



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

**Szenarienbasierte Beurteilung des
Kosten-Nutzen-Verhältnisses von
brandschutztechnischen Maßnahmen
anhand numerischer Simulationen**

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Leonie Rommeswinkel
aus Wuppertal

Wuppertal 2022

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20220620-124111-1

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20220620-124111-1>]

DOI: 10.25926/e37b-5378

[<https://doi.org/10.25926/e37b-5378>]

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Bewertungssystem für brandschutztechnische Maßnahmenkonzepte anhand einer Nutzwertanalyse entwickelt und mit einer entsprechenden Kostenrechnung für diese Maßnahmen verbunden.

Eine Literaturrecherche der Grundlagen des Baurechtes in Deutschland, ausgewählter brandschutztechnischer Maßnahmen, Brandschutzingenieurmethoden, des Begriffes des Nutzens und der Nutzwertanalyse wird in dieser Arbeit gegeben. Weiterhin werden die rechtlichen Bestimmungen für die Planung von brandschutztechnischen Maßnahmen herausgearbeitet, welche die Anforderungen an Wände, Brandmelde- und Sprinkleranlagen definieren.

Auf Basis einer Literaturrecherche wird ein Verfahren zur Kostenanalyse brandschutztechnischer Maßnahmen vorgestellt. Zur Bewertung von Brandschutzmaßnahmen werden auf bestehende Verfahren zur Berechnung der Herstellungs- und Nutzungskosten zurückgegriffen, welche jedoch für diese Kostenanalyse angepasst werden müssen.

Um den Nutzen von brandschutztechnischen Maßnahmen zu ermitteln, wird ein neu entwickeltes Verfahren vorgestellt, welches auf der Nutzwertanalyse basiert. Die Nutzwertanalyse baut auf dem Hauptziel der Einhaltung der brandschutzbezogenen Schutzziele nach § 14 der Musterbauordnung auf. Die brandschutzbezogenen Schutzziele werden in weitere Hierarchieebenen ausdifferenziert und gewichtet. Es wird aufgezeigt, wie mit Hilfe von Brandsimulationen der Nutzen von brandschutztechnischen Maßnahmen schutzzielorientiert abgeschätzt werden kann.

Das entwickelte Verfahren zur Bewertungen des Kosten-Nutzen-Verhältnisses wird exemplarisch auf zwei Szenarien angewendet, die je drei unterschiedliche Maßnahmenkonzepte beinhalten. Bei den Szenarien handelt es sich um einen Fahrzeugbrand in einer Tiefgarage und einen Bürobrand in einer Etage eines Verwaltungsgebäudes.

Des Weiteren wird in dieser Arbeit eine Diskussion des entwickelten Verfahrens und der Ergebnisse gegeben. Die Arbeit endet mit einem Ausblick auf weitere Aspekte, die in Bezug auf das Kosten-Nutzen-Verhältnisses brandschutztechnischer Maßnahmen zu betrachten sind.

Abstract

In this thesis, an evaluation system for mitigation measures from fire risk assessments is developed on the basis of a utility value analysis and combined with a corresponding cost calculation for these measures.

Based on a literature research, this thesis presents the basics of building law in Germany, selected fire protection engineering measures, fire protection engineering methods, the concept of benefit and benefit analysis. Furthermore, the legal regulations for the planning of fire protection measures are elaborated, which define the requirements for walls, fire alarm and sprinkler systems.

In this background, a procedure for the cost analysis of fire protection measures is presented. For the cost analysis existing assessment methods are used which needed to be adjusted.

In order to determine the benefit of fire protection measures, a newly developed benefit analysis is presented. Its main goal is to achieve compliance with the fire protection goals according to § 14 of the German federal construction code/regulations (Musterbauordnung). The fire protection goals are differentiated and weighted in hierarchical levels. It is shown how fire simulations can be used to estimate the benefits of fire protection measures with a focus on the protection goals.

The procedure developed for evaluating the cost-benefit ratio is applied to two scenarios as an example, each of which is further divided into three different mitigation measure implementations. The scenarios are a vehicle fire in an underground car park and an office fire on a floor of an administrative building.

Furthermore, a discussion of the developed procedure and the results is provided. At the end of this work, an outlook on further aspects is given, which are to be considered in the field of the cost-benefit ratio of fire protection measures.

Danksagung

Diese Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Chemische Sicherheit und Abwehrenden Brandschutz in dem Zeitraum von 2017 bis 2022 an der Bergischen Universität Wuppertal entstanden.

Ich bin all jenen dankbar, mit denen ich während meiner Dissertation zusammen arbeiten durfte. Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuern, Univ.-Prof. Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Roland Goertz und Prof. Dr. rer. nat. Lukas Arnold, die mich während meiner gesamten Dissertation unterstützt haben. Zusammen mit den gesamten Arbeitsgruppen dieser beiden Lehrstühle an der Bergischen Universität Wuppertal haben sie meine Zeit während der Dissertation zu etwas ganz Besonderem gemacht. Ich möchte mich auch bei meinen Betreuern für die Erstellung des Erst- und Zweitgutachtens zu dieser Arbeit bedanken. Außerdem danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fabian Brännström und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Fiedrich für die Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Ich möchte mich auch bei meinem Kollegen Fabian Ladzinski für die vielen wertvollen Diskussionen und seine Unterstützung bedanken.

Für die gewährte Rechenzeit durch JARA auf dem Supercomputer JURECA (Jülich Supercomputing Centre) am Forschungszentrum Jülich sowie durch das Projekt CoBra, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, bin ich sehr dankbar.

Dem Mann an meiner Seite, Björn Saborowski, danke ich sehr, da er mich stets in den Herausforderungen des Lebens unterstützt und ermutigt hat. Ich bin wirklich dankbar, dass er mich in meinem Leben begleitet und immer für mich da ist.

Ich möchte mich natürlich auch bei meinen Eltern bedanken, die mich immer bedingungslos unterstützen. Abschließend möchte ich mich auch bei meinen Freundinnen Julia Hartmann, Mareike Hammer, Sarah Zimmerbeutel und Margarete Müller für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und ihr Verständnis bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	III
Danksagung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Nomenklatur	XI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel	2
1.3 Abgrenzung der Arbeit	2
1.4 Herangehensweise	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Baurecht in Deutschland	5
2.2 Grundlagen ausgewählter brandschutztechnischer Maßnahmen	13
2.2.1 Wände mit Brandschutzanforderungen	14
2.2.2 Brandmeldeanlagen	20
2.2.3 Sprinkleranlagen	22
2.3 Grundlagen Brandschutzingenieurmethoden	26
2.3.1 DIN 18009-1 Brandschutzingenieurwesen	27
2.3.2 Brandschutzrelevante Regelungen der Eurocodes	30
2.3.3 Fire Dynamics Simulator und Smokeview	33
2.3.4 Räumungssimulationen	36
2.4 Definition des Begriffs Nutzen	38
2.5 Nutzwertanalyse	39
3 Möglichkeiten für eine Kostenanalyse	43
3.1 Ermittlung der Herstellungskosten brandschutztechnischer Maßnahmen	43

3.1.1	Ermittlung der Bauwerkskosten brandschutztechnischer Maßnahmen	45
3.1.2	Ermittlung der Fachplanungskosten brandschutztechnischer Maßnahmen	50
3.2	Abschätzung der Kosten für die Nutzung brandschutztechnischer Maßnahmen	53
3.2.1	Nutzungszyklus	54
3.2.2	Abschätzung der Kosten für die Instandhaltung brandschutztechnischer Maßnahmen	56
3.2.3	Abschätzung der Kosten für die Erneuerungsmaßnahmen brandschutztechnischer Maßnahmen	67
3.3	Einfluss brandschutztechnischer Maßnahmen auf die Prämienkalkulation der Feuerversicherung	68
4	Entwicklung der Kosten- und Nutzwertanalyse	71
4.1	Nutzwertanalyse für brandschutztechnische Maßnahmen	71
4.2	Verknüpfung der Nutzwertanalyse mit der Kostenanalyse	87
5	Anwendung der Kosten- und Nutzwertanalyse	89
5.1	Szenario 1: Tiefgarage	89
5.1.1	Beschreibung des Szenarios	89
5.1.2	Beurteilung der Maßnahmenkonzepte	97
5.2	Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes	126
5.2.1	Beschreibung des Szenarios	126
5.2.2	Beurteilung der Maßnahmenkonzepte	133
6	Diskussion	147
7	Schlussfolgerungen, Ausblick und Forschungsansätze	155
	Abbildungsverzeichnis	157
	Tabellenverzeichnis	167
	Literaturverzeichnis	172
A	Vorgehenssystematik der DIN 18009-1	195
B	Kennwerte für die Kostenanalyse	196

C	Vollständige Übersichten der Nutzwertanalyse	199
D	Auswertung für das Szenario 1: Tiefgarage	203
D.1	Nutzwertanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“	203
D.2	Nutzwertanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“	208
D.3	Zusammenfassende Darstellung der Nutzwertanalyse	213
E	Auswertung für das Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes	218
E.1	Nutzwertanalyse für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“	218
E.2	Nutzwertanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“	228
E.3	Nutzwertanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“	238
E.4	Zusammenfassende Darstellung der Nutzwertanalyse	248
E.5	Untersuchung des Einflusses der Gewichtungsverteilungen der Oberziele	253

Nomenklatur

AHO	Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
ARGEBAU	Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der 16 Länder der Bundesrepublik Deutschland
ASET	verfügbare Räumungszeit
BauGB	Baugesetzbuch
BIM	Building Information Modeling
BKI	Baukosteninformationszentrum
BMA	Brandmeldeanlage
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BVerG	Bundesverfassungsgericht
C-Faktor	Wärmeleitfaktor
CEA	Comité Européen des Assurances
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHF	kritischer Wärmestrom
DGNB	Deutsche Gesellschaft Nachhaltiges Bauen
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNS	Direct Numerical Simulation

EC	Eurocode
EDV	Elektrische Datenverarbeitung
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EuGH	Gerichtshof der Europäischen Union
FBU	Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung
FDS	Fire Dynamics Simulator
FIGRA	Feuerausbreitungsrate
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GK	Gebäudeklasse
HF	Wärmestrom
HH	hohe Brandgefahr
HHP	hohe Brandgefahr, Prozess
HHS	hohe Brandgefahr, Lagerrisiken
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HRR	Wärmefreisetzungsrate
JuPedSim	Jülich Pedestrian Simulator
LCC	Lebenszykluskosten
LES	Large-Eddy Simulation
LFS	seitliche Flammenausbreitung
LH	kleine Brandgefahr
MBauVorIV	Musterbauvorlagenverordnung
MBO	Musterbauordnung
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
NA	Nationaler Anhang
NE	Nutzungseinheit
NFPA	National Fire Protection Association
NIST	National Institute of Standards and Technology

OH	mittlere Brandgefahr
OLG	Oberlandesgericht
PCI	Netto-Verbrennungswärme
PCS	Brutto-Verbrennungswärme
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Rn.	Randnummer
RSET	erforderliche Räumungszeit
RTI	Response Time Index
SMOGRA	Rauchentwicklungsrate
TSP	gesamte freigesetzte Rauchmenge
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VdS	Verband der Sachversicherer

1 Einleitung

In Deutschland ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis brandschutztechnischer Maßnahmen schon seit langer Zeit zu einer wesentlichen Forschungsfrage geworden und wurde in den letzten Jahren vielfach in der Öffentlichkeit diskutiert [1, 2]. Allerdings fehlt derzeit ein einheitliches Verfahren zur Bewertung des Verhältnisses zwischen den Kosten und dem Nutzen von brandschutztechnischen Maßnahmen.

Der immer höher werdende Anspruch der Bevölkerung an Sicherheit hat eine stetige Konkretisierung und damit auch Verschärfung des Ordnungsrechtes zur Folge. Oftmals sind die in der Musterbauordnung (MBO) enthaltenen standardisierten Brandschutzkonzepte aufgrund der Bauweise, beziehungsweise der Anforderungen an Nutzung und Funktionalität, nicht mehr realisierbar. Aufgrund dessen müssen individuell angepasste Konzepte für den Brandschutz erstellt werden.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, welches dazu dient das Kosten-Nutzen-Verhältnis brandschutztechnischer Maßnahmen zu ermitteln. Dieses kann für einen Vergleich sowie einer Bewertung von alternativen Maßnahmen herangezogen werden.

1.1 Problemstellung

Zur Bewertung alternativer brandschutztechnischer Maßnahmen ist derzeit in Deutschland kein einheitliches, strukturiertes und kriteriengeleitetes Verfahren bekannt. Dies erschwert die Erstellung und Bewertung von Brandschutzkonzepten mit deren jeweiligen Nutzen und Kosten.

Es gibt kein allgemeingültiges Verfahren, welches die Kosten über einen gesamten Lebenszyklus berechnet. Weiterhin ist unklar, welche Kosten im Rahmen eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu berücksichtigen sind. Zusätzlich dazu ist nicht festgelegt, auf welcher Grundlage der Nutzen von verschiedenen brandschutztechnischen Maßnahmen untereinander verglichen werden kann.

Eine Möglichkeit zur Abwägung von Brandschutzkonzepten untereinander, welches Konzept brandschutztechnischer Maßnahmen das sinnvollste Kosten-Nutzen-Verhältnis bietet, ist ebenfalls nicht bekannt.

1.2 Ziel

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verfahren aufzustellen, welches die Abschätzung der brandschutzbezogenen Kosten, sowie die Erfassung des Nutzens von brandschutztechnischen Maßnahmen ermöglicht. Zur Bestimmung des Nutzens gibt es eine Vielzahl von Verfahren. Es muss herausgearbeitet werden, welches Verfahren eine praxisgerechte sowie einfach anzuwendende Vorgehensweise bietet. Es muss weiterhin zusammengetragen werden, welche Kosten berücksichtigt werden müssen. Außerdem wird eine Möglichkeit aufgezeigt, den Nutzen und die Kosten von brandschutztechnischen Maßnahmen einheitlich zu bewerten. Diese ermöglicht eine Bewertung und einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Brandschutzmaßnahmen sowohl unter Berücksichtigung der jeweiligen Kosten als auch des Nutzens. Im Gegensatz zu den Ansätzen, die Brandschutzmaßnahmen akzeptanzbasiert berücksichtigen, soll diese Analyse dazu beitragen, einen neuen Ansatz für die Vergleichbarkeit von Brandschutzmaßnahmen zu entwickeln.

Nach der Entwicklung und Darlegung dieser Methodik wird diese exemplarisch auf zwei Szenarien mit jeweils drei Maßnahmenkonzepten angewendet, um eine praktische Eignung der Vorgehensweise aufgezeigt.

1.3 Abgrenzung der Arbeit

In dieser Arbeit werden lediglich brandschutztechnische Maßnahmen berücksichtigt, die auf Wänden mit Brandschutzanforderungen, Brandmelde- und Sprinkleranlagen basieren. Zur Erläuterung der rechtlichen Grundlagen von brandschutztechnischen Maßnahmen werden ausschließlich die Mustervorschriften der Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der 16 Länder der Bundesrepublik Deutschland (ARGEBAU) sowie die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) und das mit diesen in Verbindung stehende technische Regelwerk herangezogen. Die Anforderungen aus dem Arbeitsschutzrecht werden in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Für die Ermittlung der Kosten, die im Zusammenhang mit den brandschutztechnischen Maßnahmen stehen, werden nur Bauwerks-, Fachplanung-, Instandhaltungs- und Erneuerungskosten betrachtet. Kosten aus behördlichen Verfahren werden nicht einkalkuliert. Diese sind nicht sicherheitsrelevant und auch schwer abzuschätzen, da sie abhängig von jeder Behörde und deren Vorgaben sind. [3] Weiterhin werden steuerliche Effekte im Zusammenhang mit Abschreibungsmodalitäten der Bauwerkskosten über die angestrebte Nutzungs-

dauer nicht berücksichtigt, da der Aufwand der Betrachtung gegenüber dem Nutzen im Zusammenhang zu gering ist.

Bei der exemplarischen Anwendung des Verfahrens wird der Fokus auf das Gebäudeinnere gelegt. Weiterhin finden tragende und aussteifende Bauteile, aufgrund der Komplexität der Auslegung, genauso wie die Bauteileanforderungen und bautechnischen Anforderungen an die Verbindung unterschiedlicher Bauteile miteinander keine Berücksichtigung. Darüber hinaus kann der Einfluss unterschiedlicher brandschutztechnischer Maßnahmen auf die Prämie der Feuerversicherung aufgrund der individuellen Vorgehensweisen in der Berechnung der Prämienkalkulation nicht berechnet werden.

1.4 Herangehensweise

Zur Berücksichtigung grundsätzlicher rechtlicher Rahmenbedingungen und zur Überprüfung des Standes der Technik wird eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Darauf aufbauend werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der brandschutztechnischen Maßnahmen, sowie die Grundlagen der Brandschutzingenieurmethoden dargelegt. Darauf folgend wird der Begriff des Nutzens erläutert, um das grundsätzliche Verfahren der Nutzwertanalyse vorzustellen.

Nachfolgend wird die Kostenanalyse, differenziert nach Herstellungs- und Nutzungskosten, im Zusammenhang mit brandschutztechnischen Maßnahmen dargestellt. Für die Berechnung der Herstellungskosten werden zwei mögliche Verfahren aufgezeigt und allgemein vorgestellt. Diese Verfahren zeigen auf, wie statistische Kostenkennwerte verwendet werden können. Nach Festlegung und Definition des zu betrachtenden Zeitrahmens werden die Nutzungskosten für ein Bauwerk des jeweiligen Maßnahmenkonzeptes zur Bestimmung der Instandhaltungskosten aufgezeigt. Außerdem wird eine Möglichkeit für die Kalkulation notwendiger Erneuerungsmaßnahmen in den Kontext der Brandschutzmaßnahmen eingeführt und dargestellt.

Im nächsten Schritt wird die entwickelte Nutzwertanalyse für die Beurteilung von brandschutztechnischen Maßnahmen erläutert. Weitergehend wird die entwickelte Analyse mit der Kostenanalyse zur Bewertung von Maßnahmen entsprechend verknüpft.

Das entwickelte Verfahren zur Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses wird anschließend auf zwei Szenarien angewendet, um die Eignung dieses Verfahrens aufzuzeigen. Hierzu wird als erstes Szenario eine Tiefgarage und als zweites eine Etage eines Verwaltungsgebäudes dargestellt. Es werden jeweils drei unterschiedliche Kon-

zepte brandschutztechnischer Maßnahmen entworfen und eine Kosten- und Nutzwertanalyse angewendet. Zur Bestimmung des Nutzwertes werden Brandsimulationen aufgestellt, berechnet und ausgewertet.

Abschließend findet eine kritische Betrachtung der entwickelten Vorgehensweise und eine Darlegung der notwendigen weiteren Herangehensweisen statt.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel enthält die wesentlichen Grundlagen für die Erstellung dieser Arbeit. Einführend wird das gesetzliche und untergesetzliche Regelwerk des Baurechtes aus brandschutztechnischer Sicht in die deutsche Rechtssystematik eingegliedert.

Nachfolgend werden ausgewählte Aspekte brandschutztechnischer Maßnahmen, die für die Bearbeitung dieser Arbeit notwendig sind, dargestellt. Es folgt eine Beschreibung der grundlegenden Funktionsweisen und Planungsvorgaben für Wände mit brandschutztechnischen Anforderungen, Brandmelde- sowie Sprinkleranlagen.

Im nächsten Abschnitt werden Grundlagen der ausgewählten Brandschutzingenieurmethoden, wie die DIN 18009-1, die Brandschutzteile der Eurocodes, der Fire Dynamics Simulator sowie Smokeview und Räumungssimulationen mit Hilfe von JuPedSim, beschrieben.

Darauffolgend wird der Begriff „Nutzen“ in verschiedene Themengebiete eingeordnet und es wird eine ausführliche Beschreibung des Begriffs im Ingenieurwesen gegeben. Der letzte Abschnitt beschreibt die Vorgehensweise zur Durchführung einer Nutzwertanalyse und in diesem Abschnitt wird anhand von Beispielen die Verwendung dieser Bewertungsmethode aufgezeigt.

