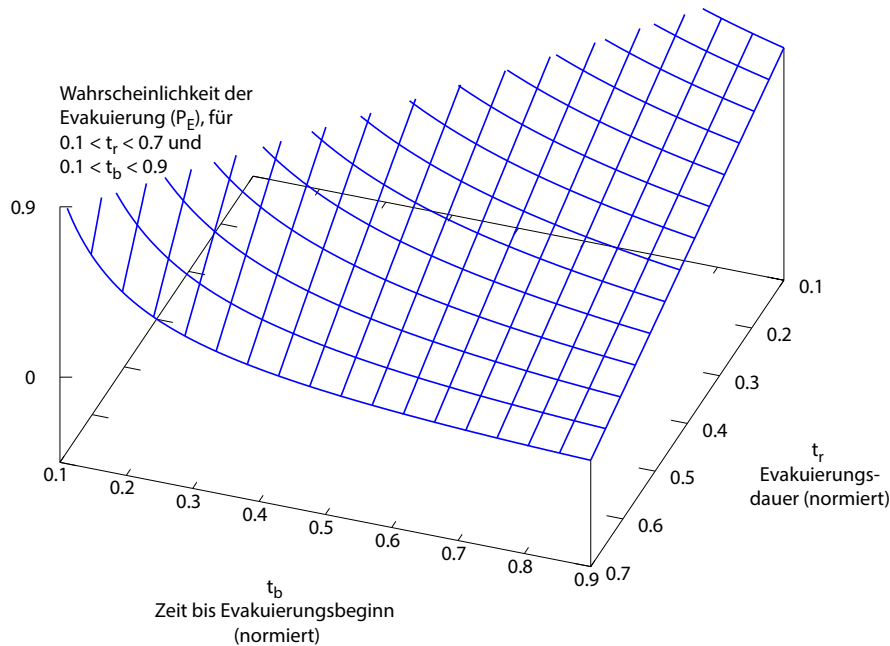


Abbildung 4.9: Wahrscheinlichkeiten der Evakuierung  $P_E$  in Abhängigkeit von der normierten Evakuierungsdauer  $t_r$  und von der normierten Zeit bis zum Beginn der Evakuierung  $t_b$  für die erste Zeile der Gleichung 4.10

### Beispiel: Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Evakuierung

Am Beispiel soll die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit der Evakuierung  $P_E$  erläutert werden. Angenommen, die für die Evakuierung verfügbare Zeit (ASET), also die Zeit bis zur Unpassierbarkeit an einem Ausgang in den sicheren Bereich einer Versammlungsstätte, wird mit 10 Minuten mithilfe einer CFD-Simulation bestimmt. Es handelt sich dabei beispielsweise um eine Überschreitung des Kriteriums der Brandrisikogröße der optischen Rauchdichte  $D_L = 0,3 \text{ m}^{-1}$  (vgl. Abschnitt 4.5.3 auf Seite 131). Dies bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt am untersuchten Punkt, etwa vor einem Ausgang in den sicheren Bereich, die kritische optische Rauchdichte überschritten wäre. Es ergibt sich nach Gleichung 4.4  $t_n^* = t_{kr}^{OD} = 10$  Minuten (vgl. Abschnitt 4.5.3). Mithilfe von  $t_n^*$  werden die übrigen Zeiten nach Gleichung 4.7 normiert.

Es sei weiterhin angenommen, dass die Zeit von der Brandentstehung bis zum Bewegungsbeginn 3 Minuten bzw. normiert  $t_b = \frac{3 \text{ Minuten}}{10 \text{ Minuten}} = 0,3$  beträgt. Ferner sei angenommen, dass die reine Bewegungszeit 6 Minuten oder normiert zu  $t_r = \frac{6 \text{ Minuten}}{10 \text{ Minuten}} = 0,6$  bestimmt wurde.

Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit werden nun die Werte in die obere Zeile der Gleichung 4.10 eingesetzt. Damit ergibt sich:

$$P_E = \frac{0,8-t_r}{t_b} = \frac{0,8-0,6}{0,3} = 0,667, \text{ da die Nebenbedingungen: } t_r < 0,8 < t_r + t_b$$

eingehalten werden, indem  $0,6 < 0,8 < 0,6 + 0,3 = 0,9$  gilt.

Die Wahrscheinlichkeit der Evakuierung wurde mit  $P_E = 0,667$  ermittelt (vgl. Tabelle 4.5 und Abbildung 4.9). Dies bedeutet, dass der Person, die den betrachteten Raum zuletzt verlässt, mit einer Wahrscheinlichkeit von 66,7 % die selbständige Evakuierung gelingt.

### 4.5.6 Funktionszuverlässigkeit gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen

Ein weiterer Term in der Gleichung 4.8 auf Seite 135 zur Berechnung des individuellen Brandrisikos ist die Funktionszuverlässigkeit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Brandfall über die normierte Zeit  $P_B(t_n)$ . Dabei werden mithilfe folgender Gleichung diejenigen Einwirkungen von Brandschutzeinrichtungen betrachtet, welche die Evakuierung unterstützen bzw. auf die Verringerung von Gefahren im Evakuierungsfall gerichtet sind (in Anlehnung an [193]).

$$\underbrace{P_B(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{von gebäude-} \\ \text{technischen} \\ \text{Brandschutz-} \\ \text{einrichtungen}}} = 1 - \left( 1 - \underbrace{P_M(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{der} \\ \text{effektiven} \\ \text{Auslösung} \\ \text{der Brand-} \\ \text{meldeanlage}}} \cdot \underbrace{P_{ELA}(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{der} \\ \text{effektiven} \\ \text{Auslösung} \\ \text{der Alarmie-} \\ \text{rungsanlage}}} \right) \cdot \left( 1 - \underbrace{P_M(t_n)}_{\substack{\text{wie zuvor} \\ \text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{der Entrau-} \\ \text{chungsanlage}}} \cdot \underbrace{P_{ENT}(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{der Entrau-} \\ \text{chungsanlage}}} \right) \quad (4.11)$$

Hierbei ist  $P_M(t_n)$  die Wahrscheinlichkeit der effektiven Auslösung (Funktionszuverlässigkeit) der Brandmeldeanlage über die normierte Zeit. Der Wert kann nach Herstellerangaben angesetzt oder mit 0,8 zu Beginn des Brandereignisses angenommen werden. Der Wert bestimmt sich aus der technischen Zuverlässigkeit von Elementen der BMA, dem Alter der Anlage, dem technischen Zustand der Anlage sowie aus vielen weiteren Faktoren [123].

$P_{ELA}(t_n)$  ist die Wahrscheinlichkeit der effektiven Auslösung (Funktionszuverlässigkeit) einer Alarmierungsanlage (ELA, Sirene) im Falle der Auslösung der BMA.



$P_{ENT}(t_n)$  ist die Wahrscheinlichkeit der effektiven Auslösung (Funktionszuverlässigkeit) einer Entrauchungsanlage im Falle der Auslösung der BMA.

Die Werte der Funktionszuverlässigkeit der BMA, wie auch die Funktionszuverlässigkeiten für die Alarmierungs- und die Entrauchungsanlagen, können zur Analyse nach Angaben von Herstellern verwendet oder, falls unbekannt, auf der sicheren Seite mit 0,8 angenommen werden [139].

In Abbildung 4.10 sind mögliche Verläufe von Wahrscheinlichkeiten der Wirkung von zuvor genannten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen über die normierte Zeit dargestellt [165].

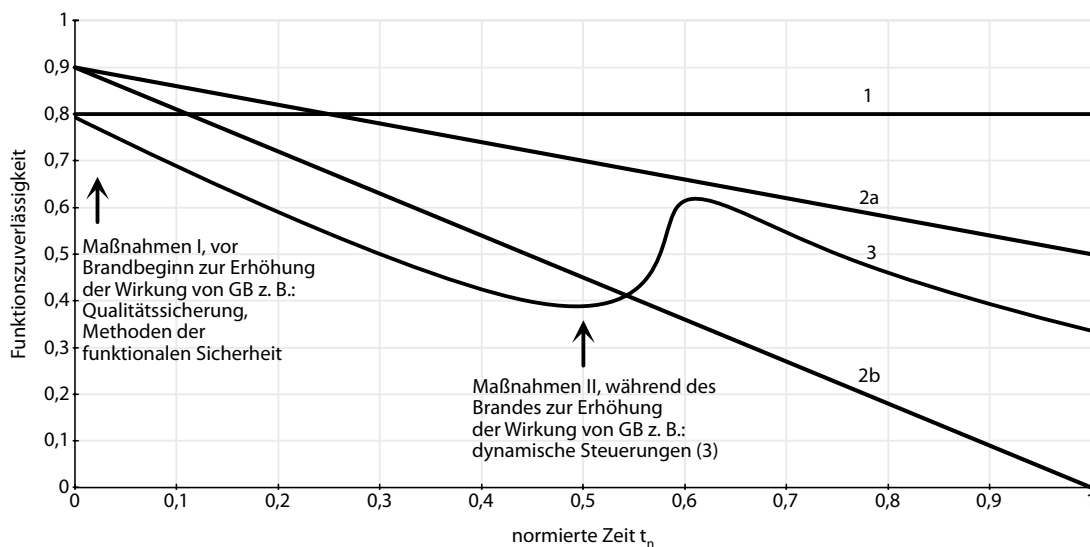


Abbildung 4.10: Qualitative Verläufe der Wahrscheinlichkeiten der Wirkung von GB über die normierte Zeit  $t_n$

Bei den Verläufen der betrachteten Wahrscheinlichkeiten (Funktionszuverlässigkeiten) über die normierte Zeit, also im Brandverlauf, kann zunächst vereinfacht angenommen werden, dass die Funktionszuverlässigkeit sich nicht verändert und konstant bei einem Wert bleibt (Ziffer 1, Abbildung 4.10) [193]. In der Regel ist jedoch zu erwarten, dass die Funktionszuverlässigkeiten eines effektiven Betriebs von GB über die Dauer des Brandereignisses in unbekannter Weise abnehmen (Ziffern 2a und 2b, Abbildung 4.10). Diese Annahme berücksichtigt den Umstand, dass sich im Brandfall negative Einwirkungen auf diese Einrichtungen einstellen und dies zu einem wahrscheinlicheren Ausfall von Anlagen führt.

Mit bestimmten Maßnahmen (Maßnahmen I), wie etwa der Qualitätssicherung oder den

Methoden der funktionalen Sicherheit, können die Funktionszuverlässigkeiten im Vorfeld des Brandereignisses auf ein gewünschtes z. T. quantifizierbares Maß erhöht werden [14, 80]. So können etwa mithilfe der Methoden der funktionalen Sicherheit die GB so gestaltet werden, dass eine quasi konstante Ausfallwahrscheinlichkeit von Anlagen gewährleistet wird (Ziffer 1, Abbildung 4.10). Solche und andere Maßnahmen erhöhen nicht nur die brandschutztechnische Gesamtsicherheit des jeweiligen Gebäudes, sondern ermöglichen in bestimmten Fällen erst die Nachweisführung nach dem hier vorgestellten Modell (vgl. Gleichung 4.2 auf Seite 130).

Denkbar sind ebenfalls Maßnahmen (Maßnahmen II), die während des Brandverlaufs zur Erhöhung der Funktionszuverlässigkeiten beitragen [57]. Zu diesen können z. B. intelligente dynamische Steuerungen von GB oder Interaktionen und die Gesamtwirkung von GB gezählt werden (vgl. hierzu [38]).

Hierzu sei ein Beispiel genannt. Betrachtet wird ein Verkehrstunnel mit maschineller Entrauchungsanlage in Form von einzeln ansteuerbaren Entrauchungsventilatoren. Mithilfe von je nach Detektionsort gesteuerten Entrauchungsventilatoren, die auch als Zuluftventilatoren funktionieren, kann die Funktionszuverlässigkeit der Wirkung der Gesamtentrauchungsanlage mit der dynamischen Steuerung auch während des Brandverlaufs erhöht werden (Kurve Ziffer 3, Abbildung 4.10). Als Beleg dieser Aussage können die in Brandverlaufssimulationen bestimmten Temperaturen an den Ventilatoren herangezogen werden, die bei der dynamischen Steuerung niedriger ausfallen und dementsprechend die Ausfallwahrscheinlichkeit von Ventilatoren senken (siehe hierzu Abschnitt 5.4).

#### **4.5.7 Nachweisführung im Modell**

Die Schritte der Nachweisführung im Modell sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Das hier vorgestellte Modell und die zugehörigen Schritte der Nachweisführung fügen sich in das bereits vorgestellte Modell zur Berücksichtigung dynamischer Brandfallsteuerungen in den Schritt 5 (vgl. Abbildung 4.5) ein. Bei diesem Schritt kann die Einhaltung der Personenschutzziele erstmals mithilfe des hier dargelegten Modells des individuellen Risikos quantifizierbar bestimmt werden.

Die Schritte der Nachweisführung in der Abbildung 4.11 fassen die zuvor erläuterten Zusammenhänge (vgl. Abschnitte 4.5.2 bis 4.5.6) des Modells zusammen.

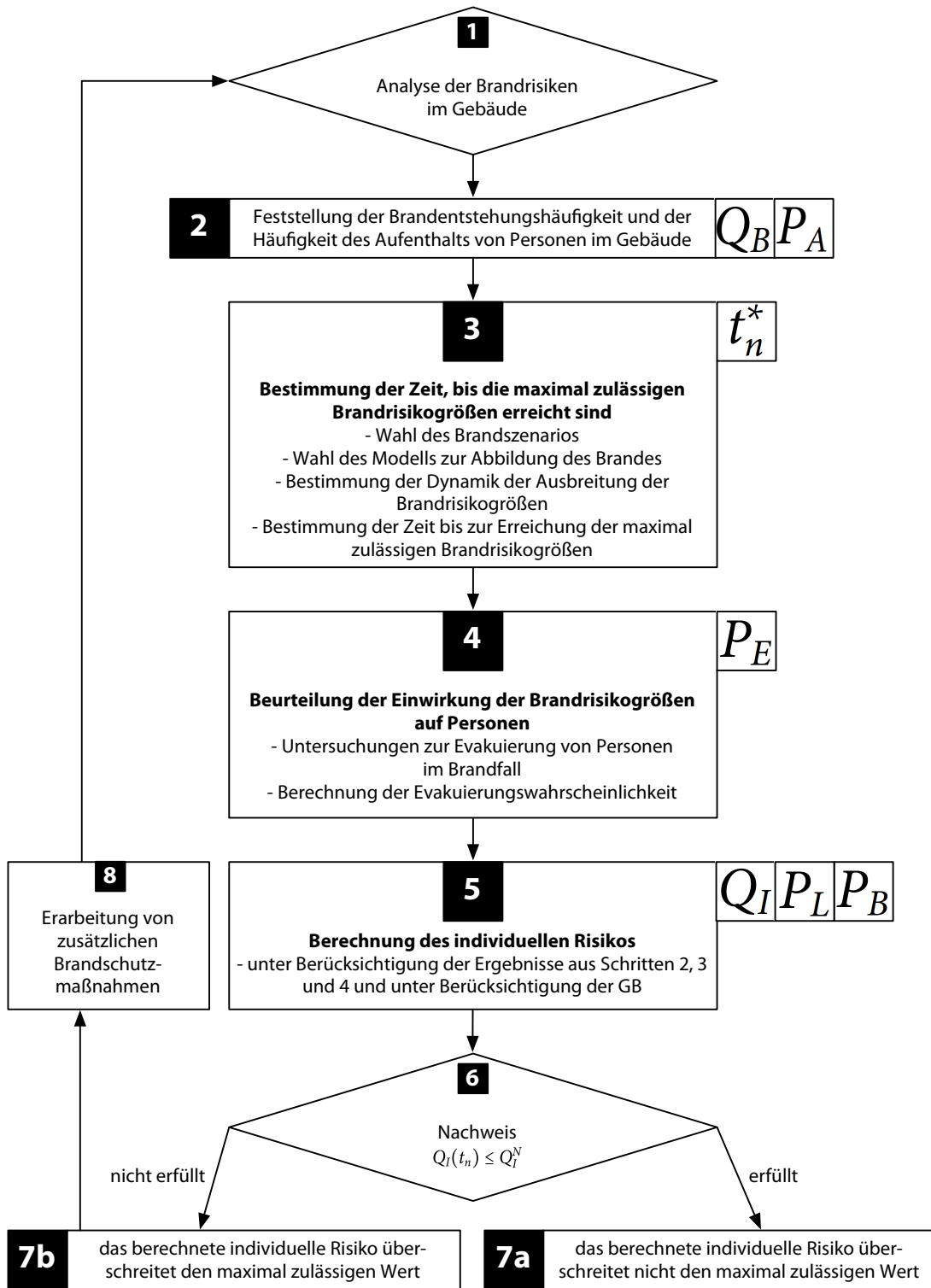


Abbildung 4.11: Ablaufdiagramm der Nachweisführung des Modells

#### 4.5.8 Beispiel der Nachweisführung im Modell

Das rechnerisch ermittelte individuelle Brandrisiko  $Q_I(t_n)$  ist nach dem vorgestellten Modell keine konstante Größe, sondern verändert sich über die Zeit im Brandverlauf. Aufgrund der Annahmen kann eine Erhöhung dieses Wertes über die Zeit im Brandverlauf festgestellt werden, da gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen im Brandverlauf ausfallen können [45]. In Abbildung 4.12 ist ein exemplarischer Verlauf der Differenz zwischen dem normativen und dem individuellen Brandrisiko dargestellt.

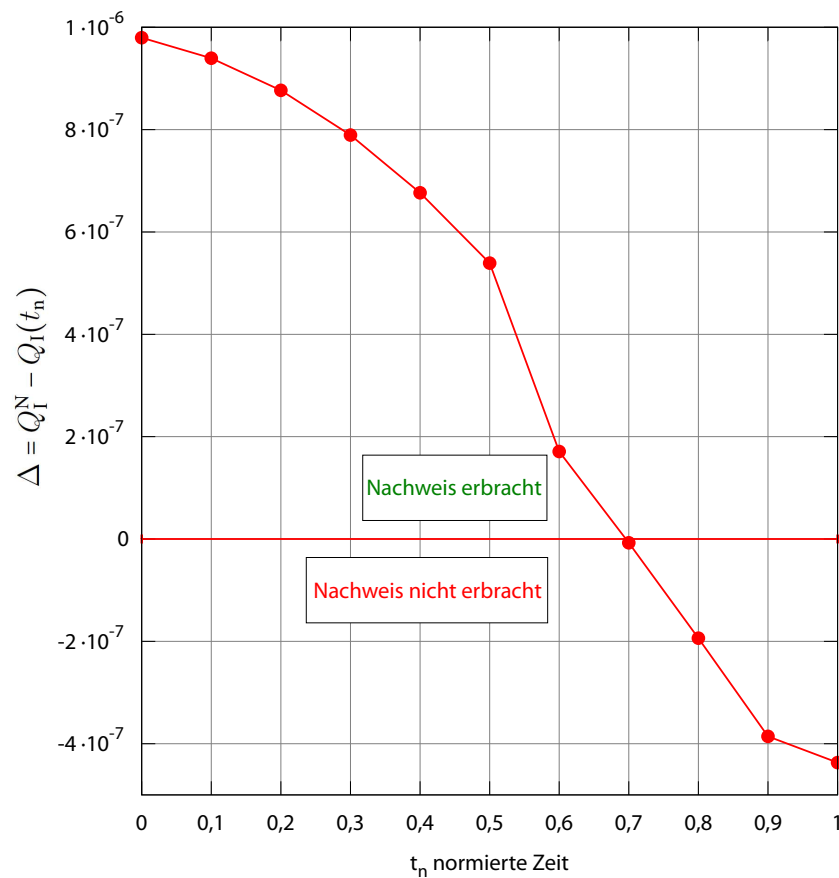


Abbildung 4.12: Differenz zwischen dem normativen und dem individuellen Brandrisiko unter Berücksichtigung der Funktionszuverlässigkeit von GB über die normierte Zeit  $t_n$  für das Beispiel nach Tabelle 4.6

Das Delta wird berechnet, indem die Differenz zwischen dem normativen und dem individuellen Brandrisiko zur jeweiligen normierten Zeit nach folgender Gleichung gebildet wird:

$$\Delta = Q_I^N - Q_I(t_n)$$

Das Delta nimmt über den Brandverlauf ab, da der Wert des  $Q_I(t_n)$  über die Zeit zunimmt und  $Q_I^N$  konstant bleibt (vgl. Gleichung 4.2 auf Seite 130, Gleichung 4.9 auf Seite 135 und Gleichung 4.11 auf Seite 140 sowie Abbildung 4.10).

$t_n$	$P_L(t_n)$	$P_B(t_n)$	$P_M(t_n)$	$P_{ELA}(t_n)$	$P_{ENT}(t_n)$	$Q_I(t_n)$	$\Delta$
0	0,9	0,87	0,8	0,8	0,8	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$9,80 \cdot 10^{-7}$
0,1	0,8	0,81	0,75	0,75	0,75	$6,04 \cdot 10^{-8}$	$9,40 \cdot 10^{-7}$
0,2	0,7	0,74	0,7	0,7	0,7	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$8,77 \cdot 10^{-7}$
0,3	0,6	0,67	0,65	0,65	0,65	$2,11 \cdot 10^{-7}$	$7,89 \cdot 10^{-7}$
0,4	0,5	0,59	0,6	0,6	0,6	$3,23 \cdot 10^{-7}$	$6,77 \cdot 10^{-7}$
0,5	0,4	0,51	0,55	0,55	0,55	$4,61 \cdot 10^{-7}$	$5,39 \cdot 10^{-7}$
0,6	0,3	0,25	0,5	0	0,5	$8,29 \cdot 10^{-7}$	$1,71 \cdot 10^{-7}$
0,7	0,2	0,2	0,45	0	0,45	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$-7,40 \cdot 10^{-9}$
0,8	0,1	0,16	0,4	0	0,4	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$-1,94 \cdot 10^{-7}$
0,9	0	0,12	0,35	0	0,35	$1,39 \cdot 10^{-6}$	$-3,86 \cdot 10^{-7}$
1	0	0,09	0,3	0	0,3	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$-4,37 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 4.6: Annahmen und berechnete Werte des Beispiels

Die übrigen zur Berechnung des  $Q_I(t_n)$  angenommenen Werte des Beispiels sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Es wird dabei angenommen, dass die Funktionszuverlässigkeiten der im Beispiel betrachteten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen in der dargestellten Art über die normierte Zeit hinweg abnehmen.

Darüber hinaus werden im Beispiel folgende konstante Werte angenommen:

$$Q_B = 1,579 \cdot 10^{-3}, P_A = 1, P_E = 0,999 \text{ und } Q_I^N = 1 \cdot 10^{-6}$$

Bei  $t_n = 0,6$  wird im Beispiel angenommen, dass die Alarmierungsanlage ausfällt und die automatische Löschanlage bei  $t_n = 0,9$  nicht mehr wirkt (vgl.  $P_{ELA}(0,6) = 0$ ,  $P_L(0,9) = 0$  und grau hinterlegte Felder in Tabelle 4.6). Dies bewirkt einen stärkeren Abfall des Deltas (vgl. Abbildung 4.10). Der Nachweis ( $Q_I(t_n) \leq Q_I^N$ ) gilt als erbracht, solange das Delta noch positiv ist. Ab dem Zeitpunkt  $t_n = 0,7$  ist das Delta negativ, was bedeutet, dass das individuelle Risiko oberhalb des geforderten normativen Werts von  $10^{-6}$  pro Jahr und Person liegt (vgl. grau hinterlegte Felder in der letzten Spalte der Tabelle 4.6).

In dem betrachteten Beispiel wäre daher zu überprüfen, ob zum Zeitpunkt  $t_n = 0,7$  die Evaluierung bereits abgeschlossen ist ( $t_r + t_b \leq t_n = 0,7$ ) (vgl. hierzu Abbildung 4.8). Falls dies

der Fall ist, sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Im anderen Fall sind Maßnahmen zur Verkürzung der Evakuierungszeit, zur Erhöhung der Ausfallsicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen oder deren dynamischer Ansteuerung notwendig (vgl. hierzu Abbildung 4.10).

#### **4.5.9 Diskussion des Modells**

In den vorstehenden Ausführungen wurden die Gleichungen und Ansätze des probabilistischen Modells des individuellen Risikos vorgestellt. Insgesamt ermöglicht das Modell eine ganzheitliche Betrachtung des individuellen Brandrisikos pro Person oder gebäudespezifisch auf einen Zeitraum, wie z. B. ein Jahr, bezogen und unter der Berücksichtigung von gebäudetechnischen Anlagen sowie deren Ausfallsicherheit und dynamischen Interaktionen. Ferner berücksichtigt das Modell die Evakuierungszeiten im Kontext der normierten Zeit des Brandverlaufs, d. h. bis zum Ausfall der Flucht- und Rettungswege.

Das Modell stellt mithilfe von Berechnungen, ingenieurgemäßen Nachweisen und Abschätzungen ein praktisches Instrument dar das es ermöglicht, eine Beurteilung der Brandrisiken vorzunehmen. Ferner lassen sich mithilfe des Modells nicht nur unterschiedliche Brandszenarien, sondern auch Ausfälle von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen untersuchen und deren Auswirkungen analysieren. Dies ist vor allem hinsichtlich der Zunahme der Bedeutung des anlagentechnischen Brandschutzes bedeutsam [106]. Ferner ist wichtig, dass es mit dem Modell möglich wird, nicht nur ein Brandereignis pauschal, sondern auch Brandereignisse über den Brandverlauf hinweg zu analysieren.

Obwohl in den Gleichungen des Modells z. B. die bautechnischen oder abwehrenden Brandschutzmaßnahmen nicht direkt eingehen und zur Nachweisführung des individuellen Risikos Annahmen getroffen und Statistiken berücksichtigt werden, ermöglicht das entwickelte Modell erstmals, das Brandgeschehen ingenieurgemäß, ganzheitlich, dynamisch und probabilistisch zu betrachten. Im Gegensatz zur gängigen Praxis bloßer Anwendung von Brandschutzvorschriften „zwingt“ das Modell den Anwender dazu, sich mit dem Phänomen des Brandereignisses in einem Gebäude in seiner Gänze auseinanderzusetzen, um die Sicherheit von Personen zu gewährleisten.

Anhand der bereits vorgestellten Gleichung des Modells können unterschiedliche brandschutztechnische Maßnahmen diskutiert werden, die zu einer Verringerung des individuellen Risikos

führen (vgl. Gleichung 4.9 auf Seite 135). Nachfolgend seien einige Beispiele hierfür in Gleichung 4.12 aufgeführt:

$$\underbrace{Q_I(t_n)} = \underbrace{Q_B} \cdot (1 - \underbrace{P_L(t_n)}) \cdot P_A \cdot (1 - \underbrace{P_E}) \cdot (1 - \underbrace{P_B(t_n)})$$

individuelles Risiko über die normierte Zeit	organisatorische Maßnahmen, um die Häufigkeit der Brandentstehung zu verringern	anlagentechnische Maßnahmen, um die Funktionszuverlässigkeit von automatischen Brandlöschanlagen zu erhöhen. Stichworte: Qualitätssicherung und Methoden der funktionalen Sicherheit	organisatorische und anlagentechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit der Evakuierung. Stichworte: Evakuierungsübungen, Installation von Sprachalarmierungsanlagen	anlagentechnische Maßnahmen, um die Funktionszuverlässigkeit von GB zu erhöhen. Stichworte: Qualitätssicherung und Methoden der funktionalen Sicherheit
--	---	--	---	---

(4.12)

Mithilfe organisatorischer Maßnahmen lässt sich die Häufigkeit der Brandentstehung senken, wodurch sich langfristig die statistische Größe  $Q_B$  für den jeweiligen Gebäudetyp verringert. Hinsichtlich der Funktionszuverlässigkeit von automatischen Brandlöschanlagen (anlagentechnische Maßnahmen, Größe  $P_L(t_n)$ ) können Maßnahmen in Form von Qualitätssicherung oder Methoden der funktionalen Sicherheit aufgeführt werden.

Mit der Größe  $P_E$  lassen sich organisatorische und anlagentechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit der Evakuierung berücksichtigen. Hierzu können z. B. regelmäßige Evakuierungsübungen, Installation von Sprachalarmierungsanlagen und weitere Maßnahmen genannt werden. Wie auch bei der Größe  $P_L(t_n)$  können bei der Größe  $P_B(t_n)$  anlagentechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Funktionszuverlässigkeit von GB vorgenommen werden. Hierzu zählen Maßnahmen der Qualitätssicherung und Methoden der funktionalen Sicherheit.

## 4.6 Zusammenfassung

In Abschnitt 2 wurde gezeigt, dass in Branchen wie z. B. der chemischen und der Luftfahrtindustrie viele sicherheitsrelevante dynamisch gesteuerte Systeme erfolgreich eingesetzt werden. Die in diesen Branchen entwickelten sicherheitsrelevanten Vorschriften und Verfahren weisen, wie gezeigt werden konnte, ein hohes Entwicklungspotential auch für gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen auf.

In Abschnitt 4 wurden zunächst grundsätzliche Eigenschaften dynamischer Systeme dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen als dynamische Systeme betrachtet werden können. Es wurden ferner Eigenschaften und Anforderungen an dynamische Brandfallsteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen formuliert.

Die Auswertung der Literatur und die Erfahrungen in der Praxis zeigen, dass die Brandfallsteuerungen bislang überwiegend statischer Natur sind, da die Interaktionslogik bei Vorliegen einer Detektion zunächst nur einmal stattfindet und die Interaktionen eines Systems danach in der Regel nicht mehr geändert werden. Das Brandgeschehen ist jedoch, wie die alltäglichen Erfahrungen der Feuerwehren bei Löscheinsätzen belegen, dynamisch. Es besteht daher das Erfordernis, an das Brandgeschehen angepasste dynamische Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen zu erarbeiten.

In Abschnitt 4.3 wurde ein praxisnahes Modell entwickelt, welches die Planung dynamischer Brandfallsteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen ermöglicht. Ferner wurden die Chancen und Risiken des Einsatzes dynamischer Brandfallsteuerungen beschrieben und beurteilt.

Die Vorteile des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen liegen darin, dass damit eine konzeptionell bessere Planung und Ausnutzung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen ermöglicht wird, da die Wirkung der Einrichtungen an das Brandgeschehen angepasst wird und somit diese Einrichtungen gezielter wirken können. Das Modell ermöglicht es ferner, das dynamische Systemverhalten sowohl für neue als auch für Bestandsgebäude planbar zu machen. So wird es z. B. möglich, dynamische Fluchtwegsteuerungen in Verbindung mit zeitgleich wirkenden anderen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen zu planen und in verständlicher Form darzustellen.

Den Vorteilen des vorgestellten Ansatzes steht ein höherer Aufwand bei der Planung gegen-



über. Dieser Aufwand ist jedoch in vielen Fällen gerechtfertigt, um die gestellten Anforderungen an die Schutzziele besser und eventuell mit weniger Mitteln zu erreichen. Mithilfe des in Abschnitt 4.5 vorgestellten probabilistischen Modells des individuellen Risikos unter Berücksichtigung von Branddynamik, Steuerungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen gelingt eine qualifizierte Bewertung des Risikos und der nachweisbaren Erreichung von Schutzzielen.

Im nächsten Abschnitt wird anhand von Beispielen gezeigt, wie das entwickelte Modell dynamischer Brandfallsteuerungen eingesetzt werden kann, um intelligent und dynamisch gesteuerte gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen verwirklichen zu können.



# 5 Umsetzung dynamischer Steuerungen

## 5.1 Untersuchungen mithilfe numerischer Simulationen

Im Bereich des Brandschutzes werden im Rahmen von ingenieurgemäßen Nachweisen, u. a. mithilfe von numerischen Simulationen, Berechnungen durchgeführt, die zur Klärung eines Sachverhaltes dienen [34, 161]. Als Beispiel für solche Untersuchungen können etwa numerische Simulationen von Brandverläufen und Evakuierungen von Personen genannt werden. Unter Simulationen von Brandverläufen versteht man den Ansatz, mithilfe der Grundsätze numerischer Strömungsmechanik (engl.: computational fluid dynamics oder CFD) strömungsmechanische Fragestellungen approximativ zu lösen [164].

Im Folgenden werden dynamische Steuerungsmöglichkeiten von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen mithilfe des im Abschnitt 4.3 auf Seite 116 vorgestellten Modells anhand von Fallbeispielen untersucht. Für die Untersuchungen wird das quelloffene CFD-Programm Fire Dynamics Simulator (FDS, Version 5.5.3 serial) verwendet [99].

Das Programm erlaubt es, Simulationen von Bränden durchzuführen. Der Fokus der Software liegt auf Simulationen von dreidimensionalen Strömungen auf Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen, denen Brandprozesse zugrunde liegen. Mithilfe der Software lassen sich die Ausbreitung des Brandes und des Brandrauchs simulieren und anschließend analysieren. Die Ergebnisse der FDS-Simulationen können mithilfe des ebenfalls quelloffenen Programms Smokeview visualisiert werden [41]. Die Analyse kann anhand von zwei- oder dreidimensionalen Bildern und Filmen oder über numerische Ausgaben erfolgen. FDS wurde für die Durchführung von Untersuchungen in dieser Arbeit ausgewählt, da das Programm es ermöglicht, Sensoren sowie die zeitlichen- oder ereignisbezogenen Steuerungen von Aktoren abzubilden und Interaktionen der wichtigsten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen zu untersuchen.

## 5.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der Untersuchungen mithilfe von Simulationen besteht zum einen darin, die Vorteile von dynamischen Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen für konkrete Beispiele aufzuzeigen. Zum anderen soll das in Abschnitt 4.3 auf Seite 116 vorgestellte Modell anhand von Beispielen und von Fragestellungen, die sich für einige brandschutztechnische Konstellationen ergeben, überprüft werden. Hierzu werden mehrere Brandverlaufssimulationen durchgeführt, die aufzeigen, welche Auswirkungen die konventionellen, statischen Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen auf der einen Seite haben und welche Vorteile und Möglichkeiten sich aus dynamischen Steuerungen nach den Betrachtungen des vorgestellten Modells auf der anderen Seite ergeben.

Die nachfolgend aufgeführten Beispielsimulationen sind grundsätzlicher Natur und beziehen sich nicht auf real existierende Gebäude. Wie bei allen Modellen und Abbildungen der Realität ermöglichen die Simulationen einen Vergleich der Ergebnisse auf einer abstrahierten Ebene. Die Szenarien der Simulationen sollen, wie die Gebäude, exemplarisch sein und der Verdeutlichung der Aussagen und der Vorgehensweise im Modell dynamischer Brandfallsteuerungen dienen.