2.1 Baurecht in Deutschland

Der bauliche Brandschutz ist in Deutschland durch das Baurecht geregelt. Der Begriff „Baurecht“ stellt in Deutschland eine Sammelbezeichnung dar und basiert auf einem zweigliedrigen System, das sich in das private Baurecht und öffentlichen Baurecht unterteilen lässt [[4, Rn. 5]; [5, Rn. 299]; [6, S. 24]; [7, S. 3]]. Das Baurecht ist ein „historisch gewachsenes Recht“ [4, Rn. 2]. Die historische Entwicklung des öffentlichen Baurechts findet sich im Handbuch Bauordnungsrecht [4, Rn. 42-269] wieder. Das öffentliche Baurecht ist ein Teilgebiet des öffentlichen Rechts, im engeren Sinne des besonderen Verwaltungsrechts.[[8, S. 158 f.]; [9, Rn. 10]; [5, Rn. 299]] Dort wird festgelegt, wo und wie gebaut werden darf. So werden in den §§30 ff. BauGB unter anderem Baubereiche festgelegt [10, §§30 ff.].

Neben dem öffentlichen Baurecht gibt es das private Baurecht. Dieses umfasst den Interessenausgleich zwischen den am Bau beteiligten Parteien untereinander und

dem Bauvertragsrecht [11]. Unter den am Bau beteiligten Parteien versteht Schulte [4, Rn. 7] den Bauherren, den Architekten und den Unternehmer, jedoch weist Robbers [5, Rn. 229] noch zusätzlich auf das Rechtsverhältnis zwischen dem Bauherren und dem Nachbarn hin.

Privates und öffentliches Baurecht lassen sich nicht getrennt voneinander betrachten. Beide stehen selbständig nebeneinander, jedoch fließen die Grenzen ineinander über [[12, Rn. 1]; [13, Rn. 27-28]]. Johlen trifft zur Differenzierung der Rechtsbereiche folgende Definition:

- „das private Baurecht zielt auf die Koordination der Interessen der an einem Bauvorhaben beteiligten Partner,
- das öffentliche Baurecht zielt auf Subordination der Bauwünsche unter die im öffentlichen Interesse erlassenen Bauvorschriften.“ [13, Rn. 24]

Das private Baurecht ist für die Erstellung dieser Arbeit nur nebensächlich. Daher erfolgt keine ausführliche Ausarbeitung. Es wird lediglich auf dieses [12, 14] verwiesen.

Nach Battis umfasst das öffentliche Baurecht „[...] die Gesamtheit der Rechtsvorschriften, die die Zulässigkeit und Grenzen, die Ordnung und die Förderung der Nutzung des Bodens, insbesondere durch Errichtung baulicher Anlagen, deren bestimmungsgemäße Nutzung, wesentliche Veränderung und Beseitigung betreffen.“ [15, Rn. 1]

Innerhalb des öffentlichen Baurechts wird in Bauplanungsrecht (auch Städtebau-recht [[15, Rn. 3];[16, S. 7]]) und Bauordnungsrecht (auch Bauwerksrecht (vgl. [15, Rn. 4])) unterschieden [[5, Rn. 299]; [17, § 2 Rn. 37]; [18, S. 1]; [16, S. 7]; [13, Rn. 63]; [19, § 1 Rn. 1]]. Die Unterscheidung der beiden Begriffe geht auf ein Rechtsgutachten des Bundesverfassungsgerichts (BVerG) aus dem Jahr 1954 zurück [20].

Bauplanungsrecht

Das Bauplanungsrecht beinhaltet das Recht zur Grundstücksbebauung, zum geordneten Städtebau und zu einer näherungsweise sozialgerechten Bodennutzung. Dies wird im Wesentlichen im BauGB [10] definiert, indem auch unter anderem die Bauleitplanung geregelt werden.[5, Rn. 299] Die „Aufgabe der Bauleitplanung ist es, die bauliche und sonstige Nutzung der Grundstücke in der Gemeinde nach Maßgabe dieses Gesetzbuchs vorzubereiten und zu leiten.“ [10, § 1 Abs. 1] Die Bauleitplanung setzt sich aus dem Flächennutzungsplan, dem vorbereitenden Bauleitplan und dem Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan) zusammen [10, § 1 Abs. 2]. Bauleitplä-

ne werden von den Gemeinden aufgestellt, wobei öffentliche und private Belange gegeneinander und untereinander gerecht abzuwägen sind [10, § 1 Abs. 2, 7].

Bauordnungsrecht

Das Bauordnungsrecht, auch als Bauwerksrecht bezeichnet [[13, Rn. 21];[9, Rn. 24]], wird von den Bundesländern grundlegend in den Landesbauordnungen geregelt [5, Rn. 299]. Es beinhaltet [21, § 1, Rn. 16]:

- die Anforderungen baukonstruktiver, baugestalterischer und bauwirtschaftlicher Art an Bauwerk und Baustoffe,
- das Baugenehmigungsverfahren,
- die Ordnung des Bauvorhabens,
- die Unterhaltung und Instandsetzung baulicher Anlagen und
- die Bekämpfung, der von ihnen ausgehenden Gefahren.

In der Bad Dürkheimer Vereinbarung vom 21.01.1955 [22] haben der Bund und die Länder die Erarbeitung einer Musterbauordnung (MBO) festgelegt. Die Länder dürfen „[...] von diesem Musterentwurf tunlichst nur insoweit abweichen, als dies durch örtliche Bedingtheiten geboten ist“ [22, S. 4]. Die Bauministerkonferenz ist die Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der 16 Länder der Bundesrepublik Deutschland (ARGEBAU) [23, S. 5]. Diese stimmen sich über die Musterbauordnung ab, welche die Grundlage der Landesbauordnungen darstellt. Im Jahr 1955 ist die Fachkommission Bauaufsicht als „Musterbauordnungskommission“ [23, S. 5] gegründet worden. Die Vertreter aller für die Bauaufsicht zuständigen Länderministerien und Vertreter des Bundesministeriums für Wohnen, die sich zur Musterbauordnungskommission zusammensetzt, haben am 30. Oktober 1959 die erste MBO (1960) verabschiedet, die am 30. Dezember 1959 den Ländern, mit Empfehlung ihre Landesbauordnungen anzupassen, zugesandt worden ist. Die Musterbauordnung ist seitdem mehrmals angepasst worden. Die neuste Fassung ist die Musterbauordnung vom November 2002, die zuletzt durch einen Beschluss der Bauministerkonferenz vom 27. September 2019 geändert worden ist (MBO 2019) [24]. Laut [25, S. 13] basiert der Grundsatz der Musterbauordnung „auf einem abgestuften, risikoorientierten Anforderungskatalog, der auf die Größe und Komplexität der einzelnen Vorhaben Bezug nimmt“.

In dieser Arbeit wird die Musterbauordnung 2019 [24] zu Grunde gelegt und keine Landesbauordnung, da sich die landesspezifischen Bauordnungen unterscheiden können, jedoch weitestgehend die Musterbauordnung als Grundlage besitzen.

Struktur der Musterbauordnung

Die Musterbauordnung besteht aus sechs Teilen, die nachfolgend aufgelistet werden [24]:

- allgemeine Vorschriften (§ 1 bis § 3)
- das Grundstück und seine Bebauung (§ 4 bis § 8)
- bauliche Anlagen (§ 9 bis § 51)
- die am Bau Beteiligten (§ 52 bis § 56)
- Bauaufsichtsbehörden und Verfahren (§ 57 bis § 83)
- Ordnungswidrigkeiten, Rechtsvorschriften, Übergangs- und Schlussvorschriften (§ 84 bis § 87)

Der erste Teil beinhaltet die allgemeinen Vorschriften, den Anwendungsbereich, die Begriffserklärungen und die allgemeinen Anforderungen an Gebäude. Eine „bauordnungsrechtliche Generalklausel“ wird durch die allgemeine Anforderung an Gebäuden [[16, S. 8];[19, § 3 Rn. 90]; [23, S. 5]; [26, Rn. 162]] definiert, die das allgemeine Ziel der MBO wiedergibt.

Im zweiten, dritten sowie vierten Teil werden die materiellen Vorschriften, welche auch als „materielles Bauordnungsrecht“ bezeichnet wird [16, S. 8], beschrieben. Diese beinhalten exemplarisch Vorgaben zur Bebauung der Grundstücke mit Gebäuden, Zugängen und Zufahrten, sowie vielen weiteren Anforderungen.

Der fünfte Teil (§ 57 bis § 83) enthält alle wichtigen Vorgaben zur Genehmigungspflicht, Genehmigungsfreiheit und zum Genehmigungsverfahren, sowie zur Bauaufsichtsbehörde, die das Vorgehen des Verfahrens überwachen soll [[19, § 13 Rn. 2]; [16, S. 8]]. Die § 57 bis § 83 werden auch als „formelles Bauordnungsrecht“ betitelt [16, S. 8].

Im sechsten Teil wird die Ermächtigung der obersten Bauaufsichtsbehörde zum Erlass von Rechtsverordnungen beziehungsweise von Technischen Baubestimmungen sichergestellt (§ 85 und § 85a).

Generalklauseln der Musterbauordnung

Die bauordnungsrechtliche Generalklausel fordert, dass „Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass

- die öffentliche Sicherheit und Ordnung,
- insbesondere Leben, Gesundheit und
- die natürlichen Lebensgrundlagen,

nicht gefährdet werden.“ [24, § 3]

Dies definiert die Ziele der MBO im allgemeinen Sinn. Die allgemeine Generalklausel ermächtigt die zuständige Behörde nicht zur Durchführung von notwendigen Maßnahmen zur Abwehr einer im einzelnen Fall bestehenden Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung [[26, Rn. 162]; [15, Rn. 502]; [19, § 12 Rn. 13]]. Sie tritt für eine Vielzahl an speziellen bauordnungsrechtlichen Regelungen, welche diese näher präzisieren, zurück.

Durch den § 14 MBO werden die Schutzziele des Brandschutzes definiert und auch als „Generalklausel des Brandschutzes“ bezeichnet. Somit wird gefordert, dass bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass

- „[...]der Entstehung eines Brandes und
- der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und
- bei einem Brand die Rettung von Mensch und Tieren sowie
- wirksame Löscharbeiten möglich sind.“ [24, § 14]

Gebäudeklassen

Materielle Anforderungen an den baulichen Brandschutz in Gebäuden, die zu Erreichung der Schutzziele in § 14 MBO gestellt werden, liegen dem Konzept der Gebäudeklassen (GK) zu Grunde. Die Einteilung der Gebäudeklasse richtet sich grundlegend nach der Höhe des Gebäudes. Hierbei muss beachtet werden, dass die Höhe laut MBO „das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel“ ist [24, § 2 Fn. 2]. Neben der Höhe sind die Anzahl der Nutzungseinheiten (NE), die Fläche der Nutzungseinheiten (unterschieden in einen Flächenanteil für alle Nutzungseinheiten oder nur für eine Nutzungseinheit) sowie die Art des Gebäudes (freistehend

oder nicht freistehend) zu beachten. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Gebäudeklassen kann aus Tabelle 2.1 entnommen werden.

Tabelle 2.1: Gebäudeklassen nach § 2 Abs. 3 MBO

GK	Höhe	Anzahl NE	Fläche NE	Zusatz
1a	≤ 7 m	≤ 2	insgesamt ≤ 400 m ²	freistehend
1b				freistehende land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude
2	≤ 7 m	≤ 2	insgesamt ≤ 400 m ²	nicht freistehend
3	≤ 7 m	-	-	
4	≤ 13 m	-	jeweils ≤ 400 m ²	
5	-	-	-	sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude

Grundsätzlich wird jedes Gebäude/jede bauliche Anlage zuerst einer Gebäudeklasse zugeordnet. Je höher die Gebäudeklasse eines Gebäudes festgelegt wird, desto höher sind die materiellen Anforderungen an den Brandschutz. Dies schlägt sich beispielsweise in den Anforderungen an Wände, Decken und Rettungswege nieder. [25, S. 14] Eine Übersichtstabelle der materiellen Anforderungen findet sich exemplarische in [25, S. 30-32] wieder.

Sonderbau

Zusätzlich zu der Einordnung in Gebäudeklassen können Gebäude auch einen Sonderbautatbestand erfüllen. [25, S. 15]. Sonderbauten sind nach § 2 Abs. 4 MBO „Anlagen und Räume besonderer Art oder Nutzung“ [24, § 2 Abs. 4]. Gebäude, die zu einem der 19 Tatbestände zugeordnet werden können, gelten als Sonderbauten [25, S. 16]. Für Tatbestände können beispielsweise Hochhäuser (Gebäude mit einer Höhe von mehr als 22 m) oder bauliche Anlagen mit einer Höhe von mehr als 30 m [24, § 2 Abs. 4 Nr. 1, Nr. 2] genannt werden. Kann einem Gebäude keiner der Tatbestände oder keine vergleichbare Gefahr zugeordnet werden, so fällt es in die Kategorie der „Standardbauten“. [25, S. 15] An Sonderbauten können im Einzelfall, nach § 51 der MBO, zur Verwirklichung der allgemeinen Anforderungen besondere Anforderungen gestellt werden [24]. Erleichterungen können auf der selben Rechtsgrundlage der MBO gestattet werden, wenn die Einhaltung von Vorschriften, aufgrund der besonderen Art oder Nutzung baulicher Anlagen bzw. Räume sowie aufgrund von besonderer Anforderungen, nicht notwendig ist [24, § 51].

Sonderbauten lassen sich in den geregelten und ungeregelten Sonderbau unterteilen. Ist eine eingeführte Sonderbauverordnung nach Landesrecht vorhanden (z. B. Sonderbauvorschriften für Beherbergungsstätten und Garagen), dann zählen sie zu den geregelten Sonderbauten. Ungeregelte Sonderbauten sind Gebäude, für die es keine Sonderbauverordnung gibt, welche jedoch einen der Sonderbautatbestände der MBO erfüllen. [27, S. 3] Für unregelte Sonderbauten sind im Einzelfall im Rahmen eines Brandschutzkonzeptes/Brandschutznachweises bestimmte Brandschutzanforderungen festzulegen [25, S. 16].

Brandschutznachweis und Brandschutzkonzept

In § 66 der MBO wird gefordert, dass die Einhaltung der Anforderungen an den Brandschutz durch bautechnische Nachweise zu ermittelt ist, vorausgesetzt es handelt sich nicht um ein Bauvorhaben mit Genehmigungsfreistellung nach § 62 MBO.

Der Brandschutznachweis ist Bestandteil der Brandschutzplanung und dient im Genehmigungsprozess als Bauvorlage [25, S. 25]. Die Einhaltung des Brandschutzes muss bei jedem Bauvorhaben über ein Brandschutznachweis nachgewiesen werden. Die Inhalte eines Brandschutznachweises sind in § 11 der Musterbauvorschriftenverordnung (MBauVorIV) [28] beschrieben [25, S. 17]. Als Beispiel für den Nachweis sei, das Brandverhalten von Baustoffen (MBauVorIV § 11 Abs. 1 Nr. 1) oder die Angabe der Nutzungseinheiten sowie der Brand- und Rauchabschnitte (MBauVorIV § 11 Abs. 1 Nr. 3) zu erwähnen. Die MBauVorIV unterscheidet dabei zwischen Standardbauten, Sonderbauten sowie Mittel- und Großgaragen. Bei den letzten Beiden sind zusätzliche Angaben aufzugeben, soweit dies für die Beurteilung erforderlich ist. Anzuführen ist außerdem, warum die Berücksichtigung von Vorschriften wegen der besonderen Art oder Nutzung eines Sonderbaus nicht notwendig ist (Abweichung). Nach § 11 Abs. 2 Satz 3 kann ein Brandschutznachweis auch in gesonderter Form eines objektbezogenen Brandschutzkonzeptes nachgewiesen werden. Es handelt sich hierbei nicht um eine unabdingbare Anforderung. Laut § 51 Satz 3 Nr. 9 der MBO können sich besondere Forderungen und Erleichterungen bei Sonderbauten auf den „[...] Umfang, Inhalt und Zahl besonderer Bauvorlagen, insbesondere eines Brandschutzkonzeptes [...]“ beziehen. Jedoch findet sich in den Mustervorschriften, im Gegensatz zu den Regelungen in den einzelnen Bundesländern, keine verbindliche Regelung, in welchen Angelegenheiten es eine Verpflichtung zur Vorlegung eines Brandschutzkonzeptes gibt. Es handelt sich hierbei vielmehr um eine Ermessensentscheidung der Bauaufsichtsbehörde, wann ein Brandschutzkonzept für Sonderbauten vorgelegt werden muss. Wobei es den Bauherren grundsätzlich freisteht, auch ohne

eine Verpflichtung durch die Bauaufsichtsbehörde ein Brandschutznachweis in Form eines Brandschutzkonzeptes darzulegen. [29, S. 45 f.]

Seit der Novellierung der MBO im Jahr 2002 enthält diese ein neues Konzept für Standardgebäude, die keine Sonderbauten sind. Dieses Konzept zielt bei der Risikobetrachtung auf die Gebäudehöhe sowie auf die Größe der Nutzungseinheiten ab und führt diese beiden Faktoren in der Gebäudeklasse zusammen. Für jede dieser fünf Gebäudeklassen gibt die MBO ein Standard-Brandschutzkonzept für Standardgebäude vor, in denen konkrete Brandschutzanforderungen festgelegt sind. Die Standard-Brandschutzkonzepte beruhen auf der Verwendung von baulichen Maßnahmen, wobei anlagentechnische oder organisatorische Maßnahmen der Kompensation besonderer Risiken von Sonderbauten dienen können und im Rahmen von Abweichungen von Anforderungen des Standard-Brandschutzkonzeptes zum Einsatz kommen können. Sonderbauvorschriften für den jeweiligen Sonderbau können über das standardisierte Brandschutzkonzept der MBO hinausgehen. Diese beziehen sich jedoch nicht nur auf bauliche Brandschutzmaßnahmen. [[23, S. 6 f.]; [30, S. 131 ff.]; [31]; [25, S. 15]; [29, S. 96]; [32, S. 95]]

Die Möglichkeit der Abweichung von den materiellen Anforderungen an den Brandschutz wird im folgendem Unterkapitel beschrieben.

Abweichung und Erleichterung

Es gibt mehrere Möglichkeiten nach der MBO materielle Anforderungen des Bauordnungsrechtes zuzulassen bzw. von ihnen abzuweichen [27, S. 1]:

- Abweichen von Anforderungen, die sich aus der MBO oder einer auf Grundlage der MBO erlassenen Verordnung ergeben – Abweichung (§ 67 MBO)
- Abweichen von Anforderungen an Sonderbauten – Erleichterung (§ 51 MBO)
- Abweichen von eingeführten Technischen Baubestimmungen (§ 85a Abs. 1 MBO)
- Abweichen von Bauproduktenregelungen

Eine Abweichung kann zugelassen werden, wenn sie „[...] unter Berücksichtigung des Zwecks der jeweiligen Anforderung und unter Würdigung der öffentlich-rechtlich geschützten nachbarlichen Belange mit den öffentlichen Belangen [...] vereinbar ist“ [24, § 67 Abs. 1]. Insbesondere muss die Abweichung mit der bauaufsichtlichen Generalklausel der MBO kompatibel sein [24, § 67 Abs. 1]. Die Bauaufsichtsbehörde bzw. je nach Bundesland die Prüfsachverständigen oder Prüfengeieure für Brandschutz entscheiden, ob die Abweichung zulässig ist oder nicht [25, S. 17]. Die Abweichung ist schriftlich mit einer ausführlichen Begründung zu beantragen [[24, § 67 Abs. 2];

[25, S. 17]]. Der Bauherr besitzt lediglich einen Rechtsanspruch auf eine fehlerfreie Ermessensausübung [[33, Rn. 198]; [34, Rn. 18]], jedoch nicht auf die Erteilung der Zulassung einer Abweichung [25, S. 17]. Ein Rechtsanspruch besteht nur, wenn sich auf eine spezialgesetzliche Regelung berufen werden kann, nach der eine Abweichung zulässig ist [[33, Rn. 199]; [34, Rn. 17]].

Erleichterungen können gestattet werden, wenn das Gebäude als ungeregelter Sonderbau einzustufen ist und „soweit es der Einhaltung von Vorschriften wegen der besonderen Art oder Nutzung baulicher Anlagen oder Räume oder wegen besonderer Anforderung nicht bedarf“ [24, § 51]. Da es ein erheblicher Aufwand wäre, Beantragungen, Prüfung und Genehmigung für jede einzelne Abweichung zu stellen, sieht die MBO für diesen Fall eine Erstellung eines Brandschutzkonzeptes vor. In diesem Brandschutzkonzept werden alle Erleichterungen dargestellt und begründet. Dieses Konzept wird ohne Einzelerleichterungen geprüft und genehmigt. [35]

Wenn die Lösung einer Umsetzung eines Sonderbaus nicht in der Sonderbauverordnung zu finden ist, aber eine Sonderbauverordnung vorhanden ist, kann nach § 51 eine Abweichung beantragt werden. Lösungen, die nicht Bestandteil der Sonderbauverordnung sind, müssen als Erleichterung im Brandschutzkonzept dargestellt werden.