## 5.3 Fallbeispiel 1: Simulation natürlicher Entrauchung einer Halle mit Atrium ohne und mit Berücksichtigung des Windeinflusses

Beim ersten Fallbeispiel handelt es sich um ein sechs Geschosse hohes Gebäude mit innenliegendem Atrium und umlaufenden offenen Galeriegängen in den Obergeschossen. Das Gebäude mit Ausstellungsflächen von insgesamt ca. 1.600 m<sup>2</sup> wird als eine Versammlungsstätte im Sinne der SBauVO NRW [207] von mehreren Hundert Personen genutzt. Im Beispiel werden Simulationen der Verrauchung mit unterschiedlich angesteuerten Anlagen zur natürlichen Entrauchung durchgeführt, wobei der Windeinfluss außerhalb des Gebäudes auf die Entrauchung mit betrachtet wird. Die Ergebnisse der Simulationen von unterschiedlich angesteuerten Nachströmflächen werden bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen hinsichtlich der Entrauchungsqualität analysiert. Die Außenmaße des Gebäudes betragen in der Länge und Brei-

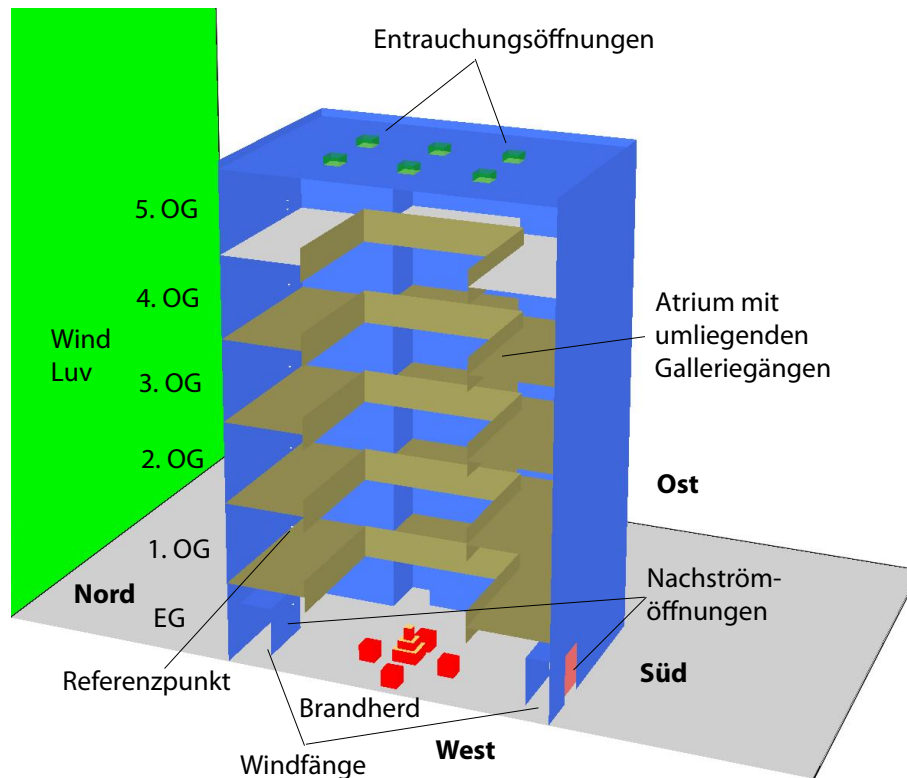


Abbildung 5.1: Schnitt durch das Modell

te 20 m. Die Grundfläche des Gebäudes beträgt somit 400 m<sup>2</sup>. Die Höhe des Gebäudes beträgt 30 m. Der Schnitt des Modells des Gebäudes ist in Bild 5.1 dargestellt. Weitere Zeichnungen des Gebäudes sind dem Anhang A1 auf Seite 235 zu entnehmen.

Um das innenliegende Atrium sind Galleriegänge auf insgesamt fünf Obergeschossen mit einer Breite von 5 m angeordnet. Die Geschosshöhe beträgt 5 m. Unterhalb der Decken des jeweils darüber liegenden Geschosses, mit Ausnahme des obersten, werden Rauchschürzen von 1 m Höhe angeordnet. Die Entrauchung des Atriums wird mit natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, die im Dach angeordnet sind, gewährleistet. Die Nachströmung der Luft im Brandfall erfolgt über die Türen im Erdgeschoss. Im Beispielgebäude sind keine selbsttätigen Feuerlöschanlagen, jedoch eine Personalarminierungsanlage vorgesehen.

### 5.3.1 Aufgabenstellung, Schutzziele und Risikoanalyse

In aktueller Fachpresse, Fortbildungsveranstaltungen und Forschungsarbeiten werden Witterungseinflüsse auf die natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen diskutiert [85, 160, 111]. Anhand von Brandverlaufssimulationen soll im Beispiel aufgezeigt werden, wie mithilfe dynamischer Steuerungen von Nachströmöffnungen, die Bestandteile der Entrauchungsanlage sind, die Entrauchungsqualität unter Windeinwirkung auf das Gebäude verbessert werden kann. Nach Vorstellung der durchgeführten Simulationen werden die Ergebnisse anhand des in Abschnitt 4.3 auf Seite 116 vorgestellten Modells diskutiert.

Das Schutzziel mit der höchsten Priorität ist im Beispiel die Personensicherheit. Es muss gewährleistet werden, dass Personen, die sich im Gebäude aufhalten, im Brandfall genügend Zeit zur Eigenrettung haben, bevor die Rauchgase eine kritische Konzentration und Temperatur erreichen und die optische Rauchdichte so hohe Werte annimmt, dass die Sicht kritisch beeinträchtigt ist. Neben dem Personenschutzziel sind funktionierende Rauch- und Wärmeabzugsanlagen für die Rettungs- und Löschmaßnahmen der Feuerwehr sowie für den Sachschutz wichtig.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der für das Beispiel durchgeführten Risikoanalyse mithilfe der Risikograph-Methode in Tabelle 5.1 aufgeführt. In Abbildung 5.2 ist der zugehörige Risikograph dargestellt.

Bei der Anwendung des Risikographen nach [188] ist zunächst der Risikoparameter der Auswirkung bzw. des Schadensausmaßes festzulegen. Bei dem betrachteten Gebäude ist mit schweren irreversiblen Verletzungen einer oder mehrerer Personen bzw. Tod einer Person infolge eines Brandereignisses bei Einwirkung von Brandrisikogrößen zu rechnen (siehe Parameter  $C_B$  in der Tabelle 5.1 bzw. Abbildung 5.2).

Anschließend ist die Häufigkeit der Aufenthaltsdauer im Gebäude festzulegen. Bei dem Gebäude aus dem Beispiel handelt es sich um eine Versammlungsstätte, sodass mit einem häufigen Aufenthalt von vielen Personen gerechnet werden kann (siehe Parameter  $F_B$  in der Tabelle 5.1 bzw. Abbildung 5.2) [19].

Sodann wird der Risikoparameter der Möglichkeit, den Brandfall zu verhindern, betrachtet. Es ist bei dem untersuchten Gebäude beinahe unmöglich, einen Brandfall über den gesamten Gebäudelebenszyklus sicher zu verhindern. Da jedoch die Branddetektion in der Brandentstehungsphase erfolgt, sind die Ansteuerung gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und

	Auswirkung/ Schadensaus- maß: $C$	Häufigkeit und Aufenthalts- dauer: $F$	Gefahren- abwehr- möglichkeit: $P$	Eintritts- wahrschein- lichkeit des unerwünschten Ereignisses: $W$
<b>Ergeb- nis</b>	$C_B$	$F_B$	$P_A$	$W_1$
<b>Begrün- dung</b>	Mit schweren irrever- siblen Verletzungen einer oder mehrerer Personen bzw. Tod einer Person infolge eines Brandereignis- ses bei Einwirkung von Brandrisikogrö- ßen ist zu rechnen.	Im Gebäude muss mit einem häufigen Aufenthalt von vie- len Personen gerech- net werden.	Es ist beinahe unmöglich einen Brandfall über den gesamten Gebäudele- benszyklus sicher zu verhindern. Jedoch erfolgt die Brand- detektion in der Brandentstehungs- phase. Damit sind die Ansteuerung gebäudetechnischer Brandschutzein- richtungen und die Einleitung einer Evakuierung frühzeitig möglich.	Mit nur wenigen Brandereignissen ist zu rechnen. Der Eintritt von Perso- nenschäden infolge der Brandrisikogrö- ßen wird als sehr gering eingestuft.

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Risikoanalyse für das Fallbeispiel 1

die Einleitung einer Evakuierung frühzeitig möglich (siehe Parameter  $P_A$  in der Tabelle 5.1 bzw. Abbildung 5.2). Wichtig für die Betrachtung dieses Parameters ist, dass die Gefahrenabwehrmöglichkeit nur mithilfe der GB gelingt.

Zuletzt wird die Wahrscheinlichkeit des Brandereignisses beurteilt. Diese ist, wie internationale Statistiken zeigen, im Allgemeinen gering, sodass auch im Beispielgebäude mit nur wenigen Brandereignissen zu rechnen ist (siehe Parameter  $W_1$  in der Tabelle 5.1 bzw. Abbildung 5.2) [19].

Die durchgeführte Risikoanalyse mithilfe des Risikographen in Anlehnung an IEC 61508 führt dazu, dass an die Sicherheitsfunktion der Entrauchungsanlagen und andere sicherheitsrelevante gebäudetechnische Einrichtungen sowie an die zugehörige Sicherheitsfunktion von Ansteuerungen dieser Anlagen des Beispielgebäudes keine speziellen Sicherheitsanforderungen

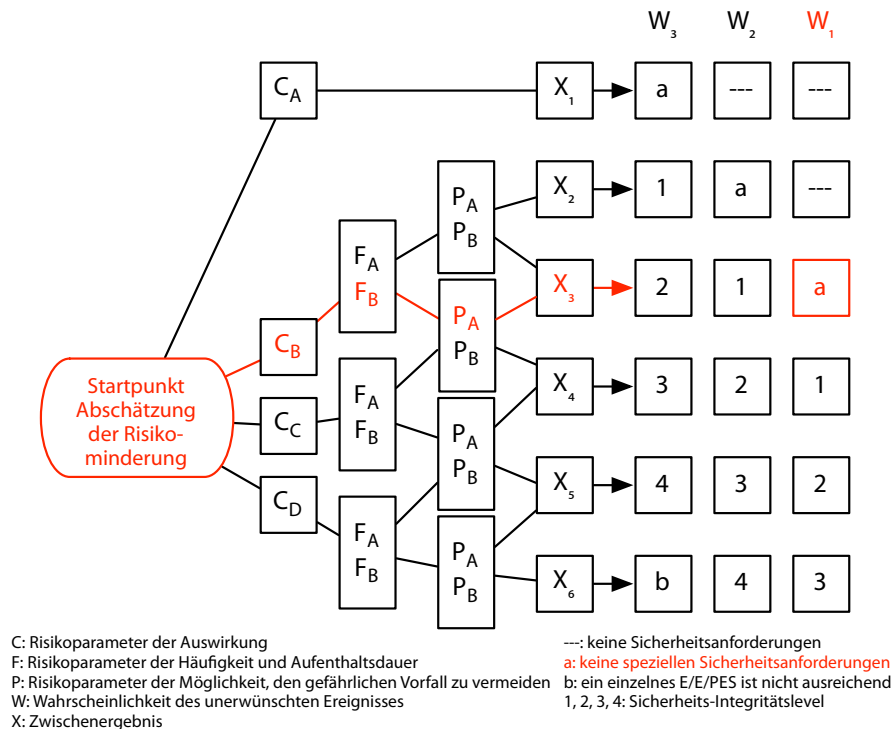


Abbildung 5.2: Risikograph des Fallbeispiels 1

zu stellen sind (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.4 auf Seite 25 und [188] Teil 5). Anders ausgedrückt können die GB nach Stand der Technik und ohne weitere Anforderungen errichtet werden. Zu beachten ist dabei jedoch, dass potentielle Störgrößen wie Wind die Gefahrenabwehrmöglichkeiten (siehe Parameter  $P_A$  in der Tabelle 5.1) nicht außer Kraft setzen können. Ferner sind übliche vorbeugende Maßnahmen des organisatorischen und des vorbeugenden Brand-schutzes zu ergreifen, um die Eintrittswahrscheinlichkeit des unerwünschten Brandereignisses (siehe Parameter  $W_1$  in der Tabelle 5.1) tatsächlich gering zu halten.

### 5.3.2 Bemessung der Rauchableitungsöffnungen und Nachströmflächen

Gemäß dem § 16 der SBauVO NRW genügen rein formell für Versammlungsräume mit einer Grundfläche von unter 1.000 m<sup>2</sup> Rauchableitungsöffnungen mit freier Öffnungsfläche von insgesamt 1 % der Grundfläche [207]. Bei der Grundfläche des Beispielgebäudes von 400 m<sup>2</sup> würden demnach Rauchableitungsöffnungen mit insgesamt einer freien Öffnungsfläche von 4 m<sup>2</sup> genügen. Erfahrungsgemäß reichen solche kleinen Rauchableitungsflächen jedoch nicht aus [160]. Aus diesem Grund werden im Beispielgebäude insgesamt 9 m<sup>2</sup> Entrauchungsfläche



gleichmäßig verteilt auf neun Öffnungen im Dach des Gebäudes angeordnet.

Für die Nachströmflächen wird von einer mindestens anderthalbfachen Fläche der Rauchableitungsflächen ausgegangen. Die Nachströmung im Beispiel findet über vier Türen des Gebäudes im Erdgeschoss statt, die im Brandfall bei statischer Ansteuerung offen stehen. Die Fläche einer Tür beträgt  $6 \text{ m}^2$ . Die Summe aller Nachströmflächen beträgt somit  $24 \text{ m}^2$ , was deutlich über den  $13,5 \text{ m}^2$  erforderlicher Nachströmfläche liegt.

Die Nachström- oder Zuluftflächen sind so angeordnet, dass eine impulsarme Nachströmung der Zuluft ermöglicht wird. Darüber hinaus liegen die Zuluftflächen verteilt auf allen vier Seiten des Gebäudes.

### 5.3.3 Randbedingungen und Vorgaben für die Simulationen

Für sämtliche Simulationen des Beispielgebäudes wird eine Zellgröße von 20 cm für alle drei Dimensionen gewählt. Diese Zellgröße bietet für die in der Arbeit betrachteten Fragestellungen eine ausreichende Genauigkeit und stellt einen Kompromiss zwischen der hinreichenden Genauigkeit der Simulationen und dem hierfür erforderlichen Rechenaufwand dar.

Vor den Türen im Erdgeschoss, die gleichzeitig auch Nachströmflächen für die Entrauchung sind, wird ein Windfang angeordnet. Dieser dient dazu, die Windeinflüsse auf den Innenraum des Gebäudes zu mindern. Die Windrichtung in den durchgeführten Simulationen mit Wind wird vom Norden angesetzt (siehe Abbildung 5.1). Die Windgeschwindigkeit in den Szenarien mit Wind wird vereinfacht als konstant über die Dauer der Simulation angenommen.

Insgesamt werden drei Szenarien untersucht. Die wichtigsten Randbedingungen für alle Szenarien sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. In Tabelle 5.3 ist eine Übersicht zu den wichtigsten Parametern der durchgeführten Simulationen mit der jeweiligen Nummerierung gegeben.

Weitere Randbedingungen sind der Eingabedatei im Anhang zu entnehmen. Die Definition des Brandes (Tannenbaum und Polstermöbel) sind der Literatur entnommen [151, 152].

Bei der Grundsimulation (Simulation: Variante 1) wird die Entrauchung ohne den Ansatz des Windes außerhalb des Gebäudes simuliert. Alle Nachströmöffnungen im Erdgeschoss sowie die Entrauchungsöffnungen werden bei dieser Simulation nach einer Minute geöffnet.

Simulation 2 bildet den Fall der Gebäudeentrauchung mit Windeinfluss von  $8 \text{ m/s}$  ab, bei

<b>Randbedingung</b>	<b>Ausprägung mit Einheit</b>
Windgeschwindigkeiten	0 m/s (für Variante 1 ohne Wind) und 8 m/s (Abb. 5.3)
Windrichtung	aus Nord senkrecht auf die Gebäudeaußenwand
Außentemperatur	20 °C
Innentemperatur	20 °C
Brand	Tannenbaum und Polstermöbel
Brandort	in der Mitte des Atriums
max. Wärmefreisetzungsrate	ca. 9 MW (Abb. 5.4)
Zeit bis zum Erreichen der max. Wärmefreisetzungsrate	ca. 6 Minuten (Abb. 5.4)

*Tabelle 5.2: Randbedingungen der Simulationen des Fallbeispiels 1*

<b>varierte Parameter in Simulation</b>	<b>Bezeichnung der Simulation</b>	<b>Simulationsnummer</b>
kein Wind, alle Nachströmöffnungen geöffnet	<b>ohne Wind</b>	1
Wind (10 m über Grund) 8 m/s, alle Nachströmöffnungen geöffnet	<b>statische Ansteuerung</b>	2
Wind (10 m über Grund) 8 m/s, Nachströmöffnungen gesteuert, Nachströmöffnung auf der windzugewandten Seite geschlossen	<b>dynamische Ansteuerung</b>	3

*Tabelle 5.3: Unterschiede und Bezeichnungen der durchgeführten Simulationen*

der ebenfalls nach einer Minute alle Nachströmöffnungen im Erdgeschoss sowie die Entrauchungsöffnungen im Dach geöffnet werden. Bei der Simulation 2 handelt es sich um die Abbildung eines konventionellen Entrauchungskonzepts. Die Aktivierung und Ansteuerung der Entrauchungs- und der Nachströmöffnungen erfolgt ohne die Berücksichtigung des Windeinflusses.

Im Gegensatz zur Simulation 2 wird in Simulation 3 die Nachströmfläche auf der Nordseite (windzugewandte Seite/Luvseite) nicht geöffnet. Die übrigen drei Nachström- sowie die Entrauchungsflächen werden wie auch in Simulation 1 und 2 eine Minute nach Brandbeginn in der Simulation geöffnet.

Mit der Simulation 3 wird eine Steuerung von Nachströmflächen nachgebildet, bei der die Nach-

strömfläche auf der windzugewandten Seite geschlossen bleibt, um dem zu erwartenden negativen Einfluss auf die Entrauchungsqualität im Gebäude entgegenzuwirken (vgl. [120, 185]). Es handelt sich somit um eine ereignisbezogene und dynamische Ansteuerung von Nachströmflächen, da diese die Windrichtung berücksichtigt. Im Vorfeld zur dynamischen Ansteuerung wäre die Mittelung der Winddaten über einen Zeitraum von etwa 15 Minuten sowie eine Entscheidung notwendig, ob die Windstärke als dynamische Störgröße für die Entrauchung relevant ist. Bei dieser Entscheidung ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass die dynamische Ansteuerung von Nachströmeinrichtungen nicht beliebig oft veränderbar ist, da das Gesamtsystem träge reagieren kann. Hier sind eindeutige Kriterien der Steuerung festzulegen und anhand von Simulationen zu überprüfen.

Für die Simulationen 2 und 3 wird die in Abbildung 5.3 dargestellte nichtlineare Verteilung der Windgeschwindigkeiten über die Höhe angenommen und in FDS nachgebildet. Die Windgeschwindigkeiten betragen für die Simulationen 2 und 3 jeweils 8 m/s in 10 m Höhe (vgl. [160]).

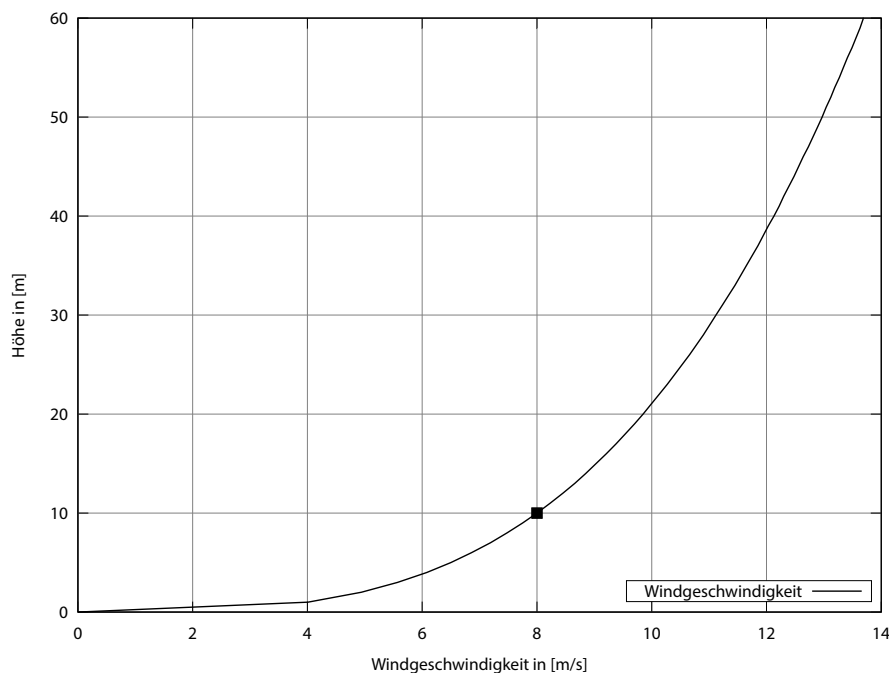


Abbildung 5.3: Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Höhe

In Abbildung 5.4 ist die Entwicklung der Wärmefreisetzung über die Zeit für alle drei untersuchten Varianten dargestellt.

Die Verläufe der Wärmefreisetzung in allen drei Varianten sind identisch. Die Verläufe werden

hier und nachfolgend aus Darstellungs- und Vereinfachungsgründen mit der Bézierkurve des n-ten Grades im Programm zur grafischen Darstellung (gnuplot) geglättet.

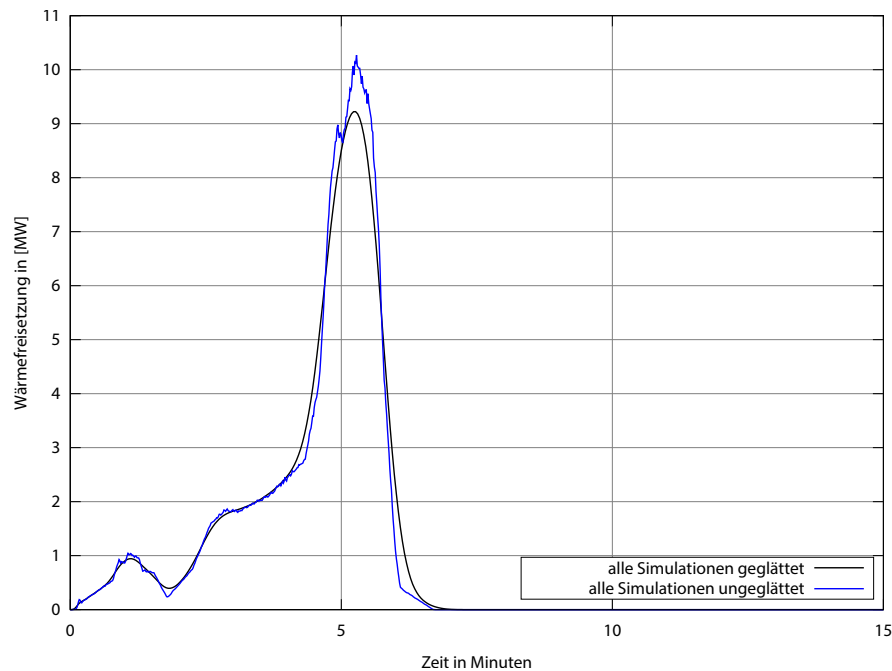


Abbildung 5.4: Wärmefreisetzung über die Zeit

### 5.3.4 Qualitativer Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation 1 zeigen, dass sich die Rauchgasschicht oberhalb Ebene 5 gleichmäßig und ungestört ausbildet, da im Modell kein Wind abgebildet wird. Die aufsteigende Rauchgassäule bildet sich in dieser Simulation ebenso ungestört aus. Die Ergebnisse dieser Simulation stellen in gewisser Weise den Idealfall dar und werden nachfolgend lediglich als Referenz aufgeführt.

Die Simulationen 2 und 3, welche die Entrauchung unter Windeinfluss untersuchen, liefern dagegen aufgrund der unterschiedlich gestalteten Ansteuerung von Nachströmflächen abweichende Ergebnisse. Aufgrund der Gebäudegeometrie, der Windrichtung und Windstärke ergeben sich an einigen Stellen Strömungsgeschwindigkeiten, die weit über den in der Simulation angesetzten Windgeschwindigkeiten liegen. Diese lokalen Erhöhungen der Geschwindigkeiten des Luftstroms üben auf die Entrauchung und Nachströmung enormen Einfluss aus. Ebenso wie die Windspitzen an bestimmten Stellen wirkt die Position von Öffnungen von Nachström-

flächen maßgeblich auf die Entrauchung des untersuchten Gebäudes.

In Simulation 2 erfolgt die Nachströmung auf der Luvseite mit Geschwindigkeiten von zum Teil bis zu 15 m/s. Diese hohen Geschwindigkeiten bewirken eine Verwirbelung des Rauchs innerhalb des Gebäudes. In Abbildung 5.5 ist die Verrauchung für die Simulationen 2 und 3 exemplarisch nach 192 Sekunden ab Simulationsbeginn in Schnitten durch das Gebäude dargestellt. Der Zeitpunkt 192 Sekunden wurde für die Darstellung gewählt, da er in der späteren Auswertung eine Rolle spielen wird.

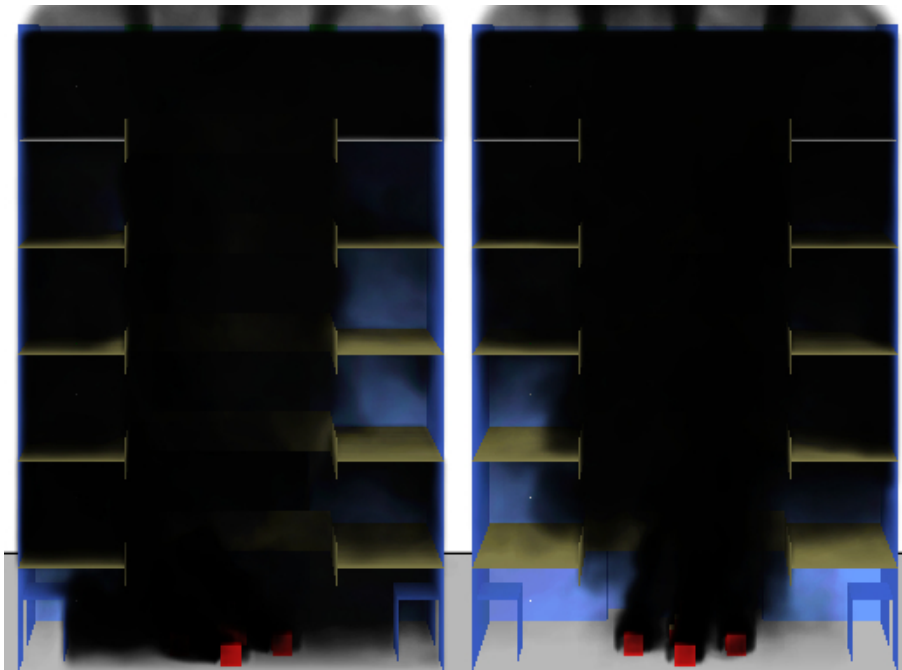


Abbildung 5.5: Verrauchung nach 192 Sekunden, statische Steuerung: Simulation 2 (links), dynamische Steuerung: Simulation 3 (rechts)

Die visuelle Auswertung der Verrauchung nach 192 Sekunden ab Brandbeginn zeigt, dass sich die Rauchgase bei der statischen Steuerung (Simulation 2) im Vergleich zum Verrauchungsbild der dynamischen Steuerung (Simulation 3) über ein größeres Volumen ausbreiten und die Rauchgassäule im EG und 1. OG in der Simulation 2 wesentlich instabiler ist. Besonders bemerkenswert ist die intensive Verrauchung in der untersten Ebene bei der statischen Ansteuerung. Der Grund für die Ausbildung dieser Effekte liegt in den Verwirbelungen der nachströmenden Luft in der Simulation, bei der alle Nachströmflächen geöffnet sind (statische Ansteuerung).

Korrelierend zu der Verrauchung verhalten sich auch die Temperaturverläufe in den untersuchten Varianten 2 und 3. In Abbildung 5.6 sind diese über den Zeitraum für eine ausgewählte

Stelle dargestellt.

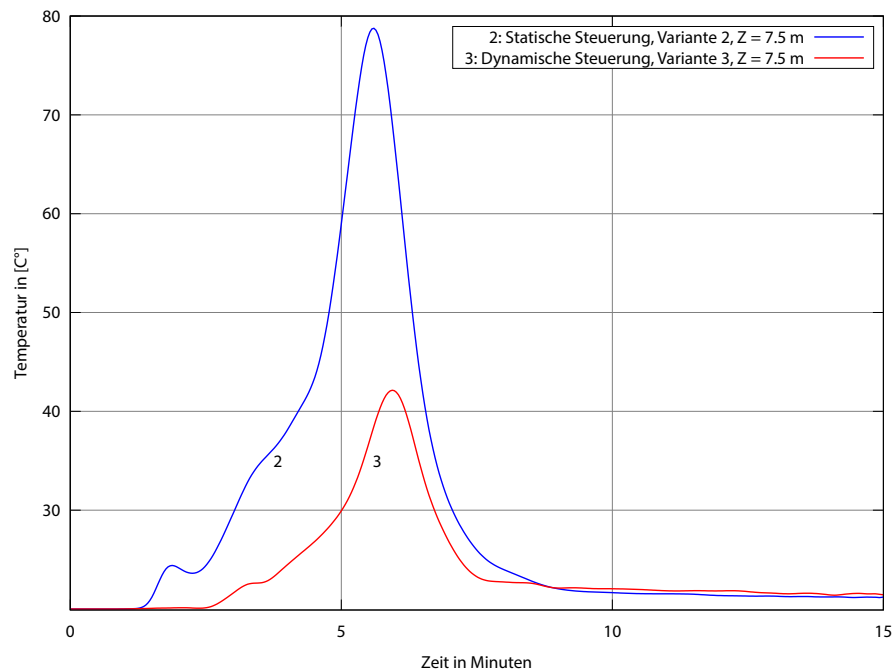


Abbildung 5.6: Temperaturverläufe auf dem nördlichen Galeriegang 1. OG in 2,5 m Höhe (Referenzpunkt)

Die Temperaturverläufe liegen für beide Simulationen an der ausgewählten Stelle in 2,5 m Höhe im nördlichen Galeriegang über die gesamte Simulationsdauer von 15 Minuten unterhalb von 80 °C. Für den Fall der statischen Ansteuerung (Ziffer 2) wird aber der Grenzwert für die Temperatur von 70 °C nach Tabelle 4.4 auf Seite 132 kurzzeitig überschritten. Im Fall der dynamischen Ansteuerung (Ziffer 3) liegen die Temperaturen an der untersuchten Stelle über die Simulationsdauer hinweg dagegen weit unterhalb der kritischen 70 °C.

### 5.3.5 Quantitativer Vergleich der Ergebnisse

Die Personensicherheit wurde für das untersuchte Gebäude im Brandfall als oberstes Schutzziel definiert. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Entrauchungseinrichtungen über möglichst lange Zeit eine raucharme Schicht mit angemessener Höhe gewährleisten.

Eine Möglichkeit, die Qualität der Entrauchung zu beurteilen, ist die Betrachtung der optischen Rauchdichte an ausgewählten Punkten. Dabei kann die optische Rauchdichte (Einheit  $\text{m}^{-1}$ , pro Meter Länge) als ein Wert für die Licht trübende Wirkung des Brandrauchs interpretiert werden.

Bei Werten der optischen Rauchdichte von größer als  $0,3 \text{ m}^{-1}$  kann man davon ausgehen, dass die Akzeptanzwerte der Konzentrationen von toxischen Verbrennungsprodukten im Brandrauch überschritten werden (vgl. Tabelle 4.4).

Die Verläufe der optischen Rauchdichten für den nördlichen Galeriegang in der Ebene 1 in 2,5 m Höhe im nördlichen Galeriegang für die statisch und dynamisch gesteuerten Entrauchungsanlagen sowie für den Fall ohne Wind sind über die Zeit in der Abbildung 5.7 aufgetragen.

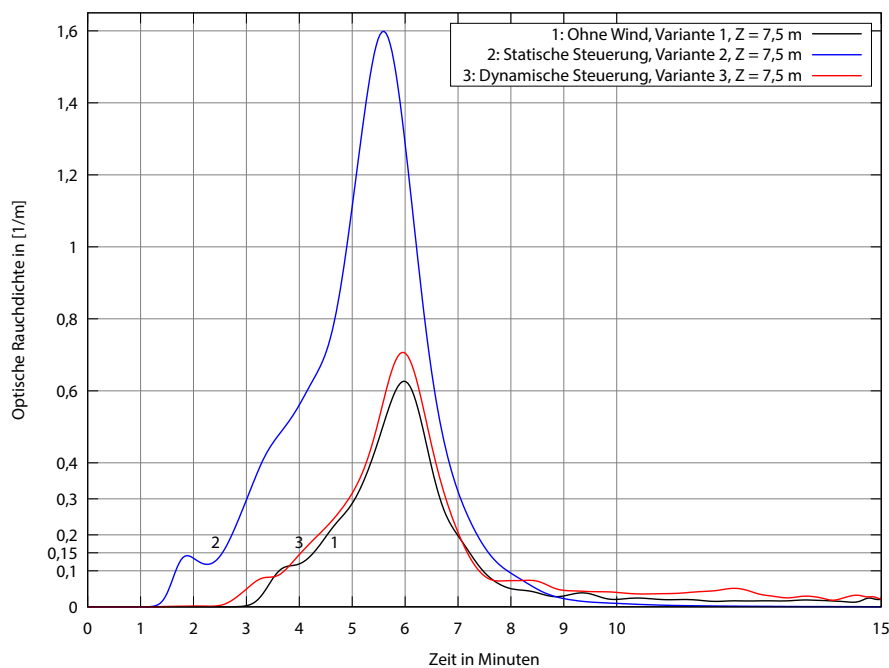


Abbildung 5.7: Optische Rauchdichte über die Zeit im nördlichen Galeriegang in der Ebene 1 (Referenzpunkt)

Die optische Rauchdichte in der zweiten Variante (*statische Steuerung*) steigt im Vergleich zu den Werten der dritten Variante (*dynamische Steuerung*) und der ersten Variante (*ohne Wind*) bereits ab der zweiten Minute signifikant an. Dies korrespondiert mit den zuvor vorgestellten Ergebnissen der Temperaturverläufe. Sowohl die absolute Höhe der optischen Rauchdichte als auch der frühere Zeitpunkt des Beginns der Verrauchung der zweiten Variante (*statische Steuerung*) zeigen Vorteile der dritten Variante (*dynamische Steuerung*), bei der die Nachströmfläche auf der windzugewandten Seite geschlossen bleibt.

Die Ergebnisse der dritten Variante (*dynamische Steuerung*) sind mit denen der ersten Variante (*ohne Wind*) am betrachteten Punkt hinsichtlich der Entrauchungsqualität nahezu identisch,

was zeigt, dass die dynamische Steuerung funktioniert.

In Abbildung 5.8 ist die Verteilung der optischen Rauchdichte in Form einer Isofläche für den Wert  $0,3 \text{ m}^{-1}$  nach 192 Sekunden im Schnitt des jeweiligen Modells dargestellt.

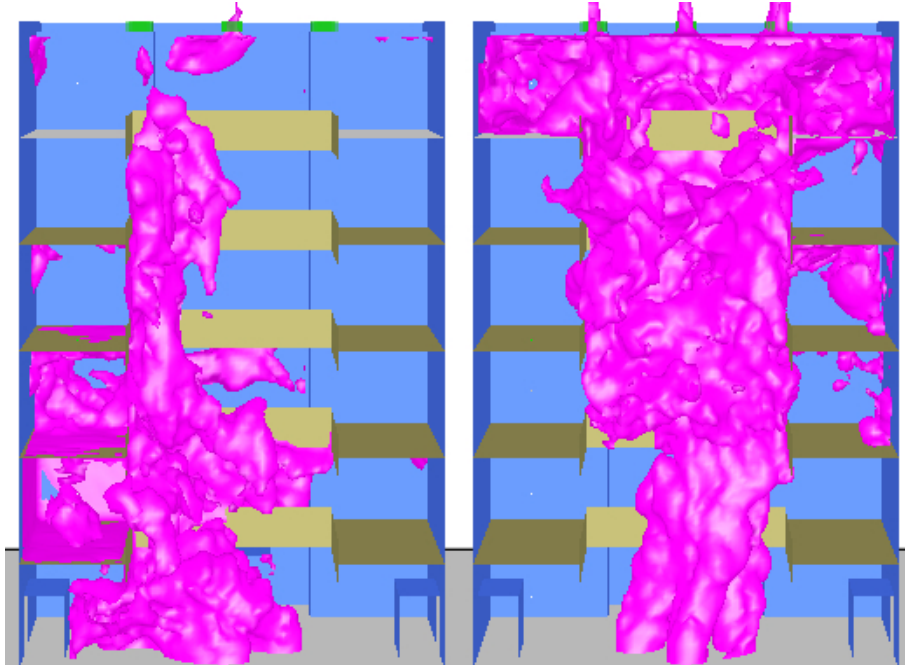


Abbildung 5.8: Verteilung der optischen Rauchdichte ( $0,3$ ) nach 192 Sekunden, Variante 2 (statische Steuerung) (links), Variante 3 (dynamische Steuerung) (rechts)

Der Grenzwert der optischen Rauchdichte liegt in der Abbildung 5.8 bei  $0,3 \text{ m}^{-1}$ . In den pink eingefärbten Bereichen liegt eine Überschreitung dieses Grenzwertes nach 192 Sekunden ab Simulationsbeginn vor. Dieser Zeitpunkt wurde gewählt, da am untersuchten Referenzpunkt (Ebene 1 des nördlichen Galeriegangs) der Grenzwert der optischen Rauchdichte in der Variante 2 (statische Steuerung) erstmals überschritten wird.

Der Abbildung von optischen Rauchdichten der Variante 2 (statische Steuerung) ist zu entnehmen, dass im Vergleich zu der Verteilung der optischen Rauchdichten der Variante 3 (dynamische Steuerung) diese zum einen größere Bereiche in den Galeriegängen einnehmen und zum anderen tiefer liegende Ebenen von der Überschreitung des Grenzwertes betroffen sind. Darüber hinaus ist in der linken Abbildung der Variante 2 eine intensivere Auslenkung der Rauchgassäule festzustellen, während in der Variante 3 die Rauchgassäule in erster Linie das Atrium ausfüllt.



### 5.3.6 Anwendung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen

Nachfolgend wird das Beispiel am Ablaufdiagramm des in Abschnitt 4.3 auf Seite 116 vorgestellten Modells betrachtet. Die Schritte für das aufgeführte Beispiel sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Im Weiteren werden die Punkte der Abbildung mithilfe von Ziffern in runden Klammern erläutert.

- (1) Das in dem Beispiel untersuchte Schutzziel ist die Personensicherheit.
- (2) Die betrachtete gebäudetechnische Brandschutzeinrichtung ist eine natürliche Entrauchungsanlage mit den zugehörigen angesteuerten Nachströmflächen.
- (3) Die statische Steuermatrix des Beispiels sieht in der Simulation 2 das Öffnen aller Entrauchungs- und Nachströmflächen vor. Diese Steuerung berücksichtigt somit keine Störgrößen wie Wind.
- (4) Als ein typisches Brandereignis wird ein Brand im Atrium angenommen. Das Gebäude im Beispiel besteht dabei aus einem einzigen Meldebereich.
- (5) Die Überprüfung der Einhaltung des Schutzziels zeigt, dass unter der Betrachtung der statischen Steuermatrix (vgl. (3)) die Schutzziele zumindest formal eingehalten sind.
- (6) Die Ergebnisse der Simulationen zeigen jedoch, dass sich für die Simulation der natürlichen Entrauchung für die statische Steuermatrix die Störgröße Wind negativ auf die Entrauchungsqualität auswirkt. Der Grund hierfür ist die Verwirbelung der Brandgase und des Rauchs durch die Nachströmfläche auf der windzugewandten Seite. Somit kann der Wind als eine Störgröße identifiziert werden.
- (7) Das dynamische Verhalten von GB im Verbund ist nicht weiter relevant, da im Beispiel lediglich die natürliche Entrauchung betrachtet wird.
- (8) Die Dynamik und die Störgröße Wind sind, wie die Ergebnisse der Simulationen zeigen, für die Entrauchungsqualität relevant.
- (9a) Aus diesem Grund wird eine dynamische und ereignisbezogen-gesteuerte Nachströmung entworfen. Die Ergebnisse der Simulation in Abschnitt 5.3.5 auf Seite 162 zeigen eindeutige Vorteile dieses Ansatzes.
- (10, 11a) Eine Verbesserung der Einhaltung des unter (1) formulierten Schutzziels kann für die Simulation mit gesteuerten Nachströmflächen (Simulation 3) gegenüber der statischen Steuerung (Simulation 2 vgl. (9a)) bestätigt werden. Als eine weitere Option besteht die Möglichkeit, mit weiteren, z. B. baulichen Maßnahmen das System hinsichtlich des Verhaltens der Entrauchung bei Wind zu optimieren.

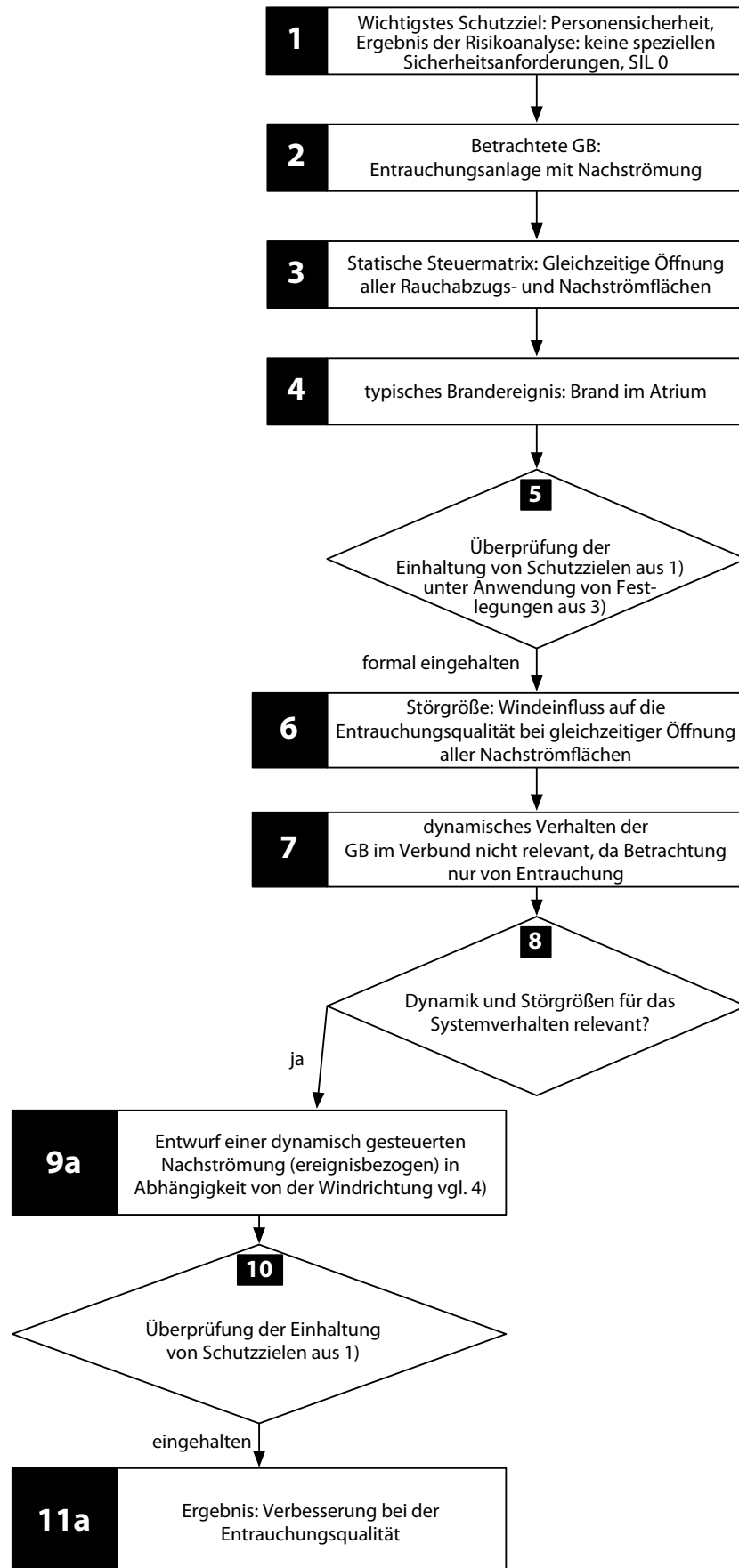


Abbildung 5.9: Ablaufdiagramm der Anwendung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen

### 5.3.7 Anwendung des probabilistischen Modells des individuellen Risikos

Im vorstehenden Abschnitt wurde im Schritt 5 (5) die Überprüfung der Einhaltung des Personenschutzziels vorgenommen (vgl. Abbildung 5.9). Im Folgenden soll die Überprüfung der Personensicherheit nach dem probabilistischen Modell des individuellen Risikos für Varianten mit statischen und dynamischen Ansteuerungen vergleichend dargestellt werden (Details des Modells siehe Abschnitt 4.5 auf Seite 129).

Hierfür werden zunächst die erforderlichen und die verfügbaren Zeiten für die Evakuierung ermittelt. Zunächst wird hierfür angenommen, dass sich auf jeder Ebene des Beispielgebäudes auf einer Fläche von ca. 250 m<sup>2</sup> 300 Personen aufhalten. Dies entspricht einer Personenbelegung von 1,2 Personen je Quadratmeter. Des Weiteren wird angenommen, dass die freie Gehgeschwindigkeit  $v_{frei} = 1,2$  m/s und der spezifische Fluss an den vier Zugangstüren zu den Treppenhäusern je Ebene  $J_s = 1,2$  [1/ms] beträgt (vgl. zu den vereinfachenden Annahmen [63]). Die Breite je Tür wird mit 1 m angenommen. Mit vier Türen ergibt sich eine Gesamtbreite der Ausgänge von  $b = 4$  Metern. Da bei dem Szenario ein Brand in der Mitte des Atriums untersucht wird, stehen alle vier Zugänge zu den Treppenhäusern zur Verfügung. Der durchschnittliche Weg bis zum nächsten Zugang zum Treppenhaus (Annahme sicherer Bereich) beträgt ca. 9,5 Meter. Die Annahmen sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Angenommene Größe	Bezeichnung	Wert	Einheit
Anzahl der Personen je Ebene	$N$	300	[-]
Freie Gehgeschwindigkeit	$v_{frei}$	1,2	[m/s]
Spezifischer Fluss an Türen	$J_s$	1,2	[1/ms]
Gesamtbreite der Ausgänge je Ebene	$b$	4	[m]

Tabelle 5.4: Zusammenstellung der Annahmen des Beispiels 1

Mit den Annahmen ergibt sich:

$$t_{lauf, 1}^* = \frac{L_{max}}{v_{frei}} = \frac{9,5 \text{ m}}{1,2 \text{ m/s}} \approx 8 \text{ s}$$

$$t_{lauf, 2}^* = \frac{N}{b \cdot J_s} = \frac{300 \text{ Personen}}{4 \text{ m} \cdot 1,2 [1/ms]} \approx 63 \text{ s}$$

Wobei  $t_{lauf, 1}^*$  die Zeit bei ungestörter Gehbewegung und  $t_{lauf, 2}^*$  die Bewegungszeit ist, die sich unter Berücksichtigung des spezifischen Flusses an den Türen ergibt. Mit ca. 63 Sekunden wird  $t_{lauf, 2}^*$  maßgebend.

Unter der Annahme von 2 Minuten bis zur Auslösung der Alarmierungseinrichtung und einer Personenreaktionszeit von 30 Sekunden ergibt sich die erforderliche Zeit vom Brandbeginn bis zum Abschluss der Evakuierung (Required Safe Egress Time (RSET)) in der jeweiligen Ebene mit:

$$\text{RSET} = t_b^* + t_r^* = \underbrace{120 + 30}_{t_b^*} + \underbrace{63}_{t_r^*} \approx 210 \text{ s} = 3,5 \text{ min}$$

Zu den verwendeten Bezeichnungen siehe Abschnitt 4.5.3 auf Seite 131 und Abbildung 4.8 auf Seite 133. Die erforderlichen 3,5 Minuten gelten unabhängig davon, ob die statische oder die dynamische Variante der Ansteuerung der Entrauchungsanlage untersucht wird. Für die Ermittlung der für die Evakuierung verfügbaren Zeit (ASET) kann, wie in Abschnitt 4.5.3 festgestellt wurde, die optische Rauchdichte herangezogen werden.

Betrachtet man exemplarisch die Entwicklung der optischen Rauchdichte am nördlichen Galeriegang der ersten Ebene über die Zeit, so kann man die optische Rauchdichte zur besseren Darstellung auf den angenommenen Grenzwert (vgl. Tabelle 4.4 auf Seite 132) der optischen Rauchdichte von 0,3 und die Zeit der Variante mit statischer Steuerung normieren. Dies ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

In Abbildung 5.10 ist zu erkennen, dass der maximal zulässige Wert der optischen Rauchdichte von 0,3 in der Variante mit statischer Steuerung bereits nach etwa 3 Minuten erreicht wird (siehe blaue Kurve mit Ziffer 2 in der Abbildung). Bei der Variante mit dynamischer Steuerung der Entrauchungsanlage ergibt sich gegenüber der statischen Variante eine um ca. 64 % höhere für die Evakuierung verfügbare Zeit von insgesamt etwa 5 Minuten (siehe rote Kurve mit Ziffer 3 in der Abbildung).

In Tabelle 5.5 sind die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung vergleichend dargestellt.

Variante	RSET in Minuten	ASET in Minuten	Kommentar
<b>Variante 1: ohne Wind</b>	3,5	5,1	Nachweis erbracht
<b>Variante 2: statische Steuerung</b>	3,5	3,0	Nachweis <b>nicht</b> erbracht
<b>Variante 3: dynamische Steuerung</b>	3,5	4,9	Nachweis erbracht

*Tabelle 5.5: Vergleich der Ergebnisse von untersuchten Varianten hinsichtlich des individuellen Risikos*

Fallbeispiel 1: Simulation natürlicher Entrauchung einer Halle mit Atrium ohne und mit Berücksichtigung des Windeinflusses

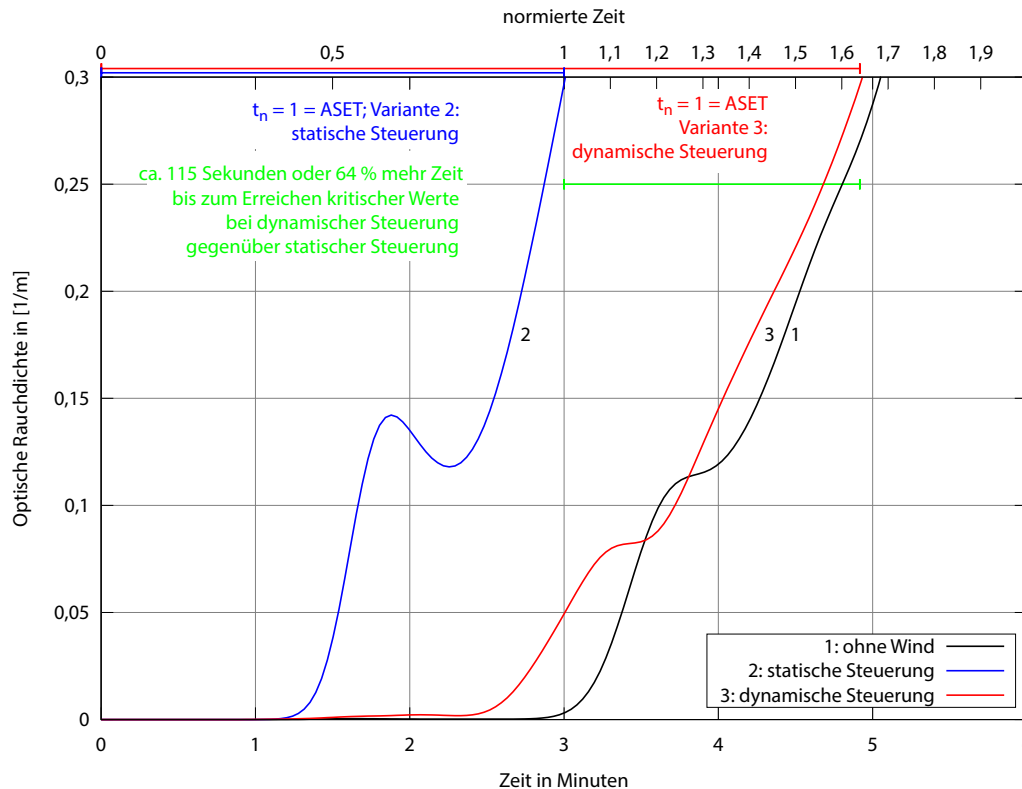


Abbildung 5.10: Optische Rauchdichte pro Weglänge  $D_L$  [1/m] über die Zeit, bezogen auf den Maximalwert 0,3 der statischen Steuerung im nördlichen Galeriegang in der Ebene 1 (Referenzpunkt) für unterschiedliche Steuerungen

Bei der Variante 2 mit der statischen Steuerung der Entrauchungsanlage ist die für die Evakuierung erforderliche Zeit (RSET = 3,5 Minuten) größer als die verfügbare Zeit (ASET = 3,0 Minuten). Somit ist  $RSET > ASET$  und der Nachweis der Personensicherheit kann nicht erbracht werden, da die Personen durch einen unzulässig dichten Rauch mit einer optischen Rauchdichte von über 0,3 fliehen [199]. Es gilt daher für beide Varianten (vgl. Abschnitt 4.5.3 auf Seite 131 und Gleichung 4.4 auf Seite 134):

$$t_{n, statisch}^* = t_{kr}^{OD} = 180 \text{ s und } t_{n, dynamisch}^* = t_{kr}^{OD} = 295 \text{ s}$$

Die Wahrscheinlichkeiten der Evakuierung  $P_E$  berechnen sich mit diesen Werten mit (vgl. Abschnitt 4.5.5 auf Seite 137 und Gleichung 4.10 auf Seite 137):

$$\begin{aligned} & \text{mit } t_{n, \text{statisch}}^* = 180 \text{ s} \\ t_{b, \text{statisch, normiert}} &= \frac{t_b^*}{t_{n, \text{statisch}}^*} = \frac{120 \text{ s} + 30 \text{ s}}{180 \text{ s}} = 0,83 [-] \\ t_{r, \text{statisch, normiert}} &= \frac{t_r^*}{t_{n, \text{statisch}}^*} = \frac{63 \text{ s}}{180 \text{ s}} = 0,35 [-] \\ P_{E, \text{statisch}} &= \frac{0,8 - t_r}{t_b} = \frac{0,8 - 0,35}{0,83} = 0,54 [-] \end{aligned}$$

da hier  $t_r < 0,8$  und  $t_r + t_b > 0,8$  also  $0,35 < 0,8$  und  $0,35 + 0,83 = 1,18 > 0,8$

Für die dynamische Variante ergibt sich die Wahrscheinlichkeit der Evakuierung  $P_E$  mit:

$$\begin{aligned} & \text{mit } t_{n, \text{dynamisch}}^* = 295 \text{ s} \\ t_{b, \text{dynamisch, normiert}} &= \frac{t_b^*}{t_{n, \text{dynamisch}}^*} = \frac{120 \text{ s} + 30 \text{ s}}{295 \text{ s}} = 0,51 [-] \\ t_{r, \text{dynamisch, normiert}} &= \frac{t_r^*}{t_{n, \text{dynamisch}}^*} = \frac{63 \text{ s}}{295 \text{ s}} = 0,21 [-] \\ P_{E, \text{dynamisch}} &= 0,999 [-] \end{aligned}$$

da hier  $t_r + t_b < 0,8$ ;  $0,72 < 0,8$

Somit ergeben sich die individuellen Brandrisiken für die beiden Varianten (vgl. hierzu den Abschnitt 4.5.4 auf Seite 135 und Gleichung 4.9 auf Seite 135) mit:

$$\underbrace{Q_I(t_{n, \text{statisch}})} = \underbrace{Q_B} \cdot (1 - \underbrace{P_L(t_n)}) \cdot \underbrace{P_A} \cdot (1 - \underbrace{P_{E, \text{statisch}}}) \cdot (1 - \underbrace{P_B(t_n)})$$

individuelles Risiko über die normierte Zeit	Häufigkeit der Brandentstehung, angenommen mit $4 \cdot 10^{-2}$	Funktionszuverlässigkeit von automatischen Brandlöschanlagen: gleich Null, da im Beispiel nicht vorhanden	Häufigkeit des Aufenthalts von Personen im Gebäude. Annahme: 18 von 24 Stunden	Wahrscheinlichkeit der Evakuierung, gleich 0,54	Funktionszuverlässigkeit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen, angenommen mit 0,99
--	--	---	--	---	---

$$Q_I(t_{n, \text{statisch}}) = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot \frac{18}{24} \cdot (1 - 0,54) \cdot (1 - 0,99) = 1,38 \cdot 10^{-4} > 1 \cdot 10^{-6}$$

Somit ist der Nachweis gemäß der zu erfüllenden Ungleichung  $Q_I(t_n) \leq Q_I^N$  nicht erfüllt, da  $1,38 \cdot 10^{-4} > 1 \cdot 10^{-6}$  ist (vgl. Abschnitt 4.5.2 auf Seite 130 und Gleichung 4.2 auf Seite 130). Für die dynamische Variante ergibt sich:

$$Q_I(t_{n, \text{dynamisch}}) = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot \frac{18}{24} \cdot (1 - 0,999) \cdot (1 - 0,99) = 3 \cdot 10^{-7} < 1 \cdot 10^{-6}$$

Der Nachweis, der gemäß der zu erfüllenden Ungleichung  $Q_I(t_n) \leq Q_I^N$  zu erbringen ist, ist somit für die dynamische Variante erfüllt, da  $3 \cdot 10^{-7} < 1 \cdot 10^{-6}$  ist.

Die Führung des Nachweises bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen zeigt, dass sich alleine aus der Tatsache der dynamischen Ansteuerung die verfügbare Zeit (ASET) für die Evakuierung gegenüber der statischen Ansteuerung erhöht. Durch diese Erhöhung steigt die Wahrscheinlichkeit der sicheren Evakuierung  $P_E$  bei der dynamischen Variante auf 0,999, wogegen die Wahrscheinlichkeit der sicheren Evakuierung im statischen Fall lediglich 0,54 beträgt.

### 5.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Windeinflüsse können bei bestimmten Konstellationen der Gebäudegeometrie und Nach- und Abströmöffnungen einen wesentlichen Einfluss auf die Entrauchungsqualität im Brandfall haben [49]. Aus diesen Einflüssen resultiert die Notwendigkeit, auf die Gestaltung der Zuluftführung besonders zu achten. Die Ergebnisse zeigen exemplarisch, dass bei Wind und ohne entsprechende Steuerung von Nachströmöffnungen die Entrauchungsqualität abnimmt. Um dem entgegenzuwirken, wird in vorangehenden Untersuchungen gezeigt, dass die dynamische Steuerung von Nachströmöffnungen auf die Entrauchungsqualität einen positiven Einfluss nehmen kann, sofern die Steuerungen auf das dynamische Ereignis Wind entsprechend reagieren.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der simulierten Varianten verdeutlicht, dass die vorgestellte dynamische Steuerung von Nachströmöffnungen, je nach Windrichtung, unter Beibehaltung der übrigen Randbedingungen eine bessere Entrauchungsqualität in zeitlicher und qualitativer Hinsicht bietet (Ziffer 11a in der Abbildung 5.9). Anhand der Anwendung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen aus Abschnitt 4.3 auf Seite 116 kann am vorgestellten Beispiel belegt werden, dass die dynamischen Brandfallsteuerungen das gestellte Schutzziel

der Personensicherheit im Vergleich zu statischen Lösungen besser erreichen und somit Vorteile bieten. Diese Vorteile resultieren aus der Erkenntnis des Erfordernisses der dynamischen Steuerung von GB und der entsprechenden gebäudetechnischen Umsetzung.

## **5.4 Fallbeispiel 2: Unterschiedliche Brandfallsteuerungen von maschinellen Entrauchungsanlagen in einem Verkehrstunnel**

Im zweiten Fallbeispiel wird ein Verkehrstunnel mit unterschiedlich angesteuerten maschinellen Entrauchungsanlagen unter Beibehaltung aller anderen Randbedingungen mithilfe von numerischen Simulationen mit dem Programm FDS untersucht. Die Ergebnisse der zwei untersuchten Varianten mit unterschiedlichen Ansteuerungen werden hinsichtlich der erreichten Entrauchungsqualität analysiert und miteinander verglichen. Ferner wird das Vorgehen im Beispiel mithilfe des in Abschnitt 4.3 auf Seite 116 vorgestellten Modells betrachtet. Anhand des vorgestellten Beispiels wird aufgezeigt, dass dynamische Brandfallsteuerungen gegenüber statischen Steuerungen Vorteile aufweisen können.

### **5.4.1 Aufgabenstellung, Schutzziele und Risikoanalyse**

In Tunnelanlagen des Schienenverkehrs, in denen nicht nur Güter, sondern auch Personen transportiert werden, ist das oberste Schutzziel im Brandfall die Personensicherheit (vgl. hier und weiter Modellüberprüfung: Ziffer 1 in der Abbildung 5.20). In dem untersuchten Beispieeltunnel sind, um dieses Ziel zu erreichen, maschinelle Entrauchungsanlagen (MRA) vorgesehen, die im Brandfall genügend lange eine raucharme Schicht für die Eigenrettung, aber auch für den Feuerwehreinsatz gewährleisten sollen (Ziffer 2 in der Abbildung 5.20). Ein Schnitt des untersuchten Verkehrstunnels ist in der Abbildung 5.11 dargestellt. Weitere Zeichnungen des Tunnels sind dem Anhang A2 auf Seite 239 zu entnehmen.

Die im Beispiel untersuchte Tunnelanlage ist 200 m lang und hat ein quadratisches Profil mit einer Höhe und einer Breite von 4 m. Die Wände und die Decke des Tunnels sind als Stahlbetonbauteile abgebildet.

Die in der Tunneldecke angeordneten Entrauchungsöffnungen der maschinellen Entrauchungsanlagen haben einen quadratischen Querschnitt mit einer Abmessung von 3 m. Diese relativ



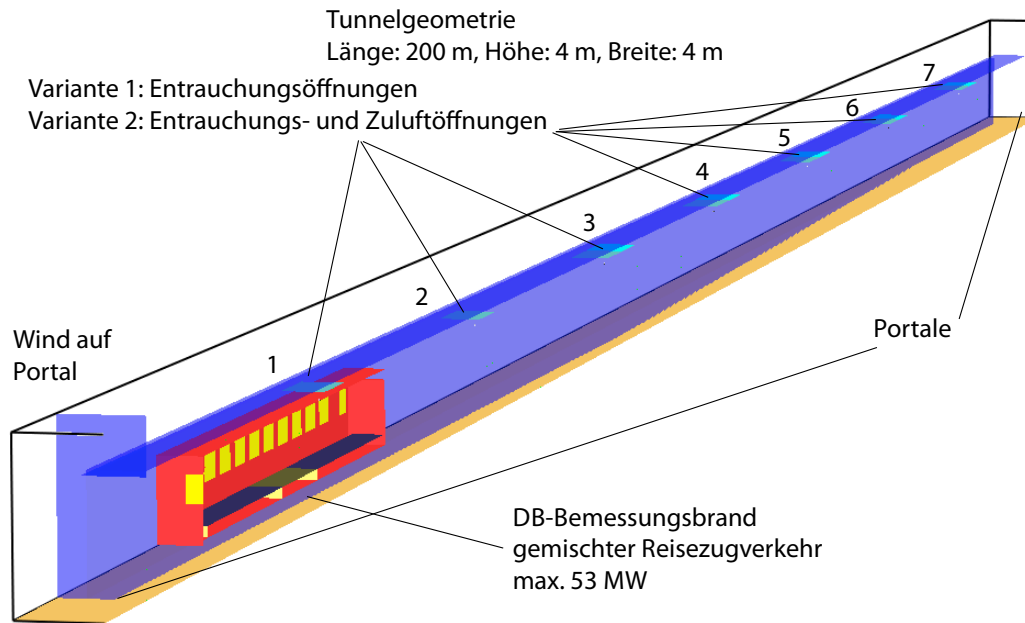


Abbildung 5.11: Schnitt der untersuchten Tunnelanlage

großen Abmessungen von Entrauchungsöffnungen werden gewählt, um die Strömungsgeschwindigkeiten in Simulationen aus Gründen der Optimierung der Rechenzeit an diesen Stellen gering zu halten. Insgesamt gibt es sieben Entrauchungsöffnungen, die bezogen auf die Mittelachse des Tunnels mittig und alle 25 m in der Längs-Achse des Modells angeordnet sind. Die Nummerierung der Entrauchungsöffnungen beginnt mit der Öffnung Nr. 1 über dem Brandherd (Waggon). Die genauen Abmessungen und die Lage der Öffnungen sowie andere Annahmen und Randbedingungen sind der FDS-Eingabedatei im Anhang der Arbeit zu entnehmen. Der Waggonbrand richtet sich nach den Vorgaben des Anwenderhandbuchs „Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr“ der Deutschen Bahn [53].

Das Schutzziel mit der höchsten Priorität ist, wie bereits im ersten Fallbeispiel, die Personensicherheit. Es ist zu gewährleisten, dass im Fall des Brandes eines Zugwaggon die Personen eine ausreichend lange Zeit zur Eigenrettung zur Verfügung haben, bevor die Rauchgase kritische Schadstoffkonzentrationen erreichen oder andere kritische Brandrisikogrößen überschritten werden. Im Beispiel wird angenommen, dass der Zug im Tunnel zum Stehen gebracht wird, so dass die Personen in beide Richtungen im Tunnel fliehen können. Für diesen Fall werden nachfolgend die Ergebnisse der durchgeführten Risikoanalyse mithilfe der Risikograph-Methode in Tabelle 5.6 aufgeführt (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.4 auf Seite 25).

	Auswirkung/ Schadensaus- maß: $C$	Häufigkeit und Aufenthalts- dauer: $F$	Gefahren- abwehr- möglichkeit: $P$	Eintritts- wahrschein- lichkeit des unerwünschten Ereignisses: $W$
<b>Ergeb- nis</b>	$C_D$	$F_A$	$P_B$	$W_1$
<b>Begrün- dung</b>	Mit Tod sehr vieler Personen infolge eines Brandereignisses bei Einwirkung von Brandrisikogrößen im Tunnel ist zu rechnen.	Die Wahrscheinlichkeit eines Zughalts im Tunnelbauwerk ist gering. Es kann daher mit einem seltenen Aufenthalt von vielen Personen gerechnet werden.	Es ist beinahe unmöglich einen Brandfall über den gesamten Gebäudelebenszyklus sicher zu verhindern. Da eine präzise automatische Branddetektion und Brandlokalisierung bei einem sich bewegendem Objekt schwierig sind, sind die Gefahrenabwehrmöglichkeiten sehr eingeschränkt.	Mit nur wenigen Brandereignissen ist zu rechnen.

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Risikoanalyse für das Fallbeispiel 2

In Abbildung 5.12 ist der zur Tabelle zugehörige Risikograph dargestellt. Der für das Beispiel relevante Pfad ist in Rot hervorgehoben.

Bei der Anwendung des Risikographen ist zunächst der Risikoparameter der Auswirkung bzw. des Schadensausmaßes festzulegen. Bei der betrachteten Tunnelanlage ist mit dem Tod sehr vieler Personen infolge eines Brandereignisses bei Einwirkung von Brandrisikogrößen im Tunnel zu rechnen (siehe Parameter  $C_D$  in der Tabelle 5.6 bzw. Abbildung 5.12). Es wird hierbei davon ausgegangen, dass die Personen während eines Brandereignisses aus dem Tunnel fliehen.

Anschließend ist die Häufigkeit der Aufenthaltsdauer im Tunnelbauwerk festzulegen. Die Wahrscheinlichkeit eines Zughalts im Tunnelbauwerk ist gering. Es kann daher mit einem seltenen Aufenthalt von vielen Personen gerechnet werden (siehe Parameter  $F_A$  in der Tabelle 5.6 bzw. Abbildung 5.12).

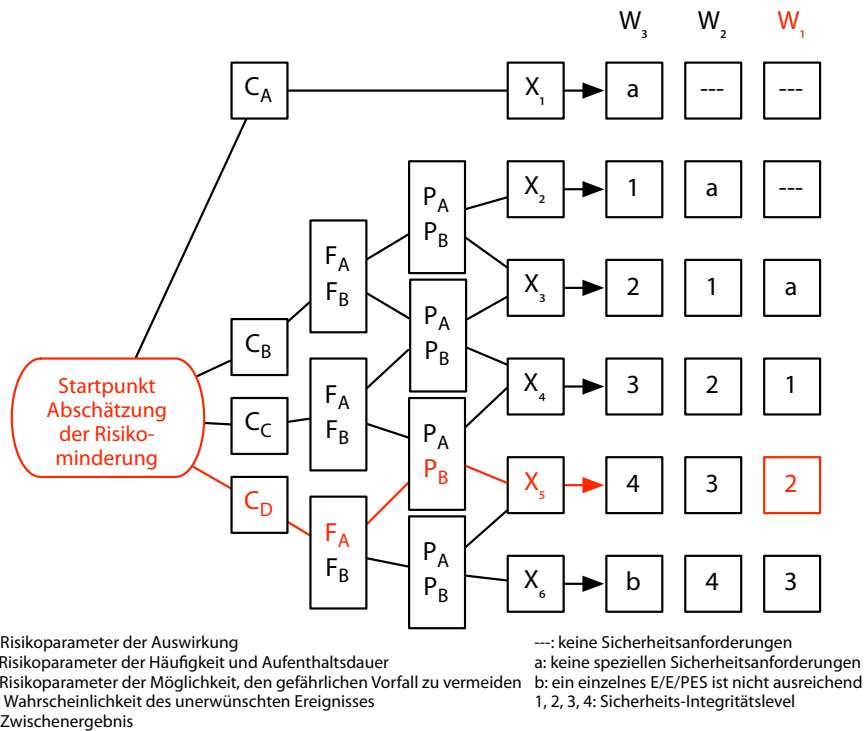


Abbildung 5.12: Risikograph des Fallbeispiels 2

Sodann wird der Risikoparameter  $P$  der Möglichkeit, den Brandfall zu verhindern, betrachtet. Es ist jedoch beinahe unmöglich, einen Brandfall über den gesamten Gebäudelebenszyklus sicher zu verhindern. Da eine präzise automatische Branddetektion und Brandlokalisierung bei einem sich bewegenden Objekt schwierig sind, sind die Gefahrenabwehrmöglichkeiten sehr eingeschränkt (siehe Parameter  $P_B$  in der Tabelle 5.6 bzw. Abbildung 5.12).