Eine Beschreibung für das Abweichen von eingeführten Technischen Baubestimmungen sowie das Abweichen von Bauproduktenregelungen ist für die Ausführung der weiteren Arbeit nicht relevant.

2.2 Grundlagen ausgewählter brandschutztechnischer Maßnahmen

Um eine Kosten- und Nutzenanalyse von brandschutztechnischen Maßnahmen aufzustellen, müssen als Erstes die betrachteten Maßnahmen dargelegt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle nur auf ausgewählte brandschutztechnische Maßnahmen eingegangen. Auf eine umfassende Darstellung der einzelnen Teilaspekte wird verzichtet und nur wichtige Aspekte für die Bearbeitung dieser Problemstellung dieser Arbeit sind nachfolgend dargestellt.

2.2.1 Wände mit Brandschutzanforderungen

Die materiellen Anforderungen der MBO an Standardbauten beziehen sich nur auf bauliche Maßnahmen. Daher sind Wände mit Brandschutzanforderungen ein großer Teilaspekt dieser. Die MBO unterteilt Wände mit Brandschutzanforderungen in verschiedene Kategorien. Dazu zählen tragende Wände und Stützen (§ 27), Außenwände (§ 28), Trennwände (§ 29) sowie Brandwände (§ 30). Es werden ausschließlich die Anforderungen an den Brandschutz aufgeführt, die sich auf Innenwände beziehen. Weiterhin bleibt die Betrachtung der Baustatik unberührt. Details zu Bekleidungen, Bodenbelägen und Dämmstoffen ebenso wie bautechnischen Anforderungen im Hinblick auf die Ausführung werden ebenfalls nicht betrachtet.

Tragende Wände, Stützen

„Tragende und aussteifende Wände und Stützen müssen im Brandfall ausreichend lang standsicher sein.“ [24, § 27 Abs. 1 Satz 1] Außerdem müssen tragende Wände im Hinblick auf den Brandschutz nicht zugleich raumabschließend sein [25, S. 56]. Wie der Tabelle 2.2 zu entnehmen ist unterscheiden sich die Anforderungen je nach Gebäudeklasse von Wänden und Stützen ohne Anforderungen in GK 1 bis hin zu feuerbeständig in GK 5. Das Tragwerk im Kellergeschoss muss in der GK 1 und 2 feuerhemmend, sowie in der GK 3, 4 und 5 feuerbeständig verbaut sein. Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht über die Brandschutzanforderung für jede Gebäudeklasse.

Tabelle 2.2: Bauordnungsrechtliche Anforderungen an tragende Wände, Stützen nach § 27 MBO

	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Tragende Wände, Stützen	-	feuerhemmend		hochfeuerhemmend	feuerbeständig
Tragwerk im Kellergeschoss	feuerhemmend		feuerbeständig		

Trennwände

Trennwände müssen „ausreichend lang widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sein“ [24, § 29 Abs. 1]. Ausgenommen von diesen Vorgaben sind Trennwände in Wohngebäude der GK 1 und 2, da die MBO für diese keine Trennwände vorsieht. Wenn es sich nicht um ein Wohngebäude handelt, sieht die MBO dieselben Anforderungen an die GK 1 und 2 wie für die GK 3 vor. Trennwände zwischen Nutzungseinheiten sowie zwischen Nutzungseinheiten und anders genutzten Räumen

müssen mindestens feuerhemmend sein. In der GK 4 müssen Trennwände hochfeuerhemmend und in der GK 5 feuerbeständig sein, wenn es sich nicht um Trennwände eines Geschosses im Dachraum handelt, über dem keine Aufenthaltsräume möglich sind. Unter diesen Umständen sind für GK 4 und 5 feuerhemmende Trennwände im Dachraum ausreichend. [24, § 29]

Trennwände zum Abschluss von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr müssen feuerbeständig ausgeführt werden. Ausgenommen davon sind Gebäude der GK 1 und 2. [24, § 29]

Trennwände zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Kellergeschoss der GK 1 und 2 (jedoch kein Wohngebäude) müssen mindestens feuerhemmend und für die GK 3 bis 5 feuerbeständig sein. Öffnungen in Trennwänden müssen auf die für die Nutzung erforderliche Zahl und Größe beschränkt sein und als feuerhemmende, dicht- und selbstschließende Abschlüsse ausgeführt werden. [24, § 29] Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht der beschriebenen Anforderungen an Trennwände und deren Öffnungen in Abhängigkeit von der Gebäudeklasse.

Tabelle 2.3: Bauordnungsrechtliche Anforderungen an Trennwände nach § 29 MBO

	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
zwischen Nutzungseinheiten¹	feuerhemmend ²		feuerhemmend	hochfeuerhemmend ³	feuerbeständig
zwischen Abschluss von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr	feuerbeständig ²		feuerbeständig		
zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Keller	feuerhemmend ²		feuerbeständig		
Öffnungen in Trennwänden	feuerhemmende, dicht- und selbstschließende Abschlüsse ²		feuerhemmende, dicht- und selbstschließende Abschlüsse		

¹ auch zwischen Nutzungseinheiten und anders genutzten Räumen

² abweichend bestehen keine Anforderungen für Wohngebäude

³ Gilt nur für Geschosse im Dachraum, wenn darüber noch Aufenthaltsräume möglich sind. Andernfalls ist eine feuerhemmende Ausführung ausreichend.

Brandwände

Brandwände müssen grundsätzlich aus nicht brennbaren Materialien (A2 - s1,d0) bestehen damit sie keinen Beitrag zum Brand leisten. Sie müssen außerdem standsicher (R) und raumabschließend (EI) sein, wenn noch zusätzliche mechanische Belastungen (M) im Brandfall dazu kommen. Weiterhin müssen Brandwände die Anforderung der Feuerbeständigkeit erfüllen. [25, S. 48]

Brandwände sollen zum Abschluss von Gebäuden (äußere Brandwände) oder zur Unterteilung von Gebäuden in Brandabschnitte (innere Brandwände) ausreichend lang die Brandausbreitung auf andere Gebäude oder Brandabschnitte verhindern [24, § 30]. An dieser Stelle erfolgt nur eine Darstellung der Anforderungen an innere Brandwände. Da innere Brandwände zur Unterteilung eines Gebäudes in Brandabschnitte dienen, darf der Abstand zwischen den Brandabschnitten in der Regel nicht mehr als 40 m betragen. Hieraus resultiert eine maximale Größe von 1.600 m² je Brandabschnitt. [24, § 30] Brandwände sind als raumabschließende Bauteile auszuführen, damit ausreichend lang die Brand- sowie Rauchausbreitung auf andere Brandabschnitte verhindert und wirksame Löscharbeiten ermöglicht werden [36, S. 341]. Abweichungen von der Anforderung feuerbeständig sieht die MBO für GK 1 bis 4 vor. In den GK 1 bis 3 müssen innere Brandwände die Eigenschaft hochfeuerhemmend besitzen, darüber hinausgehend müssen in der GK 4 diese Eigenschaften auch unter zusätzlicher mechanischer Belastung erfüllt werden. [24, § 30]

Öffnungen in inneren Brandwänden sind nur dann zulässig, „wenn sie auf die für die Nutzung erforderliche Zahl und Größe beschränkt sind“ [24, § 30 Abs. 8 Satz 2]. Diese Öffnungen müssen außerdem als feuerbeständige, dicht- und selbstschließende Abschlüsse ausgeführt werden [24, § 30]. Eine Zusammenfassung der erläuterten Anforderungen findet sich in Tabelle 2.4.

Tabelle 2.4: Bauordnungsrechtliche Anforderungen an innere Brandwände nach § 30 MBO

	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
innere Brandwände	hochfeuerhemmend			hochfeuerhemmend ¹	feuerbeständig ¹ Verwendung nicht brennbarer Bauteile
Öffnungen in inneren Brandwänden	feuerbeständig, dicht- und selbstschließende Abschlüsse				

¹ auch unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung

Innere Brandwände müssen bis zur Bedachung durchgehend und übereinander angeordnet ausgeführt werden, um dadurch eine funktionierende Brandabschnittsbildung sicherzustellen. Es kann von dieser Anforderung nur abgewichen werden, wenn die versetzt angeordneten Wände:

- zusätzlich unter mechanischer Beanspruchung feuerbeständig sind und aus nicht brennbaren Materialien bestehen,
- die mit den Wänden verbundenen Decken feuerbeständig, aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen sowie keine Öffnungen besitzen,
- die Bauteile, die die Wände und Decken unterstützen feuerbeständig sind und aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen,
- die Außenwände in der Breite des Versatzes in dem Geschoss oberhalb oder unterhalb des Versatzes feuerbeständig sind und
- Öffnungen in den Außenwänden im Bereich des Versatzes so angeordnet sind, dass eine Brandausbreitung in andere Brandabschnitte nicht zu erwarten oder diese auf Grund anderer Maßnahmen nicht möglich ist. [24, § 30 Abs. 4]

Brandwände müssen grundsätzlich 0,3 m über die Bedachung geführt oder in Höhe der Dachhaut mit einer beiderseitigen auskragenden feuerbeständigen Platte von 0,5 m ausgeführt werden. Diese Platte muss aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und es dürfen keine brennbaren Teile darüber hinweggeführt werden. Eine Ausnahme besteht bei den GK 1 bis 3, bei denen müssen die Brandwände mindestens bis unter die Dachhaut geführt werden. Entstehende Hohlräume sind vollständig mit nichtbrennbaren Baustoffen zu füllen. [24, § 30 Abs. 5]

Treffen an einer Gebäudeinnenecke zwei Brandabschnitte aneinander, so muss die Brandwand einen Abstand von mindestens 5 m zur Ecke besitzen. Dies gilt nicht, wenn der Winkel der inneren Ecke mehr als 120 Grad beträgt oder eine Außenwand auf 5 m Länge keine Öffnungen besitzt sowie feuerbeständig ist und aus nicht brennbaren Baustoffen besteht. Bei den GK 1 bis 4 reicht eine hochfeuerhemmende öffnungslose Außenwand. [24, § 30 Abs. 6]

Notwendige Treppenräume

Jede notwendige Treppe muss vom Erdgeschoss an aufwärts in einem eigenen durchgehenden Treppenraum liegen (notwendiger Treppenraum), dies gilt nicht für GK 1 und 2. Auf notwendige Treppenräume kann bei der GK 1 und 2 sowie für die Verbindung von höchstens zwei Geschossen innerhalb einer Nutzungseinheit von insgesamt nicht mehr als 200 m² Fläche verzichtet werden. Dies gilt jedoch nur, wenn in jedem

Geschoss ein anderer Rettungsweg erreichbar ist. Dadurch soll die Brandausbreitung über mehrere Etagen hinweg verhindert werden. Sie dienen zur Sicherstellung der Rettung von Menschen und Tieren, weshalb die notwendige Treppe ausreichend lang im Brandfall benutzbar sein muss. Darüber hinaus ist bei einer Außentreppe kein notwendiger Treppenraum erforderlich, wenn ihre Nutzung ausreichend sicher ist und im Brandfall keine Gefährdung darstellt. [24, § 35]

Ein Ausgang in einen notwendigen Treppenraum oder ins Freie muss innerhalb von maximal 35 m Entfernung von jeder Stelle eines Aufenthaltsraumes sowie eines Kellergeschosses erreichbar sein. Muss mehr als ein notwendiger Treppenraum vorhanden sein, so sollen sie möglichst entgegengesetzt liegen und verteilt sein, sodass die Rettungswege schnellstmöglich erreichbar sind. [24, § 35]

Die Wände notwendiger Treppenräume müssen in der GK 3 feuerhemmend, in der GK 4 hochfeuerhemmend unter zusätzlicher mechanischer Belastung und in der GK 5 als Bauart von Brandwänden ausgeführt werden. Grundsätzlich müssen dies raumabschließende Bauteile sein. Öffnungen in notwendigen Treppenräumen müssen zu Kellergeschossen, zu nicht ausgebauten Dachräumen, Werkstätten, Läden, Lager- und ähnlichen Räumen sowie zu sonstigen Räumen und Nutzungseinheiten mit einer Fläche von mehr als 200 m², ausgenommen Wohnungen, mindestens feuerhemmend, rauchdicht und selbstschließend sein [24, § 35]. Die ausgeführten Anforderungen an notwendige Treppenräume werden zusammenfassend in Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5: Bauordnungsrechtliche Anforderungen an notwendige Treppenräume nach § 35 MBO

	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Wände notwendiger Treppenräume	-	-	feuerhemmend	hochfeuerhemmend ¹	feuerbeständig, Verwendung nicht brennbarer Bauteile ¹
Öffnungen zu Kellern, zu nicht ausgebauten Dachräumen, Werkstätten, Läden, Lager- und ähnlichen Räumen sowie zu sonstigen Räumen und Nutzungseinheiten mit einer Fläche von mehr als 200 m ² , ausgenommen Wohnungen	-	-	feuerhemmende, rauchdichte und selbstschließende Abschlüsse		
Öffnungen zu notwendigen Fluren	-	-	rauchdichte und selbstschließende Abschlüsse		
Öffnungen zu sonstigen Räumen und Nutzungseinheiten	-	-	dicht- und selbstschließende Abschlüsse		

¹ auch unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung

Notwendige Flure

Rettungswege aus Aufenthaltsräumen oder aus Nutzungseinheiten mit Aufenthaltsräumen zu Ausgängen in notwendige Treppenträume oder ins Freie, verlaufen über notwendige Flure. Diese müssen so angeordnet und ausgebildet sein, dass die Nutzung im Brandfall ausreichend lang möglich ist, da sie der Rettung von Menschen und Tieren im Brandfall dienen. Grundsätzlich sind notwendige Flure in Wohngebäuden der GK 1 und 2 nicht erforderlich. Zusätzlich sind sie nicht erforderlich in sonstigen Gebäuden der GK 1 und 2, ausgenommen in Kellergeschossen, innerhalb von Nutzungseinheiten mit nicht mehr als 200 m² und innerhalb von Wohnungen. Notwendige Flure sind innerhalb von Nutzungseinheiten, die einer Büro- und Verwaltungsnutzung dienen, mit nicht mehr als 400 m² Brutto-Grundfläche, die aber durch Trennwände geteilt werden und jeder dieser Teile einen unabhängigen Rettungsweg besitzt, nicht erforderlich.[24, § 36]

Notwendige Flure werden durch nichtabschließbare, rauchdichte und selbstschließende Abschlüsse in Rauchabschnitte unterteilt. Die Rauchabschnitte dürfen nicht länger als 30 m sein. Die Wände von notwendigen Fluren müssen in der GK 3 bis 5 feuerhemmend und im Kellergeschoss zusätzlich feuerbeständig sein.[24, § 36] Eine Übersicht der Anforderungen an notwendigen Fluren und deren Öffnungen gibt die nachfolgende Tabelle 2.6.

Tabelle 2.6: Bauordnungsrechtliche Anforderungen an notwendige Flure nach § 36 MBO

	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Wände in oberirdischen Geschossen notwendiger Flure	-		feuerhemmend		
Wände im Kellergeschoss	feuerhemmend ¹		feuerbeständig		
Türen in Flurwänden	dichtschießend ²		dichtschießend		
Öffnungen zu Lagerbereichen im Kellergeschoss	feuerhemmender, dicht- und selbstschließender Abschluss				

¹ abweichend bestehen bei Wohngebäuden der Gebäudeklasse 1 und 2 keine Anforderungen

² gilt nur für Wände in notwendigen Fluren im Kellergeschoss

2.2.2 Brandmeldeanlagen

Nach DIN EN 54-1 [37] besteht eine Brandmeldeanlage (BMA) aus einer „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“ [37, S. 9]. Eine Brandmeldeanlage kann aus verschiedenen bauaufsichtlichen Gründen und aus Gründen der Feuerversicherer gefordert werden. Grundsätzlich werden bauaufsichtlich Brandmeldeanlagen in Versammlungsstätten [38, § 20], Hochhäusern [39, S. 8], Mittel- sowie Großgaragen [40, § 17] und Beherbergungsstätten werden mit 60 Betten oder mehr [41, § 9] gefordert. Außerdem können sie auch als Kompensationsmaßnahme im Rahmen einer Abweichung oder Erleichterung der Anforderung nach MBO gefordert werden.

Grundsätzlich ist die Normung für Brandmeldeanlagen sehr vielschichtig. Die Europäische Union hat die Schaffung des technischen Regelwerkes für Brandmeldeanlagen und deren Komponenten übernommen und beschreibt mit der Normreihe EN 54 den Stand der Technik für die Bestandteile von Brandmeldeanlagen. Diese ist in die nationale Normgebung zu übernehmen. Hierbei handelt es sich um europäisch harmonisierte Normen auf Grundlage der Verordnung (EU) Nr. 305/2011, die dem Bauordnungsrecht zuzuordnen sind [42]. Gesichtspunkte, die nicht in der EN 54 aufgeführt sind, werden in der in Deutschland existierenden bauordnungsrechtlichen und feuerwehrspezifischen nationalen Normungen durch die DIN 14675 ergänzt. Diese beruft sich weitestgehend auf die CEN/TS 54-14. Zusätzlich finden sich in der DIN VDE 0833-2 auf Grund ihrer Eigenschaft als elektrische Anlage weitere Anforderungen. Soll eine Brandmeldeanlage aufgrund eines Versicherungsvertrages in das Versicherungsverhältnis miteinbezogen werden, so kann der Versicherer die Einhaltung der VdS 2095 fordern. Die VdS 2095 verweist überwiegend auf die DIN EN 54 und die DIN 14675.

In der DIN 14675-1 werden verschiedene Kategorien unterschieden, die den Schutzzumfang der Überwachung durch eine Brandmeldeanlage angeben. Folgende vier Kategorien sind aufgeführt [43, S. 50]:

- **Kategorie 1: Vollschutz**

Sämtliche Bereiche im Gebäude, in denen Brände entstehen können, werden überwacht. Dadurch wird das höchste Maß an Sicherheit durch eine automatische BMA erreicht.

- **Kategorie 2: Teilschutz**

In dieser Kategorie werden nur Teile des Gebäudes geschützt, üblicherweise die verwundbarsten Gebäudeteile. Eine Teilschutz-BMA soll sich grundsätzlich immer auf ein Geschoss eines Brandabschnittes oder einen notwendigen Treppenraum erstrecken. Dabei sollte jedes Geschoss eines Brandabschnittes innerhalb des Teilschutzes wie beim Vollschutz überwacht werden. Vor dem Einsatz einer Teilschutz-BMA sollten die zu schützenden Bereiche festgelegt werden. Außerdem muss der überwachte und unbewachte Bereich brandschutztechnisch voneinander getrennt sein.

- **Kategorie 3: Schutz der Flucht- und Rettungswege**

Eine BMA, die nur die Flucht- und Rettungswege schützt, soll die Personen so frühzeitig alarmieren, dass die Wege noch nicht durch Feuer oder Rauch blockiert werden. Eine solche Anlage stellt nur die Fluchtmöglichkeit von Personen sicher, die nicht direkt mit dem Brand involviert sind, jedoch nicht für Personen am Brandentstehungsort.

- **Kategorie 4: Einrichtungsschutz**

Diese Anlage schützt spezielle Funktionen, Ausrüstungen oder Bereiche mit hohem Risiko, jedoch keine Bereiche außerhalb des zu überwachenden Bereiches. [43, S. 50]

Die Wartung und Instandhaltung von Brandmeldeanlagen wird nach DIN VDE 0833-1 und DIN VDE 0833-2 durchgeführt, auf welche in der DIN 14675 verwiesen wird. In der DIN VDE 0833-1 wird grundsätzlich in Begehung und Instandhaltung unterschieden. Die Begehung ist grundlegend die Aufgabe des Betreibers, jedoch kann dieser die Aufgabe auch an eine Fachfirma vergeben. Hierbei wird die Anlage vierteljährlich auf sichtbare Störungen und Mängel überprüft. Die Instandhaltung unterteilt sich wiederum in die Inspektion und die Wartung. Beide Aspekte werden durch eine Fachfirma durchgeführt. Die Inspektion ist genauso wie die Begehung vierteljährlich durchzuführen, die Wartung muss nur einmal pro Jahr stattfinden. Bei der Inspektion werden allgemeine, herstellerunabhängige Kriterien überprüft. Im Gegensatz dazu werden bei der Wartung vorrangig herstellereigene Tätigkeiten durchgeführt. [44, S. 1]

2.2.3 Sprinkleranlagen

Sprinkleranlagen sollen in baulichen Anlagen den Brand selbstständig bekämpfen und löschen oder seine Ausbreitung verhindern. Der Begriff „Sprinkleranlage“ stellt eine ständig betriebene Löschanlage, bei der aus einem ortsfest verlegten Rohrleitungssystem Löschwasser über Sprinkler abgegeben wird, dar. Diese Anlage löst automatisch aus und erkennt, meldet sowie bekämpft Brände. [45, S. 1] Für Wasserlöschanlagen wird Wasser als Löschmittel eingesetzt, um die Brandausbreitung zu begrenzen. Dies geschieht durch die Kühlung und Vorbenetzung des Brandgutes. Dabei unterstützt sie die wirksamen Löschmaßnahmen der Feuerwehr. [46, S. 1] Manche Muster-Sonderbauvorschriften der ARGEBAU sehen den Einbau einer Sprinkleranlage als notwendig an. Weitergehend können vorhandene Sprinkleranlagen die Nutzfläche von Brandabschnitten vergrößern. So wird auf die Vergrößerung der maximalen Brandabschnittsflächen erdgeschossiger Verkaufsstätten von 3.000 m² auf 10.000 m² [47, § 6 Abs. 1] und die Zulässigkeit von Versammlungsräumen mit einer Fußbodenebene höher 22 m über der Geländeoberfläche [38, § 19 Abs. 4] hingewiesen. Grundsätzlich können Sprinkleranlagen auch zur Kompensation von Abweichungen und Erleichterungen eingesetzt werden [48, S. 189].