Zuletzt wird die Wahrscheinlichkeit  $W$  des Brandereignisses betrachtet. Es ist mit nur wenigen Brandereignissen ist zu rechnen. Der Eintritt von Personenschäden infolge der Brandrisikogrößen wird als sehr gering eingestuft (siehe Parameter  $W_1$  in der Tabelle 5.6 bzw. Abbildung 5.12).

Die durchgeführte Risikoanalyse mithilfe des Risikographen in Anlehnung an IEC 61508 führt dazu, dass an die Sicherheitsfunktion der Entrauchungsanlagen und andere sicherheitsrelevante gebäudetechnische Einrichtungen sowie an die zugehörige Sicherheitsfunktion von Ansteuerungen dieser Anlagen des Beispielgebäudes Sicherheitsanforderungen in SIL 2 zu stellen sind (vgl. hierzu Abschnitte 2.3.4 auf Seite 25, 2.3.5 auf Seite 27 und [188] Teil 5). Anders ausgedrückt müssen alle Maßnahmen der funktionalen Sicherheit ergriffen werden, damit die Sicherheitsfunktionen der GB und der Steuerungen quantifizierbar den Anforderungen des ermittelten Sicherheits-Integritätslevels 2 genügen, um die Risiken zu beherrschen. Die in

dem Beispiel betrachteten Komponenten sind in der Abbildung 5.13 dargestellt (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.4 auf Seite 25).

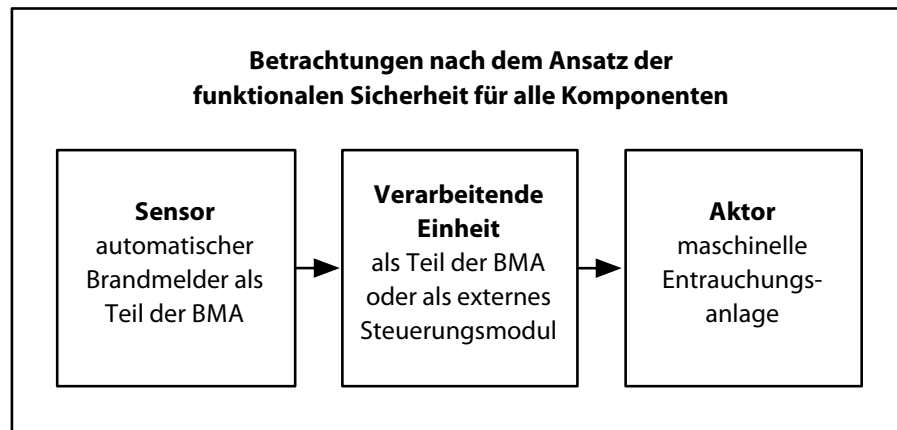


Abbildung 5.13: Komponenten für welche die Anforderung des SIL 2 zu erfüllen sind

Gemäß den Festlegungen der IEC 61508 (vgl. Tabelle 2.2 auf Seite 27) muss bei SIL 2 die mittlere Wahrscheinlichkeit des gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung der Sicherheitsfunktion (Ausfallgrenzwert) zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-2}$  liegen, da man bei dem Beispiel von einer Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate ausgehen kann. Die Verwendung von Hardware mit noch besseren Ausfallgrenzwerten, also etwa mit SIL 3-Hardware, ist dabei problemlos möglich. Die für SIL 2 entsprechend durchzuführenden Maßnahmen sind den Normen zu entnehmen und sollten von fachkundigen Personen geplant und überprüft werden (vgl. hierzu Tabelle 2.3 auf Seite 28 und [188, 195]).

Die im Beispielobjekt zu verwendende sicherheitsgerichtete Hardware muss dabei die Anforderungen des SIL 2 nachweisbar erfüllen. Üblicherweise wird dies mit entsprechenden unabhängigen oder herstellereigenen Zertifikaten erreicht. Die zu der Hardware zugehörige Steuerungssoftware ist nach den in den Normen beschriebenen Methoden zu gestalten. Sowohl die sicherheitsgerichtete Hard- als auch die Software sind, da es sich bei dem Objekt wie bei fast jedem größeren Bauwerk um ein Unikat handelt, objektspezifisch auch im Hinblick auf die Sicherheit von Anlagen zu planen.

## 5.4.2 Randbedingungen und Vorgaben für die Simulationen

In den Simulationen werden zwei unterschiedliche Varianten der Ansteuerung von maschinellen Entrauchungseinrichtungen untersucht. Um eine kompakte Darstellung zu erreichen, werden in den nachfolgenden Abschnitten lediglich die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen präsentiert.

Bei der *ersten Variante* handelt es sich um die Abbildung einer konventionellen, d. h. *statischen Entrauchung* einer Tunnelanlage mit Absaugung der Rauchgase an obersten Stellen und Nachströmung der Zuluft über die beiden Portale (Ziffer 3 in der Abbildung 5.20). Hierbei wird davon ausgegangen, dass die jeweilige Entrauchungseinrichtung in Abhängigkeit vom Detektionsort und möglichst nahe am Brandherd zunächst nur an einer Stelle aktiviert wird, wobei die übrigen unabhängigen Entrauchungseinrichtungen zunächst inaktiv bleiben und erst nach der jeweiligen Detektion bei Rauchausbreitung in weitere Breiche der Tunnelanlage zugeschaltet werden. Alle Entrauchungseinrichtungen werden dabei unabhängig voneinander über die jeweils zugeordneten, sich in der Nähe der Einrichtung befindenden automatischen Brandmelder mit der Kenngröße Rauch aktiviert. Solche und ähnliche Entrauchungseinrichtungen wurden bereits in Tunnelanlagen des Straßen- und des schienengebundenen Verkehrs realisiert (vgl. [17, 87, 130]).

Die *zweite Variante* untersucht *dynamisch angesteuerte Entrauchungseinrichtungen*. Hierbei wird zunächst bei der Detektion in Abhängigkeit vom Ort, wie auch bei der ersten Variante, die nächstgelegene Entrauchungseinrichtung aktiviert. Zusätzlich werden andere, weiter gelegene Einrichtungen mit reduzierter Kapazität auf maschinelle Zuluft geschaltet (Ziffer 6 und 8 in der Abbildung 5.20). Dies soll eine gleichmäßige Nachströmung der Frischluft entgegen der Fluchtrichtung von Personen bei dem längeren Tunnelabschnitt (rechts vom Waggon siehe Abbildung 5.11) gewährleisten und der Störgröße Wind, die in beiden untersuchten Varianten vorhanden ist und mit geringer Stärke an einem der beiden Portale ansteht, entgegenwirken (Ziffer 8 in der Abbildung 5.20). Die Nachströmung von Frischluft entgegen der Fluchtrichtung trägt dabei maßgeblich zur Verringerung von kritischen Rauchgaskonzentrationen im Fluchweg bei.

Die Dynamik der Steuerung von Entrauchungs- und Zuluftanlagen in der zweiten Variante besteht darin, dass sich im Verlauf der Rauchausbreitung die maschinelle Zuluft nach einer lokalen Detektion des Rauchs durch den zugeordneten automatischen Brandmelder in

maschinelle Abluft mit voller Kapazität umkehrt. Ferner wird zwischen den Einrichtungen im Zustand der Absaugung und der Zuluft ein inaktiver Ventilator dynamisch geschaltet, um einen Eintrag der Rauchgase in die untere raucharme Schicht und eine verspätete Detektion weiterer Entrauchungseinrichtungen zu verhindern.

Für beide Simulationen des betrachteten Beispiels wird eine Zellgröße von 20 cm für alle drei Dimensionen gewählt. Der Volumenstrom an allen Entrauchungseinrichtungen in beiden Varianten beträgt  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Volumenstrom an allen Zuluftanlagen der zweiten Variante beträgt  $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Abmessungen sowohl bei Entrauchungs- als auch bei Zuluftanlagen sind quadratisch und betragen 3 m. Die somit entstehenden maximalen Geschwindigkeiten an den Entrauchungseinrichtungen betragen etwa  $1,67 \text{ m/s}$ .

In Abbildung 5.14 ist die Wärmefreisetzung für die beiden simulierten Varianten sowie das Original des Bemessungsbrandes für den gemischten Reisezugverkehr der Deutschen Bahn in Megawatt nach [53] über die Zeit in Minuten aufgetragen (Ziffer 4 in der Abbildung 5.20).

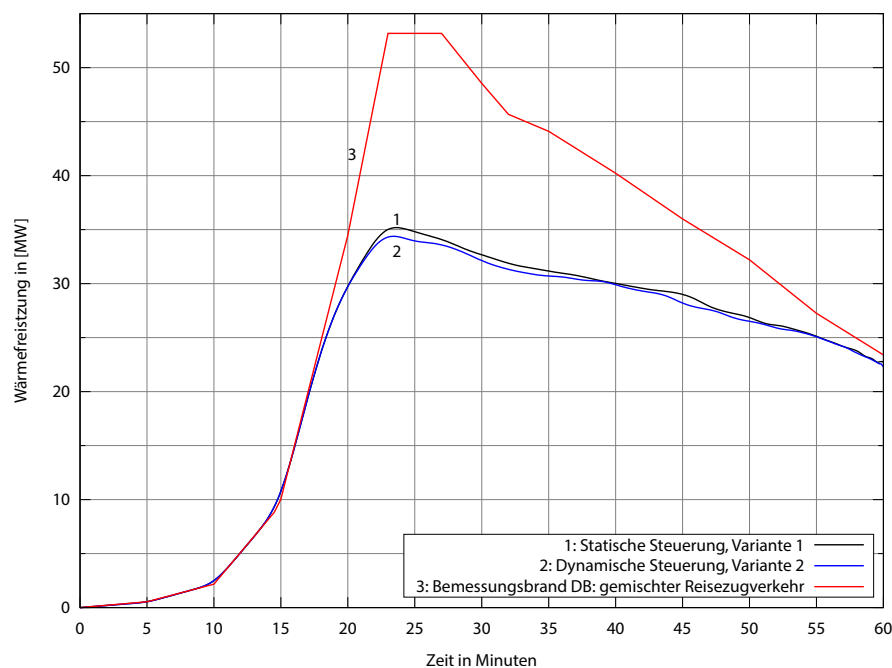


Abbildung 5.14: Wärmefreisetzung über die Zeit

Die Verläufe der jeweiligen Wärmefreisetzung über die Zeit sind bei beiden Simulationsvarianten nahezu identisch und liegen, da keine vollständige Verbrennung im Tunnel aufgrund eines reduzierten Sauerstoffgehalts stattfindet, unterhalb der Bemessungskurve. Dies hat in erster Linie damit zu tun, dass der Brand in einer Tunnelanlage simuliert wird und sich die

Strömungsverhältnisse der Rauchgase, aber auch der Zuluft in entsprechender Weise ausbilden. Die Verläufe werden aus Darstellungs- und Vereinfachungsgründen in dieser und nachfolgenden Abbildungen mit der Bézierkurve im Programm zur grafischen Darstellung (gnuplot) geglättet.

Als Störgröße für beide Simulationsvarianten steht an dem in Bild 5.11 dargestellten linken Portal Wind mit einer Windstärke von etwa 0,5 m/s an (Ziffer 8 in der Abbildung 5.20). Der Zweck des Ansatzes des Windes als Störgröße ist es, eine natürliche Strömung, die sich oftmals in Tunneln einstellt, zu berücksichtigen.

Für die Detektion der Entrauchungseinrichtungen werden automatische Brandmelder der Kenngröße Rauch, die in der Nähe der Absaugstellen angeordnet sind, verwendet, um so auf die Rauchausbreitung entweder *statisch* (Variante 1) oder *dynamisch* (Variante 2) reagieren zu können.

### 5.4.3 Qualitativer Vergleich der Ergebnisse

In der Abbildung 5.15 sind die brandschutztechnischen Interaktionen für die erste (*statische*) und zweite (*dynamische Variante*) über die Zeit aufgetragen. Die Bezeichnungen der Entrauchungs- und der Zulufteinrichtungen entsprechen denen aus der Abbildung 5.11.

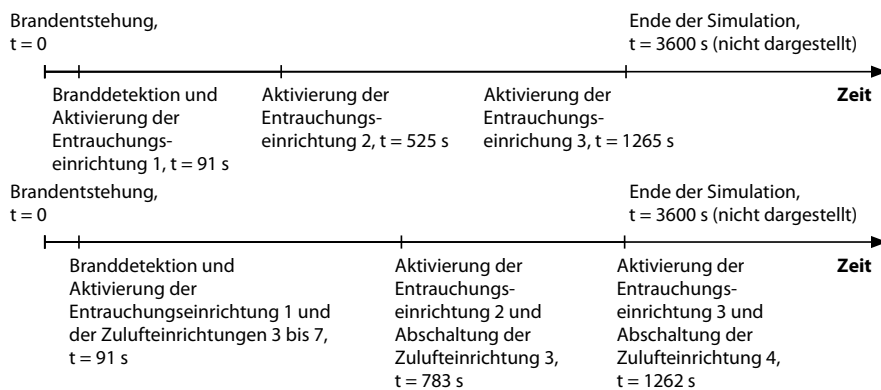


Abbildung 5.15: Brandschutztechnische Interaktionen für die Variante 1: statische Ansteuerung (oben) und Variante 2: dynamische Ansteuerung (unten) über die Zeit

Der Vergleich der Aktivierungszeitpunkte beider Varianten zeigt, dass die zweite Entrauchungseinrichtung im Falle der dynamischen Entrauchung (Variante 2) im Vergleich zur selben Einrichtung in der statischen Entrauchung (Variante 1) ca. 250 Sekunden später auslöst. Dies

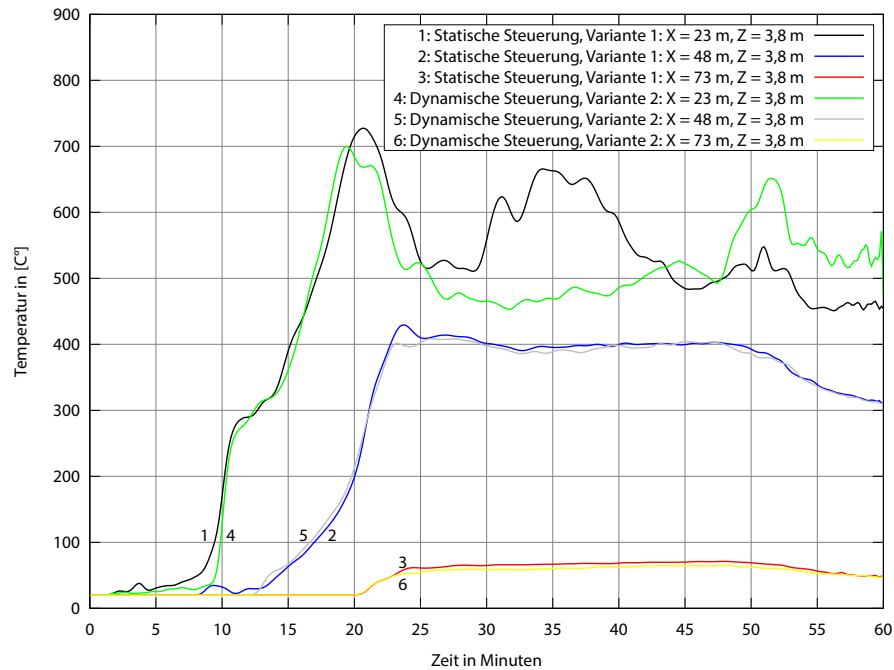


Abbildung 5.16: Temperaturverläufe an ausgewählten Stellen über die Zeit

deutet darauf hin, dass die Entrauchung insgesamt in der dynamischen Variante eine bessere Entrauchungsqualität erreicht.

In der Abbildung 5.16 sind die Temperaturverläufe an ausgewählten Stellen der simulierten Tunnelanlage über die Zeit aufgetragen.

Die Stellen, an denen die Temperatur über die Zeit hinweg bestimmt wurde, sind in einer Höhe von 3,8 m in Tunnellängsrichtung angeordnet. Die Messstelle befindet sich somit 20 cm unterhalb der Tunneldecke.

Der Abstand der ersten Stelle in x-Richtung (Tunnellängsachse) beträgt dabei 23 m und befindet sich über dem Brandherd. Die Temperaturverläufe zeigen für die Stelle  $X = 23$  m einen ähnlichen Verlauf für beide Varianten, wobei die Temperaturen der statischen Variante bis zur zehnten Minute wie auch zwischen der 20. und 43. Minute über denen der zweiten Variante liegen. Nach der 43. Minute kehrt sich dieses Verhältnis um. Die Temperaturverläufe an den Stellen  $X = 48$  m und  $X = 73$  m sind dagegen für beide Varianten jeweils nahezu identisch.

In Abbildung 5.17 ist die Verrauchung für die beiden untersuchten Varianten jeweils nach 11 Minuten ab Simulationsbeginn in Schnitten exemplarisch dargestellt.



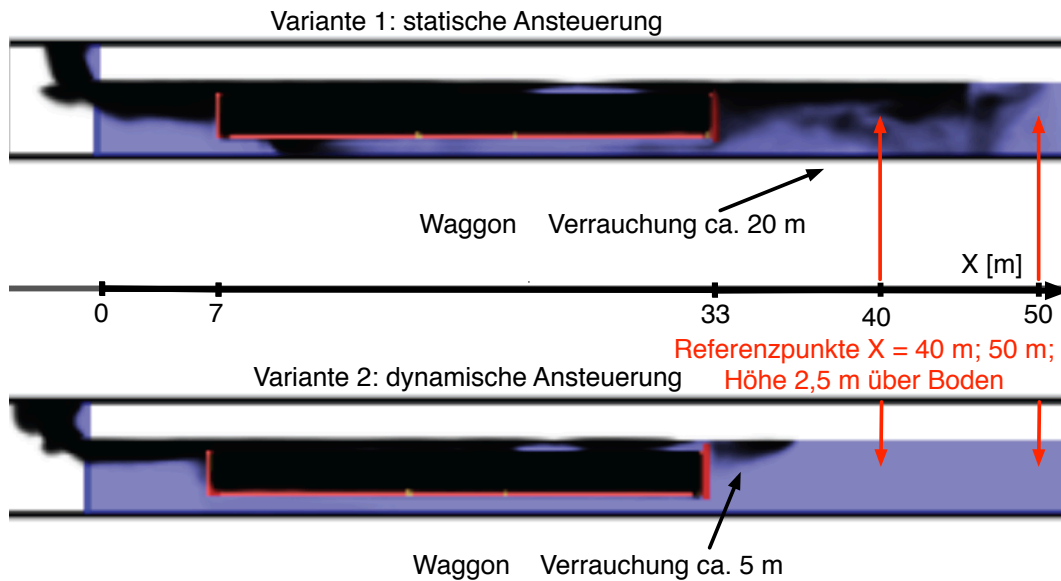


Abbildung 5.17: Verrauchung nach 11 Minuten, Variante 1: statische Ansteuerung (oben), Variante 2: dynamische Ansteuerung (unten); Darstellung der Referenzpunkte

Die visuelle Auswertung der Verrauchung nach 11 Minuten ab Brandbeginn zeigt, dass die Rauchgasschicht bei der dynamischen Variante (unten in der Abbildung) deutlich stabiler ist und die Rauchgase deutlich weniger nach unten abfallen. In der statischen Variante sinken die Rauchgase bis auf den Bodenbereich herab. Die Verrauchung erreicht zu diesem Zeitpunkt bei der Variante 1 eine Ausbreitung rechts neben dem Waggon von ca. 20 m, während bei der Variante 2 die Rauchausbreitung lediglich bei ca. 5 m liegt. Darüber hinaus bildet sich bei der dynamischen Variante eine klare Trennung zwischen der heißen und der raucharmen Schicht heraus.

#### 5.4.4 Quantitativer Vergleich der Ergebnisse

Die Personensicherheit bei den untersuchten Varianten wurde als oberstes Schutzziel definiert. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Entrauchungseinrichtungen über möglichst lange Zeit eine raucharme Schicht mit angemessener Höhe gewährleisten. Zur Beurteilung der Zielerreichung können z. B. die Werte der optischen Rauchdichte und die Höhe der raucharmen Schicht über die Zeit betrachtet werden. In der Abbildung 5.18 sind die Höhen der raucharmen Schicht über die Zeit an ausgewählten Stellen für beide Varianten dargestellt (vgl. Referenzstellen in der Abbildung 5.17).

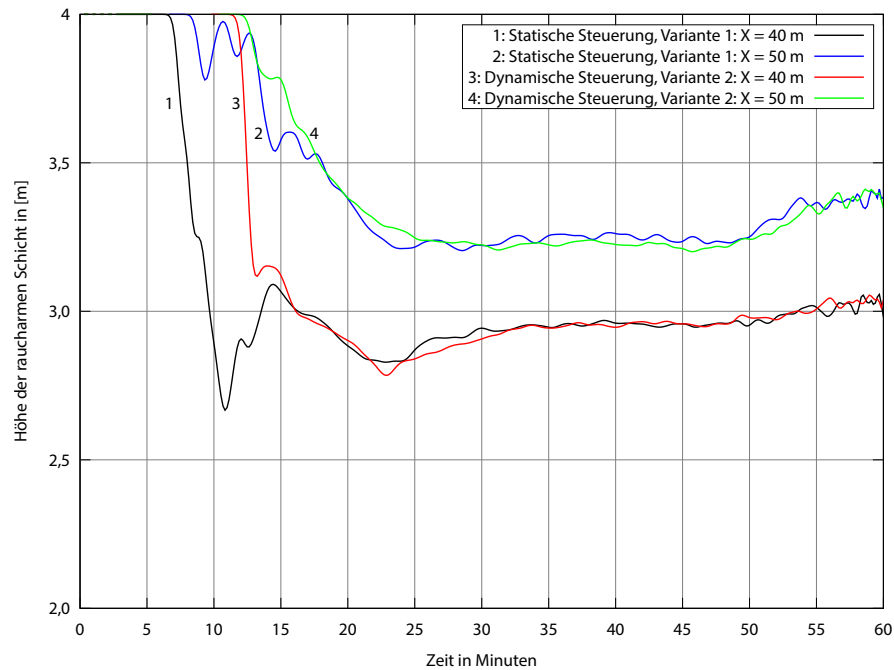


Abbildung 5.18: Höhen der raucharmen Schicht über die Zeit an ausgewählten Stellen (siehe Abbildung 5.17)

Anhand der Darstellung kann festgestellt werden, dass sich die Höhe der raucharmen Schicht bei der statischen Variante an der Stelle  $X = 40$  m in der Zeit zwischen den Minuten 6 und 15 im Vergleich zu der dynamischen Variante verringert, sodass die Rauchgase in dieser Zeitspanne deutlich weiter nach unten absinken. Auch an der Stelle  $X = 50$  m beginnt das Absinken der Rauchgase bei der statischen Variante etwa 5 Minuten früher.

Ähnliche Ergebnisse liefert die Auswertung der optischen Rauchdichte über die Zeit an ausgewählten Stellen. Die Verläufe der optischen Rauchdichten pro Weglänge  $D_L$  [1/m] über die Zeit sind in der Abbildung 5.19 aufgetragen.

Die optische Rauchdichte  $D_L$  in der ersten Variante ist über die Zeit und an den ausgewählten Referenzpunkten betrachtet im Vergleich zu den Werten der zweiten Variante höher. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen der zuvor vorgestellten Höhe der raucharmen Schicht und den Temperaturverläufen. Bei der Variante 1 (statische Steuerung) ist zudem eine Erhöhung der optischen Rauchdichte bei der weiter entfernten Stelle (Ziffer 2 gegenüber Ziffer 1), etwa ab der 22. Minute zu beobachten. Dies deutet auf eine ungleichmäßige und turbulente Rauchausbreitung in der statischen Variante hin. Bei der dynamischen Steuerung kann dieses nachteilige Verhalten der Verrauchung nicht festgestellt werden. Sowohl die absolute Höhe der

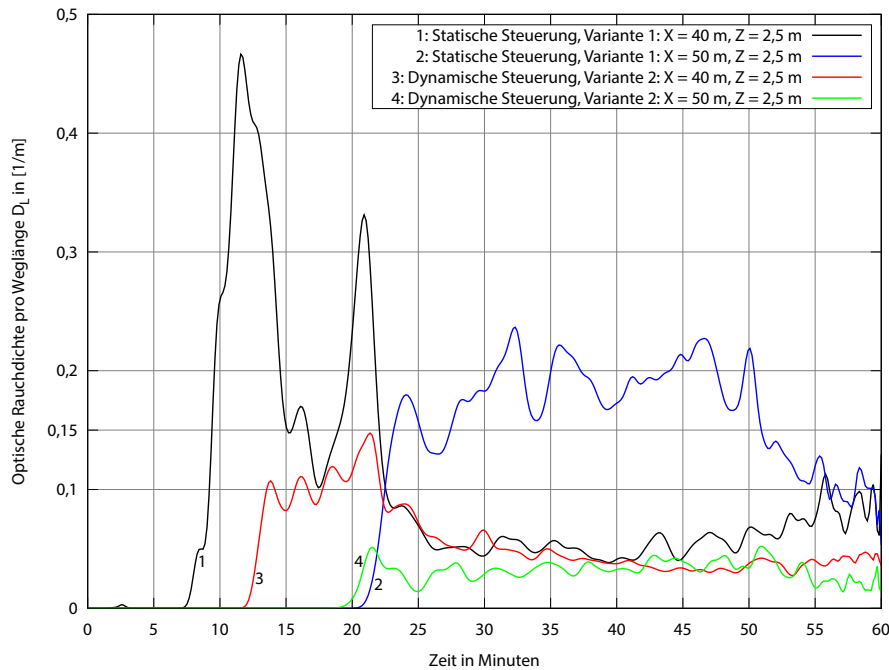


Abbildung 5.19: Optische Rauchdichte pro Weglänge  $D_L$  [1/m] über die Zeit an ausgewählten Referenzpunkten (siehe Abbildung 5.17)

optischen Rauchdichte als auch der frühere Zeitpunkt des Beginns der Verrauchung an den betrachteten Stellen zeigen Vorteile der dynamischen Entrauchung gegenüber der statischen Variante (Ziffer 10 in der Abbildung 5.20).

### 5.4.5 Anwendung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen

Nachfolgend werden die zuvor dargestellten Schritte des Beispiels am Ablaufdiagramm des in Abschnitt 4.3 auf Seite 116 vorgestellten Modells dargestellt. Die Schritte für das aufgeführte Beispiel sind in Abbildung 5.20 dargestellt.

- (1) Das in dem Beispiel betrachtete Schutzziel ist die Personensicherheit.
- (2) Die betrachtete GB ist die unterschiedlich angesteuerte maschinelle Entrauchungsanlage.
- (3) Die statische Brandfallsteuerung sieht im Beispiel vor, dass die an den Brandherd nächstgelegenen Entrauchungsanlagen aktiviert werden.
- (4) Als ein typisches Brandereignis wird der DB-Bemessungsbrand für den gemischten Reisezugverkehr zugrunde gelegt [53].

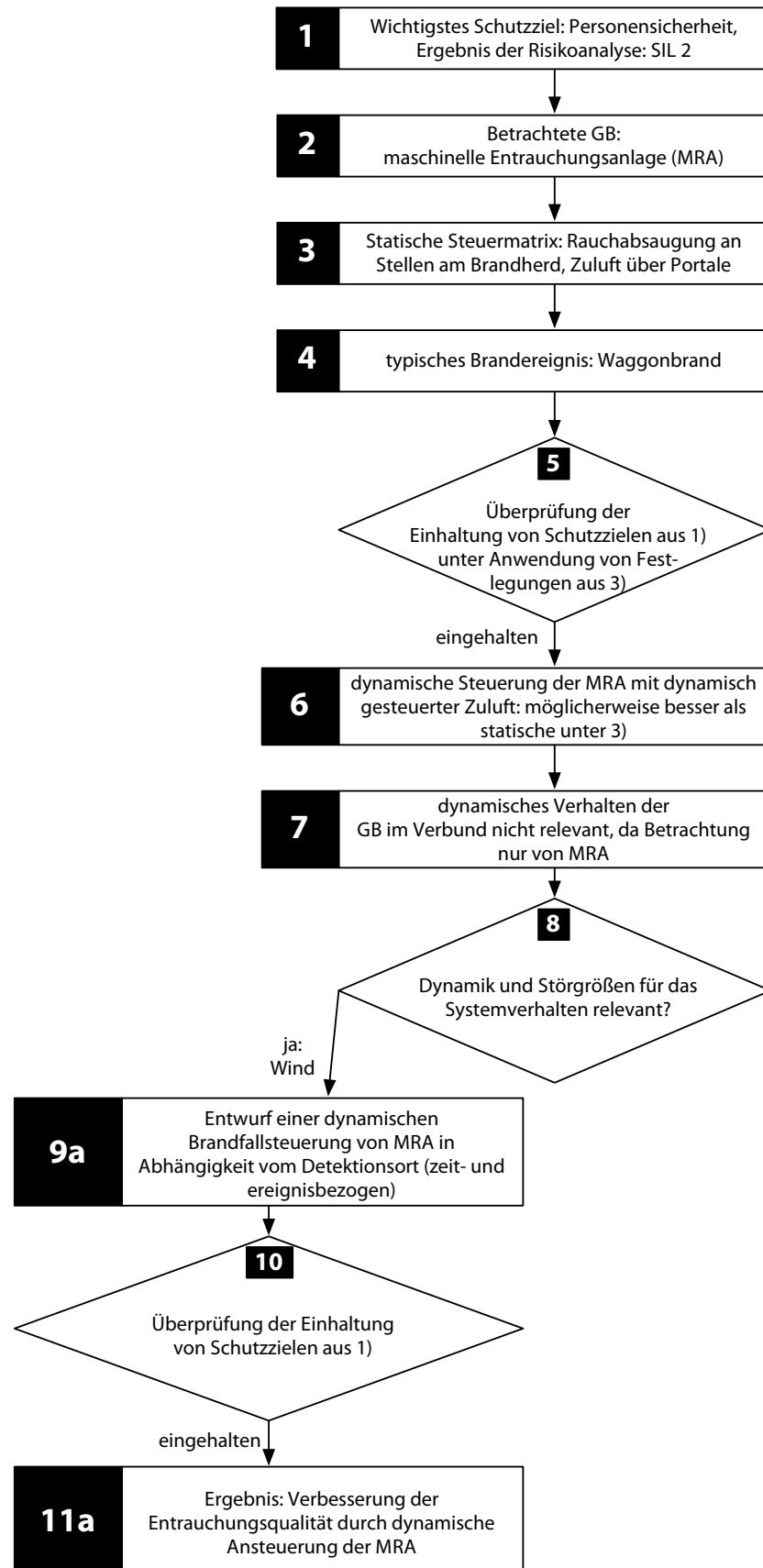


Abbildung 5.20: Ablaufdiagramm der Anwendung des Modells

- (5) Die in dem Beispiel für die statische Variante festgelegte Steuermatrix erfüllt formell die Einhaltung des unter (1) festgelegten Schutzziels der Personensicherheit.
- (6) Aufgrund der in der Regel nur geringfügig über dem Soll bemessenen Entrauchungskapazität von Entrauchungsanlagen kann es sinnvoller sein, die Entrauchungskapazität nicht einmalig und statisch, sondern angepasst an das Brandereignis und den Brandverlauf dynamisch zu steuern.
- (7) Weitere gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen werden im Beispiel nicht betrachtet.
- (8) Die Dynamik bei dem Tunnelbrand des Beispiels ist aufgrund der schnellen Verrauchung und des an einem Portal anstehenden Windes relevant.
- (9a) Die dynamische Brandfallsteuerung der Entrauchungsanlagen wurde im Abschnitt 5.4.2 auf Seite 177 vorgestellt. Im Wesentlichen handelt es sich bei dieser Steuerung um eine kombinierte zeit- und ereignisbezogene Brandfallsteuerung. Der Ereignisbezug rührt zum einen aus der Tatsache, dass der Waggonbrand an vielen Orten im Tunnelbauwerk stattfinden kann, und zum anderen daraus, dass die dynamische Brandfallsteuerung in Abhängigkeit vom Detektionsort und der Dynamik der Rauchausbreitung stattfindet.
- (10, 11a) Die Schutzziele bei Umsetzung der dynamischen Brandfallsteuerungen werden eingehalten. Darüber hinaus belegen die Analyse und die Gegenüberstellung der Ergebnisse, dass die in dem Beispiel gezeigte dynamische Brandfallsteuerung höherwertige Entrauchungsqualität im Vergleich zur statischen Steuerung bietet.

#### **5.4.6 Anwendung des probabilistischen Modells des individuellen Risikos**

Im vorherigen Abschnitt wurde im Schritt (5) die Überprüfung der Einhaltung des Personenschutzziels vorgenommen (vgl. Abbildung 5.20). Im Folgenden soll die Überprüfung der Personensicherheit nach dem probabilistischen Modell des individuellen Risikos für Varianten mit statischen und dynamischen Ansteuerungen vergleichend dargestellt werden (Details des Modells siehe Abschnitt 4.5 auf Seite 129).

Hierfür werden die erforderliche und die verfügbare Zeit für die Evakuierung ermittelt. Zunächst wird hierfür angenommen, dass ein Teil der Personen mit einer reduzierten freien Gehgeschwindigkeit von  $v_{frei} = 0,6 \text{ m/s}$  (vgl. zu den vereinfachenden Annahmen [63]) ca. 180 m im Tunnel bis zum rechten Portal zurücklegen muss. Mit dieser Annahme ergibt sich

für die Bewegungszeit:

$$t_r^* = \frac{L_{max}}{v_{frei}} = \frac{180 \text{ m}}{0,6 \text{ m/s}} = 300 \text{ s} = 5 \text{ min}$$

Unter der Annahme einer Alarmierungszeit durch das Zugpersonal von 60 Sekunden sowie einer Reaktionszeit von 30 Sekunden ergibt sich die erforderliche Zeit vom Brandbeginn bis zum Abschluss der Evakuierung am rechten Portal mit:

$$\text{RSET} = t_b^* + t_r^* = \underbrace{60 + 30}_{t_b^*} + \underbrace{300}_{t_r^*} = 390 \text{ s} = 6,5 \text{ min}$$

Zu den verwendeten Bezeichnungen siehe Abschnitt 4.5.3 auf Seite 131 und Abbildung 4.8 auf Seite 133. Hierbei wird vereinfacht angenommen, dass keine weiteren Verzögerungen in Form von Stauwirkungen auftreten. Die erforderlichen 6,5 Minuten gelten unabhängig davon, ob die statische oder die dynamische Variante der Ansteuerung der Entrauchungsanlage untersucht wird.