Für die Planung, Installation und Instandsetzung von Sprinkleranlagen gibt es in Deutschland eine Vielzahl von anerkannten Richtlinien, die zum Beispiel aus der Versicherungswirtschaft entstanden sind. Hierbei sei als erstes die VdS CEA 4001 „Sprinkleranlagen – Planung und Einbau“ [49] zu nennen, die im Jahr 2003 als europäische Richtlinie CEA 4001 mit der nationalen Versicherungsrichtlinie VdS 2092 zusammen geführt worden ist [50]. Die MVV TB verweist auf die CEA 4001 und die VdS CEA 4001, wenn Sprinkleranlagen abweichend nach einem anderen technischen Regelwerk als der DIN EN 12845 ausgelegt werden sollen [51, S. 319]. Die DIN EN 12845 „Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Automatische Sprinkleranlagen – Planung, Installation und Instandhaltung“ [52] gilt als europaweit einheitliche Norm für die Planung, Installation und Instandhaltung von Sprinkleranlagen. Diese ist auf Grundlage der CEA 4001 und VdS CEA 4001 entstanden, weshalb einige wortgleiche Passagen enthalten sind. Wenn es jedoch um die Bauteile einer Sprinkleranlage geht, muss die europäisch harmonisierte Normreihe EN 12259 herangezogen werden. Die bauaufsichtlichen Anforderungen führen kein explizites Regelwerk auf. Daher können weitere Regelwerke zur Auslegung von Sprinkleranlagen, wie die FM Global Data Sheets [53] oder das NFPA-Regelwerk 13 [54], verwendet werden. Jedoch kann im Rahmen eines Versicherungsvertrages ein bestimmtes Regelwerk

verlangt werden. Nachfolgend wird, aufgrund ihrer europäischen Verbreitung, Bezug auf die DIN EN 12845 genommen. [[55]; [56, S. 26 ff.]; [48, S. 194]]

Vor Beginn der Planung einer Sprinkleranlage nach DIN EN 12845 wird eine Brandgefahrenklasse festgelegt. Die Bestimmung der Brandgefahrenklasse hängt von der Nutzung des Schutzbereiches sowie der Brandbelastung ab. Dabei werden folgende Brandgefahrenklasse aufgeführt [[52, S. 32]; [48, S. 196]]:

- kleine Brandgefahr (engl. „Light Hazard“, kurz „LH“)
- mittlere Brandgefahr (engl. „Ordinary Hazard“, kurz „OH“)
- hohe Brandgefahr (engl. „High Hazard“, kurz „HH“)
 - hohe Brandgefahr, Produktionsrisiken (engl. „High Hazard Processing“, kurz „HHP“)
 - hohe Brandgefahr, Lagerrisiken (engl. „High Hazard Storage“, kurz „HHS“)

Die Brandgefahrengruppen OH und HH werden nochmals in jeweils vier Untergruppen (mit der Nummer 1 bis 4 beschrieben) unterteilt. Diese Untergruppen sind bedeutungsvoll bei der Planung einer Sprinkleranlage, da sich diese in ihren Anforderungen erheblich unterscheiden. Beispielsweise ist eine Nass- oder vorgesteuerte Anlage bei mittlerer Brandgefahr (Untergruppe 1) auf eine Wasserbeaufschlagung von 5,0 mm/min bei einer Wirkfläche von 72 m² auszulegen. Stattdessen ist bei einer hohen Brandgefahr mit Produktionsrisiken Gruppe 2 eine Wasserbeaufschlagung von 10,0 mm/min bei einer Wirkfläche von 260 m² anzunehmen. [52, S. 36]

Neben der Einordnung von Sprinkleranlagen in die Brandgefahrenklassen, können diese ebenso nach ihrer Art und Größe unterschieden werden. Sprinkleranlagen lassen sich in folgende fünf Anlagenarten unterteilen [[52, S. 73 ff.]; [48, S. 207]; [57, S. 74 ff.]]:

- Nassanlagen
- Trockenanlagen
- Nass-Trocken-Anlagen
- Vorgesteuerte Anlagen
- Tandem-Anlagen

Nassanlagen

Nassanlagen stehen ständig mit Wasser gefüllt unter Druck. Sie dürfen nur in Bereichen ohne Frostgefahr eingebaut werden, in denen die Umgebungstemperatur gleichzeitig 95 °C nicht überschreitet. [52, S. 74]

Trockenanlagen

Trockenanlagen sind anders als die Nassanlagen hinter dem Trockenventil mit Luft oder Inertgas unter Druck gefüllt. Vor dem Ventil steht Wasser unter Druck an. Im Gegensatz zur Nassanlage dürfen Trockenanlagen nur dort eingebaut werden, wo Frostgefahr besteht und die Temperatur 70 °C nicht überschreitet. Die Alarmventilstation bei der Nass- und auch bei der Trockenanlage werden durch einen Druckabfall des anstehenden Gases oder Wassers ausgelöst und aktivieren somit die gesamte Anlage. [52, S. 75]

Nass-Trocken-Anlage

Die Kombination der beiden zuvor beschriebenen Anlagen ist die Nass-Trocken-Anlage. Diese enthält entweder ein Nass-Trockenventil oder eine Kombination aus einem Nassalarmventil und einem Trockenalarmventil. In den kälteren Monaten im Jahr sind die Rohrleitungen der Anlage hinter dem Nass-Trocken-Alarmventil oder dem Trockenalarmventil mit Luft oder Inertgas unter Druck gefüllt, um Frostschäden zu vermeiden. Der Rest der Anlage ist vor dem Alarmventil unter Druck mit Wasser gefüllt. In den übrigen Monaten im Jahr kann die Anlage als Nassanlage betrieben werden. [52, S. 76]

Vorgesteuerte Anlagen

Vorgesteuerte Anlagen besitzen grundsätzlich den selben Funktionsaufbau wie Trockenanlagen, müssen aber im Gegensatz zu den vorherigen beschriebenen Anlagen mit einer automatischen Brandmeldeanlage verbunden sein. Eine Besonderheit dieser Anlagen ist der Auslösemechanismus der Alarmventilstation. Bei dem Typ A der Anlagenart löst dieser nur über die automatische Brandmeldeanlage aus. Die vorgesteuerte Anlage vom Typ A wird in Bereichen empfohlen, in denen ein erheblicher Schaden bei einem versehentlichen Austreten von Wasser entstehen könnte. Anlagen des Typs A müssen bei einer Störung wie eine gewöhnliche Trockenanlage funktionieren, daher muss der Druckabfall im Rohrnetz überwacht werden. Im Gegensatz dazu erfolgt bei Typ B ein Auslösen der Alarmventilstation entweder durch einen Druckabfall im Rohrsystem oder durch die automatische Brandmelde-

anlage. Eine vorgesteuerte Anlage ist für die gleichen Bereiche vorgesehen, die auch für die Trockenanlage gelten und für Bereiche in denen eine schnelle Brandausbreitung zu erwarten ist. Daher ist das Ziel eine Reduzierung der Gesamtauslösezeit der Sprinkleranlage. [[52, S. 76]; [48, S. 208 ff.]]

Tandem- und Tandem-Nass-Trockenanlagen

Tandem- und Tandem-Nass-Trockenanlagen stellen eine Erweiterung zur normalen Nassanlage dar. Dabei sind eine oder mehrere Trockenanlagen an eine Nassanlage angeschlossen. Diese kommen zum Einsatz, wenn nur ein Teil der Anlage einer möglichen Frostgefahr ausgesetzt ist. Außerdem wird eine Nass- oder Nass-Trocken-Anlage mit einer erweiterten Trockenanlage in Kühllhäusern sowie Hochtemperaturlöfen oder -trockenräumen eingesetzt. [52, S. 77]

In der DIN EN 12845 werden umfangreiche Anforderungen für die Instandhaltung von Sprinkleranlagen definiert. Hierbei wird außer Acht gelassen, um welchen Sprinkleranlagentyp oder um welche Brandgefahrenklasse es sich handelt. Grundsätzlich wird vom Betreiber einer Sprinkleranlage erwartet, dass dieser alle planmäßigen durchzuführenden Prüf-, Service- und Instandhaltungsarbeiten vom Errichter der Anlage oder einer ähnlich qualifizierten Firma auf Basis eines entsprechenden Vertrages durchführen lässt. Der Errichter der Anlage übergibt an den Betreiber einen umfangreiches Inspektions- und Prüfprogramm, welches der Betreiber erfüllen muss. [52, S. 125] Vorgeschrieben sind die nachfolgenden Prüfungen, Kontrollen und Inspektionen, die der Betreiber durchführen lassen muss [52, S. 126 ff.]:

- wöchentliche Routineprüfungen:
Hierbei werden unter anderem die Wasser- und Gasdrücke der Anlage, die Funktionsfähigkeit des automatischen Pumpenstarts und die Funktion der Heizungen zum Verhindern des Einfrierens der Sprinkleranlage überprüft.
- monatliche Kontrolle:
In dieser Kontrolle sind alle Elektrolytstände und -dichten aller Zellen von Blei-Akkumulatoren, die zur Stromversorgung dienen, zu überprüfen.
- vierteljährliche Routineinspektion:
In dieser werden die Einstufung der Brandgefahrenklasse oder die Auslegung der Anlage überprüft. Außerdem müssen Sprinkler, Steuerventile und Sprühdosen gereinigt und inspiziert werden. Eine Routineinspektion der Wasserversorgung, der Absperrarmaturen sowie der Strömungsmelder muss außerdem stattfinden.

- halbjährliche Routineinspektion:
Trockenalarmventile sowie die elektrischen Anlagen für die Alarmübertragung zur Feuerwehr und zu externen zentralen Leitstellen sind im Abstand von nicht mehr als sechs Monaten zu kontrollieren.
- jährliche Routineinspektion:
In dieser Inspektion werden die Durchflussrate der Anlage, sowie die Dieselmotoren hinsichtlich eines Fehlstartes, die Schwimmventile für Vorratsbehälter, die Pumpenansaugkammern und die Steinfänger überprüft.
- 3-Jahres-Routineinspektion:
Nach drei Jahren werden die Vorrats- und Druckbehälter inspiziert, sowie die Absperrarmaturen, die Alarm- und Rückschlagventile der Wasserversorgung.
- 10-Jahres-Routineinspektion:
In dieser Inspektion müssen alle Vorratsbehälter gereinigt und in Stand gesetzt werden.

Die Vorgabe für eine tiefergehende Inspektion nach 12,5 Jahren für Nass- und 25 Jahre für Trockenanlagen sieht die VdS CEA 4001 [49, S. 1] vor, jedoch finden sich keine Angaben in der DIN EN 12845 wieder. Diese verweist im Anhang K auf eine 25-Jahres-Überprüfung und definiert die Erfüllung als Soll-Anforderung. [52, S. 166]

2.3 Grundlagen Brandschutzingenieurmethoden

Es gibt drei Vorgehensweisen, nach denen die materiellen Anforderungen der Bauordnung zur Erfüllung der Schutzziele des Brandschutzes gemäß §14 MBO überprüft werden können. Einmal die klassische maßnahmenbasierte (präskriptive) Vorgehensweise, die leistungsbasierte Vorgehensweise und die risikobasierte Vorgehensweise (siehe Abbildung 2.1). Bei der präskriptiven Vorgehensweise werden die materiellen Anforderungen, z. B. an Baustoffe, Bauteile und Rettungswege, aus den Landesbauordnungen oder Sonderbauverordnungen entnommen. Die leistungsbasierte Vorgehensweise basiert auf der Definition von leistungsorientierten Schutzzielen oder Kriterien, die durch Nachweise mit Ingenieurmethoden berechnet werden. In der dritten Vorgehensweise werden Festlegungen mit risikobasierten Schutzzielen (z. B. Todesfallraten oder Grenzwerte für die Grenzkosten) getroffen. Die Einhaltung dieser wird mit Hilfe von Brandrisikoanalysen aufgezeigt. [58]

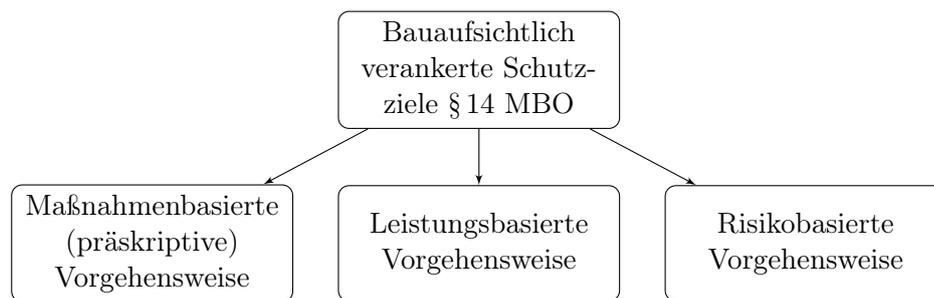


Abbildung 2.1: Maßnahmenbasierte, leistungsbasierte und risikobasierte Vorgehensweise bei der Brandschutzbemessung in Anlehnung an [58]

2.3.1 DIN 18009-1 Brandschutzingenieurwesen

Das Deutsche Institut für Normung e. V. (DIN) verabschiedete 2016 den ersten Teil der DIN 18009-1, um die bauaufsichtliche Akzeptanz der Anwendung von Ingenieurmethoden für den Nachweis der Brandsicherheit zu verbessern. Dort werden die Grundsätze und Regeln für die Anwendung der Methoden des Brandschutzingenieurwesens erläutert. Ziel dieser Norm ist es, sich von den festgelegten Bauteilanforderungen der Vorschriften zu lösen und stattdessen ingenieurgemäße Methoden zu verwenden. [59, S. 171] Bei der Erstellung von schutzzielorientierten bzw. leistungsbasierten Nachweisen soll sich an den Vorgaben der DIN 18009-1 orientiert werden [60, S. 33]. Ingenieurtechnische Verfahren für die Brandsicherheit kommen zur Anwendung, um Schutzziele in der Brandschutzplanung nachzuweisen und zu überprüfen (schutzzielorientierter Nachweis). Das Zusammenwirken der Brandschutzmaßnahmen, der Wechselwirkungen zwischen den Planungsparametern und den Planungsmodulen muss berücksichtigt werden. [61, S. 9] Nach DIN 18009-1 sind folgende ingenieurtechnische Verfahren zum Nachweis der Schutzziele möglich [61, S. 10]:

- **argumentative ingenieurgemäße Nachweisführung;** ggf. auch unter Verwendung von Schätzverfahren, z. B. engineering judgement; Kriterium: unmittelbare Akzeptanzfindung.
- **leistungsbezogene Nachweisführung;** Diese Vorgehensweise ist typischerweise ein iterativer Prozess. Kriterium: Erfüllung sicherheitstechnischer Leistungskriterien.

Bei der argumentativen ingenieurgemäßen Nachweisführung liegt das Kriterium in einer unmittelbaren Akzeptanzfindung, während bei der leistungsbezogenen Akzeptanzfindung die Erfüllung sicherheitstechnischer Leistungskriterien bestätigt wird [59, S. 174].

Ingenieurtechnische Verfahren setzen sich nach DIN 18009-1 aus drei Hauptprozessen zusammen. Diese Hauptprozesse sind die Nachweisführung, die Dokumentation und die Prüfung. Diese gliedern sich in Abhängigkeit des Verfahrens in weitere Unterprozesse auf. Die genannte Vorgehenssystematik wird in Abbildung A.1 übersichtlich dargestellt.

Nachweisführung

Im Prozess der Nachweisführung und des Planungsentwurfs sind einige Schritte vorhanden, die unabhängig von der Nachweisführung zu beachten sind. Dazu zählen im Besonderen die qualitative Entwurfsanalyse und die Feststellung möglicher Abweichungen von präskriptiven Anforderungen bzw. Vorschriften. Weiterhin gehören die Schutzzielkonkretisierung, die Festlegung funktionaler Anforderungen sowie eine Entscheidung, ob die Nachweise mit ingenieurtechnischen Verfahren geführt werden müssen, dazu. [61, S. 11]

Anfänglich zu jeder Nachweisführung sind Planungsentwürfe einer qualitativen Entwurfsanalyse zu unterziehen. Die qualitative Entwurfsanalyse beinhaltet die Feststellung der vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen und die Erfassung von brandschutztechnischen Randbedingungen von baulichen Anlagen und deren Nutzung. Dazu zählen die Struktur der baulichen Anlage (Konstruktion und Baustoffe, Unterteilung in Abschnitte, Anordnung und Abtrennung der Rettungswege), das Nutzungskonzept (Brandlasten und Nutzer) und die Infrastruktur (anlagentechnische und organisatorische Brandschutzmaßnahmen, Vorkehrungen für den abwehrenden Brandschutz). Auf Grundlage einer solchen Entwurfsanalyse ist eine systematische Identifizierung von beurteilungsrelevanten Gefahren in Verbindung mit einer Risikobewertung möglich. [61, S. 12]

Darauffolgend ist zu bewerten, ob präskriptive Anforderungen eingehalten bzw. umgesetzt und Planungen ohne besondere Nachweise fortgesetzt werden können. Andernfalls muss geprüft werden, ob Alternativlösungen mit Hilfe von ingenieurtechnischen Methoden erforderlich bzw. gewünscht sind. [61, S. 12] In diesem Fall kann die Nachweismethode eine argumentative ingenieurgemäße oder eine leistungsbezogene Nachweisführung sein. [61, S. 11]

Eine argumentative ingenieurgemäße Nachweisführung kann verwendet werden, wenn von einzelnen präskriptiven Anforderungen abgewichen und sich die Auswirkungen dieser Abweichung, unter Berücksichtigung des Erreichungsgrades funktionaler Anforderungen mit ausreichender Zuverlässigkeit, abschätzen lassen. Dabei müssen die verwendeten Argumentationen durch ingenieurwissenschaftliche Erkenntnis-

se belegt werden. [61, S. 12] Bei konkreten Abweichungen werden bei derartigen Nachweisführungen folgende Angaben verlangt [61, S. 12]:

- Angabe der betroffenen Regelanforderungen mit Quellenverweis
- Angabe von der Regelanforderung vorhandenen Art der Abweichung
- Angabe der funktionalen Anforderung die mit der Regelanforderung konkret im Zusammenhang stehen
- Angabe bzw. Erreichungsgradabschätzung der funktionalen Anforderung für „alternative Lösungen“ auf Grundlage belegbarer wissenschaftlicher Erkenntnisse des Ingenieurwesens
- Angaben zu notwendigen Maßnahmen, deren Zusammenwirken und Funktionsweisen

Leistungsbezogene Nachweise kommen zum Einsatz, wenn sich die Auswirkungen von Abweichungen nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit abschätzen lassen. Berechnungsergebnisse sind hinsichtlich der Schutzzieleerreichung zu bewerten und Entscheidungen bezüglich der Brandschutzplanung zu begründen. Unter Berücksichtigung geforderter Sicherheitsniveaus sind Soll-Ist-Vergleiche zwischen den, aus den Schutzziele abgeleiteten Leistungskriterien (Akzeptanzkriterien) und den Ergebnissen aus Analysen von Berechnungen durchzuführen. Es muss nachvollziehbar gezeigt werden, dass ausreichend konservative Annahmen in Bezug auf sicherheitsrelevante Einwirkungen (E), wie z. B. Brandeinwirkungen getroffen werden. Dabei werden festgelegte Leistungskriterien als Grenzzustände bzw. erforderliche Widerstände (R) betrachtet, welche in dem Gesamtsystem den Einwirkungen entgegengesetzt werden. Grundsätzlich müssen die Einwirkungen kleiner oder gleich dem erforderlichen Widerstand des Gesamtsystems sein. Um Streuungen und Unwägbarkeiten von Parametern zu berücksichtigen, werden sowohl die Einwirkungen als auch die Widerständen unter Zugrundelegung eines Sicherheitskonzeptes, beispielsweise das im nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-2 beschriebene [62], mit Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände (γ_R) und Einwirkungen (γ_E) beaufschlagt. [61, S. 13]

Das Bestimmen der jeweiligen Akzeptanzkriterien bei der Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden ist von großer Bedeutung [59, S. 175]. Aus den verschiedenen öffentlich-rechtlichen und privatrechtlichen Schutzinteressen können unterschiedliche Schutzziele entstehen. Dazu zählen insbesondere [61, S. 12]:

- Standsicherheit, auch im Brandfall
- Vorbeugung gegen Brandentstehung, Brandausbreitung inklusive Rauchausbreitung

- Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren
- Ermöglichung von wirksamer Löschmaßnahmen
- Denkmalschutz, Erhaltung von Kulturdenkmalen
- Umweltschutz
- Begrenzung des Sachschadens
- Vermeidung von Betriebsunterbrechungen

Dokumentation

Die Nachweise kommen im Hauptprozessschritt der Dokumentation zusammen und müssen alle wesentlichen Aspekte der Nachweisführung enthalten. Die Inhalte des Nachweises sollen strukturiert, nachvollziehbar und prüfbar dargelegt werden. Eine Aufschlüsselung der wichtigsten Aspekte der Dokumentation findet sich in Abschnitt 10 der DIN 18009-1 wieder. [61, S. 31]

Prüfung

Der letzte Hauptprozessschritt ist die Prüfung in der die Dokumentation mündet. Diese erfolgt grundsätzlich nachdem 4-Augen-Prinzip und wird in Abhängigkeit der Nachweisführung entweder nach Richtlinien, Schutzziele oder nach Ingenieurprinzipien auf Akzeptanz geprüft. Der gesamte Prozess der ingenieurtechnischen Nachweisführung schließt mit einem Prüfbericht bzw. einer Genehmigung ab. Andernfalls muss bei Nichterreichen der Akzeptanz und Nichtbestehen der Nachweis-Prüfung der Entwurf bzw. die Planung variiert oder die Nachweisführung nachgebessert werden. [61, S. 11]

2.3.2 Brandschutzrelevante Regelungen der Eurocodes

1975 beschloss die Kommission der Europäischen Gemeinschaft eine Erarbeitung von harmonisierten technischen Regelwerken für die Tragwerksplanung von Bauwerken in Form der Eurocodes. Diese sollen als Ergänzung zu den in den Mitgliedsländern geregelten Vorschriften dienen oder diese ganz ersetzen. [63, S. 4] Die Brandschutzteile der Eurocodes sind für den Bauherren (z. B. für die Aufstellung spezieller Anforderungen), den Planer, den Bauunternehmer und die relevanten Behörden bestimmt. Die Eurocodes definieren als allgemeines Ziel des Brandschutzes „die Begrenzung der Risiken für die Einzelpersonen und die Gesellschaft, benachbarte Bauwerke und, falls erforderlich, die Umgebung oder direkt betroffene Bauwerke im Brandfall.“ [[63, S. 7]; [64, S. 7]; [65, S. 6]] Die Brandschutzteile der Eurocodes 1 bis 6 und 9 [63, 64, 65, 66, 67, 68, 69] beinhalten Bemessungsverfahren mit denen individuelle Brand-

schutznachweise für Einzelbauteile sowie Teil- und Gesamttragwerke möglich sind. [70, S.189] Eine Übersichtstabelle der brandschutzrelevanten Regelungen wird in Tabelle 2.7 dargestellt.

Tabelle 2.7: Übersichtstabelle der brandschutzrelevanten Regelungen der Eurocodes

Abkürzung	Bezeichnung	Inhalt
EC 1-1-2	DIN EN 1991-1-2	Einwirkung auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke
EC 2-1-2	DIN EN 1992-1-2	Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall
EC 3-1-2	DIN EN 1993-1-2	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall
EC 4-1-2	DIN EN 1994-1-2	Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall
EC 5-1-2	DIN EN 1995-1-2	Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall
EC 6-1-2	DIN EN 1996-1-2	Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall
EC 9-1-2	DIN EN 1999-1-2	Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken – Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall

In der Muster-Verwaltungsvorschrift technischer Baubestimmungen (MVV TB) [51] sind die Eurocodes und ihre zugehörigen Nationalen Anhänge als technische Baubestimmungen übernommen. Grundlegend ist die brandschutztechnische Bemessung nach den einzelnen Eurocodes durchzuführen. Die DIN 4102-4 [71] kann für Bemessungen verwendet werden, die nicht in den Eurocodes geregelt sind [51, S. 22]. [70, S. 191]

In Abbildung 2.2 ist die Anwendung der Bemessungsverfahren nach den Eurocodes dargestellt. Die Bemessung beruht grundsätzlich auf nominellen Bränden, aus denen sich thermische Einwirkungen ergeben. Die Brandschutzbemessung, die durch

den Brandschutzingenieur durchgeführt wird, stützt sich auf einem leistungsabhängigen Ansatz der sich auf thermische Einwirkung bezieht, die auf physikalischen und chemischen Parametern basieren. [[63, S. 8]; [64, S. 9]; [65, S. 8]]

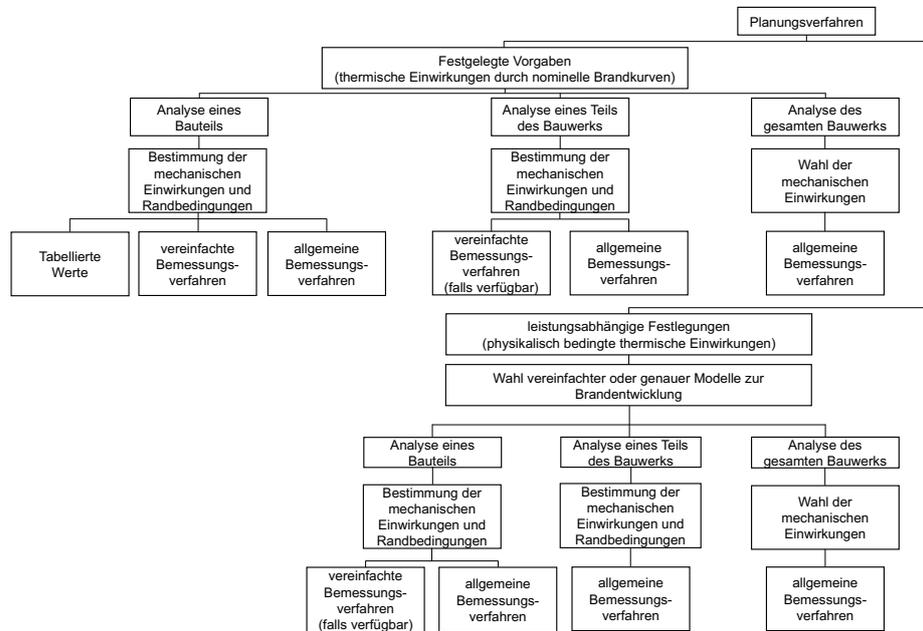


Abbildung 2.2: Bemessungsverfahren der brandschutztechnischen Teile der Eurocodes in Anlehnung an [[63, S. 8]; [64, S. 10]; [65, S. 9]; [66, S. 9]; [67, S. 9]; [68, S. 9]; [69, S. 9]]

Beim Planungsverfahren lassen sich festgelegte Vorgaben (thermische Einwirkungen durch nominelle Brandkurven) und leistungsabhängige Festlegungen (physikalisch bedingte thermische Einwirkungen) unterscheiden. Grundsätzlich unterteilen sich jeweils die festgelegten Vorgaben und die leistungsabhängige Festlegung in drei verschiedene Teile [[63, S. 8]; [65, S. 9]]:

- Analyse eines Bauteils
- Analyse eines Teils des Bauwerks
- Analyse des gesamten Bauwerks

Die Analyse eines Bauteils gliedert sich weitestgehend in drei verschiedene Nachweistufen für die Bestimmung der Standsicherheit von Bauteilen und Tragwerken im Brandfall [[63, S. 8]; [65, S. 9]; [72, S. 10.94]]:

- Ebene 1: Tabellierte Werte
- Ebene 2: Vereinfachte Bemessungsverfahren
- Ebene 3: Allgemeine Bemessungsverfahren

Das tabellarische Verfahren (Ebene 1) ist aus Brandversuchen abgeleitet und ist prinzipiell konservativ. Die Verfahren der Bemessung sind wirklichkeitsnäher, jedoch aufwändiger in der Berechnung. Grundsätzlich hängt die Wahl des Verfahrens von der benötigten Aussage und der geforderten Genauigkeit ab. [70, S. 191]

2.3.3 Fire Dynamics Simulator und Smokeview

Feldmodelle bzw. CFD-Modelle (Computational Fluid Dynamics Modelle) finden einen immer stärkeren Einzug in die numerische Simulation von Brandereignissen. Es gibt mehrere Berechnungsmodelle die weitverbreitet sind, wie beispielsweise ANSYS-CFX [73], FLUENT [74] und insbesondere der Fire Dynamics Simulator (FDS) [75]. [76, S. 9] Diese finden in den letzten Jahren zunehmend Anwendung, da die Leistungsfähigkeit von Computern steigt. [77, S. 20] Berechnungen der Brand- und Rauchausbreitung werden im Brandschutzingenieurwesen auch als Brandsimulation bezeichnet. Durch Brandsimulationen kann die Tauglichkeit von Sicherheitskonzepten nachgewiesen werden. Einige wichtige Aspekte, die untersucht werden können, sind [78, S. 251]:

- die zu erwartende Zeit bis zum Ansprechen von automatischen Rauchmeldesystemen
- die thermische Belastung von Tragwerken oder Bauteilen
- die Sichttrübung und Rauchgaskonzentration in Rettungswegen
- die Wirksamkeit von vorgesehenen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen
- die Brandausbreitungsmöglichkeit in Wechselwirkung mit den vorgesehenen Abschottungsmaßnahmen

Mit Hilfe von Brandsimulationen kann gezeigt werden, dass auch auf anderem Wege, wie beispielsweise Handrechenmodelle oder Standardkonzepten, die Einhaltung der Schutzziele möglich ist. Damit findet mit der Anwendung von Simulationstechnologien ein Prinzipienwechsel statt. Während Sicherheitskonzepte im Wesentlichen auf empirischen Erkenntnissen beruhen, welche bisher auf die langjährige Erfahrung im Umgang mit Schutzmaßnahmen zurückzuführen sind (präskriptive Vorgaben), können diese mit Hilfe von Brandsimulationen auch auf naturwissenschaftliche Erkenntnisse und Methoden gestützt werden (schutzzielorientierter Nachweis). [78, S. 252]

CFD ist im internationalen Sprachgebrauch weit verbreitet und bezeichnet die Näherungslösung physikalischer Gleichungen zur Berechnung strömungsmechanischer Fragestellungen mit Hilfe von numerischer Methoden [78, S. 251]. Mit Hilfe von nu-

merischer Strömungsdynamik (CFD) wird das Strömungsverhalten in brandbedingten Strömungsfeldern berechnet. [75, S. 3] CFD-Modelle können Variablen als Funktion von Ort und Zeit in unterschiedlichen Raumpunkten bzw. Raumrichtungen berechnen. Als Grundlage dieser Modelle dienen die Gleichungen der Masse-, Energie- und Impulserhaltung. Diese liegen in Form von partiellen Differenzialgleichungen allgemeingültig vor und unterliegen vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen. Damit können physikalische Größen wie Temperatur, Druck, Konzentrationen von Brandprodukten an beliebigen Punkten sowie Gasgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Raumrichtungen berechnet werden. [76, S. 9]

In dieser Arbeit wird der CFD-basierte Fire Dynamics Simulator (FDS) verwendet. Vorteile dieses Programms sind die umfangreich betriebenen Validierungsarbeiten und der offen zugängliche Quellcode [77, S. 21]. Die erste Version von FDS wurde durch das National Institute of Standards and Technology (NIST) und dem Technical Research Centre of Finland im Februar 2000 veröffentlicht und fortlaufend weiterentwickelt [75, S. xi]. FDS wird unter anderem für die Konstruktion von Rauchabzugsanlagen, Berechnung von Sprinkler-/Melderaktivierung sowie zur Rekonstruktion von Bränden in Gebäuden verwendet. [75, S. 3] Die aktuelle Version von FDS bietet Modelle für Hydrodynamik, Verbrennungsprozesse und Strahlungstransporte, sowie die Möglichkeit Geometrien nachzubilden und ortsabhängig unterschiedliche Gitterweiten zu verwenden. Außerdem können auch Eigenschaften der Systemgrenzen hinterlegt werden. Zusätzlich können dazu Berechnungen parallelisiert, d. h. gleichzeitig auf einer Vielzahl von Computern berechnet werden, um die Rechenzeit zu verkürzen. [75, S. 3 f.] Der Anwender unterteilt den zu untersuchenden Raum in ein Raumgitter (Mesh). So entsteht eine Vielzahl von Kontrollvolumina, in denen die grundlegenden Gleichungen gelöst werden. [76, S. 9] Ein Ablaufschema zur Durchführung einer Brandsimulation findet sich in Abbildung 2.3.

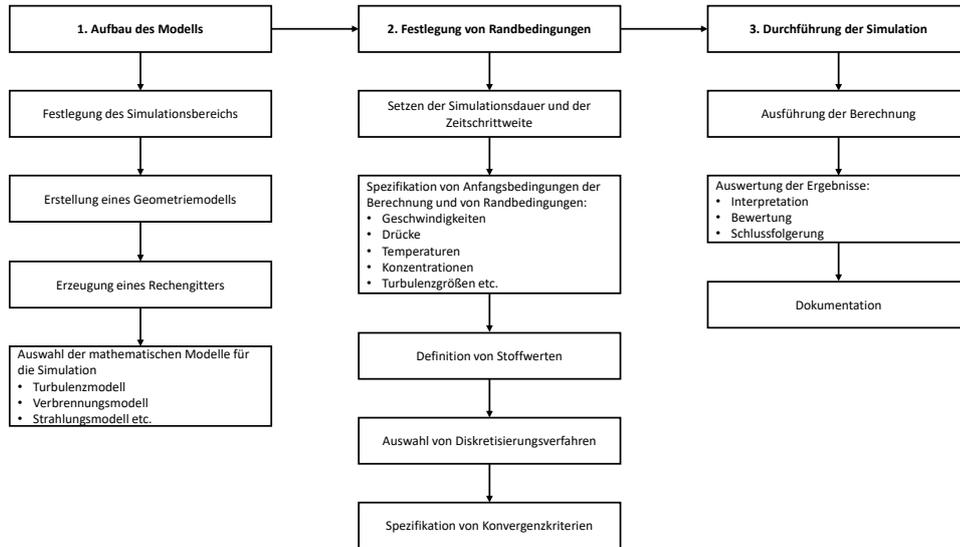


Abbildung 2.3: Ablaufschema für eine Brandsimulation in Anlehnung an Münch [78, S. 292] und VDI 6019 Blatt 2 [79, S. 36]

Turbulente Fluidströmungen können auf unterschiedlicher Weise simuliert werden. Beispielsweise seien hier die direkte numerische Simulation (engl. „Direct Numerical Simulation“, kurz „DNS“), die Grobstruktursimulation (engl. „Large-Eddy Simulation“, kurz „LES“) sowie die Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen (engl. „Reynolds-Averaged Navier-Stokes“, kurz „RANS“) zu nennen. Der Detaillierungsgrad nimmt von der DNS über die LES (räumliche Mittelung der Geschwindigkeiten) bis zur der RANS Simulation (grobe Strömungsskalen für zeitlich gemittelte Größen) ab. [[80, S. 134 f.];[81, S. 540]]

Um die mit FDS berechneten Simulationsergebnisse visualisieren zu können, dient das Programm Smokeview. Die visuelle Darstellung erfolgt durch verschiedene Techniken. Zum einen wird ermöglicht, das Raummodell in einer 3D-Ansicht darzustellen, zum anderen die Darstellung einer 2D-Ansicht bzw. 3D-Ansicht von Gas- und Temperaturentbreitung sowie Strömungsvektoren. Diese Darstellungen ermöglichen die brandschutztechnische Interpretation der Ergebnisse. Smokeview ist ein Post-processor, welcher nach der Berechnung der Simulation die Ergebnisse verarbeitet und darstellt. [77, S. 36] Der Zusammenhang zwischen FDS und Smokeview wird in Abbildung 2.4 verdeutlicht.

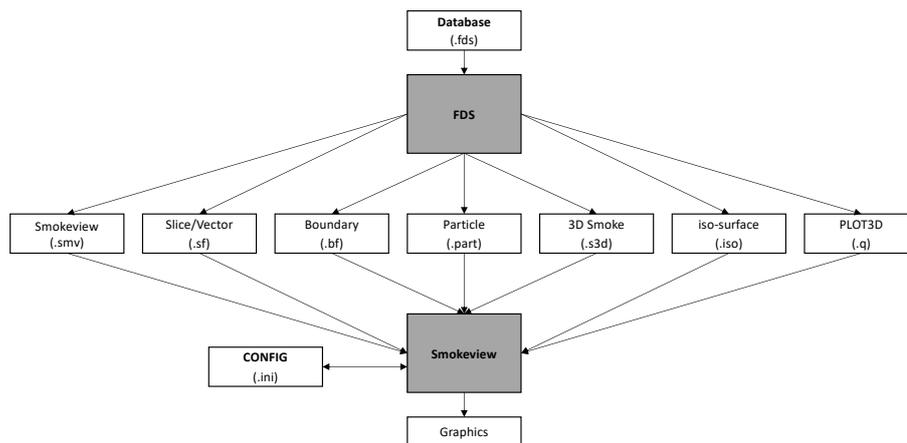


Abbildung 2.4: Struktureller Zusammenhang zwischen FDS und Smokeview in Anlehnung an [77, S. 37]

2.3.4 Räumungssimulationen

Grundsätzlich sind zwischen den Begriffen „Evakuierung“ und „Räumung“ zu unterscheiden. Evakuierung kann als eine organisierte Verlegung von Menschen aus einem gefährdeten Bereich gesehen werden, wohingegen die Räumung als eine ungeplante und kurzfristige Verlegung aufgefasst werden kann. [82]

Nach diesen Definitionen müsste die Simulation von Personenströmen, die aus einem Raum flüchten, „Räumungssimulation“ heißen, jedoch wird häufig in der Literatur der Begriff der „Evakuierungssimulation“ verwendet. [83–86] Zudem wird aufgrund der Verwendung des Begriffs Räumungssimulation in der sich in Entwicklung befindlichen, DIN 18009-2 (Räumungssimulation und Personensicherheit) auch in dieser Arbeit der Begriff Räumungssimulation verwendet [87].

Grundsätzlich lassen sich die Modelle für Räumungssimulationen in makroskopische und mikroskopische Modelle unterscheiden. Makroskopische Modelle (Strömungsmodelle, Hydraulische Modelle) betrachten eine Population als geschlossenen Personenstrom mit einer mittleren Dichte und Gehgeschwindigkeit. Aufgrund der Vereinfachung der Annahmen eignen sich diese Modelle für Handrechenverfahren. Dahingegen wird bei mikroskopischen Modellen die Bewegung jedes einzelnen Individuums einer Population betrachtet (Individualmodelle). Den Individuums können verschiedene Verhalten in Bezug auf die Eigenschaften wie Platzbedarf, Gehgeschwindigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit zugeordnet werden. Dabei wird die Geometrie der baulichen Anlage detailliert nachgebildet. Da mikroskopische Modelle einen großen Rechenaufwand benötigen, ist der Einsatz von Computersimulationsprogrammen erforderlich. [61, S. 50 f.]

Räumungssimulationen werden zur Bewertung der Personensicherheit verwendet. Ein wichtiger Grundsatz zur Bewertung der Personensicherheit ist, dass die verfügbare Räumungszeit (engl. „available safe egress time“, kurz „ASET“) größer oder gleich der erforderlichen Räumungszeit (engl. „required safe egress time“, kurz „RSET“) sein muss. Diese ASET/RSET-Methode wurde von Cooper und Strout [88] entwickelt. Die verfügbare Räumungszeit kann dazu beispielsweise mit Hilfe von Brandsimulationen bestimmt werden. Die erforderliche Räumungszeit lässt sich entsprechenden Räumungssimulationen entnehmen.