Für die Ermittlung der für die Evakuierung verfügbaren Zeit kann oftmals vereinfachend die optische Rauchdichte pro Weglänge  $D_L$  herangezogen werden, da diese Größe viele andere kritische Brandrisikogrößen hinreichend genau abbildet (vgl. Abschnitt 4.5.3 auf Seite 131).

Betrachtet man exemplarisch die Entwicklung der optischen Rauchdichte 40 Meter vom linken Tunnelportal in einer Höhe von 2,5 Metern, so wird die Überschreitung des Wertes für die optische Rauchdichte (0,3) in der Variante mit der statischen Ansteuerung nach etwa 11 Minuten (ASET) erreicht (vgl. hierzu Abbildung 5.19).

Bei der dynamischen Ansteuerung werden an derselben Stelle die kritischen Werte zu keinem Zeitpunkt überschritten. Es gilt daher für die normierte Zeit der beiden Varianten in ausreichender Entfernung von der Brandquelle (vgl. Abschnitt 4.5.5 auf Seite 137 und Gleichung 4.10):

$$t_{n, \text{statisch}}^* = t_{kr}^{OD} = 660 \text{ s} = 11 \text{ min}$$
$$t_{n, \text{dynamisch}}^* = t_{kr}^{OD} = \infty$$

Die Wahrscheinlichkeiten der Evakuierung  $P_E$  berechnen sich mit diesen Werten zu (vgl. hierzu

den Abschnitt 4.5.5 auf Seite 137 und Gleichungen 4.7 und 4.10 (Zeile 2)):

$$\begin{aligned} & \text{mit } t_{n, \text{statisch}}^* = 660 \text{ s} \\ t_{b, \text{statisch, normiert}} &= \frac{t_b^*}{t_{n, \text{statisch}}^*} = \frac{60 \text{ s} + 30 \text{ s}}{660 \text{ s}} \approx 0,136 \\ t_{r, \text{statisch, normiert}} &= \frac{t_r^*}{t_{n, \text{statisch}}^*} = \frac{300 \text{ s}}{660 \text{ s}} \approx 0,455 \\ P_{E, \text{statisch}} &= 0,999 \end{aligned}$$

$$\text{da } t_r + t_b < 0,8; 0,455 + 0,136 = 0,591 < 0,8$$

Für die dynamische Variante ergibt sich die Wahrscheinlichkeit der Evakuierung  $P_E$  ebenfalls nach Gleichung 4.10 (Zeile 2) zu:

$$P_{E, \text{dynamisch}} = 0,999$$

Dieser Wert wird erreicht, da gemäß den Ergebnissen der Simulationen die kritischen Brandrisikogrößen aufgrund von guten Leistungen der dynamisch gesteuerten Entrauchungsanlage zu keinem Zeitpunkt in einer ausreichenden Entfernung von der Brandquelle überschritten werden.

Somit ergeben sich die individuellen Brandrisiken für die beiden Varianten (vgl. hierzu den Abschnitt 4.5.4 auf Seite 135 und Gleichung 4.9) mit:

$$Q_I(t_n) = \underbrace{Q_B}_{\text{Häufigkeit der Brandentstehung, angenommen mit } 4 \cdot 10^{-2}} \cdot \underbrace{(1 - P_L(t_n))}_{\text{Funktionszuverlässigkeit von automatischen Brandlöschanlagen: gleich Null, da im Beispiel nicht vorhanden}} \cdot \underbrace{P_A}_{\text{Häufigkeit des Aufenthalts von Personen im Tunnel: 24 von 24 Stunden, da gemäß der Risikoanalyse gerade der Halt des Zuges im Tunnel betrachtet wird}} \cdot \underbrace{(1 - P_E)}_{\text{Wahrscheinlichkeit der Evakuierung, gleich 0,999}} \cdot \underbrace{(1 - P_B(t_n))}_{\text{Funktionszuverlässigkeit von GB, aufgrund von SIL 2 zwischen 0,99 und 0,999 siehe Ergebnisse der Risikoanalyse und Abbildung 5.12}}$$

$$Q_I(t_n) = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot \frac{24}{24} \cdot (1 - 0,999) \cdot (1 - 0,99) = 0,4 \cdot 10^{-6} < 1 \cdot 10^{-6}$$

Somit ist der Nachweis gemäß der zu erfüllenden Ungleichung  $Q_I(t_n) \leq Q_I^N$  für beide Varianten erfüllt.

Bemerkenswert ist, dass im Falle der üblicherweise anzunehmenden Werte für die Funktionszuverlässigkeit des effektiven Betriebs von GB ( $P_B(t_n)$ ) von 0,9, also bei Brandmelde- und Entrauchungsanlagen, die keine erhöhten Anforderungen an die Sicherheitsfunktion im Sinne der funktionalen Sicherheit erfüllen, der Nachweis nicht gelingen würde, da:

$$Q_I(t_n) = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot \frac{24}{24} \cdot (1 - 0,999) \cdot (1 - 0,9) = 4 \cdot 10^{-6} > 1 \cdot 10^{-6}$$

Hieraus erkennt man die Wichtigkeit und die Bedeutung von quantifizierbar sicheren gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Anforderungsfall.

Der Term  $P_B(t_n)$  setzt sich zusammen aus (vgl. hierzu Abschnitt 4.5.6 auf Seite 140 und Gleichung 4.11):

$$\underbrace{P_B(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{von gebäude-} \\ \text{technischen} \\ \text{Brandschutz-} \\ \text{einrichtungen}}} = 1 - \left( 1 - \underbrace{P_M(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{der Brand-} \\ \text{meldeanlage}}} \cdot \underbrace{P_{ELA}(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{der Alarmie-} \\ \text{rungsanlage}}} \right) \cdot \left( 1 - \underbrace{P_M(t_n)}_{\substack{\text{wie zuvor}}} \cdot \underbrace{P_{ENT}(t_n)}_{\substack{\text{Funktions-} \\ \text{zuverlässigkeit} \\ \text{der Entrau-} \\ \text{chungsanlage}}} \right)$$

Auf das Beispiel bezogen reduziert sich der Term, da nur die Brandmelde- und die Entrauchungsanlage betrachtet werden, zu:

$$P_B(t_n) = 1 - (1 - P_M(t_n) \cdot P_{ENT}(t_n))$$

Trotz der Einfachheit des Beispiels erkennt man die Abhängigkeiten beider Anlagen voneinander. Damit die Entrauchung im Brandfall sicher funktioniert, müssen sowohl die Brandmeldeanlage als auch die Entrauchungsanlage ihren jeweiligen Beitrag im Verbund zur Gesamtsicherheit im Anforderungsfall leisten, um die erforderliche Gesamtfunktionszuverlässigkeit von GB zu gewährleisten. Man kann beispielsweise annehmen, die Wahrscheinlichkeit der effektiven Auslösung der Brandmeldeanlage läge bei 0,99, da es sich um eine sehr zuverlässige und gut gewartete Anlage handelt. Nimmt man weiterhin an, die Funktionszuverlässigkeit der Entrauchungsanlage läge über die normierte Zeit bei nur 0,7, da es sich um eine ungenügend gewartete Anlage handelt, so resultiert daraus für die Funktionszuverlässigkeit insgesamt:

$$P_B(t_n) = 1 - (1 - P_M(t_n) \cdot P_{ENT}(t_n)) = 1 - (1 - 0,99 \cdot 0,7) = 0,693$$



Dies ist ein vergleichsweise schlechter Gesamtwert, der verdeutlicht, dass die Entrauchungsanlage mit dem niedrigeren Wert die kombinierte Funktionszuverlässigkeit beider Anlagen sehr negativ beeinflusst. Würde dagegen die Funktionszuverlässigkeit der Entrauchungsanlage in Anlehnung an die Sicherheitsfunktion der Brandmeldeanlage die Mindestanforderungen aus der durchgeführten Risikoanalyse (SIL 2) erfüllen, so läge diese bei mindestens  $P_{ENT}(t_n) = 1 - 10^{-2} = 0,99$ . Die Funktionszuverlässigkeit wäre in diesem Fall:

$$P_B(t_n) = 1 - (1 - 0,99 \cdot 0,99) = 0,98$$

Der Wert in dieser Größenordnung ist, wie bei der Nachweisführung gezeigt, auch erforderlich, um im Modell des individuellen Risikos den geforderten Grenzwert von  $1 \cdot 10^{-6}$  einzuhalten. Dies verdeutlicht die Bedeutung der quantifizierbaren Funktionszuverlässigkeit gebäudetechnischer Einrichtungen für die hier untersuchte Personensicherheit.

#### **5.4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden simulierten Varianten verdeutlicht, dass die vorgestellte dynamische Steuerung von Entrauchungseinrichtungen unter Beibehaltung der übrigen Randbedingungen eine bessere Entrauchungsqualität in zeitlicher und qualitativer Hinsicht bietet (Ziffer 11a in der Abbildung 5.20). Anhand der Anwendung der Modelle kann am vorgestellten Beispiel belegt werden, dass die dynamischen Brandfallsteuerungen das gestellte Schutzziel der Personensicherheit im Vergleich zu statischen Lösungen besser erreichen und somit Vorteile bieten.

Die Betrachtungen des Beispiels nach dem probabilistischen Modell des individuellen Risikos verdeutlichen die Wichtigkeit der quantifizierbaren Funktionszuverlässigkeit gebäudetechnischer Einrichtungen im Brandfall.

## 5.5 Zusammenfassung

Anhand der Fallbeispiele konnte gezeigt werden, dass das zuvor erarbeitete Modell dynamischer Brandfallsteuerungen aus Abschnitt 4.3 auf Seite 116 umgesetzt werden kann, einen quantifizierbaren Zugewinn an Sicherheit bringt und die Schutzziele durch die Anwendung des Modells bei entsprechender anlagentechnischer Umsetzung besser erreicht werden. Die Fallbeispiele belegen außerdem, dass dynamische Brandfallsteuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen in der Praxis oftmals ergänzend zu den bereits vorhandenen statischen Steuerungen umgesetzt werden können, indem entsprechende Steuerungen bei zum Teil gleichbleibender Anlagentechnik implementiert werden.

Mithilfe des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen ist es daher mit geringem Aufwand möglich, die Notwendigkeit von dynamischen Brandfallsteuerungen zu identifizieren und anhand zuvor festgelegter Schutzziele entsprechende Steuerungen zu planen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Um dem dynamischen Phänomen des Brandes entgegenzuwirken, wurden bereits im Altertum bauliche und organisatorisch-abwehrende Maßnahmen, aber auch technische Vorrichtungen eingesetzt [48]. Die technischen Vorrichtungen wurden über die Zeit für spezielle Zwecke des Brandschutzes weiterentwickelt und ausdifferenziert.

Ein wichtiger Bestandteil moderner technischer Vorrichtungen des Brandschutzes sind gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen, die im Brandfall gesteuert werden und zusammenwirken. Trotz der stetigen Entwicklung dieser Einrichtungen sind deren Steuerungen jedoch bis heute überwiegend statisch. Die statische Eigenschaft der Steuerung gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen liegt zum einen darin, dass die Steuerung der Anlagen meistens nur einmal während eines Brandereignisses stattfindet, und zum anderen darin, dass die Anlagen in dem Zustand nach einmaliger Ansteuerung verbleiben, bis etwa ein manueller Eingriff erfolgt bzw. die Einrichtung versagt. Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen reagieren somit nicht immer adäquat auf das dynamische Brandgeschehen.

Die Arbeit zeigt Wege, wie die Diskrepanz zwischen den bislang überwiegend statischen Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und dem dynamischen Phänomen des Brandereignisses beseitigt werden kann.

Hierfür wurden zunächst in der Einleitung in Abschnitt 1 die Aufgabenstellung, die Abgrenzung des Themas sowie die Methodik und der Aufbau der Arbeit vorgestellt. Des Weiteren wurden in Abschnitt 2 Lösungsansätze im Umgang mit sicherheitsgerichteten Systemen und sicherheitsrelevanten Anlagen außerhalb des Brandschutzes vorgestellt. Der Abschnitt behandelt zunächst Eigenschaften komplexer Systeme sowie die Grundlagen dynamischer Steuerungen technischer Anlagen. Sodann wurde der Ansatz der funktionalen Sicherheit vorgestellt, der es ermöglicht, sicherheitsrelevante technische Einrichtungen ganzheitlich im Lebenszyklus zu betrachten, um das angestrebte Sicherheitsniveau quantitativ belegbar und mit vorher festgelegter Wahrscheinlichkeit zu erreichen. Es wurde festgestellt, dass die Betrachtung von gebäudetechnischen

nischen Brandschutzeinrichtungen mithilfe der Methoden der funktionalen Sicherheit nicht nur, wie in anderen Branchen mit sicherheitsrelevanten Anlagen, möglich ist, sondern darüber hinaus Vorteile bietet. Die Vorteile sind der quantifizierbare Nachweis des angestrebten Sicherheitsniveaus gebäudetechnischer Einrichtungen über den Lebenszyklus des Gebäudes hinweg und damit ein angemessener Beitrag zur Gesamtsicherheit nach heutigem Stand der Technik.

In Abschnitt 3 wurden gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen und andere im Brandfall wichtige und relevante gebäudetechnische Anlagen und Einrichtungen in das Konzept des ganzheitlichen Brandschutzes eingeordnet und systematisch dargestellt. Ferner wurden diese Einrichtungen einzeln auf die Eignung zur dynamischen Steuerbarkeit untersucht. Des Weiteren wurden Anforderungen an gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln formuliert und deren Sicherheit untersucht. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde die Gestaltung von Brandfallsteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen nach dem heutigen Stand der Technik ausführlich erläutert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die wichtigsten gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen für dynamische Ansteuerungen eignen.

Aus den Erkenntnissen zu einzelnen gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen wurde in Abschnitt 4, nach einer allgemeinen Einführung in dynamische Systeme, das Modell dynamischer Brandfallsteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen erarbeitet und hinsichtlich der Chancen und Risiken bewertet. Das Modell ermöglicht es, mithilfe des Ablaufdiagramms und anhand von Schutzziele sowohl für Neu- als auch für Bestandsbauten das Zusammenwirken von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und die zugehörigen Steuerungen unter der Berücksichtigung der Dynamik systematisch zu planen und anschaulich zu visualisieren. Die Bewertung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen zeigt Vorteile gegenüber dem derzeit üblichen Weg der Planung von Brandfallsteuerungen, der überwiegend zu statischen Brandfallsteuerungen führt.

Um die Einhaltung der Schutzziele zu überprüfen, wurde in Abschnitt 4 ein probabilistisches Modell des individuellen Risikos unter Berücksichtigung von Branddynamik, Steuerungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen entwickelt. Dieses Modell fügt sich in das Modell dynamischer Brandfallsteuerungen ein und ermöglicht es, eine detaillierte Untersuchung der Einhaltung der Schutzziele durchzuführen. Obwohl in die Gleichungen des probabilistischen Modells z. B. die bautechnischen oder abwehrenden Brandschutzmaßnahmen nicht direkt eingehen und zur Nachweisführung des individuellen

Risikos Annahmen getroffen und Statistiken berücksichtigt werden, ermöglicht das entwickelte Modell erstmals, das Brandgeschehen ganzheitlich, dynamisch und probabilistisch zu betrachten. Darüber hinaus lassen sich mithilfe des Modells nicht nur unterschiedliche Brand-szenarien, sondern auch Ausfälle von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und anderen Maßnahmen untersuchen und die hieraus resultierenden Auswirkungen analysieren.

Die Tragfähigkeit des hier entwickelten Modells dynamischer Brandfallsteuerungen wird in Abschnitt 5 anhand von zwei Beispielen überprüft. Dabei werden die Ergebnisse der Umsetzung dynamischer Steuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen den statischen Lösungen gegenübergestellt. Die betrachteten Beispiele von natürlichen und maschinellen Entrauchungsanlagen werden mithilfe von CFD-Simulationen untersucht. Die Ergebnisse belegen die Vorteile dynamischer Steuerungen von Entrauchungsanlagen für die Entrauchungsqualität, die sich bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen alleine aus dynamischen Steuerungen ergeben.

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit lassen sich anhand folgender Punkte zusammenfassen:

- Ansteuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen sind bislang überwiegend statisch.
- Nur quantitative Nachweise erlauben qualifizierte Aussagen zur Sicherheit gebäudetechnischer Einrichtungen.
- Mithilfe von Methoden der funktionalen Sicherheit können wichtige Aspekte der Sicherheit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen qualitativ und quantitativ im gesamten Gebäudelebenszyklus betrachtet und belegbar erhöht werden.
- Viele gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen eignen sich für dynamische Ansteuerungen.
- Das Modell dynamischer Brandfallsteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen ermöglicht es, die Ansteuerungen zu planen und zu optimieren.
- Dynamische Ansteuerungen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen bieten gegenüber statischen Steuerungen hinsichtlich der Erreichung von Schutzzielen Vorteile.
- Das probabilistische Modell des individuellen Risikos unter Berücksichtigung von Branddynamik, Steuerungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen ermöglicht eine quantifizierbare Überprüfung des Erreichens des Personenschutzziels.

- Die im probabilistischen Modell des individuellen Risikos eingeführte normierte Zeit ermöglicht es, unterschiedliche Brandereignisse miteinander ohne absolute Zeitangaben zu vergleichen.
- Die Erarbeitung von Visualisierungsmöglichkeiten für die dynamischen Ansteuerungen ermöglicht eine anschauliche Darstellung der Dynamik und Logik von Ansteuerungen.
- Die Überprüfung des vorgestellten Modells anhand von Fallbeispielen mithilfe von Simulationen belegt die Vorteile dynamischer Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen gegenüber statischen Steuerungen.

Die vorliegende Arbeit behandelt erstmalig systematisch das Thema dynamischer Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen. Künftige Untersuchungen zu diesem Thema könnten sich auf weitergehende Quantifizierungen von Randbedingungen richten, bei welchen dynamische Ansteuerungen gegenüber statischen Ansteuerungen Vorteile bieten. Die Quantifizierung solcher Randbedingungen wird es ermöglichen, die Wirkung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Verbund als ein Gesamtsystem planbar und optimiert zu gestalten, um die gestellten Schutzziele besser bzw. mit weniger Mitteln zu erreichen. Daneben werden künftig Untersuchungen zur Beurteilung und einer ebenfalls quantifizierbaren Erhöhung der Sicherheit von gebäudetechnischen Einrichtungen notwendig sein. Hierbei spielt der Ansatz der funktionalen Sicherheit eine besondere Rolle. Aufgrund der technischen Entwicklung in anderen Branchen ist die spezielle Entwicklung einer Branchennorm für die sicherheitsrelevanten Einrichtungen in der Gebäudetechnik unumgänglich. Hierauf werden künftig die Bemühungen gerichtet sein, um einen möglichst internationalen Lösungsansatz zu erarbeiten.

Neben der Frage von Neuentwicklungen wird die Evaluierung der Sicherheit gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen bei Bestandsgebäuden eine zunehmende Rolle spielen. Das Ziel dieser Bewertungen wird sein, gegenüber den momentan weitverbreiteten heuristischen und rein qualitativen Ansätzen, auch quantitative Ansätze zu erarbeiten und in die Praxis umzusetzen.

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur Weiterentwicklung moderner und intelligent gesteuerter gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen. Sie hat das Ziel, die Personensicherheit zu erhöhen und zum Erhalt materieller und immaterieller Werte beizutragen.







# Literaturverzeichnis

- [1] Akaike, H.; Nakagawa, T.: *Statistical Analysis and Control of Dynamic Systems*, KTK Scientific Publishers Tokyo, 1988. (Zitiert auf Seite 13)
- [2] Aldemir, T.; et al. (Herausgeber): *Reliability and Safety Assessment of Dynamic Process Systems*, NATO ASI Series, Series F: Computer and System Sciences, Vol. 120, Springer-Verlag, 1994. (Zitiert auf Seite 9)
- [3] Baecker, D.: *Schlüsselwerke der Systemtheorie*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005. (Zitiert auf Seite 8)
- [4] Bansemer, B.: *Ein Modell zur szenarioabhängigen Beurteilung der Rauchgastoxizität*, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Pro Business Verlag, 2004. (Zitiert auf Seiten 131 und 134)
- [5] Bar-Yam, Y.: *Dynamics of Complex Systems*, Addison-Wesley, 1997. (Zitiert auf Seite 8)
- [6] Bertsche, B.; et al.: *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme*, Springer, 2009. (Zitiert auf Seite 16)
- [7] Birta, L. G.; Arbez, G.: *Modeling and Simulation – Exploring Dynamic System Behaviour*, Springer, 2007. (Zitiert auf Seiten 110 und 221)
- [8] Bischoff, H. J. (Herausgeber): *Risks in Modern Society*, Springer, 2008. (Zitiert auf Seite 27)
- [9] Bock, H. M.; Klement, E.: *Brandschutz-Praxis für Architekten und Ingenieure*, Bauwerk, 2011. (Zitiert auf Seite 83)
- [10] Böhnert, R.: *Bauteil- und Anlagensicherheit*, Vogel-Fachbuchverlag, 1992. (Zitiert auf Seite 36)
- [11] Börcsök, J.: *System-Architekturen in sicherheitsgerichteten Anwendungen – Aspekte und Grundlagen*, HIMA, 2004. (Zitiert auf Seiten 18, 30, 33, 36 und 225)

- [12] Börcsök, J.: *Sicherheitsbetrachtungen*, HIMA Paul Hildebrand GmbH + Co KG, 2002. (Zitiert auf Seite 23)
- [13] Börcsök, J.: *Elektronische Sicherheitssysteme*, Hüthig, 2007. (Zitiert auf Seite 25)
- [14] Börcsök, J.: *Funktionale Sicherheit – Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme*, Hüthig, 2008. (Zitiert auf Seiten 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 26, 28, 29, 31, 35, 136, 142, 224 und 225)
- [15] Börcsök, J.: *HIMA Lexikon Sicherheitstechnik*, Hüthig, 2009. (Zitiert auf Seiten 23, 30, 31, 32, 43, 45, 219 und 222)
- [16] Bowman, K.: *Systems Analysis*, palgrave macmillan, 2004. (Zitiert auf Seite 13)
- [17] Brander, C.: *Mechanical smoke for large fire loads in the Gotthard Base Tunnel*, in: *6th International Conference Tunnel Safety and Ventilation*, Graz, 2012. (Zitiert auf Seite 177)
- [18] Breedveld, P. C.: *Port-Based Modeling of Dynamic Systems*, in: *Modeling and Control of Complex Physical Systems*, Springer, 2009. (Zitiert auf Seite 110)
- [19] Brushlinsky, N.; et al.: *Humanity and fires*, Fundacja Edukacja i Technika Ratwnictwa, 2010. (Zitiert auf Seiten 130, 136, 154 und 155)
- [20] Burke, R.: *Fire Protection Systems and Response*, CRC Press, 2008. (Zitiert auf Seite 94)
- [21] Burns, R. S.: *Advanced Control Engineering*, Butterworth Heinemann, 2001. (Zitiert auf Seite 46)
- [22] Bussenius, S.: *Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes*, W. Kohlhammer, Stuttgart, 1996. (Zitiert auf Seite 136)
- [23] Collet, P.; et al.: *Time and Life Cycle Assessment: How to Take Time into Account in the Inventory Step?*, Band Towards Life Cycle Sustainability Management, Springer, 2011. (Zitiert auf Seite 119)
- [24] Cottin, C.; Döhler, S.: *Risikoanalyse Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen*, Vieweg und Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2009. (Zitiert auf Seite 21)
- [25] Craighead, G.: *High-Rise Security and Fire Life Safety*, Butterworth Heinemann, 2003. (Zitiert auf Seiten 41, 42, 63, 78, 96 und 100)
- [26] Custer, R. L. P.; Meacham, B. J.: *Introduction to Performance-Based Fire Safety*, Society of Fire Protection Engineers, 1997. (Zitiert auf Seite 119)

- [27] Daenzer, W. F. (Herausgeber): *Systems Engineering*, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1983. (Zitiert auf Seite 111)
- [28] Dale, C.; Anderson, T. (Herausgeber): *Safety-Critical Systems: Problems, Process and Practice*, Springer, 2009. (Zitiert auf Seite 43)
- [29] David, H.: *Winderkennung für sichere Entrauchung*, Deutsches Ingenieurblatt, 09/2011. (Zitiert auf Seite 123)
- [30] Dekker, S.: *Ten Questions About Human Error A New View of Human Factors and System Safety*, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 2005. (Zitiert auf Seite 9)
- [31] Devaney, R. L.: *A First Course In Chaotic Dynamical Systems*, Perseus Books Publishing, 1992. (Zitiert auf Seiten 110 und 221)
- [32] Diehl, S.: *Software Visualization*, Springer, 2007. (Zitiert auf Seite 122)
- [33] Duijm, N. J.: *Acceptance criteria in Denmark and the EU*, Technischer Bericht, Danish Ministry of the Environment, 2009. (Zitiert auf Seite 130)
- [34] Emmons, H. W.: *Firesafety Science – The Promise of a Better Future*, Fire Technology, 1990. (Zitiert auf Seite 151)
- [35] Ericson, C. A.: *Hazard Analysis Techniques for System Safety*, Wiley Interscience, 2005. (Zitiert auf Seiten 7 und 16)
- [36] Farber, U.; et al.: *Prüfung elektrischer Anlagen und Betriebsmittel – Grundlagen und Methoden*, VDE Verlag, 2010. (Zitiert auf Seite 94)
- [37] Ferguson, L. H.; Janicak, C. A.: *Fundamentals of Fire Protection for the Safety Professional*, Government Institutes, 2005. (Zitiert auf Seite 43)
- [38] Fitzgerald, R. W.: *Building Fire Performance Analysis*, Wiley, 2004. (Zitiert auf Seiten 136 und 142)
- [39] Flanagan, R.; Norman, G.: *Risk Management and Construction*, Blackwell Sci., Royal Institution of Chartered Surveyors, 1993. (Zitiert auf Seite 27)
- [40] Forell, B.: *Personengefährdung durch Brandrauch*, Feuertrutz Ausgabe 1, 2010. (Zitiert auf Seite 133)
- [41] Forney, G. P.: *Smokeview Version 5 – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, User's Guide*, NIST, 2008. (Zitiert auf Seite 151)

- [42] Fraden, J.: *Handbook of Modern Sensors*, Springer, 2010. (Zitiert auf Seite 44)
- [43] Frey, G.: *Regeln und Steuern*, in: *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, Springer, 2006. (Zitiert auf Seite 12)
- [44] Frey, T.; Bossert, M.: *Signal- und Systemtheorie*, Vieweg und Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2008. (Zitiert auf Seite 111)
- [45] Fullwood, R. R.: *Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries*, Butterworth Heinemann, 1999. (Zitiert auf Seite 144)
- [46] Gagnon, R. M.: *Design of Special Hazard and Fire Alarm Systems*, Delmar Publishers, 1998. (Zitiert auf Seite 43)
- [47] Gehlen, P.: *Funktionale Sicherheit von Maschinen und Anlagen*, Publics corporate publishing, Siemens, 2007. (Zitiert auf Seite 36)
- [48] Gerber, G.: *Brandmeldeanlagen Planen, Errichten, Betreiben*, Hüthig Pflaum Verlag, 2009. (Zitiert auf Seiten 44, 49, 55, 191 und 226)
- [49] Gerhardt, H. J.: *Windeinflüsse bei der Planung von Entrauchungseinrichtungen*, in: *VDI Berichte 1840 Brandschutz in der Gebäudetechnik 11 – Entrauchung*, 2004. (Zitiert auf Seite 171)
- [50] Graeger; et al.: *Einsatz- und Abschnittsleitung, Das Einsatz-Führungs-System*, ecomed Sicherheit, 2009. (Zitiert auf Seite 1)
- [51] Gressmann, H. J.: *Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz*, expert Verlag, 2005. (Zitiert auf Seite 40)
- [52] Güdemann, M.; Ortmeier, F.: *Probabilistic model-based safety analysis*, Computer Systems in Engineering, Otto-von-Guericke University of Magdeburg, ca. 2010. (Zitiert auf Seite 136)
- [53] Haack, A.; Schreyer, J.: *Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr*, *Anwenderhandbuch*, Technischer Bericht, Deutsche Bahn, 2010. (Zitiert auf Seiten 173, 178 und 183)
- [54] Hageböling, V. (Herausgeber): *Technisches Risikomanagement*, TÜV Media, 2009. (Zitiert auf Seite 42)
- [55] Hall, F.; Greeno, R.: *Building Services, Handbook*, Elsevier, 2007. (Zitiert auf Seite 67)

- [56] Hartwig, S.; Festag, S.: *Über risikoerhöhendes menschliches Verhalten durch falsche Führungsstrategien*, Technische Sicherheit Bd. 2, Springer, VDI Verlag, Nr. 3 – März, 2012. (Zitiert auf Seite 42)
- [57] Hasofer, A. M.; et al.: *Risk Analysis in Building Fire Safety Engineering*, Elsevier, 2007. (Zitiert auf Seite 142)
- [58] Hauptmanns, U.; et al.: *Availability analysis for a fixed wet sprinkler system*, Fire Safety Journal 43 (2008) 468-476, 2008. (Zitiert auf Seite 17)
- [59] Heins, T.: *Simulationsmodell zur Sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung bei Bränden in ausgedehnten Räumen*, Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1991. (Zitiert auf Seite 135)
- [60] Hering, E.; et al.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, Springer, 2003. (Zitiert auf Seite 49)
- [61] Hofmann, J.: *Gezielte Evakuierung, effizientes Informationsmanagement schützt und rettet Leben*, W und S Krankenhaus, 05/2006. (Zitiert auf Seite 73)
- [62] Holl, S.; et al.: *Hermes - Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen*, in: *Informatik 2010 Service Science*, Band 2, Seite 162, Gesellschaft für die Informatik, 2010. (Zitiert auf Seite 71)
- [63] Holl, S.; Seyfried, A.: *Validität von Evakuierungssimulationen*, vfdb-Zeitschrift, 59, Seiten 31-37, 2010. (Zitiert auf Seiten 167 und 185)
- [64] Hosser, D. (Herausgeber): *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*, vfdb, 2009. (Zitiert auf Seite 132)
- [65] Hosser, D.: *Anlagentechnischer und baulicher Brandschutz, Perfektes Zusammenspiel*, ProSicherheit, 3/2009. (Zitiert auf Seite 1)
- [66] Ioannou, P. A.; Pitsillides, A.: *Modeling and Control of Complex Systems*, CRC Press, 2008. (Zitiert auf Seite 36)
- [67] Iwanow, J. N.: *Automatische Brandschutzanlagen*, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1978. (Zitiert auf Seite 41)
- [68] Jäger, G.; Spennes, G.: *Nachweis Personensicherheit – eine Standortbestimmung*, Feuertrutz Ausgabe 5, 2012. (Zitiert auf Seite 133)

- [69] Joglar, F.: *Reliability, Availability, and Maintainability*, in: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*, 2008. (Zitiert auf Seiten 42 und 112)
- [70] John, R.; et al. (Herausgeber): *Die Methodologien des Systems*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010. (Zitiert auf Seite 13)
- [71] Jones A. M. Jr.: *Fire Protection Systems*, Delmar, Cengage Learning, 2009. (Zitiert auf Seite 41)
- [72] Jost, J.: *Dynamical Systems, Examples of Complex Behaviour*, Springer, 2005. (Zitiert auf Seite 111)
- [73] Jung, U.: *Entrauchung für den Personenschutz*, Springer-VDI-Verlag, HLH Heft 8, 2006. (Zitiert auf Seite 81)
- [74] Jung, U.: *Funktionssicherheit mit minimalem Aufwand*, HLH, Bd. 63, Nr. 2, 2012. (Zitiert auf Seite 107)
- [75] Kaiser, K. O.: *Brandschutztechnische Bauüberwachung Haustechnik, Qualitätssicherung bei Planung und Ausführung im baulichen Brandschutz*, Feuertrutz GmbH Verlag für Brandschutzpublikationen, 2008. (Zitiert auf Seite 84)
- [76] Kaspers; Kufner: *Messen – Steuern – Regeln, Elemente der Automatisierungstechnik*, Vieweg, 2005. (Zitiert auf Seite 12)
- [77] Kastner, W.; et al.: *Communication Systems for Building Automation and Control*, in: *Proceedings of the IEEE, Vol 93, No. 6*, 2005. (Zitiert auf Seite 1)
- [78] Klein, W.; Böke, J.: *Brandschutzanlagen Teil 1: Grundlagen und Wasserlöschanlagen*, VdS Schadenverhütung Verlag, 2004. (Zitiert auf Seiten 41, 67 und 68)
- [79] Klingsch, W.: *Brandschutz nach Maß in der Haustechnik: Optimale Brandschutzkonzepte*, in: *VDI Berichte 1377 Vorbeugender Brandschutz in der Gebäudetechnik*, 1998. (Zitiert auf Seite 39)
- [80] Klingsch, W.: *Qualitätssicherung im Brandschutz*, DiB-Spezial Brandschutz, 02/2002. (Zitiert auf Seiten 136 und 142)
- [81] Klingsch, W.: *Gebäudetechnik als Bestandteil ganzheitlicher Brandschutzkonzepte*, HLH Heizung Lüftung Klima Sanitär, Heft 10, 2002. (Zitiert auf Seiten 1, 40 und 41)
- [82] Klingsch, W.; et al.: *Brandschutzkonzept für den Wiederaufbau des Berliner Schlosses - Humboldtforum*, Technischer Bericht, hhpberlin, 2011. (Zitiert auf Seiten 77, 116 und 129)

- [83] Klingsch, W.; Wagner, A.: *Dynamisches Evakuierungssystem, Patent, Veröffentlichungsnummer WO1998017350 A1*, 1998. (Zitiert auf Seite 72)
- [84] Klingsch, W.; Wagner, A.: *Evakuierungssystem für Aufzüge, Patent, Dokumentenidentifikation DE19649552A, Veröffentlichungsnummer WO1998023525 A1*, 1998. (Zitiert auf Seiten 77 und 126)
- [85] Kosinski, L.: *Untersuchung von Witterungseinflüssen auf die Wirksamkeit von natürlichen Rauchabzugsanlagen mit CFD-Simulationen*, Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH), 2009. (Zitiert auf Seiten 65 und 154)
- [86] Krüppel, A.: *Entrauchung – Gebäudeautomation als Integrator*, in: *VDI Berichte 1499 Brandschutz in der Gebäudetechnik*, 1999. (Zitiert auf Seite 79)
- [87] Kuchenmeister, R.: *Tunnelentrauchung für Zentralbahnhof Antwerpen/B*, Tunnel 05, 2009. (Zitiert auf Seite 177)
- [88] Kustosz, A.; Barth, U.: *Bewertung der wirtschaftlichen Folgen von Explosionsereignissen*, TÜ Bd. 51 Nr. 11/12 - Nov./Dez., 2010. (Zitiert auf Seite 36)
- [89] Leber, F.: *Fire Alarm System Interconnections*, in: A. E. Cote (Herausgeber), *Fire Protection Handbook*, Band I and II, NFPA, 2009. (Zitiert auf Seite 42)
- [90] Lieb, R. D.; Gerhardt, H. J.: *Die Bedeutung der Ausführungsplanung und Bauüberwachung im Brandschutz bei komplexen Steuerungsvorgaben*, VIII. Baurecht und Brandschutz-Symposium, 2004. (Zitiert auf Seite 123)
- [91] Litz, L.: *Grundlagen der Automatisierungstechnik – Regelungssysteme – Steuerungssysteme – Hybride Systeme*, Oldenbourg Verlag München Wien, 2005. (Zitiert auf Seite 126)
- [92] Lunze, J.: *Automatisierungstechnik, Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme*, Oldenbourg Verlag München Wien, 2003. (Zitiert auf Seiten 11 und 12)
- [93] MacDonald, D.: *Practical Industrial Safety, Risk Assessment, and Shutdown Systems*, Elsevier Science, 2004. (Zitiert auf Seite 19)
- [94] Magnusson, S. E.; et al.: *Fire Safety Design Based on Calculations Uncertainty Analysis and Safety Verification*, Technischer Bericht, Department of Fire Safety Engineering Lund Institute of Technology, 1995. (Zitiert auf Seite 43)

- [95] Mahdavi, A.: *Toward a simulation-assisted dynamic building control strategy*, Department of Architecture, Cernegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, ca. 1996. (Zitiert auf Seite 79)
- [96] Mamrot, D.: *Zur Komplexität des Verlaufs von Bränden in Bauwerken – Sensitivitätsanalyse*, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Lehrstuhl Baustofftechnologie und Brandschutz, Heft 7, 1998. (Zitiert auf Seite 1)
- [97] Männchen, C.: *Brandfallsteuermatrix professionell managen*, TGA Fachplaner, 08/2012. (Zitiert auf Seiten 104 und 125)
- [98] Masing, W. (Herausgeber): *Handbuch Qualitätsmanagement*, Hanser, 1999. (Zitiert auf Seite 49)
- [99] McGrattan, K., Hostikka, S.; et al.: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, NIST, 2009. (Zitiert auf Seite 151)
- [100] Merz, H.; et al.: *Gebäudeautomation Kommunikationssysteme mit EIB/KNX, LON und BACnet*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010. (Zitiert auf Seite 79)
- [101] Meyers, R. A. (Herausgeber): *Encyclopedia of Complexety and Systems Science*, Springer, 2009. (Zitiert auf Seiten 7 und 11)
- [102] Meyna, A.: *Einführung in die Sicherheitstheorie Sicherheitstechnische Analyseverfahren*, Carl Hanser Verlag, 1982. (Zitiert auf Seite 130)
- [103] Meyna, A.; Pauli, B.: *Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik – Quantitative Bewertungsverfahren*, Hanser, 2003. (Zitiert auf Seiten 9 und 225)
- [104] Meyna, A.; Pauli, B.: *Zuverlässigkeitstechnik – Quantitative Bewertungsverfahren*, Hanser, 2010. (Zitiert auf Seite 136)
- [105] Mogilevskiy, V. D.: *Methodologie von Systemen – verbaler Ansatz (auf Russisch)*, Verlag Ekonomika, Moskau, 1999. (Zitiert auf Seiten 7 und 223)
- [106] Nachtigall, E.; Klingsch, W.: *Perspektiven anlagentechnischer Komponenten im ganzheitlichen Brandschutz*, in: *sicher ist sicher – Arbeitsschutz aktuell*, 04/2011. (Zitiert auf Seiten 40 und 146)
- [107] Nolan, D. P.: *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities*, Noyes Publications, 1996. (Zitiert auf Seite 81)



- [108] Novak, T.: *Functional Safety and System Security in Building Automation and Control Systems*, Dissertation, Vienna University of Technology, 2008. (Zitiert auf Seite 94)
- [109] Novak, T.; et al.: *Common Approach to Functional Safety and System Security in Building Automation and Control Systems*, in: *Proceedings of ETFA. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2007. (Zitiert auf Seite 13)
- [110] Oishi M.; et al.: *Discrete Abstractions of Hybrid Systems: Verification of Safety and Application of User-Interface Design*, NASA/TM-2003-212803, 2003. (Zitiert auf Seiten 70 und 81)
- [111] Ostertag, D.; et al.: *Entrauchung – Grundlagen Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden – Grundlagenermittlung für die Erstellung bauaufsichtlicher Richtlinien*, Fraunhofer IRB Verlag, 2004. (Zitiert auf Seite 154)
- [112] Ostroff, J. S.: *Temporal Logic for Real-Time Systems*, John Wiley and Sons Inc., 1989. (Zitiert auf Seite 13)
- [113] Perrow, C.: *Normale Katastrophen – Die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*, Campus Verlag, 1989. (Zitiert auf Seiten 7 und 222)
- [114] Pittioni, V.: *Modelle – Konstruktionen der Wirklichkeit, Modelle und Mathematik*, Hrsg. Herbert Stachowiak, 1983. (Zitiert auf Seite 117)
- [115] Pleß, G.; Seliger, U.: *Entwicklung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen, Forschungsbericht Nr. 145, Teil 1*, Technischer Bericht, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 2007. (Zitiert auf Seite 131)
- [116] Portz, H.: *Brand- und Explosionsschutz von A – Z, Begriffserläuterungen und brandschutztechnische Kennwerte*, Vieweg, 2005. (Zitiert auf Seite 41)
- [117] Predtetschenski, W. M.; Milinski, A. I.: *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung*, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Köln-Braunsfeld, 1971. (Zitiert auf Seite 137)
- [118] Proske, D.: *Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung*, Eigenverlag, 2004. (Zitiert auf Seiten 94 und 130)
- [119] Purser, D. A.: *Physiological effects of combustion products and fire hazard assessment*, in: *Europacable Seminar: Safety during Fire, Brussels 6th May 2009*, 2009. (Zitiert auf Seiten 132 und 133)

- [120] Quenzel, K. H.: *Einrichtungen zur Rauch- und Wärmefreihaltung*, Feuertrutz GmbH Verlag für Brandschutzpublikationen, 2009. (Zitiert auf Seite 159)
- [121] Ramachandran, G.; Charters, D.: *Quantitative Risk Assessment in Fire Safety*, Spon Press, 2011. (Zitiert auf Seiten 43 und 136)
- [122] Rasbash, D.; et al.: *Evaluation of Fire Safety*, John Wiley, 2004. (Zitiert auf Seite 129)
- [123] Rausand, M.; Hoyland, A.: *System Reliability Theory Models, Statistical Methods and Applications*, John Wiley, 2004. (Zitiert auf Seite 140)
- [124] Reintsema, J.: *Brandschutz-Wegweiser Technischer Brandschutz und Brandschutzsysteme*, Publics Publishing, 2012. (Zitiert auf Seiten 41, 67 und 68)
- [125] Richmond, B.; Richmond, T.: *A Discrete Transition to Advanced Mathematics*, American Mathematical Society, Belmont, 2009. (Zitiert auf Seite 134)
- [126] Richter, B.: *Anlagensicherheit*, Hüthig, 2007. (Zitiert auf Seiten 13 und 16)
- [127] Rönty, V.; Keski-Rahkonen, O.: *Reliability of sprinkler systems Exploration and analysis of data from nuclear and non-nuclear installations*, JULKAISIJA UTGIVARE, VTT Working Papers 15, 2004. (Zitiert auf Seite 136)
- [128] Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik*, Universitätsverlag Karlsruhe, 2009. (Zitiert auf Seiten 6, 8 und 225)
- [129] Ropohl, G.: *Allgemeine Systemtheorie – Einführung in transdisziplinäres Denken*, edition sigma, 2012. (Zitiert auf Seite 110)
- [130] Rottmann, H.: *Ergebnisse von dem realistischen Brandversuch mit zwei Pkw und 12 MW Brandleistung zur Prüfung der neuartigen Entrauchungsanlage im 1.528 m langen Malbergtunnel in Bad Ems*, Technischer Bericht, Tunnellüftung + Tunnelentrauchung, Frankfurt am Main, 2007. (Zitiert auf Seite 177)
- [131] Ryabinin, I. A.: *Reliability and safety of structural-complex systems (auf Russisch)*, Verlag Polytechnik, 2000. (Zitiert auf Seite 10)
- [132] Salisbury, T. I.: *A survey of control technologies in the building automation industry*, IFAC, 2005. (Zitiert auf Seiten 10, 11, 36, 42 und 104)
- [133] Scherbina, W. I.: *Integrierte Sicherheitssysteme der Hochhäuser und multifunktionaler Gebäude (auf Russisch)*, UKSB IO, 2006. (Zitiert auf Seite 95)

- [134] Scherrer, M.: *Interoperabilität: Mehr Sicherheit durch das Zusammenspiel, Sicherheitsmarkt, Informationen über die Sicherheitsbranche*, SecuMedia Verlags-GmbH, 2009-06-20. (Zitiert auf Seite 36)
- [135] Schilling, S.: *Beitrag zur dynamischen Fehlerbaumanalyse ohne Modulbildung und zustandsbasierte Erweiterungen*, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2009. (Zitiert auf Seiten 13, 14 und 225)
- [136] Schlosser, I.; et al.: *Brandschutzanlagen Teil 2: Gaslöschanlagen, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Brandmeldeanlagen*, VdS Schadenverhütung Verlag, 2008. (Zitiert auf Seite 69)
- [137] Schmidt, G.; Schlusche, E.: *Überdruckbelüftung*, W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart, 2007. (Zitiert auf Seite 66)
- [138] Schneider, J.: *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen*, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich und B. G. Teubner Stuttgart, 1996. (Zitiert auf Seiten 27 und 222)
- [139] Schneider, U.; et al.: *Brandschutz – Dokumentation einer Entwicklung*, Bauphysik 30 Heft 6, 2008. (Zitiert auf Seiten 130 und 141)
- [140] Schroll, R. C.: *Industrial Fire Protection Handbook*, CRC Press, 2002. (Zitiert auf Seite 41)
- [141] Sgruev, V.; et al. (Herausgeber): *Intelligent Systems: From Theory to Practice*, Springer, 2010. (Zitiert auf Seite 8)
- [142] Slingerland, R.; Kump, L.: *Mathematical Modeling of Earth's Systems*, Princeton University Press, 2011. (Zitiert auf Seite 117)
- [143] Smith, D. J.; Simpson, K. G. L.: *Functional Safety – A straightforward guide to applying IEC 61508 and related standards*, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. (Zitiert auf Seite 19)
- [144] Stadlbauer, H.: *Sicherheitstechnische Anlagen im Verbund*, BS Brandschutz, Sonderdruck aus 2/2007. (Zitiert auf Seite 42)
- [145] Stapelberg, R. F.: *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*, Springer, 2009. (Zitiert auf Seite 16)
- [146] Stec, A.; Hull, R. (Herausgeber): *Fire toxicity*, Woodhead Publishing Limited, 2010. (Zitiert auf Seiten 131 und 132)

- [147] Stelljes, M. E. (Herausgeber): *Toxicology for non-toxicologists*, Government Institutes, The Scarecrow Press, 2010. (Zitiert auf Seite 131)
- [148] Stephans, R. A.: *System Safety for the 21st Century*, Wiley Interscience, 2004. (Zitiert auf Seiten 7 und 223)
- [149] Stollard, P.; Abrahams, J.: *Fire from First Principles – A design guide to building fire safety*, E and FN Spon, 1999. (Zitiert auf Seite 117)
- [150] Strick, J.: *Sicherheit und Ausfallsicherheit von Sprinkleranlagen*, Bachelorarbeit, Bergische Universität Wuppertal, 2012. (Zitiert auf Seite 136)
- [151] Stroup, D. W.; et al.: *Scotch Pine Christmas Tree Fire Test, Report of Test FR 4010*, Technischer Bericht, U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology (NIST), 1999. (Zitiert auf Seite 157)
- [152] Stroup, D. W.; et al.: *Upholstered Chair Fire Test Using a California Technical Bulletin 133 Burner Ignition Source, Report of Test FR 4012*, Technischer Bericht, U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology (NIST), 2001. (Zitiert auf Seite 157)
- [153] Tadahisa, J.: *Visibility and Human Behavior in Fire Smoke*, in: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*, 2008 (Zitiert auf Seite 132)
- [154] Trebojevic, V. M.: *Risk criteria in EU*, in: *ESREL European safety and reliability conference, 2005*, Risk Support Limited, London, 2005. (Zitiert auf Seite 130)
- [155] v. Geel, P.: *Guidelines for qualitative risk assessment*, Publications Series on Dangerous Substances (PGS 3), CPR 18E, Technischer Bericht, VROM, 2005. (Zitiert auf Seite 130)
- [156] Vogel, H.: *Gerthesen Physik*, Springer, 1999. (Zitiert auf Seiten 110, 111 und 221)
- [157] Wehrheim, J.: *Die überwachte Stadt – Sicherheit, Segregation und Ausgrenzung*, Verlag Barbara Budrich, 2012. (Zitiert auf Seite 126)
- [158] Wellenreuther, G.; Zastrow, D.: *Automatisieren mit SPS – Theorie und Praxis*, Vieweg, 2005. (Zitiert auf Seite 126)
- [159] Wellpott, E.; Bohne, D.: *Technischer Ausbau von Gebäuden*, Kohlhammer, 2006. (Zitiert auf Seite 78)
- [160] Wernicke, J.: *Windeinflüsse auf die natürliche Entrauchung von Industriebauten*, Masterarbeit, Lehrstuhl Baustofftechnologie und Brandschutz, Bergische Universität Wuppertal, 2010. (Zitiert auf Seiten 65, 154, 156 und 159)

- [161] Wiese, J.: *Hinweise zur Prüfung von ingenieurgemäßen Brandsicherheitsnachweisen*, vfdB Tagungsband, 2011. (Zitiert auf Seite 151)
- [162] Wollert, J. F.: *Bussysteme*, in: *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, Springer, 2006. (Zitiert auf Seite 16)
- [163] Wratil, P.; Kieviet, M.: *Sicherheitstechnik für Komponenten und Systeme*, VDE Verlag GmbH, 2010. (Zitiert auf Seite 42)
- [164] Yeoh, G. H.; Yuen, K. K.: *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*, Elsevier, 2009. (Zitiert auf Seite 151)
- [165] Yung, D.: *Principles of Fire Risk Assessment in Buildings*, John Wiley, 2008. (Zitiert auf Seiten 63, 136 und 141)
- [166] *Acceptable Solution for New Zealand Building Code, Fire Safety Clauses: Analysis of Existing Performance Metrics*, Building Research Levy and the Department of Building and Housing, 2007. (Zitiert auf Seiten 133 und 134)
- [167] *Umfassende Brandschutzlösungen für Flughäfen*, IKZ-Fachplaner 10, 2008. (Zitiert auf Seiten 71, 72 und 82)
- [168] *Brandschutzerläuterung, Gewährleistung der Betriebsbereitschaft von Brandfallsteuerungen (BFS)*, Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, Schweiz, 2008. (Zitiert auf Seiten 95 und 102)
- [169] *Brandschutz-Merkblatt, Gewährleistung der Betriebsbereitschaft von Brandmeldeanlagen (BMA)*, Forum für technischen Brandschutz, Schweiz, 2007. (Zitiert auf Seite 86)
- [170] *BS 7974:2001, Application of fire safety engineering principles to the design of buildings, Code of practice*, 2001. (Zitiert auf Seite 131)
- [171] *BS 9999:2008, Code of practice for fire safety in the design, management and use of buildings*, 2008. (Zitiert auf Seite 3)
- [172] *Department of Defense Standard Practice for System Safety MIL-STD-882D*, 2000. (Zitiert auf Seiten 7 und 223)
- [173] *DIN 14661 Feuerwehrwesen Feuerwehr-Bedienfeld für Brandmeldeanlagen*, 2011. (Zitiert auf Seiten 80 und 96)
- [174] *DIN 14662 Feuerwehrwesen Feuerwehr-Anzeigetableau für Brandmeldeanlagen*, 2010. (Zitiert auf Seite 80)

- [175] *DIN 14674 Brandmeldeanlagen – Anlagenübergreifende Vernetzung*, 2010. (Zitiert auf Seiten 41 und 95)
- [176] *DIN 14675 Brandmeldeanlagen Aufbau und Betrieb*, 2003. (Zitiert auf Seiten 51, 74, 75 und 84)
- [177] *DIN 18232-5 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung, Entwurf* 2011. (Zitiert auf Seite 65)
- [178] *DIN 19226-1 Leittechnik Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Allgemeine Grundbegriffe, Teil 1*, 1994. (Zitiert auf Seiten 11, 12, 222 und 223)
- [179] *DIN 25424-2 Fehlerbaumanalyse Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes, Teil 2*, 1990. (Zitiert auf Seite 13)
- [180] *DIN 40041 Zuverlässigkeit Begriffe*, 1990. (Zitiert auf Seiten 16, 17 und 224)
- [181] *DIN 66001 Informationsverarbeitung Sinnbilder und ihre Anwendung*, 1983. (Zitiert auf Seiten 15, 117 und 122)
- [182] *DIN 69900 Projektmanagement – Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe*, 2009. (Zitiert auf Seiten 15 und 123)
- [183] *DIN EN 54-1 Brandmeldeanlagen – Teil 1: Einleitung*, 2011. (Zitiert auf Seiten 47, 51, 52, 53, 59, 61, 223 und 225)
- [184] *DIN EN 54-13 Brandmeldeanlagen – Teil 13: Bewertung der Kompatibilität von Systembestandteilen*, 2005. (Zitiert auf Seite 94)
- [185] *DIN EN 12101-2 Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 2: Festlegungen für natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte*, 2003. (Zitiert auf Seite 159)
- [186] *DIN EN 12101-3 Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 3: Bestimmungen für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte*, 2002. (Zitiert auf Seite 65)
- [187] *DIN EN 12101-6 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 6: Festlegungen für Differenzdrucksysteme, Bausätze*, 2005. (Zitiert auf Seite 66)
- [188] *DIN EN 61508 Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme, Alle Teile*, diverse Jahre. (Zitiert auf Seiten 19, 20, 21, 22, 25, 26, 30, 31, 32, 33, 154, 156, 175, 176, 221, 222 und 225)

- [189] *DIN EN 61508-4 Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer /programmierbarer elektronischer Systeme, Teil 4: Begriffe und Abkürzungen*, 2009. (Zitiert auf Seite 5)
- [190] *DIN V 19222 Leittechnik Begriffe*, 2001. (Zitiert auf Seite 11)
- [191] *DIN V VDE 0801 Grundsätze für Rechner in Systemen mit Sicherheitsaufgaben, Status: zurückgezogen*, 01/1990. (Zitiert auf Seite 25)
- [192] *DIN VDE 0833-2 Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall – Teil 2: Festlegungen für Brandmeldeanlagen*, 2009. (Zitiert auf Seiten 47, 81 und 225)
- [193] *EMERCOM Methoden zur Berechnung von individuellen Brandrisikogrößen in Gebäuden und Bauwerken verschiedener Klassen von Brandgefährdungen, 6 Anlagen, als Anlage zur Anordnung Nummer 382 (auf Russisch)*. (Zitiert auf Seiten 129, 130, 132, 133, 135, 136, 137, 140, 141 und 218)
- [194] *Feuerwehr und Rettungsdienst Landeshauptstadt Düsseldorf, Flughafenbrand Düsseldorf 11. April 1996 – Ein bedeutendes Datum im Düsseldorf der Nachkriegszeit*, 1996. (Zitiert auf Seite 1)
- [195] *GOST R 53195 Functional safety of building/erection safety-related systems, parts 1-5*, 2008-2011. (Zitiert auf Seiten 23, 43, 86 und 176)
- [196] *Grundsätze für die Prüfung technischer Anlagen entsprechend der Prüfverordnung durch Sachverständige – Prüfgrundsätze NRW*, 2011. (Zitiert auf Seite 103)
- [197] *itf IT Frankfurt GmbH, Zusammenfassung der Podiumsdiskussion am 18.04.2012*, 2012. (Zitiert auf Seite 125)
- [198] *ISO 13571 Life threatening components of fires – Guidelines on the estimation of time available for escape using fire data*, 2007. (Zitiert auf Seite 132)
- [199] *ISO/TS 19706 Guidelines for assessing the fire threat to people, technical specification*, 2004. (Zitiert auf Seite 169)
- [200] *DIN ISO 31000 Risikomanagement – Grundsätze und Leitlinie*, Entwurf, 2011. (Zitiert auf Seiten 27, 36 und 222)
- [201] *ISO Guide 73 Risk management – Vocabulary*, 2009. (Zitiert auf Seite 36)
- [202] *Leistungen für Brandschutz*, AHO-Fachkommission Brandschutz, Nr. 17, Bundesanzeiger Verlag, 2009. (Zitiert auf Seite 97)

- [203] *Musterbauordnung MBO, ARGEBAU, 2002, geändert 2008.*  
(Zitiert auf Seiten 39, 40 und 83)
- [204] *NFPA 72 National Fire Alarm Code, 2002.* (Zitiert auf Seiten 96 und 223)
- [205] *PD 7974-7:2003, Application of fire safety engineering principles to the design of buildings, Probabilistic risk assessment, 2003.* (Zitiert auf Seite 131)
- [206] *Rauchschutz-Druck-Anlagen Anwenderleitfaden, RDA-Arbeitskreis, 2009.*  
(Zitiert auf Seite 66)
- [207] *Verordnung über den Bau und Betrieb von Sonderbauten, Sonderbauverordnung, SBau-VO, NRW, 2009.* (Zitiert auf Seiten 84, 85, 152 und 156)
- [208] *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI), Verordnung der Bundesregierung, Drucksache 395/09, 2009.* (Zitiert auf Seite 97)
- [209] *VDE-Bestimmungen Auswahl zur funktionalen Sicherheit, VDE Verlag, Berlin Offenbach, 12/2011.* (Zitiert auf Seite 23)
- [210] *VDI Qualitätsmerkmal Technische Sicherheit – Eine Denkschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 2010.* (Zitiert auf Seite 126)
- [211] *VDI 3814 Gebäudeautomation Blatt 1-6, 2003-2010.* (Zitiert auf Seite 78)
- [212] *VDI 3819 Blatt 1 Brandschutz in der Gebäudetechnik – Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln, 2012.* (Zitiert auf Seite 85)
- [213] *VDI 3819 Blatt 2 Entwurf Brandschutz in der Gebäudetechnik – Funktionen und Wechselwirkungen, 2012.* (Zitiert auf Seite 64)
- [214] *VDI 3819 Blatt 3 Brandschutz in der Gebäudetechnik – Brandschutzplanung und -einweisung Pflichten, Inhalt und Dokumentation, 2009.* (Zitiert auf Seiten 96 und 223)
- [215] *VDI 4003 Zuverlässigkeitsmanagement Reliability Management, 2007.*  
(Zitiert auf Seite 17)
- [216] *VDI 6010 Sicherheitstechnische Einrichtungen – Systemübergreifende Funktionen, 2005.*  
(Zitiert auf Seiten 41, 90, 221 und 222)
- [217] *VDI 6010 Blatt 2 Sicherheitstechnische Einrichtungen – Ansteuerung von automatischen Brandschutzeinrichtungen, 2011.*  
(Zitiert auf Seiten 62, 63, 65, 70, 72, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 96, 99, 100, 119 und 223)



- [218] VDI 6010 Blatt 3 Sicherheitstechnische Einrichtungen – Vollprobetests, in Entwicklung, 2012. (Zitiert auf Seiten 79, 94 und 99)
- [219] VDI 6017 2008 Aufzüge – Steuerungen für den Brandfall, 2008. (Zitiert auf Seiten 77 und 126)
- [220] VDI 6017 Blatt 2 Entwurf Aufzüge im Brandfall – Verlängerung der Betriebszeiten, 2007. (Zitiert auf Seite 77)
- [221] VDI 6026 Blatt 1 Dokumentation in der Technischen Gebäudeausrüstung – Inhalte und Beschaffenheit von Planungs-, Ausführungs- und Revisionsunterlagen, 2008. (Zitiert auf Seite 92)
- [222] VDI 6039 Entwurf Facility-Management – Inbetriebnahmemanagement für Gebäude, 2010. (Zitiert auf Seite 79)
- [223] VDMA 24177 2003 Ventilatoren zur Rauch- und Wärmefreihaltung von Gebäuden im Brandfall, 2003. (Zitiert auf Seite 65)
- [224] VDMA 24200-1 Gebäudeautomation – Automatisierte Brandschutz- und Entrauchungssysteme – ABE, 2004. (Zitiert auf Seite 65)
- [225] VdS 2815 : 2001-03 (01) Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA), 2001. (Zitiert auf Seite 90)
- [226] VdS 3122 : 2009-06 (01) Winderkennungseinrichtungen zur Steuerung windbeeinflusster Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, 2009. (Zitiert auf Seite 65)
- [227] VdS 3527 : 2008-02 (01) Richtlinien für Inertisierungs- und Sauerstoffreduzierungsanlagen Planung und Einbau, 2007. (Zitiert auf Seite 69)
- [228] VdS 3531 : 2008-02 (01) Anlagenübergreifende Vernetzung, 2008. (Zitiert auf Seite 86)
- [229] ZVEI: EVACom – Das ganzheitliche Alarmierungs- und Evakuierungskonzept mit dem kleinen Unterschied, Fachkreis Intercom-Systeme im ZVEI – Fachverband Sicherheitssysteme, 2004. (Zitiert auf Seite 72)
- [230] ZVEI: Technische Anlagen zum Brandrettungskonzept des ZVEI, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., 2008. (Zitiert auf Seite 11)



# Abkürzungsverzeichnis

<b>AK</b>	Anforderungsklasse
<b>ASET</b>	Available Safe Egress Time
<b>BM</b>	Brandmelder
<b>BMA</b>	Brandmeldeanlage
<b>BMZ</b>	Brandmelderzentrale
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>DFTA</b>	Dynamic Fault Tree Analysis
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>E/E/PE</b>	programmierbares elektronisches System
<b>ELA</b>	Elektroakustische Anlage
<b>EMERCOM</b>	Ministry of the Russian Federation for Affairs for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters
<b>EMV</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>EUC</b>	Equipment Under Control
<b>EV</b>	Energieversorgungseinrichtung
<b>FAT</b>	Feuerwehr-Anzeigetableau
<b>FBF</b>	Feuerwehr-Bedienfeld
<b>FDS</b>	Fire Dynamics Simulator
<b>FEC</b>	Fractional Effective Concentration
<b>FED</b>	Fractional Effective Dose
<b>FSD</b>	Feuerwehrschlüsseldepot
<b>FTA</b>	Fault Tree Analysis

<b>FW</b>	Feuerwehr
<b>GB</b>	Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen
<b>GLT</b>	Gebäudeleittechnik
<b>GMA</b>	Gefahrenmeldeanlage
<b>GMS</b>	Gefahren-Management-System
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>IR</b>	Infrarot
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>LP</b>	Leistungsphase
<b>MB</b>	Meldebereich
<b>MBO</b>	Musterbauordnung
<b>MRA</b>	Maschinelle Rauchabzugsanlage
<b>NRA</b>	Natürliche Rauchabzugsanlage
<b>NSÖ</b>	Nachströmöffnung
<b>RDA</b>	Rauchschutz-Druckanlage
<b>RLT</b>	Raumlufttechnik
<b>RSET</b>	Required Safe Egress Time
<b>RWA</b>	Rauch- und Wärmeabzug
<b>SBauVO</b>	Verordnung über Bau und Betrieb von Sonderbauten
<b>s. e.</b>	sobald erreicht
<b>SIL</b>	Sicherheits-Integritätslevel
<b>TFTA</b>	Temporal Fault Tree Analysis
<b>u. a.</b>	unter anderem
<b>ÜE</b>	Übertragungseinrichtung
<b>UV</b>	Ultraviolett
<b>VDE</b>	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
<b>VDI</b>	Verband Deutscher Ingenieure
<b>VdS</b>	VdS Schadenverhütung GmbH

# Symbolverzeichnis

## Abschnitt: Sicherheitsgerichtete Systeme

Symbol	Erklärung	Verweise/Gleichung(en)
$PA$	Point Availability	2.1 auf Seite 17
$MTTF$	Mean Time To Failure	2.1 auf Seite 17, 2.5 und 2.6
$MTBF$	Mean Time Between Failures	2.1 auf Seite 17
$MTTR$	Mean Time To Repair	2.1 auf Seite 17
$\lambda_B$	Basis-Ausfallrate	2.2 auf Seite 24
$\lambda_S$	sichere Fehlerraten	2.2 auf Seite 24, 2.3
$\lambda_D$	gefährliche Fehlerraten	2.2 auf Seite 24, 2.4
$\lambda_{SD}$	sichere entdeckbare Fehlerraten	2.3 auf Seite 24
$\lambda_{SU}$	sichere nicht entdeckbare Fehlerraten	2.3 auf Seite 24
$\lambda_{DD}$	gefährliche entdeckbare Fehlerraten	2.4 auf Seite 25
$\lambda_{DU}$	gefährliche nicht entdeckbare Fehlerraten	2.4 auf Seite 25
$R$	Zuverlässigkeit	2.7 auf Seite 31, 2.8 und 2.9
$P$	Versagenswahrscheinlichkeit	2.10 auf Seite 31
$PF_D$	mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung (Probability of dangerous Failure on Demand)	2.11 auf Seite 32 bis 2.15
$PF_H$	mittlere Häufigkeit eines gefahrbringenden Ausfalls der Sicherheitsfunktion pro Stunde (Probability of dangerous Failure per Hour)	2.14 auf Seite 32, 2.16 auf Seite 33

## Abschnitte: Entwicklung und Umsetzung dynamischer Steuerungen

Symbol	Erklärung	Verweise/Gleichung(en)
$X, X(t)$	Eingangsgröße(n)	4.1a auf Seite 110, 4.1b
$Y, Y(t)$	Ausgangsgröße(n)	4.1a auf Seite 110, 4.1b
$F$	Operator	4.1a auf Seite 110, 4.1b
$Q_I(t_n)$	das rechnerisch ermittelte individuelle Brandrisiko unter Berücksichtigung der normierten Zeit	4.2 auf Seite 130 und 4.9
$Q_I^N$	das maximal zulässige und in [193] normativ vorgegebene individuelle Brandrisiko in der Höhe $1 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr und Person	4.2 auf Seite 130
$t_{kr}^{\dots}$	kritische Brandrisikogröße(n)	4.3 auf Seite 134
$t_n^*$	Minimum aus kritischen Brandrisikogrößen $t_{kr}^{\dots}$	4.4 auf Seite 134
$t_i^*$	Beliebiger Zeitpunkt bzw. Zeitraum (in z. B. Minuten)	4.7 auf Seite 134
$t_i$	Beliebiger normierter Zeitpunkt bzw. Zeitraum (dimensionslos)	4.7 auf Seite 134
$Q_B$	Häufigkeit der Brandentstehung	4.9 auf Seite 135
$P_L(t_n)$	Wahrscheinlichkeit einer effektiven Auslösung und Löschung (Funktionszuverlässigkeit) durch automatische Brandlöschanlagen über die normierte Zeit	4.9 auf Seite 135
$P_A$	Häufigkeit des Aufenthalts von Personen im Gebäude	4.9 auf Seite 135
$P_E$	Wahrscheinlichkeit der Evakuierung	4.8 auf Seite 135 und 4.10
$P_B(t_n)$	Funktionszuverlässigkeit von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen im Brandfall und über die normierte Zeit	4.9 auf Seite 135 und 4.11
$t_r$	rechnerische Evakuierungsdauer von Personen in Normalform	4.10 auf Seite 137
$t_b$	Zeitspanne vom Brandbeginn bis zum Beginn der Evakuierung in Normalform	4.10 auf Seite 137
$P_M(t_n)$	Wahrscheinlichkeit der effektiven Auslösung (Funktionszuverlässigkeit) der Brandmeldeanlage über die normierte Zeit	4.11 auf Seite 140
$P_{ELA}(t_n)$	Wahrscheinlichkeit der effektiven Auslösung (Funktionszuverlässigkeit) einer Alarmierungsanlage (ELA, Sirene) im Falle der Auslösung der BMA	4.11 auf Seite 140
$P_{ENT}(t_n)$	Wahrscheinlichkeit der effektiven Auslösung (Funktionszuverlässigkeit) einer Entrauchungsanlage im Falle der Auslösung der BMA	4.11 auf Seite 140

# Glossar

## **Aktor**

Aktoren sind in der Regel technische Vorrichtungen, die eine Eingangsgröße in eine andersartige Ausgangsgröße umwandeln, um einen gewünschten Effekt in einem System zu erreichen. In der Steuer- und Regelungstechnik bezeichnen Aktoren das wandlerbezogene Gegenstück zu Sensoren und bilden die Stellglieder in einem Regelkreis. Sie setzen Signale einer Regelung in z. B. mechanische Arbeit (Öffnen und Schließen eines Ventils) um (vgl. [15]).

## **Ausfall**

Ein Ausfall ist das Aussetzen der Ausführung einer festgelegten Aufgabe. Als Ausfall wird somit der Übergang vom fehlerfreien in einen fehlerhaften Zustand bezeichnet. Der Ausfall ist somit ein Ereignis.

## **Brandfallsteuerung**

Alle Steuerungen, die infolge eines Alarms der BMZ vorgenommen werden.

## **Brandmeldeanlage**

Gruppe von Bestandteilen einschließlich einer Brandmelderzentrale, die bei Anordnung in einer festgelegten Konfiguration bzw. festgelegten Konfigurationen in der Lage sind, einen Brand zu erkennen, zu melden und Signale zur Einleitung entsprechender Aktionen abzugeben.

## **Brandmelder**

Bestandteil eines Brandmeldesystems, das mindestens einen Sensor enthält, der ständig oder in periodischen Zeitabständen mindestens eine geeignete physikalische und/oder chemische Kenngröße (Brandkenngröße) überwacht, die in der Folge eines Brandes auftritt, und der mindestens ein entsprechendes Signal für die Brandmelderzentrale zur Verfügung stellt.