Auch wenn diese Methodik in den deutschen Normungen noch keine Betrachtung findet, kann sie bei der Nachweisführung von bauordnungsrechtlichen Schutzziele betrachtet werden.

In dieser Arbeit wird zur Bestimmung der erforderlichen Räumungszeit das Simulationsprogramm JuPedSim [89] verwendet. JuPedSim ist ein Open Source Framework zur Simulation, Analyse und Visualisierung von Fußgängerströmen. Es soll Studierenden und Forschenden eine Möglichkeit zur Untersuchung und Entwicklung von Personenstrommodellen bieten. Grundsätzlich können auch mit kleinen Anpassungen andere Forschungsfelder, wie z. B. die Untersuchung von Pendlerverkehr oder die Auslegung von Fußgängeranlagen betrachtet werden. [89, S. 4]

Unter dem Begriff JuPedSim vereinen sich verschiedene Module, die unabhängig von einander auszuführen sind. Diese Module setzen sich zusammen aus [89, S. 4 f.]:

- JPScore
- JPSreport
- JPSvis
- JPSeditor
- JPSfire

JPScore stellt das Hauptmodul dar, hier werden die sogenannten Trajectories, mit Hilfe von Informationen über Position, Richtung und Geschwindigkeit der einzelnen Agenten, berechnet. JPSvis dient der Visualisierung der Bewegungen von Agenten im Evakuierungsszenario. Mit JPSeditor können Geometryfiles erstellt oder bearbeitet werden, dies ist ein graphisches User Interface. Nach Angaben der Entwickler ist dieses Programm jedoch noch nicht fehlerfrei. JPSreport dient dazu, die von JPScore erzeugten Trajectories zu analysieren, indem sogenannte Flussdiagramme erzeugt werden. Das letzte der aufgelisteten Module ist das JPSfire. Dieses hilft dabei die Ergebnisse einer Brandsimulation in JuPedSim einzubinden. [89, S. 4 f.]

2.4 Definition des Begriffs Nutzen

Die Definition des Begriffs Nutzen unterscheidet sich je nach zugrundeliegendem Themengebiet. In der Verbraucherforschung wird beispielsweise der Nutzen über den Grad der Bedürfnisbefriedigung eines Gutes definiert. Für eine ausführliche Definition des Begriffs Nutzen in der Verbraucherforschung siehe [90–93].

In der wirtschaftlichen Betrachtung des Begriffs Nutzen existiert häufig die Überlegung, dass das Werteparadoxon aus dem Gebrauchswert (Nutzen) und dem Tauschwert (Preis) von Gütern abgeleitet wird, siehe hierzu auch [90, 94].

Eine weitere Definition des Begriffs Nutzen findet sich im Gesundheitswesen, dort gibt es verschiedene Ansätze und Methodiken, siehe dazu [95–98]. Die Bewertungsmethode des Humankapitalansatzes, der individuelle Zahlungsbereitschaftsansatz und der Ansatz der Quality-Adjusted Life-Years (QALYs) finden dort Anwendung [98]. Auf eine weitere Erläuterung der vorhergegangenen Definitionen wird in dieser Arbeit verzichtet, da diese keine Verwendung finden.

In dieser Arbeit wird lediglich der Begriff des Nutzens im Ingenieurwesen weiter ausgeführt. In der Ingenieurwissenschaft wird der Begriff „Nutzen“ unter anderem mit einer Änderung von quantitativen Merkmalen definiert. Dies können beispielsweise ein Ertrag, eine Reduktion von Verlusten oder eine Reduzierung des Risikos sein. [[99, S. 37]; [100, S. 148 ff.]; [101, S. 159 ff.]; [102, S. 714 ff.]]

Um den Ertrag (Nutzen) monetär zu erfassen und dem Aufwand gegenüber zustellen, kann die betriebswirtschaftliche Kennzahl der Wirtschaftlichkeit heran gezogen werden, die mit folgender Formel 2.1 beschrieben wird [[100, S. 148]; [102, S. 714 ff.]]:

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Ertrag (Nutzen)}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Kosten}} \quad (2.1)$$

Der Wert der Wirtschaftlichkeit muss aus dem ökonomischen Prinzip demnach >1 sein, damit eine Maßnahme wirtschaftlich ist. Nach [100, S. 149] wird der Ertrag im Brandschutz in drei Komponenten aufgeteilt:

- primär quantifizierbare Erträge, hierzu gehören z. B. Rabatte der Feuerversicherer
- sekundäre quantifizierbare Erträge, beispielsweise erhaltene Sachwerte, jedoch um diese zu ermitteln muss eine Berechnungsgrundlage definiert werden [101]
- nicht quantifizierbare Erträge, hierzu zählen die Verhinderung von Betriebsunterbrechungen nach Bränden, sowie die Rettung von Menschenleben

2.5 Nutzwertanalyse

Zur Betrachtung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses von brandschutztechnischen Maßnahmen finden sich in der Literatur eine Vielzahl von Arbeiten. Jedoch wird sich in diesen Arbeiten meist nur auf eine bestimmte Maßnahme mit Hilfe von umfangreichen Annahmen fokussiert. Diese Arbeiten lassen sich allerdings nicht ohne weiteres in der Praxis anwenden. Als Beispiel seien die Literaturstellen [58, 103–111] zu nennen. Eine Betrachtung mit Hilfe der Kosten-Nutzen-Analyse ist eine besondere Herausforderung, da dies eine Monetarisierung des menschlichen Lebens bzw. von Gesundheitsschäden voraussetzt. Diese Wertebemessung ist in der Gesellschaft, wie bereits erwähnt, moralisch und ethisch sehr umstritten. Es wird die These vertreten, dass das menschliche Leben unendlich wertvoll und somit ökonomisch nicht bewertbar ist. Daher wird in dieser Arbeit keine Kosten-Nutzen-Analyse angewendet. Als Alternativen zu dieser Methodik kämen die Nutzwertanalyse und die Kosten-Wirksamkeitsanalyse in Frage, welche eine Bewertung von nicht monetären Maßnahmen ermöglichen. [[112, S. 19]; [113, S. 23]; [114, S. 163]; [115, S. 91]] In dieser Arbeit wird die Nutzwertanalyse als Verfahren herangezogen und nicht die Kosten-Wirksamkeitsanalyse, da diese die Wirksamkeit selbst nur durch Teilwirksamkeiten angibt. Außerdem ist die Berechnung des Verhältnisses mit der Kosten-Wirksamkeitsanalyse nur bei einem eindimensionalen Zielkriterium möglich, weshalb sich diese Methodik im Hinblick auf mehrdimensionale Schutzziele nicht eignet. [116, S. 161 ff.]

Die Nutzwertanalyse ist auch bekannt unter dem Namen Scoring-Methode und basiert auf einem entscheidungstheoretischen Modell. Damit lassen sich Nutzwerte mehrerer komplexer Maßnahmen- oder Handlungsalternativen bezüglich mehrerer Bewertungskriterien qualitativ ermitteln, ordnen und zu einem Gesamtnutzen vereinigen. [[117, S. 9], [118, S. 38]; [114, S. 163]; [119, S. 120]] Dieses Verfahren ist grundsätzlich von einer subjektiven Einschätzung der durchführenden Person geprägt. Außerdem besteht die Gefahr, dass diesem Verfahren durch die angewandten Rechenverfahren eine messtheoretische, entscheidungslogische und mathematische Präzision unterstellt wird, die faktisch nicht da ist. [[109, S. 98]; [118, S. 38]] Trotz allem wird dieses Verfahren mitunter auch vom Bundesministerium der Finanzen [112, S. 19 ff.] und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [114, S. 163] zum Vergleich von Projektalternativen des Bundes empfohlen.

Ramachandran unterteilt die Risikoanalyse in die quantitative Risikoanalyse, die semi-quantitative Risikoanalyse und die qualitative Risikoanalyse [120, S. 13 ff.]. In

dieser Arbeit wird die Nutzwertanalyse als semi-quantitative Risikoanalyse angewendet. Zur Durchführung einer Nutzwertanalyse müssen zuerst drei Schritte erarbeitet werden. Als Erstes erfolgt die Festlegung und Gewichtung der einzelnen Kriterien, diese sollten entsprechend ihrer Wertigkeit gewichtet werden (Summe der Gewichtung = 100 oder 1). Dabei ist es hilfreich die einzelnen Ziele in eine Zielhierarchie zu übertragen, damit Unterziele dem übergeordneten Ziel zugeordnet werden können. [112, S. 20] Eine beispielhafte Darstellung einer Zielhierarchie ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

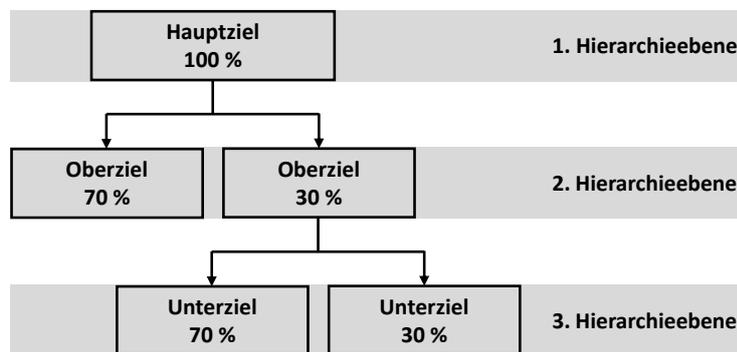


Abbildung 2.5: Beispielhafte Zielhierarchie (in Anlehnung an [115, S. 43])

Nach der Erstellung der Zielhierarchie müssen jedem Ziel Indikatoren oder Wirksamkeitsmaße zugeordnet werden. Mit diesen lässt sich die jeweilige Zielerreichung einer Maßnahme bestimmen. Zur Bestimmung der Zielerträge lassen sich beispielsweise Messdaten oder qualitative Beschreibungen verwenden. Aufgrund anderer Skalierungen der jeweiligen Daten müssen diese zuerst auf eine einheitliche Skala transformiert werden. Dafür lassen sich Punkteskalen verwenden, beispielsweise von 1 bis 10 oder von 0 bis 3. Jedem Punkt wird ein Bereich auf der transformierten Skala zugeordnet.

Der zweite Schritt beinhaltet die Beurteilung der Handlungsalternativen. Dabei wird beurteilt, ob ein Kriterium zutrifft, teils zutrifft oder gar nicht zutrifft. Der ausgewählte Punktwert wird auch als Zielerfüllungsgrad bezeichnet. [[115, S. 44 ff.]; [116, S. 177 ff.]; [114, S. 165]; [112, S. 19 f.]] Eine Beispielhafte Darstellung findet sich in Tabelle 2.8 wieder.

Tabelle 2.8: Beispielhafte Ermittlung von Zielerfüllungsgraden auf Basis unterschiedlicher Zielerträge (in Anlehnung an [115, S. 46])

Reaktionszeit auf Bürgeranfragen	> 3 Tage	2 bis 3 Tage	1 bis 2 Tage	< 1 Tag
Reaktionszeit	langsam	mittel	schnell	sehr schnell
Zielerfüllungsgrad	0	1	2	3

Der dritte Arbeitsschritt ist die Multiplikation der Punkte für jedes Kriterium über die Gewichtung. Aus der Addition aller ermittelten Teilnutzwerte eines jeweiligen Oberzieles ergibt sich der zugehörige Zielerfüllungsgrad eines Oberzieles, bezogen auf das Hauptziel. Um den Nutzwert einer Maßnahme im Gesamten zu bestimmen, ist anschließend der Teilnutzwert jedes Oberzieles durch Multiplikation des Zielerfüllungsgrades mit der jeweiligen Gewichtung zu berechnen und anschließend eine Addition aller Teilwerte vorzunehmen. [[115, S. 44 ff.]; [116, S. 180 ff.]; [114, S. 167]; [112, S. 20 f.]] Eine beispielhafte Ermittlung für einen Nutzwert ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

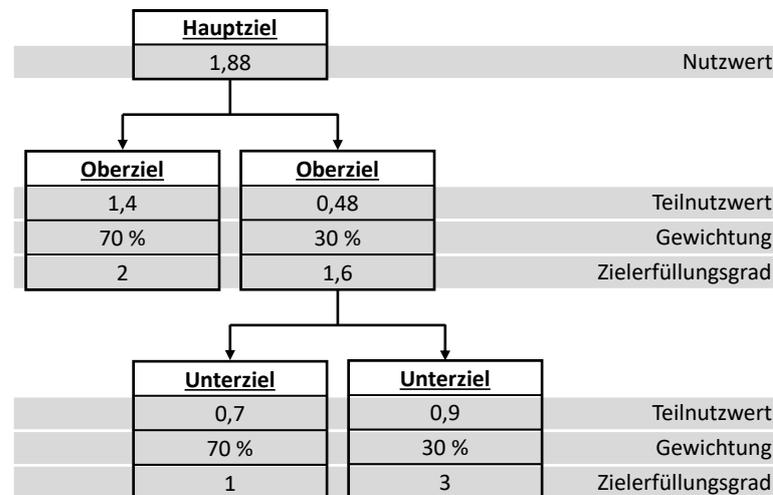


Abbildung 2.6: Beispielhafte Nutzwernermittlung

Wenn für alle Maßnahmenalternativen ein Nutzwert bestimmt worden ist, lässt sich eine Rangfolge dieser ermitteln. Die Maßnahme mit dem höchsten Nutzwert ist aus der Sicht der Nutzwertbetrachtung zu befürworten.

Um eine Entscheidung über die richtige Maßnahmenalternative zu treffen, muss der Nutzwert mit den verbundenen Kosten verglichen werden. Jedoch ist eine mathematische Verrechnung der Kosten mit dem Nutzwert laut [[114, S. 168]; [112,

S. 20]; [116, S. 175]] ausdrücklich nicht vorgesehenen. Abweichend davon verwendet Schleich das der Kosten-Wirksamkeits-Analyse zugeordnete „Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis“ [116, S. 172] als „Kosten-Nutzwert-Verhältnis“ (vergleiche auch hierzu [16, S. 443]).

3 Möglichkeiten für eine Kostenanalyse

In diesem Kapitel wird eine grundsätzliche Vorgehensweise zur Ermittlung von Kosten für brandschutztechnische Maßnahmen vorgestellt. Es werden wesentliche Besonderheiten bei der Anwendung dieser Kostenanalyse dargestellt. Außerdem gibt es zum Verständnis einen kurzen Exkurs über die Prämienkalkulation der Feuerversicherer und die Probleme der Verallgemeinerung dieser.

Eine Kostenanalyse im Bauwesen beinhaltet die Herstellungskosten sowie die Kosten, die im Rahmen der Nutzung entstehen [121, S.2]. Da die Kalkulation der Nutzungskosten auf Grundlage der ermittelten Bauwerkskosten erfolgen kann [122, S.15], findet die Kostenanalyse in dieser Arbeit zweistufig statt. Der erste Schritt ist die Ermittlung der Herstellungs- und der Bauwerkskosten für brandschutztechnische Maßnahmen. Im zweiten Schritt folgt die Ermittlung der Nutzungskosten. Beide Schritte werden anschließend zu den Gesamtkosten der jeweiligen Brandschutzmaßnahme über den betrachteten Zeitraum summiert.

3.1 Ermittlung der Herstellungskosten brandschutztechnischer Maßnahmen

Zur Ermittlung und Gliederung von Kosten kann die DIN 276 „Kosten im Bauwesen“ [123] herangezogen und für die Kostenplanung im Bauwesen nach [123, S.4] angewendet werden. Mit Hilfe dieser lassen sich die Kosten von Hochbauten, Ingenieurbauten, Infrastrukturanlagen und Freiflächen sowie die projektbezogenen Kosten ermitteln. Für die Kostenplanung beinhaltet die Norm nur die Kosten für den Neubau, den Umbau und die Modernisierung von Bauwerken und Anlagen. Für Nutzungskosten im Hochbau muss die DIN 18960 herangezogen werden [124]. [123, S.4]

Die Kostenermittlung unterteilt sich nach [123, S. 9 ff.] in:

- den Kostenrahmen,
- die Kostenschätzung,
- die Kostenberechnung,
- die Kostenfeststellung,
- den Kostenvoranschlag und
- den Kostenanschlag.

Im Kostenrahmen findet die Entscheidung über die Bedarfsplanung, grundsätzliche Wirtschaftlichkeits- und Finanzierungsüberlegungen, sowie die Festlegung einer Kostenvorgabe statt. Zur Anwendung dieses Verfahrens müssen im Kostenrahmen die Gesamtkosten entsprechend [123, S. 9] nach Kostengruppen in der ersten Ebene (Basisgliederung) der Kostengliederung berechnet werden. Die Kostenschätzung beinhaltet die Entscheidung über die Vorplanung und die Kostenberechnung über die Entwurfsplanung. Während der Kostenvoranschlag den Entscheidungen für die Ausführungsplanung und der Vorbereitung der Vergabe dient, ist der Kostenanschlag für die Entscheidungen über die Vergabe und die Ausführung heranzuziehen. Die Kostenfeststellung wird als Nachweis über die entstandenen Kosten herangezogen und erfordert eine Differenzierung der Gesamtkosten nach Kostengruppen bis zur dritten Ebene (Funktionselemente). [123, S. 9 ff.]

Das in der Norm (DIN 276) beschriebene Verfahren setzt das Vorhandensein von Schätzverfahren nach Erfahrungswerten (Baukostenkennwerte), die sich auf geometrische oder nutzungsspezifische Einheiten beziehen, voraus. Als geometrische Kennwerte können laut DIN 277 der Brutto-rauminhalt, die Bruttogrundfläche oder die Nutzfläche eines Gebäudes angegeben werden. Als nutzungsabhängige Kennwerte definiert die DIN 277 beispielsweise die Anzahl der Arbeitsplätze oder die Anzahl der Betten. [72, S. 1.32] Die Kostengliederung sieht drei Ebenen vor, die Basisgliederung, die Grobelemente und die Funktionselemente. Diese sind durch dreistellige Ordnungszahlen gekennzeichnet. Die Basisgliederung erfolgt nach acht Kostengruppen in der ersten Ebene, die durch die erste Ordnungszahl gekennzeichnet wird. Die Kostenermittlung nach DIN 276 gibt dem Auftraggeber bereits zu einem frühen Zeitpunkt Informationen über die zu erwartenden Kosten eines Projektes. [72] In Tabelle 3.1 wird die erste Ebene der Kostengliederung dargestellt. [123, S. 13]

Tabelle 3.1: Auflistung der Kostengruppen der ersten Gliederungsebene der DIN 276

Kostengruppe	Bezeichnung
100	Grundstück
200	Vorbereitende Maßnahmen
300	Bauwerk – Baukonstruktionen
400	Bauwerk – Technische Anlagen
500	Außenanlagen und Freiflächen
600	Ausstattung und Kunstwerke
700	Baunebenkosten
800	Finanzierung

In dieser Arbeit wird auf eine ausführliche Darstellung der zweiten und dritten Ebene verzichtet. Eine solche Auflistung findet sich in der DIN 276 wieder [123].

An dieser Stelle gibt es nur eine Betrachtung der Kostengruppen 300 und 400, da sie zusammengefasst die Bauwerkskosten darstellen. Außerdem wichtig für die Darstellung der Herstellungskosten ist die Kostengruppe 740 „Fachplanung“ aus der zweiten Ebene.

3.1.1 Ermittlung der Bauwerkskosten brandschutztechnischer Maßnahmen

Um Bauwerkskosten von brandschutztechnischen Maßnahmen der Kostengruppe 300 und 400 mittels der DIN 276 zu ermitteln, können statistische Kostenkennwerte, wie beispielsweise Werte des Baukosteninformationszentrum (BKI) [125–127], herangezogen werden [[121, S. 21]; [114, S. 48]]. Die BKI-Kostenkennwerte beinhalten die Aufschlüsselungen auf Basis der Bauelemente der DIN 276 und darüber hinaus noch weitere Detaillierungsgrade. Als Beispiel sei hier die dritte Ebene der Kostengruppe für Türen zu nennen, diese lässt in der DIN 276 keine weitere Differenzierung nach der dritten Ebene zu. Die Unterteilung endet mit den „Innenwandöffnungen“. [123, S. 19] Im Vergleich dazu wird bei den BKI-Kostenkennwerten hinsichtlich der Materialien und den Brandschutzanforderungen unterteilt, dies stellt einen viel ausführlicheren Detaillierungsgrad dar. Daher wird der zusätzliche Detaillierungsgrad der BKI-Kostenkennwerte auch als „vierte Ebene“ für die Ermittlung der Bauwerkskosten bezeichnet. [16]

Um das Preisniveau verschiedener Städte und Landkreise zu berücksichtigen, stellt das BKI Regionalfaktoren zur Verfügung. Mit diesen Faktoren lassen sich die statistischen Kostenkennwerte für verschiedener Städte und Landkreise umrechnen. [127, S. 52] Um diese regionalen Kennwerte zu erhalten, muss der Faktor mit dem Ergebnis

der Kostenermittlung multipliziert werden [127, S. 10]. In einem Urteil des Oberlandesgerichtes (OLG) Hamm ist für einen konkreten Fall bestätigt worden, dass eine prozentuale Abweichung von 19,86 % der geplanten Kosten von den konkreten Kosten akzeptabel ist [128]. Dieser ist laut dem OLG Hamm noch im tolerablen Bereich. Jedoch bezog sich dieses Urteil auf die Vorgängernorm der DIN 276, dennoch wird davon ausgegangen, dass das Urteil übertragbar ist.

Aufgrund der Überlegenheit in der Genauigkeit der Kostenkennwerte für einzelne Positionen im Gegensatz zu den Kostenkennwerten für Bauteile wird bei der Verwendung davon ausgegangen, dass eine Abweichung den Toleranzbereich nicht überschreitet (vergleiche hierzu auch [129, S. 335]).

Die verwendeten Kostenkennwerte in dieser Arbeit finden sich im Anhang A wieder, diese beruhen auf festgelegten Kennwerten [32, 127]. Die in dieser Arbeit verwendeten Nettopreise bilden die Grundlage für die Ermittlung der Fachplanungskosten. Diese Kostenkennwerte stammen überwiegend aus der BKI-Datenbank und führen tabellarisch die Minimal-, Von-, Bis-, Mittel- sowie Maximalpreise auf. Aufgeführt werden für einzelne Positionen in den Kostenkennwerten jeweils Brutto- und Nettopreise. [127, S. 10] Die Kostenkennwerte für die Positionen sind die einzige Ausnahme, bei der beide Preise ausgewiesen werden, ansonsten sind die BKI-Baukosten als Bruttopreise dargestellt [[125, S. 8]; [126, S. 9]]. Sind jedoch die statistischen Kostenkennwerte als Nettopreise angeben, so ist momentan eine Umsatzsteuer von 19 % zu addieren [130, § 12 Abs. 1]. Eine beispielhafte Darstellung der BKI-Kostenkennwerte befindet sich in Tabelle 3.2. Die Von- (\triangleright), Mittel- (\emptyset) und Bis-Preise (\triangleleft) beschreiben die Spannweite der Positionspreise. Diese wurden mit einer Standardabweichung ermittelt, die aus einem kompletten Spektrum der Preisbeispiele einen wahrscheinlichen Mittelbereich errechnet. Da Abweichungen nach oben wahrscheinlicher sind als nach unten, wurde die Standardabweichung für die Preise oberhalb des Mittelwertes getrennt von denen die unterhalb sind ermittelt. [127, S. 11] Außerdem werden in der BKI-Datenbank Minimal- (\blacktriangleright) und Maximalpreise (\blacktriangleleft) dokumentiert. Diese stellen die kleinsten und größten auftretenden Preise einer Position dar. [127, S. 43] Die aufgeführten Preise beinhalten den Lohn- und Materialanteil, da das BKI diese beiden Anteile nicht getrennt voneinander aufführt [[127, S. 56]; [131, S. 2]]. Zur Berechnung der Kosten werden in dieser Arbeit die Mittelpreise (\emptyset) verwendet.

Tabelle 3.2: Exemplarische Darstellung der verwendeten statistischen Kostenkennwerte

Bezeichnung	Größe	Nettopreis in €					Quelle
		▶	▷	∅	◁	◀	
Holz-Türelement, T-RS, einflügelig, 0,75 m x 2,00 m / 2,125 m	Stück	-	401	446	500	-	[127, S. 460]
Holz-Türelement, T-RS, einflügelig, 0,875 m x 2,00 m / 2,125 m	Stück	296	430	479	647	875	[127, S. 460]

An manchen Stellen findet sich in der Auflistung der statistischen Kostenkennwerte nur ein Mittelpreis. Dies hat die Ursache, dass die Quellenlage nur einen Preis (Mittelpreis) zur Verfügung stellt. Als Beispiel sei hier die statistische Kostenposition für Brandmeldeanlagen nach DIN 14675 zu nennen [131, S. 6]. Zusätzlich zu den Kostenkennwerten in der Literatur, können auch Erfahrungswerte aus vorherigen Bauvorhaben herangezogen werden. [114, S. 48]

Weiterhin muss beachtet werden, dass statistische Kostenkennwerte und auch die Erfahrungswerte aus vorherigen Bauvorhaben auf einen einheitlichen und möglichst aktuellen Betrachtungszeitpunkt umzurechnen sind. Der Wiederbeschaffungswert stellt den aktuellen und zu berechnenden Wert dar. Dies kann mit der Verwendung von Bauindizes des Statistischen Bundesamtes [132] geschehen [16, S. 335]. Mit der Formel 3.1 kann der Wiederbeschaffungswert für das entsprechende Jahr berechnet werden [[133, S. 30]; [122, S. 19];[134, S. 37]].

$$WBW(t_2) = \frac{BK(t_1) \cdot BI(t_2)}{BI(t_1)} \quad (3.1)$$

Mit:

WBW = Wiederbeschaffungswert

BK = Bauwerkskosten

BI = Baupreisindex

t_1 = Jahr der Gebäudeerstellung

t_2 = Zieljahr

Zur Formel 3.1 sei anzumerken, dass anders als in der Literatur die Bauwerkskosten anstelle der Herstellungskosten [[133, S. 30]; [122, S. 19];[134, S. 37]] verwendet werden. Wie bereits erläutert setzten sich die Herstellungskosten aus den Bauwerkskosten und den Planungskosten zusammen. Der Baupreisindex bezieht sich aller-

dings nur auf die Bauwerkskosten, Planungskosten werden in diesem Index nicht betrachtet [132].

In dieser Arbeit soll eine standardisierte Vorgehensweise zur Berechnung der Bauwerkskosten erstellt werden. Daher findet anschließend eine Erläuterung der wichtigsten Aspekte für die Betrachtung der Bauwerkskosten für brandschutztechnische Maßnahmen statt.

Ermittlung der Bauwerkskosten für Wände mit Brandschutzanforderungen

Für die Ermittlung der Bauwerkskosten für Wände mit Brandschutzanforderungen werden zum einen Teil die Kosten der Wände selbst betrachtet und zum anderen Teil die Kosten der in den Wänden befindlichen Abschlüsse, da diese in einem Zusammenhang stehen. Für Abschlüsse in Wänden seien hier beispielsweise Brandschutzabschottungen, Brandschutzklappen und Kabelkanäle zu nennen. Entscheidend ist, dass nur Wände und ihre Abschlüsse betrachtet werden, die aufgrund von brandschutztechnischen Anforderungen eingebaut werden. Für Wände mit brandschutztechnischen Anforderungen, die aber auch zusätzlich aus nutzungsspezifischen oder architektonischen Gründen eingebaut werden, müssen die Kosten in einer zweistufigen Berechnung ermittelt werden. Zuerst sind, analog zur vorher beschriebenen Vorgehensweise, die Kosten der jeweiligen Wand und des Abschlusses zu berechnen. Im zweiten Schritt sind die jeweiligen Kosten der Wände und der Abschlüsse zu ermitteln, die entstehen, wenn keine brandschutztechnische Anforderung gestellt werden würde. Aus der Subtraktion der Kosten ergibt sich die rein für den Brandschutz aufzuwendende Kostenposition. Wenn Informationen über die statischen Bauteilbeanspruchungen der tragenden und aussteifenden Wände vorliegen, können diese berücksichtigt werden. In dieser Arbeit werden die statischen Bauteilbeanspruchungen aus Komplexitätsgründen nicht betrachtet.

Die Unterscheidung der Wände, die hinsichtlich der Brandschutzanforderungen oder derjenigen die aufgrund von nutzungsspezifischen architektonischen Gründen eingebaut werden ist ebenso komplex, jedoch ist diese Unterscheidung für die Betrachtung der Kosten unverzichtbar.

Ermittlung der Bauwerkskosten für Brandmeldeanlagen

Im Gegensatz zu den Bauwerkskosten der Wände, die sich aufgrund des Erhebungsverfahrens als relativ präzise herausstellen, sind für Brandmeldeanlagen keine statistischen Kostenkennwerte bekannt. Jedoch wären diese bekannt, wäre die Umsetzung mit den Kostenkennwerten nicht ohne weiteres möglich, da die für diese Berechnung zugrunde liegenden Mengenangaben sich erst aus einem objektspezifischen Brandmeldekonzept ergeben würden. Dieses setzt jedoch eine umfangreiche Planungsleistung mit entsprechenden Fachplanungskosten voraus.

Es sind in der Literatur Kostenkennwerte für Brandmeldeanlagen zu finden, jedoch sind diese hinsichtlich ihrer Präzision nicht mit denen des Baukosteninformationszentrums für Positionen zu vergleichen, aber sie ermöglichen eine ungefähre Kostenermittlung. Unter anderem sind solche Ansätze in Schleich [16, S. 335] zu finden. Für Brandmeldeanlagen können Nettopreise dem Brandschutzatlas im Kapitel „Kosten im Brandschutz“ entnommen werden. Dort finden sich weitergehend Preise für Brandmelder, Alarmierungseinrichtungen und Feuerwehrschränke der Klasse 3 einer Brandmeldeanlage nach DIN 14675. [131, S. 3-7] Diese Preise werden pro Stück angegeben. Bei diesen Kostenkennwerten wird davon ausgegangen, dass pro 60 m² ein Brandmelder verwendet werden muss [131, S. 6]. Die Fläche pro Brandmelder kann sich bei einer ungünstigen Deckenflächenaufteilung verkleinern. Eine genaue Angabe auf welcher Grundlage die Bezugsfläche von 60 m² angenommen wird, ist nicht bekannt. Zur Darstellung der statistischen Kostenkennwerte wird überwiegend die „Brutto-Grundfläche“ der DIN 277 verwendet, daher wird davon ausgegangen, dass diese auch für die Betrachtung der Bezugsfläche zugrunde liegt.

Weitergehend findet sich auch eine Kostenangabe für die Infrastruktur („Zentrale, Feuerwehrbedienfeld und Weiterleitung“ [131, S. 6]) einer Brandmeldeanlage nach DIN 14675. Dies ermöglicht eine Kostenabschätzung für eine einfache Brandmeldeanlage, jedoch können mehrere Unterzentralen und etwaige umfangreiche sowie aufwendige Ansteuerungen gebäudetechnischer Anlagen nicht betrachtet werden. [131, S. 6]

Die im Brandschutzatlas angegebenen Preise sind nachweislich der dortigen Bemerkungen unter anderem in Expertengesprächen ermittelt worden und teilweise aus Preistabellen durch die Berechnung mittels den Indizes auf das Jahr 2014 hochgerechnet worden. [131, S. 7] Um einheitliche zeitliche Bezugspunkte in dieser Arbeit zu erhalten, wurden diese Preise mit Hilfe des Baupreisindizes des Statistischen Bun-

desamtes und der angegebenen Formel 3.1 auf das erste Quartal 2018 umgerechnet. Die Ergebnisse befinden sich im Anhang in der Tabelle B.3.

Ermittlung der Bauwerkskosten für Sprinkleranlagen

Ebenso wie für Brandmeldeanlagen sind auch für Sprinkleranlagen keine statistischen Kostenkennwerte bekannt. Daher können, wie bei der Vorgehensweise für die Ermittlung der Bauwerkskosten von Brandmeldeanlagen, die gelisteten Kostenkennwerte für Sprinkleranlagen aus dem Brandschutzatlas genutzt werden. Diese Kostenkennwerte gelten für eine Sprinkleranlage, die entsprechend der VdS CEA 4001 geplant wird. Da keine weiteren bekannt sind, werden diese für diese Arbeit verwendet. Aufgelistet sind Kostenkennwerte für Sprinkler einschließlich der Bauwerkskosten für die zugehörigen Leitungen. Pro 10 m² ist ein Sprinkler erforderlich, es wird, wie bei den Brandmeldeanlagen, davon ausgegangen, dass sich diese Angabe auf die „Brutto-Grundfläche“ bezieht. Außerdem sind Kostenkennwerte für einen Wassertank und für die Infrastruktur („Sprinklerzentrale und Druckwasserbehälter“), die mittels der Anzahl der angeschlossenen Sprinkler unterschieden werden, angegeben. [131, S. 6] Analog zu den Kosten für die Brandmeldeanlage werden auch diese Kosten auf das 1. Quartal 2018 hochgerechnet (Anhang Tabelle B.3).

3.1.2 Ermittlung der Fachplanungskosten brandschutztechnischer Maßnahmen

Zur Ermittlung der Herstellungskosten müssen neben den Bauwerkskosten auch die Fachplanungskosten der Kostengruppe 740 nach DIN 276 [123] berücksichtigt werden. Bei Wänden mit brandschutztechnischen Anforderungen ist davon auszugehen, dass keine Fachplanungskosten heranzuziehen sind. Die Auslegung der Anforderungen richtet sich nach der MBO und somit werden diese bei der grundsätzlichen Planung des Gebäudes betrachtet. Sollte jedoch eine umfangreiche Planung eines Sonderbaus erforderlich sein, welche eine Vielzahl von Abweichungen beinhaltet, kann das AHO-Heft 17 „Leistung im Brandschutz“ [135] zur Abschätzung herangezogen werden. Zur Bewertung eines solchen Gebäudes ist die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) zu unspezifisch [136, S. 97].

Für Brandmeldeanlagen und Sprinkleranlagen erfolgt in dieser Arbeit mittels der HOAI [137] eine Berücksichtigung der Fachplanungskosten. Die HOAI „[...] gilt für Honorare für Ingenieure- und Architektenleistungen, soweit diese durch diese Verordnung erfasst sind.“ [138, § 1] Diese kann zur Berechnung des Honorars einer Honorarvereinbarung zugrunde gelegt werden. [138, § 1]

Die Honorartafeln der HOAI weisen lediglich Orientierungswerte aus, „[...] die an der Art und dem Umfang der Aufgabe sowie an der Leistung ausgerichtet sind.“ [138, § 2a Abs. 1] Für jeden Leistungsbereich enthalten die Honorartafeln Honorarspannen vom Basishonorarsatz bis zum oberen Honorarsatz. Diese sind gegliedert nach den einzelnen Honorarzonen und den zugrundeliegenden Ansätzen für Flächen, den anrechenbaren Kosten oder den Verrechnungseinheiten. [138, § 2a Abs. 1] Die Festlegung des Honorars richtet sich nach der Vereinbarung zwischen dem Auftraggeber und dem Auftragnehmer und muss in Textform erfolgen. Wenn jedoch keine Vereinbarung über die Höhe des Honorars in Textform vorliegt, gilt der jeweilige Basishonorarsatz als vereinbart, der sich nach den Honorargrundlagen § 6 HOAI ergibt. [138, § 7 Abs. 1] Nach der Vereinbarung über den Honorarsatz lassen sich die Grundleistungen für die Technischen Ausrüstungen mittels der Honorartafel bestimmen. Zwischenstufen von anrechenbaren Kosten sind in der Honorartafel durch lineare Interpolation zu ermitteln [138, §13].

Der Europäische Gerichtshof (EuGH) hat am 04.07.2019 eine Verletzung der europarechtlichen Dienstleistung im Binnenmarkt bei der Verwendung der HOAI festgestellt. Die Mindest- und Höchstsätze der HOAI sind laut dem EuGH nicht mit dem EU-Recht vereinbar. Das System von Mindest- und Höchst Honoraren für Leistungen von Architekten und Ingenieuren verhindere neuen Anbietern aus anderen Mitgliedstaaten den Zugang zum deutschen Markt. [139] Eine neue Fassung der HOAI wurde Anfang des Jahres 2021 veröffentlicht. In dieser Arbeit wird Bezug auf die neue HOAI 2021 [138] genommen.

Grundlegend sind für die Honorarberechnung, neben den vertraglich vereinbarten Honorarzonen und den Leistungsphasen, die anrechenbaren Kosten. Diese Kosten „[...] sind Teil der Kosten für die Herstellung, den Umbau, die Modernisierung, Instandhaltung oder Instandsetzung von Objekten sowie für die damit zusammenhängenden Aufwendungen.“ [138, § 4 Abs. 1] Die anrechenbaren Kosten sind nach allgemein anerkannten Regeln der Technik oder nach Verwaltungsvorschriften (Kostenvorschriften) auf Grundlage der ortsüblichen Preise zu berechnen. Hierbei weist die HOAI ausdrücklich auf die DIN 276-1:2008-12 hin, obwohl bereits eine neue Novellierung dieser Norm im Jahr 2018 stattgefunden hat, um die anrechenbaren Kosten zu ermitteln. [138, § 4 Abs. 1] Die Fachplanungskosten können auf Basis der ermittelten Bauwerkskosten für die Honorarberechnung verwendet werden.

Wie zuvor erwähnt sind für die Honorarberechnung auch die Leistungsphasen entscheidend. In dieser Arbeit werden die Fachplanungskosten für Sprinkleranlagen und Brandmeldeanlagen berücksichtigt. Der Abschnitt 2 der HOAI berücksichtigt die-

se unter den Technischen Ausrüstungen in den Punkten eins und fünf. [138, § 53 Abs. 2] Im § 55 der HOAI „Leistungsbild Technische Ausrüstung“ werden neun Leistungsphasen aufgeführt. Diese umfassen die Grundleistungen für Neuanlagen, Wiederaufbauten, Erweiterungsbauten, Umbauten, Modernisierungen, Instandhaltungen und Instandsetzungen. [138, § 55 Abs. 1] Jeder Leistungsphase wird ein Prozentsatz des Honorars zugeordnet. In der nachfolgenden Tabelle 3.3 werden die neun Leistungsphasen mit den entsprechenden Prozentsätzen aufgeführt.

Tabelle 3.3: Leistungsphasen im Leistungsbild Technische Ausrüstung der HOAI [138, § 55 Abs. 1]

Leistungsphase	Bezeichnung	Honorarsatz
1	Grundlagenermittlung	2 %
2	Vorplanung	9 %
3	Entwurfsplanung	17 %
4	Genehmigungsplanung	2 %
5	Ausführungsplanung	22 %
6	Vorbereitung der Vergabe	7 %
7	Mitwirkung bei der Vergabe	5 %
8	Objektüberwachung – Bauüberwachung	35 %
9	Objektbetreuung	1 %

Die Unterscheidung in einzelne Leistungsphasen ermöglicht Auftraggebern auch nur einen Teil einer Gesamtleistung in Auftrag zu geben und abzurechnen. Die Berechnung der Nutzungskosten werden in dieser Arbeit gesondert betrachtet, weshalb die Leistungsphase 9 „Objektbetreuung“ an dieser Stelle entfällt.

Für die Berechnung der Grundleistungen der technischen Anlage nach § 55 HOAI werden drei Honorarzonen unterschieden. Diese Honorartafel enthält Orientierungswerte in Form von Honorarspannen für anrechenbare Kosten. Welche Grundleistungen welcher Honorarzone zugeordnet wird, richtet sich nach folgenden Bewertungskriterien [138, § 56 Abs. 2]:

- Anzahl der Funktionsbereiche
- Integrationsansprüche
- technische Ausgestaltung
- Anforderungen an die Technik
- konstruktive Anforderungen

Um die Honorarzonen zu zuordnen, ist die Objektliste der Anlage 15 Nummer 15.2 der HOAI heranzuziehen [137, § 56 Abs. 4]. Brandmeldeanlagen gehören nach Anlage 15 Nummer 15.2 zur Anlagengruppe 5 „Fernmelde- oder informationstechni-

sche Anlagen“. Da sie eine Objektüberwachungsanlage darstellen, fallen sie in die Honorarzone III [137, S. 116]. Sprinkleranlagen können zur Anlagengruppe 7 „Feuerlöschanlagen, zum Beispiel selbsttätig auslösende Anlagen“ eingegliedert und wie Brandmeldeanlagen der Honorarzone III zugeordnet werden [137, S. 117].

Neben den Honoraren der HOAI kann der Auftragnehmer auch zusätzliche Kosten, die für die Ausführung des Auftrages erforderlich sind, in Rechnung stellen [138, §14 Abs. 1]. Eine Auflistung von Beispielen, die Nebenkosten darstellen können, findet sich in [138, §14 Abs. 2] wieder. In dieser Arbeit wird auf die Abrechnung und Geltendmachung von Nebenkosten verzichtet.