## **Brandmelderzentrale**

Bestandteil einer Brandmeldeanlage, durch welches andere Bestandteile mit Energie versorgt werden können, und welches

a) dazu dient:

1. die Signale der angeschlossenen automatischen Melder und/oder Handfeuermelder aufzunehmen;
2. festzustellen, ob diese Signale eine Brandmeldung bedeuten;
3. jede Brandmeldung akustisch und optisch anzuzeigen;
4. den Ort der Gefahr anzuzeigen.

b) dazu dient, das System auf ordnungsgemäße Funktion zu überwachen und sichtbare und hörbare Anzeigen bei jeder Störung zu geben (z. B. bei Kurzschluss, Drahtbruch oder Störungen in der Stromversorgung); und, wenn notwendig, in der Lage ist, die Störungsmeldung über die Übertragungseinrichtung für Störungsmeldungen an die Empfangszentrale für Störungsmeldungen weiterzuleiten.

c) wenn gefordert, in der Lage ist, die Brandmeldesignale weiterzuleiten; zum Beispiel:

- zu akustischen oder optischen Alarmierungseinrichtungen oder zu einem Sprachalarmierungssystem;
- über die ÜE für Brandmeldungen an eine Alarmempfangszentrale;
- zur Steuerfunktion für automatische Brandschutzeinrichtungen oder -systeme;
- zum Feuerwehr-Bedienfeld;
- zu anderen Systemen oder Einrichtungen, die nicht in den Anwendungsbereich der EN 54 fallen

### **Datenintegrität**

Datenintegrität ist die Fähigkeit eines Systems, der Zerstörung seiner eigenen Datenbank vorzubeugen und Fehler zu erkennen und evtl. zu korrigieren, die in diesem Zusammenhang auftreten.

### **Dynamik**

Unter Dynamik versteht man Veränderungen und Wechselwirkungen zwischen Elementen in einem System und von den Elementen selbst über die Zeit.

### **Dynamische Brandfallsteuerungen**

Unter dynamischen Brandfallsteuerungen werden Steuerungen und Interaktionen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen und anderer technischer Anlagen verstanden, die ereignis- und/oder zeitbezogen stattfinden.



### **Dynamisches System**

Ein dynamisches System enthält eine oder mehrere Größen bzw. Elemente, die sich mit der Zeit ändern (In Anlehnung an [156, 7, 31]).

### **E/E/PE-System (programmierbares elektronisches System)**

System zur Steuerung, zum Schutz oder zur Überwachung, basierend auf einem oder mehreren programmierbaren elektronischen Geräten, einschließlich aller Elemente des Systems wie z. B. Energieversorgung, Sensoren und anderen Eingabegeräten, Datenverbindungen und anderen Kommunikationswegen sowie Aktoren und anderen Ausgabeeinrichtungen [188].

### **Fehler**

Ein Fehler ist die Nichterfüllung einer vorgesehenen Forderung durch einen Merkmalswert. Ein Fehler ist also ein Zustand.

### **Fehlersicherer Betrieb**

Vom fehlersicheren Betrieb eines Systems kann gesprochen werden, wenn das System im Falle des Auftretens eines Fehlers automatisch in einen sicheren Zustand übergeht. Das System kann als „fehlersicher“ bezeichnet werden, wenn das System auch dann in einen sicheren Zustand übergeht, wenn Zweifel daran bestehen, ob das System noch korrekt funktioniert.

### **Feststellanlagen**

Feststellanlagen sind Geräte oder Gerätekombinationen, die geeignet sind, die Funktion von Schließmitteln kontrolliert unwirksam zu machen.

### **Funktionale Sicherheit**

Teil der Gesamtsicherheit, bezogen auf die EUC und das EUC-Leit- oder Steuerungssystem, der von der korrekten Funktion des sicherheitsbezogenen E/E/PE-Systems und anderer risikomindernder Maßnahmen abhängt [188].

### **Funktionsmatrix**

Darstellung der Anforderungen an die jeweils betrachtete sicherheitstechnische Einrichtung auf Basis der zuvor festgestellten Kommunikationsbeziehung aus der Schnittstellenmatrix [216].

### **Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen**

Alle technischen Einrichtungen, die im Brandfall wirken, um die geforderten Schutzziele zu erreichen.

### **Komplexes System**

Ein komplexes System besteht aus einer großen Anzahl von wechselwirkenden Elementen. Die Wechselwirkungen zwischen den Elementen solcher Systeme sind oft nichtlinear und dynamisch [113].

### **Meldebereich**

Geografische Unterteilung des Sicherungsbereiches, in dem ein oder mehrere Punkte installiert sein können, die als Meldergruppe(n) bezeichnet werden und für die eine eigene gemeinsame Anzeige an der BMZ vorgesehen ist.

### **Regeln, Regelung**

Das Regeln, die Regelung ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst [178].

### **Risiko**

Kombination aus der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Schaden auftritt, und dem Ausmaß dieses Schadens [138, 188]. Oder allgemeiner: Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele [200].

### **Safety Integrity Level (SIL), dt.: Sicherheits-Integritätslevel**

Eine von vier diskreten Stufen, die einem Wertebereich der Sicherheitsintegrität entsprechen, wobei der Sicherheits-Integritätslevel 4 die höchste Stufe der Sicherheitsintegrität und der Sicherheits-Integritätslevel 1 die niedrigste darstellt [188].

### **Schnittstellenmatrix**

Darstellung der Kommunikationsbeziehungen der einzelnen sicherheitstechnischen Einrichtungen zum Managementsystem oder untereinander (mit Kommunikationseinrichtung) [216].

### **Sensor**

Ein Sensor ist ein technisches Bauteil, das bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaften und/oder die stoffliche Beschaffenheit der Umgebung, in der er installiert ist, qualitativ oder als Messgröße quantitativ erfasst. Die erfassten Messgrößen werden in weiterverarbeitbare Größen (z. B. elektrische Signale) umgeformt und zur Weiterleitung, Verarbeitung und Auswertung bereitgestellt (vgl. [15]).

### **Steuermatrix**

Die Steuermatrix umfasst alle Steuerungen, die im Brandfall gemeinsam genutzt werden. Der Verknüpfungsplan nach DIN VDE 0833-2 kann Bestandteil der Steuermatrix sein [214].

Die Steuermatrix beschreibt den funktionalen Zusammenhang aller brandschutztechnischen Komponenten. Dies betrifft sowohl die Komponenten der TGA als auch steuerbare bauliche Einrichtungen, z. B. Türen und Tore. Die Steuermatrix beschreibt für jeweils einen Alarmierungsbereich die Interaktionen zwischen Meldern und Aktoren, bzw. Quelle und Senke, in detaillierter Form und unter Benennung der konkreten Gerätekomponente (z. B. Ventilator, Aufzug, Ventilationsfenster) oder einer funktional zusammenhängenden Gerätegruppe (z. B. alle Rauchmelder eines Raums, alle Rettungswegpiktogramme einer Etage) [204, 217].

### **Steuern, Steuerung**

Das Steuern, die Steuerung ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken [178].

### **System**

Ein System besteht aus einer Reihe von Elementen, die in Beziehungen und Verbindungen zueinander stehen und eine gewisse Ganzheitlichkeit oder eine Einheit bilden [105, 148, 172].

### **Systemintegrität**

Die Systemintegrität ist die Fähigkeit, Fehler im eigenen Betrieb zu erkennen und einen Systembediener zu informieren.

### **Systemwiederherstellung**

Bei der Systemwiederherstellung handelt es sich um eine Eigenschaft des Systems, bei dem das System sich bei Ausfällen wieder neu startet und diesbezüglich dem Bediener eine Meldung ausgibt.

### **Übertragungsweg**

Verbindung zwischen den Bestandteilen einer Brandmeldeanlage zur Übertragung von Informationen und/oder Energie [183].

**Verfügbarkeit**

Die Verfügbarkeit eines Systems ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein System zu einem Zeitpunkt korrekt funktioniert (nach DIN 40041 [180] und [14]).

**Verlässlichkeit**

Verlässlichkeit ist die Eigenschaft eines Systems, die es rechtfertigt, Vertrauen in das System zu setzen.

**Wartung, Wartbarkeit**

Wartung ist die Tätigkeit, ein System in seinem erwünschten Betriebsverhalten zu erhalten, oder in dieses Verhalten zurückzuführen. Wartbarkeit ist die Fähigkeit, gewartet zu werden [14].

**Zuverlässigkeit**

Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsanforderung zu erfüllen [180].

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Konzepte der Systemtheorie in Anlehnung an Ropohl [128] . . . . .	6
2.2	Anforderungen an ein technisches System in Anlehnung an [103] . . . . .	9
2.3	Methoden zur Berücksichtigung dynamischer Effekte in Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalysen in Anlehnung an [135] . . . . .	14
2.4	Gesamt-Sicherheitslebenszyklus nach [188] . . . . .	21
2.5	Überblick über die Teile der IEC/DIN EN 61508 in Anlehnung an [14] und [188] . . . . .	22
2.6	Systematik der Fehler . . . . .	24
2.7	Systematik/Informationsfluss: Sensor, Verarbeitende Einheit, Aktuator und Normen . . . . .	26
2.8	Risikograph: Allgemeiner Aufbau in Anlehnung an IEC 61508, Teil 5 [188]	26
2.9	Hardware-Sicherheitslebenszyklus in Anlehnung an [14] . . . . .	29
2.10	Darstellung des 1oo1-Systems in Anlehnung an [11] . . . . .	30
2.11	Darstellung des 1oo2-Systems in Anlehnung an [11] . . . . .	33
2.12	Software-Sicherheitslebenszyklus in Anlehnung an [14] . . . . .	35
3.1	Einteilung des Brandschutzes . . . . .	40
3.2	Systematik/Informationsfluss: Sensor, verarbeitende Einheit und Aktor bei dynamischen Systemen . . . . .	46
3.3	Systematik der Gefahrenmeldeanlagen nach [192] . . . . .	47
3.4	Auswahl physikalischer Einflussgrößen auf die Funktion der BMA . . . . .	48
3.5	Schutzmechanismen der BMA . . . . .	49
3.6	Anforderungen an die BMA . . . . .	49
3.7	Möglichkeiten der BMA . . . . .	50
3.8	Funktionen der BMA mit Subsystemen in Anlehnung an [183] . . . . .	51
3.9	Phasen für Aufbau und Betrieb von BMA . . . . .	51

3.10	Einteilung von Brandmeldern (vgl. hierzu [48]) . . . . .	55
3.11	Beispiel der Vernetzung (Topologie) eines verteilten Brandmeldesystems . . . . .	61
3.12	Exemplarische Quellen von Kosten einer BMA . . . . .	88
3.13	Wechselwirkungen und Ansteuerungen eigenständiger Systeme/Anlagen von der BMA . . . . .	89
4.1	Dynamisches System . . . . .	110
4.2	GB als dynamisches System . . . . .	112
4.3	Phasen dynamischer Brandfallsteuerungen . . . . .	114
4.4	Exemplarische Darstellung der statischen und dynamischen Ansteuerung eines Ventilators . . . . .	115
4.5	Ablaufdiagramm des Modells zur Berücksichtigung von dynamischen Ansteuerungen gebäudetechnischer Brandschutzeinrichtungen . . . . .	118
4.6	Beispiel eines Ablaufdiagramms für Steuerungen . . . . .	122
4.7	Beispiel eines Balkenplans für Steuerungen mit unterschiedlichen Zuständen von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen . . . . .	124
4.8	Zeitstrahl des Brandereignisses . . . . .	133
4.9	Wahrscheinlichkeiten der Evakuierung $P_E$ in Abhängigkeit von der normierten Evakuierungsdauer $t_r$ und von der normierten Zeit bis zum Beginn der Evakuierung $t_b$ für die erste Zeile der Gleichung 4.10 . . . . .	139
4.10	Qualitative Verläufe der Wahrscheinlichkeiten der Wirkung von GB über die normierte Zeit $t_n$ . . . . .	141
4.11	Ablaufdiagramm der Nachweisführung des Modells . . . . .	143
4.12	Differenz zwischen dem normativen und dem individuellen Brandrisiko unter Berücksichtigung der Funktionszuverlässigkeit von GB über die normierte Zeit $t_n$ für das Beispiel nach Tabelle 4.6 . . . . .	144
5.1	Schnitt durch das Modell . . . . .	153
5.2	Risikograph des Fallbeispiels 1 . . . . .	156
5.3	Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Höhe . . . . .	159
5.4	Wärmefreisetzung über die Zeit . . . . .	160
5.5	Verrauchung nach 192 Sekunden, statische Steuerung: Simulation 2 (links), dynamische Steuerung: Simulation 3 (rechts) . . . . .	161
5.6	Temperaturverläufe auf dem nördlichen Galeriegang 1. OG in 2,5 m Höhe (Referenzpunkt) . . . . .	162

5.7	Optische Rauchdichte über die Zeit im nördlichen Galeriegang in der Ebene 1 (Referenzpunkt) . . . . .	163
5.8	Verteilung der optischen Rauchdichte (0,3) nach 192 Sekunden, Variante 2 (statische Steuerung) (links), Variante 3 (dynamische Steuerung) (rechts) .	164
5.9	Ablaufdiagramm der Anwendung des Modells dynamischer Brandfallsteuerungen . . . . .	166
5.10	Optische Rauchdichte pro Weglänge $D_L$ [1/m] über die Zeit, bezogen auf den Maximalwert 0,3 der statischen Steuerung im nördlichen Galeriegang in der Ebene 1 (Referenzpunkt) für unterschiedliche Steuerungen . . . . .	169
5.11	Schnitt der untersuchten Tunnelanlage . . . . .	173
5.12	Risikograph des Fallbeispiels 2 . . . . .	175
5.13	Komponenten für welche die Anforderung des SIL 2 zu erfüllen sind . . . .	176
5.14	Wärmefreisetzung über die Zeit . . . . .	178
5.15	Brandschutztechnische Interaktionen für die Variante 1: statische Ansteuerung (oben) und Variante 2: dynamische Ansteuerung (unten) über die Zeit . . .	179
5.16	Temperaturverläufe an ausgewählten Stellen über die Zeit . . . . .	180
5.17	Verrauchung nach 11 Minuten, Variante 1: statische Ansteuerung (oben), Variante 2: dynamische Ansteuerung (unten); Darstellung der Referenzpunkte	181
5.18	Höhen der raucharmen Schicht über die Zeit an ausgewählten Stellen (siehe Abbildung 5.17) . . . . .	182
5.19	Optische Rauchdichte pro Weglänge $D_L$ [1/m] über die Zeit an ausgewählten Referenzpunkten (siehe Abbildung 5.17) . . . . .	183
5.20	Ablaufdiagramm der Anwendung des Modells . . . . .	184





# Tabellenverzeichnis

2.1	Sytemeigenschaften von GB . . . . .	10
2.2	Zusammenhang zwischen den Ausfallgrenzwerten, der niedrigen und hohen Anforderungsrate und SIL in Anlehnung an IEC 61508 . . . . .	27
2.3	Spezifikationen und Anforderungen für die verschiedenen SILs gemäß IEC 61508 . . . . .	28
3.1	Gebäudetechnische Brandschutzeinrichtungen . . . . .	44
3.2	Exemplarische Komponenten einer Brandmeldeanlage und die jeweiligen Anforderungen . . . . .	52
3.3	Exemplarische zusätzliche Komponenten einer ringförmigen Brandmeldeanlage und die jeweiligen Anforderungen . . . . .	53
3.4	Beispiel einer Schnittstellenmatrix . . . . .	91
3.5	Beispiel einer Funktionsmatrix einer Brandmeldeanlage . . . . .	92
3.6	Beispiel einer Steuermatrix . . . . .	101
3.7	Zusammenfassung der Eignung von gebäudetechnischen Brandschutzeinrichtungen und anderer Anlagen zur dynamischen Ansteuerung . . . . .	106
4.1	Eigenschaften von Systemen . . . . .	111
4.2	Eigenschaften von Eingangssignalen mit Beispielen . . . . .	112
4.3	Eigenschaften von Ausgangssignalen mit Beispielen . . . . .	113
4.4	Beispiele für Werte von Brandrisikogrößen . . . . .	132
4.5	Wahrscheinlichkeiten der Evakuierung $P_E$ für diskrete Wertepaare der normierten Evakuierungsdauer $t_r$ und der normierten Zeit bis zum Beginn der Evakuierung $t_b$ für die erste Zeile der Gleichung 4.9 . . . . .	138
4.6	Annahmen des Beispiels . . . . .	145
5.1	Ergebnisse der Risikoanalyse für das Fallbeispiel 1 . . . . .	155

5.2	Randbedingungen der Simulationen des Fallbeispiels 1 . . . . .	158
5.3	Unterschiede und Bezeichnungen der durchgeführten Simulationen . . . .	158
5.4	Zusammenstellung der Annahmen des Beispiels 1 . . . . .	167
5.5	Vergleich der Ergebnisse von untersuchten Varianten hinsichtlich des indivi- duellen Risikos . . . . .	168
5.6	Ergebnisse der Risikoanalyse für das Fallbeispiel 2 . . . . .	174

# Anhang A

## A1 Eingabedatei des Beispiels 1

Die in den Beispielen eingefügten Punkte bedeuten Auslassungen von Elementen, die sich wiederholen. Durch Raute am Zeilenanfang sind Alternativen und Kommentare hervorgehoben.

```
1 &HEAD CHID='4', TITLE='Wind_4' /
2 &SURF ID='WIND',VEL=-8.0, PROFILE='ATMOSPHERIC', PLE=0.3, Z0=10.0 ,COLOR='GREEN' /
3 &SURF ID = 'WAND'
4 RGB = 200,200,200
5 MATL_ID = 'GYPSUM PLASTER'
6 THICKNESS = 0.012 /
7 &MATL ID = 'GYPSUM PLASTER'
8 FYI = 'Quintiere, Fire Behavior'
9 CONDUCTIVITY = 0.48
10 SPECIFIC_HEAT = 0.84
11 DENSITY = 1440. /
12 &MESH IJK=200,200,240, XB=-10.0,40.0,-10.0,40.0,0.0,60.0 /
13 &TIME T_END=900.0 /
14 &MISC RESTART=.FALSE., SURF_DEFAULT='WAND' /
15 &DUMP DT_RESTART=60.00,DT_DEVC=1.0,DT_SLCF=1.0,DT_PL3D=30.,PLOT3D_QUANTITY(5)='SOOT VOLUME FRACTION' /
16 &VENT MB='XMIN',SURF_ID='WIND' /
17 &VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN' /
18 &VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /
19 &VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN' /
20 &VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN' /
21 &MISC TMPA=20.0 /
22 &REAC ID='Atriumbrand',SOOT_YIELD=0.0815,CO_YIELD=0.052,HEAT_OF_COMBUSTION=18000. /
23 &RADI RADIATIVE_FRACTION=0.38 /
24 &RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3 /
25 &SURF ID='B1',HRRPUA=190.500 ,RAMP_Q='HRR1',COLOR='RED' /
26 &RAMP ID='HRR1',T=0.0,F=0.0 /
27 &RAMP ID='HRR1',T=46.5,F=1.0 /
28 &RAMP ID='HRR1',T=106.0,F=0.0 /
29 &RAMP ID='HRR1',T=180.0,F=0.0 /
30 &RAMP ID='HRR1',T=700.0,F=0.0 /
31 &SURF ID='B2',HRRPUA=190.500 ,RAMP_Q='HRR2',COLOR='RED' /
32 &RAMP ID='HRR2',T=0.0,F=0.0 /
33 &RAMP ID='HRR2',T=46.5,F=0.0 /
34 &RAMP ID='HRR2',T=53.0,F=1.0 /
35 &RAMP ID='HRR2',T=92.0,F=1.0 /
36 &RAMP ID='HRR2',T=106.0,F=0.0 /
37 &RAMP ID='HRR2',T=700.0,F=0.0 /
38 &SURF ID='B3',HRRPUA=190.500 ,RAMP_Q='HRR3',COLOR='RED' /
39 &RAMP ID='HRR3',T=0.0,F=0.0 /
40 &RAMP ID='HRR3',T=53.0,F=0.0 /
41 &RAMP ID='HRR3',T=59.5,F=1.0 /
42 &RAMP ID='HRR3',T=79.0,F=1.0 /
43 &RAMP ID='HRR3',T=92.0,F=0.0 /
44 &RAMP ID='HRR3',T=700.0,F=0.0 /
45 &SURF ID='B4',HRRPUA=190.500 ,RAMP_Q='HRR4',COLOR='RED' /
46 &RAMP ID='HRR4',T=0.0,F=0.0 /
47 &RAMP ID='HRR4',T=59.5,F=0.0 /
48 &RAMP ID='HRR4',T=63.3,F=1.0 /
49 &RAMP ID='HRR4',T=75.5,F=1.0 /
50 &RAMP ID='HRR4',T=79.0,F=0.0 /
51 &RAMP ID='HRR4',T=700.0,F=0.0 /
52 &SURF ID='B5',HRRPUA=190.500 ,RAMP_Q='HRR5',COLOR='RED' /
53 &RAMP ID='HRR5',T=0.0,F=0.0 /
54 &RAMP ID='HRR5',T=63.3,F=0.0 /
55 &RAMP ID='HRR5',T=72.0,F=1.0 /
56 &RAMP ID='HRR5',T=72.5,F=1.0 /
57 &RAMP ID='HRR5',T=75.5,F=0.0 /
58 &RAMP ID='HRR5',T=700.0,F=0.0 /
59 &OBST XB=14.15,15.85,14.15,15.85,0.5,0.9,SURF_IDS='INERT','B1','INERT' /
60 &OBST XB=14.3125,15.6875,14.3125,15.6875,0.9,1.3,SURF_IDS='INERT','B2','INERT' /
61 &OBST XB=14.475,15.525,14.475,15.525,1.3,1.7,SURF_IDS='INERT','B3','INERT' /
62 &OBST XB=14.6375,15.3625,14.6375,15.3625,1.7,2.1,SURF_IDS='INERT','B4','INERT' /
63 &OBST XB=14.8,15.2,14.8,15.2,2.1,2.5,SURF_IDS='INERT','B5','INERT' /
64 #BRAND_SESSEL
```

```

65 &SURF ID='Sitz',HRRPUA= 510.994 ,RAMP_Q='HRR',COLOR='RED' /
66 &RAMP ID='HRR',T= 0.000 ,F= 0.000 /
67 &RAMP ID='HRR',T= 73.635 ,F= 0.004 /
68 &RAMP ID='HRR',T= 107.332 ,F= 0.023 /
69 &RAMP ID='HRR',T= 134.789 ,F= 0.074 /
70 &RAMP ID='HRR',T= 154.758 ,F= 0.156 /
71 &RAMP ID='HRR',T= 170.983 ,F= 0.180 /
72 &RAMP ID='HRR',T= 185.335 ,F= 0.178 /
73 &RAMP ID='HRR',T= 219.657 ,F= 0.207 /
74 &RAMP ID='HRR',T= 258.970 ,F= 0.270 /
75 &RAMP ID='HRR',T= 275.195 ,F= 0.416 /
76 &RAMP ID='HRR',T= 282.683 ,F= 0.629 /
77 &RAMP ID='HRR',T= 287.051 ,F= 0.760 /
78 &RAMP ID='HRR',T= 294.540 ,F= 0.871 /
79 &RAMP ID='HRR',T= 300.780 ,F= 0.848 /
80 &RAMP ID='HRR',T= 315.133 ,F= 1.000 /
81 &RAMP ID='HRR',T= 331.981 ,F= 0.904 /
82 &RAMP ID='HRR',T= 340.718 ,F= 0.689 /
83 &RAMP ID='HRR',T= 345.710 ,F= 0.453 /
84 &RAMP ID='HRR',T= 353.198 ,F= 0.254 /
85 &RAMP ID='HRR',T= 358.814 ,F= 0.113 /
86 &RAMP ID='HRR',T= 364.431 ,F= 0.039 /
87 &RAMP ID='HRR',T= 400.624 ,F= 0.000 /
88 &OBST XB=12.,13.,14.5,15.5,0.,1.,SURF_IDS='Sitz','Sitz','INERT' /
89 &OBST XB=17.,18.,14.5,15.5,0.,1.,SURF_IDS='Sitz','Sitz','INERT' /
90 &OBST XB=14.5,15.5,12.,13.,0.,1.,SURF_IDS='Sitz','Sitz','INERT' /
91 &OBST XB=14.5,15.5,17.,18.,0.,1.,SURF_IDS='Sitz','Sitz','INERT' /
92 #WAENDE_UND_WINDFAENGE
93 &OBST XB= 5.0,25.0,5.0,5.0,0.0,30.5,RGB=65,105,225/ E WAND
94 &HOLE XB= 14.0,16.0,4.8,5.2,0.5,3.0, COLOR='RED', TRANSPARENCY=0.5, DEVC_ID='timer 1' / E EINGANG
95 #Luftspalt
96 &HOLE XB= 14.0,16.0,4.8,5.2,0.0,0.5 /
97 &OBST XB= 13.0,17.0,7.0,7.0,0.0,3.0,RGB=65,105,225/ E Windfang Teil 1
98 &OBST XB= 13.0,17.0,5.0,7.0,3.0,3.0,RGB=65,105,225/ E Windfang Teil 2
99 &OBST XB= 5.0,25.0,2.5,0,25.0,0.0,30.5,RGB=65,105,225 / W WAND
100 &HOLE XB= 14.0,16.0,24.8,25.2,0.5,3.0, COLOR='RED', TRANSPARENCY=0.5, DEVC_ID='timer 1' / W EINGANG
101 #Luftspalt
102 &HOLE XB= 14.0,16.0,24.8,25.2,0.0,0.5 /
103 &OBST XB= 13.0,17.0,23.0,23.0,0.0,3.0,RGB=65,105,225 / W Windfang Teil 1
104 &OBST XB= 13.0,17.0,23.0,25.0,3.0,3.0,RGB=65,105,225 / W Windfang Teil 1
105 &OBST XB= 25.0,25.0,5.0,25.0,0.0,30.5,RGB=65,105,225 / N WAND
106 &HOLE XB= 24.8,25.2,14.0,16.0,0.5,3.0, COLOR='RED', TRANSPARENCY=0.5, DEVC_ID='timer 1' / N EINGANG
107 #Luftspalt
108 &HOLE XB= 24.8,25.2,14.0,16.0,0.0,0.5 /
109 &OBST XB= 23.0,23.0,13.0,17.0,0.0,3.0,RGB=65,105,225 / N Windfang Teil 1
110 &OBST XB= 23.0,25.0,13.0,17.0,3.0,3.0,RGB=65,105,225 / N Windfang Teil 2
111 &OBST XB= 5.0,5.0,5.0,25.0,0.0,30.5,RGB=65,105,225 / S WAND
112 &HOLE XB= 4.8,5.2,14.0,16.0,0.0,3.0, COLOR='RED', TRANSPARENCY=0.5, DEVC_ID='timer 1' / S EINGANG
113 &OBST XB= 7.0,7.0,13.0,17.0,0.0,3.0,RGB=65,105,225 / S Windfang Teil 1
114 &OBST XB= 5.0,7.0,13.0,17.0,3.0,3.0,RGB=65,105,225 / S Windfang Teil 2
115 #oberste Decke
116 &OBST XB= 5.0,25.0,5.0,25.0,30.0,30.0,RGB=65,105,225 / oberste Decke
117 #ENTRAUCHUNGSOEFFNUNGEN#
118 #Entrauchungsoeffnungen 9qm
119 &HOLE XB= 10.0,11.0,10.0,11.0,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 1
120 &OBST XB= 10.0,11.0,10.0,10.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 1.1
121 &OBST XB= 10.0,11.0,11.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 1.2
122 &OBST XB= 10.0,10.0,10.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 1.3
123 &OBST XB= 11.0,11.0,10.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 1.4
124 &HOLE XB= 14.5,15.5,10.0,11.0,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 2
125 &OBST XB= 14.5,15.5,10.0,10.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 2.1
126 &OBST XB= 14.5,15.5,11.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 2.2
127 &OBST XB= 14.5,14.5,10.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 2.3
128 &OBST XB= 15.5,15.5,10.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 2.4
129 &HOLE XB= 19.0,20.0,10.0,11.0,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 3
130 &OBST XB= 19.0,20.0,10.0,10.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 3.1
131 &OBST XB= 19.0,20.0,11.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 3.2
132 &OBST XB= 19.0,19.0,10.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 3.3
133 &OBST XB= 20.0,20.0,10.0,11.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 3.4
134 &HOLE XB= 10.0,11.0,14.5,15.5,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 4
135 &OBST XB= 10.0,11.0,14.5,14.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 4.1
136 &OBST XB= 10.0,11.0,15.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 4.2
137 &OBST XB= 10.0,10.0,14.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 4.3
138 &OBST XB= 11.0,11.0,14.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 4.4
139 &HOLE XB= 14.5,15.5,14.5,15.5,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 5
140 &OBST XB= 14.5,15.5,14.5,14.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 5.1
141 &OBST XB= 14.5,15.5,15.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 5.2
142 &OBST XB= 14.5,14.5,14.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 5.3
143 &OBST XB= 15.5,15.5,14.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 5.4
144 &HOLE XB= 19.0,20.0,14.5,15.4,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 6
145 &OBST XB= 19.0,20.0,14.5,14.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 6.1
146 &OBST XB= 19.0,20.0,15.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 6.2
147 &OBST XB= 19.0,19.0,14.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 6.3
148 &OBST XB= 20.0,20.0,14.5,15.5,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 6.4
149 &HOLE XB= 10.0,11.0,19.0,20.0,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 7
150 &OBST XB= 10.0,11.0,19.0,19.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 7.1
151 &OBST XB= 10.0,11.0,20.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 7.2
152 &OBST XB= 10.0,10.0,19.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 7.3
153 &OBST XB= 11.0,11.0,19.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 7.4
154 &HOLE XB= 14.5,15.5,19.0,20.0,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 8
155 &OBST XB= 14.5,15.5,19.0,19.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 8.1
156 &OBST XB= 14.5,15.5,20.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 8.2
157 &OBST XB= 14.5,14.5,19.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 8.3
158 &OBST XB= 15.5,15.5,19.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 8.4
159 &HOLE XB= 19.0,20.0,19.0,20.0,29.9,30.1, COLOR='KHAKI', TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='timer 2' / Entrauchungsoeffnung 9
160 &OBST XB= 19.0,20.0,19.0,19.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 9.1
161 &OBST XB= 19.0,20.0,20.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 9.2
162 &OBST XB= 19.0,19.0,19.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 9.3
163 &OBST XB= 20.0,20.0,19.0,20.0,30.0,30.5,RGB=0,139,0, TRANSPARENCY=0.5, / Ueberbau Entrauchungsoeffnung 9.4
164 #GESCHOSSDECKEN#
165 &OBST XB= 5.0,25.0,5.0,10.0,5.0,5.0,RGB=139,134,78/ OG1a

```

```

166 &OBST XB= 5.0,10.0,10.0,20.0,5.0,5.0,RGB=139,134,78/ OG1b
167 &OBST XB= 20.0,25.0,10.0,20.0,5.0,5.0,RGB=139,134,78/ OG1c
168 &OBST XB= 5.0,25.0,20.0,25.0,5.0,5.0,RGB=139,134,78/ OG1d
169 &OBST XB= 5.0,25.0,5.0,10.0,10.0,10.0,RGB=139,134,78/ OG2a
170 &OBST XB= 5.0,10.0,10.0,20.0,10.0,10.0,RGB=139,134,78/ OG2b
171 &OBST XB= 20.0,25.0,10.0,20.0,10.0,10.0,RGB=139,134,78/ OG2c
172 &OBST XB= 5.0,25.0,20.0,25.0,10.0,10.0,RGB=139,134,78/ OG2d
173 &OBST XB= 5.0,25.0,5.0,10.0,15.0,15.0,RGB=139,134,78/ OG3a
174 &OBST XB= 5.0,10.0,10.0,20.0,15.0,15.0,RGB=139,134,78/ OG3b
175 &OBST XB= 20.0,25.0,10.0,20.0,15.0,15.0,RGB=139,134,78/ OG3c
176 &OBST XB= 5.0,25.0,20.0,25.0,15.0,15.0,RGB=139,134,78/ OG3d
177 &OBST XB= 5.0,25.0,5.0,10.0,20.0,20.0,RGB=139,134,78/ OG4a
178 &OBST XB= 5.0,10.0,10.0,20.0,20.0,20.0,RGB=139,134,78/ OG4b
179 &OBST XB= 20.0,25.0,10.0,20.0,20.0,20.0,RGB=139,134,78/ OG4c
180 &OBST XB= 5.0,25.0,20.0,25.0,20.0,20.0,RGB=139,134,78/ OG4d
181 &OBST XB= 5.0,25.0,5.0,10.0,25.0,25.0 / OG5a
182 &OBST XB= 5.0,10.0,10.0,20.0,25.0,25.0 / OG5b
183 &OBST XB= 20.0,25.0,10.0,20.0,25.0,25.0 / OG5c
184 &OBST XB= 5.0,25.0,20.0,25.0,25.0,25.0 / OG5d
185 #RAUCHSCHUERZEN_UND_GELAENDER
186 &OBST XB= 10.0,20.0,10.0,10.0,4.0,6.0,RGB=139,134,78/ OG1a
187 &OBST XB= 10.0,20.0,20.0,20.0,4.0,6.0,RGB=139,134,78/ OG1b
188 &OBST XB= 10.0,10.0,10.0,20.0,4.0,6.0,RGB=139,134,78/ OG1c
189 &OBST XB= 20.0,20.0,10.0,20.0,4.0,6.0,RGB=139,134,78/ OG1d
190 &OBST XB= 10.0,20.0,10.0,10.0,9.0,11.0,RGB=139,134,78/ OG2a
191 &OBST XB= 10.0,20.0,20.0,20.0,9.0,11.0,RGB=139,134,78/ OG2b
192 &OBST XB= 10.0,10.0,10.0,20.0,9.0,11.0,RGB=139,134,78/ OG2c
193 &OBST XB= 20.0,20.0,10.0,20.0,9.0,11.0,RGB=139,134,78/ OG2d
194 &OBST XB= 10.0,20.0,10.0,10.0,14.0,16.0,RGB=139,134,78/ OG3a
195 &OBST XB= 10.0,20.0,20.0,20.0,14.0,16.0,RGB=139,134,78/ OG3b
196 &OBST XB= 10.0,10.0,10.0,20.0,14.0,16.0,RGB=139,134,78/ OG3c
197 &OBST XB= 20.0,20.0,10.0,20.0,14.0,16.0,RGB=139,134,78/ OG3d
198 &OBST XB= 10.0,20.0,10.0,10.0,19.0,21.0,RGB=139,134,78/ OG4a
199 &OBST XB= 10.0,20.0,20.0,20.0,19.0,21.0,RGB=139,134,78/ OG4b
200 &OBST XB= 10.0,10.0,10.0,20.0,19.0,21.0,RGB=139,134,78/ OG4c
201 &OBST XB= 20.0,20.0,10.0,20.0,19.0,21.0,RGB=139,134,78/ OG4d
202 &OBST XB= 10.0,20.0,10.0,10.0,24.0,26.0,RGB=139,134,78/ OG5a
203 &OBST XB= 10.0,20.0,20.0,20.0,24.0,26.0,RGB=139,134,78/ OG5b
204 &OBST XB= 10.0,10.0,10.0,20.0,24.0,26.0,RGB=139,134,78/ OG5c
205 &OBST XB= 20.0,20.0,10.0,20.0,24.0,26.0,RGB=139,134,78/ OG5d
206 #TREPPENHAUSER
207 #TH 1
208 &OBST XB= 5.0,8.0,8.0,8.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 1a
209 &OBST XB= 8.0,8.0,5.0,8.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 1b
210 #TH 2
211 &OBST XB= 22.0,25.0,8.0,8.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 2a
212 &OBST XB= 22.0,22.0,5.0,8.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 2b
213 #TH 3
214 &OBST XB= 5.0,11.0,22.0,22.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 3a
215 &OBST XB= 11.0,11.0,22.0,25.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 3b
216 #TH 4
217 &OBST XB= 19.0,25.0,22.0,22.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 2a
218 &OBST XB= 19.0,19.0,22.0,25.0,0.0,30.0,RGB=65,105,225/ TH 2b
219 &OBST XB=7.5,7.5,15.0,15.0,0.0,30.0,RGB=255,0,0, TRANSPARENCY=0.75, DEVC_ID='LH1' /
220 &DEVC XB=7.5,7.5,15.0,15.0,0.0,30.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='LH1' /
221 #Oeffnen von Nachstroemoeffnungen nach 1 Minute
222 &DEVC XYZ=0.1,0.1,0.1, ID='timer 1', SETPOINT= 60.0, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.FALSE. /
223 &DEVC XYZ=0.1,0.1,0.1, ID='timer 2', SETPOINT= 60.0, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.FALSE. /
224 #Output#
225 &ISOF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', VALUE(1)=0.1 /
226 ...
227 &ISOF QUANTITY='FED', VALUE(1)=1.0 /
228 &SLCF PBZ=1.,QUANTITY='PRESSURE' /
229 &SLCF PBZ=1.,QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE./
230 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='OPTICAL DENSITY' /
231 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='FED' /
232 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
233 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='PRESSURE' /
234 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /
235 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='DENSITY',SPEC_ID='carbon monoxide' /
236 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='DENSITY',SPEC_ID='oxygen' /
237 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='DENSITY',SPEC_ID='soot' /
238 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='DENSITY',SPEC_ID='carbon dioxide' /
239 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='MASS FRACTION',SPEC_ID='carbon monoxide' /
240 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='MASS FRACTION',SPEC_ID='soot' /
241 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='MASS FRACTION',SPEC_ID='carbon dioxide' /
242 &SLCF PBZ=15.,QUANTITY='VOLUME FRACTION',SPEC_ID='carbon monoxide' /
243 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='OPTICAL DENSITY', ID='OD_Z_2.5m' /
244 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='OPTICAL DENSITY', ID='OD_Z_7.5m' /
245 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7., QUANTITY='OPTICAL DENSITY', ID='OD_Z_7m' /
246 ...
247 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='OPTICAL DENSITY', ID='OD_Z_27.5m' /
248 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='FED', ID='FED_Z_2.5m' /
249 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='FED', ID='FED_Z_7.5m' /
250 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7., QUANTITY='FED', ID='FED_Z_7m' /
251 ...
252 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='FED', ID='FED_Z_27.5m' /
253 ...
254 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='VFCO_Z_2.5m' /
255 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='VFCO_Z_7.5m' /
256 ...
257 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='VFCO_Z_27.5m' /
258 ...
259 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='VFCO2_Z_2.5m' /
260 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='VFCO2_Z_7.5m' /
261 ...
262 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='VFCO2_Z_27.5m' /
263 ...
264 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen', ID='VFO2_Z_2.5m' /
265 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen', ID='VFO2_Z_7.5m' /
266 ...

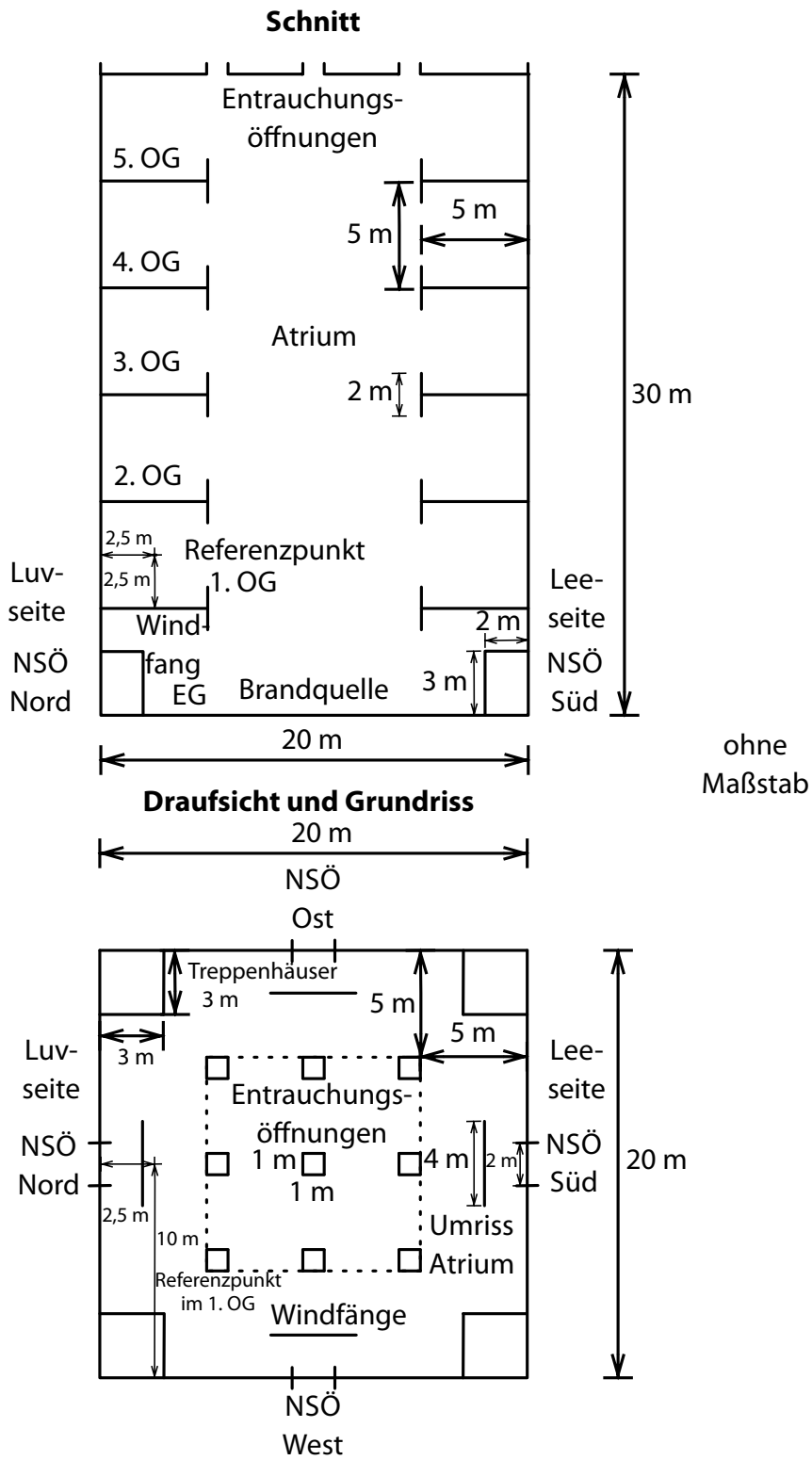
```

```

267 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen', ID='VFO2_Z_27.5m' /
268 ...
269 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='MFCO_Z_2.5m' /
270 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='MFCO_Z_7.5m' /
271 ...
272 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='MFCO_Z_27.5m' /
273 ...
274 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='MFCO2_Z_2.5m' /
275 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='MFCO2_Z_7.5m' /
276 ...
277 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='MFCO2_Z_27.5m' /
278 ...
279 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='oxygen', ID='MFO2_Z_2.5m' /
280 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='oxygen', ID='MFO2_Z_7.5m' /
281 ...
282 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='oxygen', ID='MFO2_Z_27.5m' /
283 ...
284 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='soot', ID='MFS_Z_2.5m' /
285 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='soot', ID='MFS_Z_7.5m' /
286 ...
287 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='soot', ID='MFS_Z_27.5m' /
288 ...
289 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='soot', ID='RHOS_Z_2.5m' /
290 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='soot', ID='RHOS_Z_7.5m' /
291 ...
292 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='soot', ID='RHOS_Z_27.5m' /
293 ...
294 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='RHOCO_Z_2.5m' /
295 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='RHOCO_Z_7.5m' /
296 ...
297 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='RHOCO_Z_27.5m' /
298 ...
299 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='oxygen', ID='RHO02_Z_2.5m' /
300 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='oxygen', ID='RHO02_Z_7.5m' /
301 ...
302 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='oxygen', ID='RHO02_Z_27.5m' /
303 ...
304 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='RHOCO2_Z_2.5m' /
305 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='RHOCO2_Z_7.5m' /
306 ...
307 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='RHOCO2_Z_27.5m' /
308 ...
309 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='T_Z_2.5m' /
310 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='T_Z_7.5m' /
311 ...
312 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='T_Z_27.5m' /
313 ...
314 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, QUANTITY='VISIBILITY', ID='V_Z_2.5m' /
315 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, QUANTITY='VISIBILITY', ID='V_Z_7.5m' /
316 ...
317 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, QUANTITY='VISIBILITY', ID='V_Z_27.5m' /
318 ...
319 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 2.5, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD1' /
320 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 7.5, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD2' /
321 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 12.5, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD3' /
322 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 17.5, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD4' /
323 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 22.5, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD5' /
324 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27.5, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD6' /
325 &DEVC XYZ= 7.5, 15.0, 27, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD7' /
326 &PROP ID='Acme Smoke Detector', QUANTITY='CHAMBER OBSCURATION', LENGTH=1.8,
327 ACTIVATION_OBSCURATION=3.28 /
328 &TAIL /

```

# A1 Zeichnungen des Beispiels 1



## A2 Eingabedatei des Beispiels 2

```
1 &HEAD CHID='7' /
2 &MESH IJK= 1050.0, 30.0, 30.0, XB= -15.0, 195.0, -3.0, 3.0, -1.0, 5.0 /
3 &SURF ID='WIND',VEL=-0.5, PROFILE='ATMOSPHERIC', PLE=0.3, ZO=10.0 ,COLOR='GREEN'/
4 &OBST XB= -10.0,190.0, -2.1,-2.0, -1.0,3.0, SURF_ID='Wand'/
5 &OBST XB= -10.0,190.0, 2.0,2.1, -1.0,3.0, SURF_ID='Wand'/
6 &OBST XB= -10.0,190.0, -2.0,2.0, 3.0,3.1, SURF_ID='Wand'/
7 &OBST XB= -10.0,190.0, -2.0,2.0, -1.0,-0.9, SURF_ID='Wand'/
8 &OBST XB= -10.0,-10.0, -3.0,3.0, 3.0,5.0, SURF_ID='Wand'/
9 &OBST XB= -10.0,-10.0, -3.0,-2.1, -1.0,3.0, SURF_ID='Wand'/
10 &OBST XB= -10.0,-10.0, 2.1,3.0, -1.0,3.0, SURF_ID='Wand'/
11 &SURF ID='Wand', MATL_ID='Beton', THICKNESS=0.1, COLOR='BLUE', TRANSPARENCY=0.5/
12 &EVENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' / Systemgrenze
13 &EVENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' / Systemgrenze
14 &EVENT XB= -15.0, -15.0, -3.0, 3.0, 0.0, 5.0, SURF_ID='WIND' /
15 &EVENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' / Systemgrenze
16 &EVENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' / Systemgrenze
17 &TIME T_END= 3600.0 /
18 &DUMP DT_SLCF= 1.0, DT_DEVC= 1.0, DT_CTRL=1.0 /
19 &MATL ID='Beton',
20 CONDUCTIVITY = 2.1,
21 SPECIFIC_HEAT = 1.0,
22 DENSITY = 2400. /
23 &REAC ID='BAHN',
24 C=1.00,
25 H=1.13,
26 O=0.3400,
27 N=0.1600,
28 X_O2_LL=0.15,
29 HEAT_OF_COMBUSTION=2.3110000E004,
30 CO_YIELD=0.0700,
31 SOOT_YIELD=0.1300/
32 &RADI RADIATIVE_FRACTION=0.2 /
33 &MATL ID='Aluminium',
34 SPECIFIC_HEAT=0.46,
35 CONDUCTIVITY=45.00,
36 DENSITY=7.5000000E003/
37 &MATL ID='GF-UP',
38 SPECIFIC_HEAT=1.92,
39 CONDUCTIVITY=0.50,
40 DENSITY=1.8000000E003/
41 &MATL ID='PUR',
42 SPECIFIC_HEAT=2.13,
43 CONDUCTIVITY=0.1800,
44 DENSITY=950.00/
45 &MATL ID='VSG',
46 SPECIFIC_HEAT=0.84,
47 CONDUCTIVITY=0.8,
48 DENSITY=2600.00/
49 &SURF ID='Aussenhaut',
50 RGB=255,51,51,
51 BACKING='INSULATED',
52 MATL_ID(1,1)='Aluminium',
53 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
54 THICKNESS(1)=3.0000000E-003/
55 &SURF ID='Innenwand',
56 COLOR='WHITE',
57 BACKING='INSULATED',
58 MATL_ID(1,1)='GF-UP',
59 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
60 THICKNESS(1)=3.0000000E-003/
61 &SURF ID='Fenster',
62 COLOR='YELLOW',
63 BACKING='INSULATED',
64 MATL_ID(1,1)='VSG',
65 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
66 THICKNESS(1)=50.0000000E-003/
67 &SURF ID='burner1',HRRPUA= 802.4 ,RAMP_Q='burner1',RGB=100,100,50 /
68 &SURF ID='burner2',HRRPUA= 862.8 ,RAMP_Q='burner2',RGB=50,50,100 /
69 &RAMP ID='burner1',T= 0.00 ,F= 0.00 /
70 &RAMP ID='burner1',T= 300.00 ,F= 0.05 /
71 &RAMP ID='burner1',T= 600.00 ,F= 0.22 /
72 &RAMP ID='burner1',T= 870.00 ,F= 0.88 /
73 &RAMP ID='burner1',T= 900.00 ,F= 0.90 /
74 &RAMP ID='burner1',T= 1200.00 ,F= 1.00 /
75 &RAMP ID='burner1',T= 1380.00 ,F= 1.00 /
76 &RAMP ID='burner1',T= 1500.00 ,F= 1.00 /
77 &RAMP ID='burner1',T= 1620.00 ,F= 1.00 /
78 &RAMP ID='burner1',T= 1800.00 ,F= 0.97 /
79 &RAMP ID='burner1',T= 1920.00 ,F= 0.91 /
80 &RAMP ID='burner1',T= 2100.00 ,F= 0.88 /
81 &RAMP ID='burner1',T= 2400.00 ,F= 0.80 /
82 &RAMP ID='burner1',T= 2700.00 ,F= 0.72 /
83 &RAMP ID='burner1',T= 3000.00 ,F= 0.64 /
84 &RAMP ID='burner1',T= 3300.00 ,F= 0.54 /
85 &RAMP ID='burner1',T= 3600.00 ,F= 0.47 /
86 &RAMP ID='burner1',T= 3900.00 ,F= 0.39 /
87 &RAMP ID='burner1',T= 4200.00 ,F= 0.31 /
88 &RAMP ID='burner1',T= 4500.00 ,F= 0.24 /
89 &RAMP ID='burner1',T= 4800.00 ,F= 0.16 /
90 &RAMP ID='burner1',T= 5100.00 ,F= 0.08 /
91 &RAMP ID='burner1',T= 5400.00 ,F= 0.01 /
92 &RAMP ID='burner2',T= 0.00 ,F= 0.00 /
93 &RAMP ID='burner2',T= 300.00 ,F= 0.00 /
94 &RAMP ID='burner2',T= 600.00 ,F= 0.00 /
95 &RAMP ID='burner2',T= 870.00 ,F= 0.00 /
96 &RAMP ID='burner2',T= 900.00 ,F= 0.02 /
97 &RAMP ID='burner2',T= 1200.00 ,F= 0.57 /
```



```

98 &RAMP ID='burner2',T= 1380.00 ,F= 1.00 /
99 &RAMP ID='burner2',T= 1500.00 ,F= 1.00 /
100 &RAMP ID='burner2',T= 1620.00 ,F= 1.00 /
101 &RAMP ID='burner2',T= 1800.00 ,F= 0.90 /
102 &RAMP ID='burner2',T= 1920.00 ,F= 0.85 /
103 &RAMP ID='burner2',T= 2100.00 ,F= 0.82 /
104 &RAMP ID='burner2',T= 2400.00 ,F= 0.75 /
105 &RAMP ID='burner2',T= 2700.00 ,F= 0.67 /
106 &RAMP ID='burner2',T= 3000.00 ,F= 0.60 /
107 &RAMP ID='burner2',T= 3300.00 ,F= 0.51 /
108 &RAMP ID='burner2',T= 3600.00 ,F= 0.43 /
109 &RAMP ID='burner2',T= 3900.00 ,F= 0.36 /
110 &RAMP ID='burner2',T= 4200.00 ,F= 0.29 /
111 &RAMP ID='burner2',T= 4500.00 ,F= 0.22 /
112 &RAMP ID='burner2',T= 4800.00 ,F= 0.15 /
113 &RAMP ID='burner2',T= 5100.00 ,F= 0.08 /
114 &RAMP ID='burner2',T= 5400.00 ,F= 0.01 /
115 &DEVX XYZ= 10.0 , 0.0 , 0.0 ,ID='timer 1',QUANTITY='TIME',SETPOINT= 800.0 , INITIAL_STATE=.TRUE./
116 &DEVX XYZ= 10.0 , 0.0 , 0.0 ,ID='timer 2',QUANTITY='TIME',SETPOINT= 700.0 , INITIAL_STATE=.TRUE./
117 &DEVX XYZ= 10.0 , 0.0 , 0.0 ,ID='timer 3',QUANTITY='TIME',SETPOINT= 600.0 , INITIAL_STATE=.TRUE./
118 &DEVX XYZ= 10.0 , 0.0 , 0.0 ,ID='timer 4',QUANTITY='TIME',SETPOINT= 0.0 , INITIAL_STATE=.TRUE./
119 &HOLE XB= -2.4 , -1.55 , -1.925 , -1.025 , 0 , 2.2 ,DEVC_ID='timer 4' /
120 &HOLE XB= 21.55 , 22.4 , -1.925 , -1.025 , 0 , 2.2 ,DEVC_ID='timer 4' /
121 &OBST XB= -3 , 23 , 1.325 , 1.625 , 0 , 1.25 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
122 &OBST XB= -3 , 23 , 1.325 , 1.625 , 2.2 , 2.4 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
123 &OBST XB= -3 , -2.4 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
124 &OBST XB= -1.4 , 0.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
125 &OBST XB= 1.7 , 2.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
126 &OBST XB= 3.7 , 4.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
127 &OBST XB= 5.7 , 6.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
128 &OBST XB= 7.7 , 8.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
129 &OBST XB= 9.7 , 10.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
130 &OBST XB= 11.7 , 12.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
131 &OBST XB= 13.7 , 14.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
132 &OBST XB= 15.7 , 16.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
133 &OBST XB= 17.7 , 18.3 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
134 &OBST XB= 19.7 , 21.4 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
135 &OBST XB= 22.4 , 23 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
136 &OBST XB= -2.4 , -1.4 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
137 &OBST XB= 0.3 , 1.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
138 &OBST XB= 2.3 , 3.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
139 &OBST XB= 4.3 , 5.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
140 &OBST XB= 6.3 , 7.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
141 &OBST XB= 8.3 , 9.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 3',PERMIT_HOLE=.FALSE./
142 &OBST XB= 10.3 , 11.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 3',PERMIT_HOLE=.FALSE./
143 &OBST XB= 12.3 , 13.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
144 &OBST XB= 14.3 , 15.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
145 &OBST XB= 16.3 , 17.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
146 &OBST XB= 18.3 , 19.7 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
147 &OBST XB= 21.4 , 22.4 , 1.325 , 1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
148 &OBST XB= -3 , -2.4 , -1.325 , -1.625 , 0 , 1.25 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
149 &OBST XB= -1.55 , 21.55 , -1.325 , -1.625 , 0 , 1.25 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
150 &OBST XB= 22.4 , 23 , -1.325 , -1.625 , 0 , 1.25 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
151 &OBST XB= -3 , 23 , -1.325 , -1.625 , 2.2 , 2.4 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
152 &OBST XB= -3 , -2.4 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
153 &OBST XB= -1.55 , 0.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
154 &OBST XB= 1.7 , 2.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
155 &OBST XB= 3.7 , 4.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
156 &OBST XB= 5.7 , 6.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
157 &OBST XB= 7.7 , 8.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
158 &OBST XB= 9.7 , 10.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
159 &OBST XB= 11.7 , 12.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
160 &OBST XB= 13.7 , 14.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
161 &OBST XB= 15.7 , 16.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
162 &OBST XB= 17.7 , 18.3 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
163 &OBST XB= 19.7 , 21.55 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
164 &OBST XB= 22.4 , 23 , -1.325 , -1.625 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
165 &OBST XB= -2.4 , -1.55 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
166 &OBST XB= 0.3 , 1.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
167 &OBST XB= 2.3 , 3.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
168 &OBST XB= 4.3 , 5.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
169 &OBST XB= 6.3 , 7.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
170 &OBST XB= 8.3 , 9.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 3',PERMIT_HOLE=.FALSE./
171 &OBST XB= 10.3 , 11.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 3',PERMIT_HOLE=.FALSE./
172 &OBST XB= 12.3 , 13.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
173 &OBST XB= 14.3 , 15.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 2',PERMIT_HOLE=.FALSE./
174 &OBST XB= 16.3 , 17.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
175 &OBST XB= 18.3 , 19.7 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
176 &OBST XB= 21.55 , 22.4 , -1.625 , -1.325 , 1.25 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
177 &OBST XB= 22.7 , 23 , -1.625 , 1.625 , 0 , 2.4 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
178 &OBST XB= -3 , -2.7 , -0.5 , 0.5 , 1.2 , 2.2 ,SURF_ID='Fenster',DEVC_ID='timer 1',PERMIT_HOLE=.FALSE./
179 &OBST XB= -3 , -2.7 , -0.5 , 0.5 , 0 , 1.2 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
180 &OBST XB= -3 , -2.7 , -0.5 , 0.5 , 2.2 , 2.4 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
181 &OBST XB= -3 , -2.7 , -1.625 , -0.5 , 0 , 2.4 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
182 &OBST XB= -3 , -2.7 , 0.5 , 1.625 , 0 , 2.4 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
183 &OBST XB= -3 , 23 , -1.625 , 1.625 , 2.4 , 2.7 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
184 &OBST XB= -3 , 23 , -1.625 , 1.625 , -0.3 , 0 ,SURF_ID='Aussenhaut',PERMIT_HOLE=.FALSE./
185 &OBST XB= 7.5 , 12.5 , -1.25 , 1.25 , 0 , 0.4 ,PERMIT_HOLE=.FALSE.,SURF_IDS='burner1','INERT','INERT' /
186 &OBST XB= -2.5 , 7.5 , -1.25 , 1.25 , 0 , 0.4 ,PERMIT_HOLE=.FALSE.,SURF_IDS='burner2','INERT','INERT' /
187 &OBST XB= 12.5 , 22.5 , -1.25 , 1.25 , 0 , 0.4 ,PERMIT_HOLE=.FALSE.,SURF_IDS='burner2','INERT','INERT' /
188 &SURF ID='FAN1', VOLUME_FLUX=15.0, RGB=100,200,200 /
189 &SURF ID='FAN2', VOLUME_FLUX=15.0, RGB=100,200,200 /
190 &SURF ID='FAN3', VOLUME_FLUX=15.0, RGB=100,200,200 /
191 &SURF ID='FAN4', VOLUME_FLUX=15.0, RGB=100,200,200 /
192 &SURF ID='FAN5', VOLUME_FLUX=15.0, RGB=100,200,200 /
193 &SURF ID='FAN6', VOLUME_FLUX=15.0, RGB=100,200,200 /
194 &SURF ID='FAN7', VOLUME_FLUX=15.0, RGB=100,200,200 /
195 &VENT XB= 13.5 , 16.5 , -1.5 , 1.5 , 3.0 , 3.0 ,SURF_ID='FAN1', CTRL_ID='SD1a' /
196 &VENT XB= 38.5 , 41.5 , -1.5 , 1.5 , 3.0 , 3.0 ,SURF_ID='FAN2', CTRL_ID='SD2a' /
197 &VENT XB= 63.5 , 66.5 , -1.5 , 1.5 , 3.0 , 3.0 ,SURF_ID='FAN3', CTRL_ID='SD3a' /
198 &VENT XB= 88.5 , 91.5 , -1.5 , 1.5 , 3.0 , 3.0 ,SURF_ID='FAN4', CTRL_ID='SD4a' /

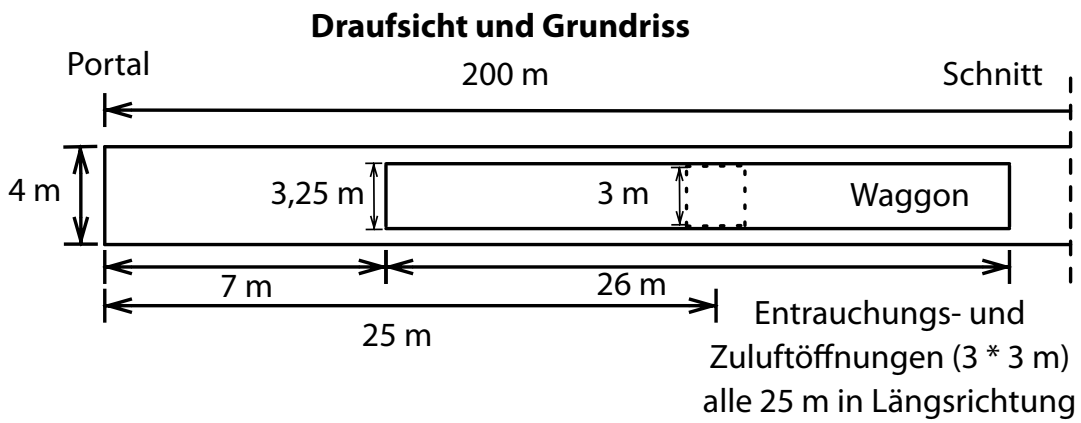
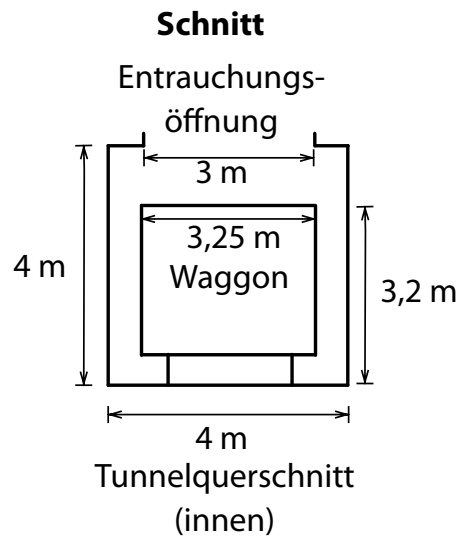
```

```

199 &VENT XB= 113.5, 116.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FANS', CTRL_ID='SD5a' /
200 &VENT XB= 138.5, 141.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FAN6', CTRL_ID='SD6a' /
201 &VENT XB= 163.5, 166.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FAN7', CTRL_ID='SD7a' /
202 &CTRL ID='SD1a', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD1', INITIAL_STATE=.FALSE. /
203 &CTRL ID='SD2a', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD2', INITIAL_STATE=.FALSE. /
204 &CTRL ID='SD3a', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD3', INITIAL_STATE=.FALSE. /
205 &CTRL ID='SD4a', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD4', INITIAL_STATE=.FALSE. /
206 &CTRL ID='SD5a', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD5', INITIAL_STATE=.FALSE. /
207 &CTRL ID='SD6a', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD6', INITIAL_STATE=.FALSE. /
208 &CTRL ID='SD7a', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD7', INITIAL_STATE=.FALSE. /
209 &SURF ID='FAN3a', VOLUME_FLUX=-4.5, RGB=100,200,200 /
210 &VENT XB= 66.5, 69.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FAN3a', CTRL_ID='SD1a' /
211 &SURF ID='FAN4a', VOLUME_FLUX=-4.5, RGB=100,200,200 /
212 &VENT XB= 91.5, 94.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FAN4a', CTRL_ID='SD1a' /
213 &SURF ID='FAN5a', VOLUME_FLUX=-4.5, RGB=100,200,200 /
214 &VENT XB= 116.5, 119.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FAN5a', CTRL_ID='SD1a' /
215 &SURF ID='FAN6a', VOLUME_FLUX=-4.5, RGB=100,200,200 /
216 &VENT XB= 141.5, 144.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FAN6a', CTRL_ID='SD1a' /
217 &SURF ID='FAN7a', VOLUME_FLUX=-4.5, RGB=100,200,200 /
218 &VENT XB= 166.5, 169.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, SURF_ID='FAN7a', CTRL_ID='SD1a' /
219 &OBST XB= 66.5, 69.5, -1.5, 1.5, 2.9, 3.0, CTRL_ID='SD2a', COLOR='CYAN' /
220 &OBST XB= 91.5, 94.5, -1.5, 1.5, 2.9, 3.0, CTRL_ID='SD3a', COLOR='CYAN' /
221 &OBST XB= 116.5, 119.5, -1.5, 1.5, 2.9, 3.0, CTRL_ID='SD4a', COLOR='CYAN' /
222 &OBST XB= 141.5, 144.5, -1.5, 1.5, 2.9, 3.0, CTRL_ID='SD5a', COLOR='CYAN' /
223 &OBST XB= 166.5, 169.5, -1.5, 1.5, 2.9, 3.0, CTRL_ID='SD6a', COLOR='CYAN' /
224 ...
225 &DEVC XYZ= 13.0, 0.0, 2.8, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD1' /
226 &DEVC XYZ= 38.0, 0.0, 2.8, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD2' /
227 &DEVC XYZ= 63.0, 0.0, 2.8, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD3' /
228 &DEVC XYZ= 88.0, 0.0, 2.8, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD4' /
229 &DEVC XYZ= 113.0, 0.0, 2.8, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD5' /
230 &DEVC XYZ= 138.0, 0.0, 2.8, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD6' /
231 &DEVC XYZ= 163.0, 0.0, 2.8, PROP_ID='Acme Smoke Detector', ID='SD7' /
232 &PROP ID='Acme Smoke Detector', QUANTITY='CHAMBER OBSCURATION', LENGTH=1.8,
233 ACTIVATION_OBSCURATION=3.28 /
234 &SLCF PBX= -10.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
235 ...
236 &SLCF PBY= 0.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
237 ...
238 &SLCF PBX= -10.0, QUANTITY='VELOCITY' /
239 ...
240 &SLCF PBY= 0.0, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
241 &SLCF PBY= 0.0, QUANTITY='VELOCITY' /
242 &SLCF PBY= 0.0, QUANTITY='OPTICAL DENSITY' /
243 &SLCF PBZ= 0.0, QUANTITY='VELOCITY' / VECTOR=.TRUE. /
244 ...
245 &DEVC XB= 39.0, 39.0, -2.0, 2.0, -1.0, 3.0, QUANTITY='MASS FLOW +', ID='MF_P_X_39m' /
246 ...
247 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='T_X_N_10m' /
248 ...
249 &DEVC XB= 38.0, 38.0, -2.0, 2.0, -1.0, 3.0, QUANTITY='HEAT FLOW +', ID='H_P_X_39m' /
250 ...
251 &DEVC XB= 14.0, 14.0, -2.0, 2.0, -1.0, 3.0, QUANTITY='VOLUME FLOW +', ID='VF_P_X_14m' /
252 ...
253 &DEVC XB= -10.0, -10.0, -2.0, 2.0, -1.0, 3.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='LH_X_N_10m' /
254 ...
255 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, -1.0, QUANTITY='OPTICAL DENSITY', ID='OD_Z_N_1_X_N_10m' /
256 ...
257 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='FED', ID='OD_Z_P_1_X_N_10m' /
258 ...
259 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='MFCO_Z_P_1_X_N_10m' /
260 ...
261 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='VFCO_Z_P_1_X_N_10m' /
262 ...
263 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon monoxide', ID='RHOCO_Z_P_1_X_N_10m' /
264 ...
265 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='MFCO2_Z_P_1_X_N_10m' /
266 ...
267 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='VFCO2_Z_P_1_X_N_10m' /
268 ...
269 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='soot', ID='MFS_Z_P_1_X_N_10m' /
270 ...
271 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='soot', ID='VFS_Z_P_1_X_N_10m' /
272 ...
273 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='oxygen', ID='MFO_Z_P_1_X_N_10m' /
274 ...
275 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon dioxide', ID='RHOCO2_Z_P_1_X_N_10m' /
276 ...
277 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='soot', ID='RHOS_Z_P_1_X_N_10m' /
278 ...
279 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='oxygen', ID='RHOO_Z_P_1_X_N_10m' /
280 ...
281 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 1.0, QUANTITY='VISIBILITY', ID='V_Z_P_1_X_N_10m' /
282 ...
283 &DEVC XYZ= -10.0, 0.0, 0.0, QUANTITY='PRESSURE', ID='P_Z_0_X_N_10m' /
284 ...
285 &DEVC XYZ= 13.0, 0.0, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='T_V1_L' /
286 ...
287 &DEVC XYZ= 13.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='VELOCITY', ID='VEL_V1' /
288 ...
289 &DEVC XB= 13.5, 16.5, -1.5, 1.5, 3.0, 3.0, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='V_V1' /
290 ...
291 &TAIL/

```

## A2 Zeichnungen des Beispiels 2





# Stichwortverzeichnis

## A

Aktoren .....	45
Ausfall .....	24

## B

Brandfallsteuerung .....	95
Brandmeldeanlage .....	47
Brandmelder .....	53
Brandmelderzentrale .....	58

## D

Datenintegrität .....	18
Dynamik .....	11
Dynamische Brandfall- steuerungen .....	114
Dynamisches System .....	110

## E

E/E/PE-System .....	20
EUC-Einrichtung .....	20

## F

Fehler .....	23
Fehlersicherer Betrieb .....	18

Feststellanlagen .....	62
Feuerwehranzeigetableau .....	80
Feuerwehrbedienfeld .....	80
Funktionale Sicherheit .....	20
Funktionsmatrix .....	90

## G

Gebäudetechnische Brandschutz- einrichtungen .....	41
Gebäudetechnischer Brandschutz .....	39

## K

Komplexes System .....	7
------------------------	---

## M

Meldebereich .....	58
--------------------	----

## R

Regeln, Regelung .....	12
Risiko .....	27

## S

Safety Integrity Level .....	20
Schnittstellenmatrix .....	90
Sensoren .....	43

Sicherheitsgerichtete Systeme .....	5
Steuermatrix .....	96
Steuern, Steuerung .....	11
System .....	7
Systemintegrität .....	18
Systemwiederherstellung .....	18
 <b>T</b>	
Technisches System .....	8
 <b>U</b>	
Übertragungsweg .....	61
 <b>V</b>	
Verfügbarkeit .....	17
Verlässlichkeit .....	19
 <b>W</b>	
Wartung, Wartbarkeit .....	18
 <b>Z</b>	
Zuverlässigkeit .....	16