Aus der Addition des Honorars und den Nebenkosten ergibt sich das Netto-Honorar für Fachplaner der Technischen Ausrüstung. Um das Brutto-Honorar zu erhalten, muss derzeit eine Umsatzsteuer von 19 % [130, § 13 Abs. 1] berücksichtigt werden. [138, § 16]

3.2 Abschätzung der Kosten für die Nutzung brandschutztechnischer Maßnahmen

DIN 276 beinhaltet alle Kosten für den Neubau, den Umbau und die Modernisierung von Bauwerken sowie Anlagen. Zur Abschätzung von Kosten für Nutzungen kann die DIN 18960 „Nutzungskosten im Hochbau“ [124] verwendet werden. Die DIN 18960 „gilt für die Nutzungskostenplanung und insbesondere für die Ermittlung und die Gliederung von Nutzungskosten im Hochbau.“ [124, S. 3] Nach dieser Norm sind die Nutzungskosten im Hochbau definiert als „alle in baulichen Anlagen und deren Grundstücken entstehenden regelmäßig wiederkehrenden Kosten von Beginn ihrer Nutzbarkeit bis zu ihrer Beseitigung (Nutzdauer)“. [124, S. 4]

DIN 276 definiert fünf verschiedene Arten zur Nutzungskostenermittlung. Diese unterscheiden sich nach ihrem Zweck, den erforderlichen Grundlagen und dem Detaillierungsgrad. Die Nutzungskostengliederung sieht auch hier drei Ebenen vor, die wieder durch dreistellige Ordnungszahlen und Bezeichnungen gekennzeichnet sind. [124, S. 7] Die erste Ebene der Nutzungskostengliederung unterteilt sich, wie in Tabelle 3.4 dargestellt, in vier Nutzungskostengruppen [124, S. 7]. Eine ausführliche Darstellung der zweiten und dritten Ebene findet sich in [124, S. 8 ff.].

Tabelle 3.4: Auflistung der Nutzungskostengruppen der ersten Gliederungsebene der DIN 18960

Nutzungskostengruppe	Bezeichnung
100	Kapitalkosten
200	Objektmanagementkosten
300	Betriebskosten
400	Instandsetzungskosten

Eine bauteilspezifische Berechnung der Nutzungskosten, wie bei der Berechnung der Bauwerkskosten mit der DIN 276, ist nicht möglich, da statistische Kennwerte die über die dritte Gliederungsebene hinaus gehen nicht bekannt sind. Dieser Ansatz zur Berechnung kann nicht weiter verfolgt werden (vgl. hierzu [121, S. 87 ff.]).

In der Literatur wird die Bedeutung der Lebenszykluskostenrechnung allgemein anerkannt [140, S. 60]. Diese wird als unverzichtbarer Kernindikator zur Beurteilung von ökonomischen Qualitäten nach der internationalen und europäischen Norm zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden aufgelistet. Jedoch gibt es in Deutschland oder auch international keine allgemein anerkannte Grundlage für die Berechnung von Lebenszykluskosten. [140, S. 60] Trotz allem wird nachfolgend ein ausgewähltes Verfahren vorgestellt, mit dem die Instandsetzungs- und Erneuerungskosten getrennt voneinander betrachtet werden können. Als Erstes wird der Nutzungszyklus, der Zeitraum einer Nutzungskostenrechnung, erläutert. Es findet keine Anwendung der Nutzungskostengruppe 100 und 200 statt, da nur brandschutztechnischen Maßnahmen berücksichtigt werden.

3.2.1 Nutzungszyklus

Der Immobilien-Lebenszyklus ist die Bezeichnung für eine zeitliche Abfolge von Prozessen, von der Fertigstellung eines Gebäudes bis hin zu einer Kernsanierung oder zum Abriss. Bedeutend für die Nutzungskostenermittlung ist eine festgelegte Zeitspanne. Die tatsächliche Lebensdauer eines Gebäudes hängt von technischen und ökonomischen Einflüssen ab. Die technische Lebensdauer endet, wenn die Immobilie ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann und dieser Zustand auch nicht durch Reparaturen oder Sanierungen behoben werden kann. [141, S. 212]

Die kürzeste betrachtete Zeitspanne ist die wirtschaftliche Lebensdauer eines Gebäudes. Diese Lebensdauer ist erreicht, wenn das Grundstück durch eine alternative Nutzung unter Berücksichtigung aller anstehenden Kosten eine höhere Rentabilität erwirtschaften kann. Dieser weitergehende Zeitpunkt tritt meistens unbemerkt ein, da nicht fortlaufend alle Alternativen untersucht und verglichen werden können.

Meist wird die Immobilie weiter genutzt, obwohl die wirtschaftliche Lebensdauer bereits überschritten worden ist. Dieser Zeitraum wird daher als tatsächliche Nutzungsdauer bezeichnet. [141, S. 212]

Wenn nach der Beendigung der Nutzung das Gebäude noch stehen bleibt, wird dieser gesamte Zeitraum tatsächliche Lebensdauer genannt. Die Unterscheidungen der verschiedenen Lebensdauern wird in Abbildung 3.1 dargestellt.

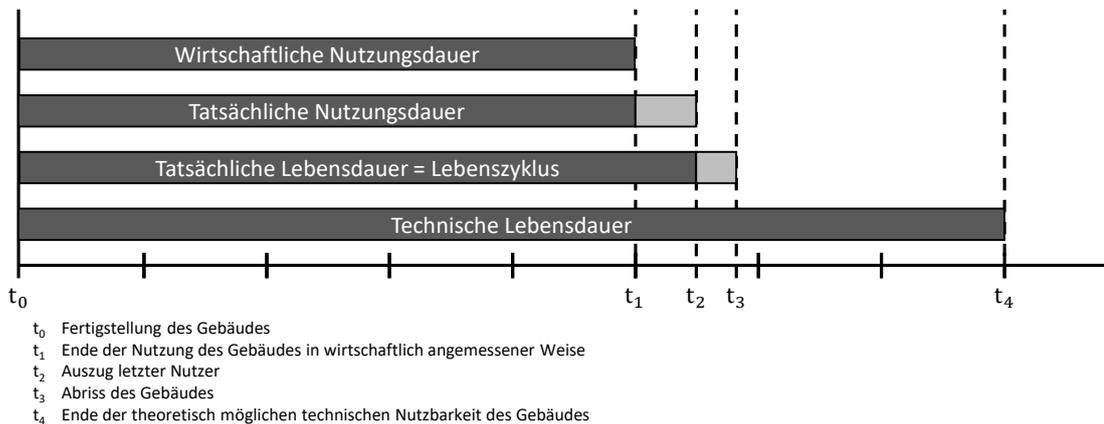


Abbildung 3.1: Lebens- und Nutzungsdauer von Gebäuden [142, S. 28]

Der Begriff Lebensdauer bezieht sich ausschließlich auf das Gebäude selbst und nicht auf dessen jeweilige kurzlebige Art der Nutzung oder dessen jeweiligen Eigentümer [141, S. 213]. Ein Objekt durchläuft unabhängig von der Art der Immobilie über die tatsächliche Lebensdauer einen Immobilienlebenszyklus. Grundsätzlich kann ein Gebäude während seiner Lebensdauer mehrere dieser Immobilienlebenszyklen durchlaufen. Dabei gibt es in der Regel meist zwischen den Zyklen kurze Umnutzungsphasen. Demnach liegt ein Nutzungszyklus immer dann vor, wenn

- „[...] eine Nutzungsänderung unabhängig von evtl. flankierenden baulichen Maßnahmen bzw.
- baulichen Maßnahmen“ [142, S. 30]

vorgenommen wird. [142, S. 29 f.]

Die Nutzungsänderung nach den beschriebenen Kriterien wird als baugenehmigungsrechtliche Nutzungsänderung mit dem Merkmal der notwendigen und hinreichenden Bedingung verstanden. Bauliche Maßnahmen können nur notwendige Bedingungen sein, da nicht alle Maßnahmen ein hinreichendes Kriterium für das Vorliegen eines Nutzungszykluswechsels bilden. Eine hinreichende bauliche Maßnahme für den Wechsel eines Nutzungszyklus liegt nur dann vor, wenn der Wert des Gebäudes

durch eine andere Bestandsmaßnahme (Umbauten und Modernisierungen) erhöht wird. Nicht hinreichende bauliche Maßnahmen sind Maßnahmen, die auf die Erhaltung der Nutzbarkeit und des Wertes eines Gebäudes abzielen und jeweils periodisch oder temporär auftreten können. [142, S. 31 ff.]

Als Betrachtungszeitraum muss ein variabler Modellparameter in Abhängigkeit des Untersuchungszieles ausgewählt werden. Eine Lebenszykluskostenermittlung (engl. „Life Cycle Costs“, kurz „LCC“) nach Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) [143] bzw. nach dem Bewertungssystem des Nachhaltigen Bauens für Bundesgebäude (BNB) [144] würde ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren erforderlich machen [145, S. 6]. Außerdem muss beachtet werden, dass mit wachsendem Betrachtungszeitraum auch die Prognoseunsicherheit einer Berechnung steigt. Bei einem langen Betrachtungszeitraum müssen die Modellparameter und Eingaben fundiert überprüft werden. Zugleich können sehr kurze Betrachtungszeiträume die Instandsetzungskosten, wenn sie als Ersatz nach Ablauf der technischen Lebensdauer angesetzt werden, kaum oder nicht berücksichtigen, da die technische Lebenserwartung wesentlicher Anlagen und Bauteile diese übersteigt. [146, S. 4]

Der Nutzungszyklus wird als geeignetste Zeitspanne für die Betrachtung der Nutzungskosten von brandschutztechnischen Maßnahmen angesehen, da bei einem Nutzungszykluswechsel in jedem Fall eine Neubewertung von brandschutztechnischen Maßnahmen erforderlich und bei einer Vielzahl von werterhöhenden baulichen Maßnahmen anzuraten ist. Der Beginn und das Ende eines Nutzungszyklus ist klar definiert und im Vorhinein abschätzbar. Daher wird er im Rahmen dieser Arbeit als Betrachtungszeitspanne verwendet. Sind keine statistischen Daten für die Nutzungszyklusdauer einer Gebäudeart vorzufinden, dann kann auf eine wirtschaftliche Nutzungsdauer zurückgegriffen werden. Eine Quellenübersicht von Nutzungsdauern findet sich in [142, S. 28].

3.2.2 Abschätzung der Kosten für die Instandhaltung brandschutztechnischer Maßnahmen

Die Europäische Norm DIN EN 13306 dient dem Zweck Definitionen für alle Arten der Instandhaltung und des Instandhaltungsmanagements, unabhängig von der Art des betrachteten Objekts, aufzustellen [147, S. 6]. Sie definiert die Instandhaltung als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der

Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann.“ [147, S. 8] Dieselbe Definition für Instandhaltung findet sich auch in der DIN 31051 wieder. Die Norm verweist an dieser Stelle auf die Begriffe „Verbesserung“ und „Modifikation“. [148, S. 4] „Verbesserung“ soll eine Steigerung der immanenten Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit eines Objekts darstellen [148, S. 6]. Die „Modifikation“ soll die Anpassung einer oder mehrerer Funktionen eines Objekts bewirken [148, S. 10]. Aus beiden Definitionen kann die Annahme entstehen, dass dies einen Nutzungszykluswechsel darstellt, daher werden diese Maßnahmen im Rahmen einer Kostenabschätzung der Instandhaltung nicht berücksichtigt.

Zusätzlich zu den Kosten für die Instandhaltung fallen weitere Kosten für das Betreiben von Anlagen an. Jedoch ist eine Unterscheidung dieser beiden Kosten sehr schwierig oder sogar unmöglich. Daher werden die Kosten für den Betrieb im Rahmen der Wartung und der Instandhaltung berücksichtigt (vgl. hierzu [122, S. 8 f.]). Hieraus ergibt sich, dass die Kosten für die Instandhaltung, Instandsetzung, Wartung und für den Betrieb zusammen unter den Kosten für die Instandhaltung brandschutztechnischer Maßnahmen fallen. Kosten für die Erneuerung von Bauteilen nach ihrer Lebensdauer werden gesondert betrachtet.

Budgetierung von Instandhaltungsmaßnahmen

Grundsätzlich werden zur Ermittlung der für die Instandhaltung notwendigen finanziellen Mittel (Budgetierung von Instandhaltungsmaßnahmen) vier Ansätze unterschieden [133, S. 25]:

- kennzahlenorientierte bzw. historienbasierte Budgetierung
- wertorientierte Budgetierung
- analytische Berechnung des Instandhaltungsbudgets
- Budgetierung durch Zustandsbeschreibung

Die kennzahlenorientierte bzw. historienbasierte Budgetierung bezieht sich auf die Instandsetzungskosten, die im vorherigem Jahr angefallen sind. Demnach lässt sich dieser Ansatz nicht vorausschauend für die Abschätzung von Kosten für die Instandsetzung der nächsten Jahre heranziehen. Daher findet dieser Ansatz im Rahmen dieser Arbeit keine Berücksichtigung. Der Ansatz der wertorientierten Budgetierung orientiert sich an dem Herstellungswert bzw. Wiederbeschaffungs- oder Friedensneubauwert eines Gebäudes. Dabei wird dieser Wert mittels eines Prozentwertes festgelegt. Hiermit können Anhaltspunkte für die Instandhaltungskosten errechnet, jedoch keine exakte Berechnung des kommenden Jahres durchgeführt werden. Aus

diesem Grund wird auch dieser Ansatz nicht weiter verfolgt. Laut Bahr [133, S. 25] wird ein zufriedenstellendes Ergebnis nur mit dem dritten Ansatz erreicht, da Einflüsse wie zum Beispiel das Nutzerverhalten oder die Intensität der Instandhaltung berücksichtigt wird. Der letzte Ansatz ist verbunden mit einem großen Zeitaufwand. Hierbei sollen durch Begehungen der Zustand eines Objektes beschrieben werden. Daher ist der Ansatz für diese Arbeit ungeeignet, da dieser nur auf Basis eines spezifischen Gebäudes angewendet werden kann. In dieser Arbeit soll ein allgemeiner Ansatz entwickelt werden, der sich nicht auf einzelne Gebäude bezieht. Das Instandhaltungsbudget ist in der Praxis bisher sehr grob berechnet worden oder für die Aufstellung einer genauen Kostenanalyse sind detaillierte Kenntnisse über einzelne Bauteile erforderlich. [133, S. 25] Zu beachten ist, dass es sich bei diesen Ansätzen nur um Vereinfachungen handelt, da eine exakte Abbildung aufgrund des Aufwandes und den damit verbundenen Aufwendungen nicht wirtschaftlich ist.

Auswahl und Vorstellung des Verfahrens zur Instandhaltungsbudgetierung

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Ansatz der analytischen Berechnung der Instandhaltungskosten verwendet. Die Bauwerkskosten lassen sich vergleichsweise präzise ermitteln. Daher wird ein Verfahren auf Grundlage der Bauwerkskosten verwendet, da hier keine flächenbezogenen Kennwerte benötigt werden. Es wird zur Berechnung der Nutzungskosten für einen Nutzungszyklus das entwickelte Verfahren vom Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltung (AMEV) verwendet, da zwei der drei Maßnahmen anlagentechnischer Art sind. Das Verfahren wird in der AMEV-Empfehlung Nr. 120 „Ermittlung der Kosten für das Betreiben von technischen Anlagen in öffentlichen Gebäuden“ [122] beschrieben. Das Verfahren gilt grundsätzlich für technische Ausrüstungen von Liegenschaften oder Gebäudeportfolien, die in ihrer Gesamtheit eine Größe von 1000 m² Nettogrundfläche nicht unterschreiten [122, S. 7]. Zu beachten ist, dass Wände mit brandschutztechnischen Anforderungen nicht in den Geltungsbereich dieser Empfehlung fallen. Jedoch wird davon ausgegangen, dass eine größere Unsicherheit bei Verfahren auf Basis von flächenbezogenen Kennzahlen entstehen würde. Außerdem sei anzumerken, dass dieses Verfahren nur für größere Liegenschaften angewendet wird, bei der Anwendung auf ein einzelnes Gebäudes können höhere Streuungen entstehen, die eventuell als problematisch anzusehen sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird trotz allem die Abschätzung der Instandhaltungskosten über die AMEV-Empfehlung berechnet, da davon ausgegangen werden kann, dass auch andere Verfahren Unsicherheiten mit sich bringen.

Das Verfahren der AMEV-Empfehlung wird verwendet, um Instandhaltungskosten für den Betrieb der einzelnen brandschutztechnischen Maßnahme abzuschätzen. In dem Verfahren werden die Kosten für den Betrieb sowie die Instandhaltungskosten berücksichtigt. Hierbei sind die Kosten für die Verbesserung nach DIN 31051 ebenso wie für umfangreiche Instandhaltungsmaßnahmen heranzuziehen. Die Kosten für Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen oder Umbau- und Erweiterungsmaßnahmen sowie Erneuerung von Anlagen, die am Ende der bestimmungsgemäßen Lebensdauer (Ersatzinvestition) anfallen würden, gehören nicht zu den Aufgaben des Betreibers und werden daher nicht berücksichtigt. [122, S. 9] Aufgrund der Übereinstimmung der Definition, welche Kosten zu betrachten sind, zur vorherigen Definition des Nutzungszyklus sind lediglich die Erneuerungsmaßnahmen gesondert zu betrachten (Kapitel 3.2.3).

Um die Instandsetzungskosten zu erhalten, wird der Wiederbeschaffungswert mit einem Jahreskostenfaktor und einem Korrekturfaktor multipliziert. Nachfolgend wird das Verfahren dafür auf brandschutztechnische Maßnahmen angepasst.

Der Ausgangspunkt dieser Ermittlung ist der Wiederbeschaffungswert, welcher im direkten Zusammenhang mit den Instandhaltungskosten steht. Die Berechnung des Wiederbeschaffungswertes wurde bereits im Kapitel 3.1.1 erläutert.

Der Wiederbeschaffungswert ist gleich den Bauwerkskosten zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt und ist als Bruttowert zugrunde zu legen. Zur Abschätzung der Instandhaltungskosten wird dieser mit einem anlagen- oder nutzungsspezifischen Jahresfaktor sowie weiteren Korrekturfaktoren verrechnet. Mit den Jahreskostenfaktoren können die jährlichen Kosten für den Anlagenbetrieb berechnet werden. Die Korrekturfaktoren berücksichtigen bauteil- bzw. gebäudespezifische Belange. Das Verfahren lässt sich anschließend in fünf Teilschritte unterteilen und wird nachfolgend beschrieben.

Ermittlung des Wiederbeschaffungswertes

Im ersten Schritt ist der Wiederbeschaffungswert zu ermitteln. Die Bauwerkskosten der brandschutztechnischen Maßnahmen, die zuvor ermittelt worden sind, können als Wiederbeschaffungswert übernommen werden. Wichtig ist, dass an dieser Stelle die Kosten einschließlich der Umsatzsteuer (Bruttokosten) anzusetzen sind.

Korrektur der Jahresfaktoren

Im zweiten Schritt ist zuerst festzustellen, ob die kostengruppenspezifischen Jahreskostenfaktoren (Tabelle B.4 im Anhang) oder die nutzungsspezifischen Jahreskostenfaktoren (Tabelle B.5 im Anhang) mit einem Faktor korrigiert werden müssen. Bei kostengruppenspezifischen Jahreskostenfaktoren wird die zweite Ebene der Kostengruppe 400 der DIN 276 verwendet. Bei der Verwendung der nutzungsspezifischen Jahreskostenfaktoren wird der gesamte Wiederbeschaffungswert und die Nutzung des Gebäudes benötigt. Vorteil der Verwendung des nutzungsspezifischen Verfahrens ist, dass nicht der Wiederbeschaffungswert differenziert werden muss. Ein Vorteil für das Verfahren mit kostengruppenspezifischen Jahreskostenfaktoren ist die Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Ausprägungen und Ausstattungen im Hinblick auf größere Immobilienportfolien bei gleichbleibender Kalkulationsgüte. [122, S. 17]

Aufgrund der in dieser Arbeit anfallenden Bauwerkskosten für Baukonstruktionen (Kosten­gruppe 300) wird ein nutzungsspezifisches Verfahren gewählt, da kostengruppenspezifische Korrekturfaktoren in der Literatur nicht zu finden sind.

Die Korrektur kann nach Feststellung der Jahreskostenfaktoren vorgenommen werden. Dadurch, dass die Jahreskostenfaktoren statistische Durchschnittswerte sind, können sie in Abhängigkeit von anlagen- bzw. gebäudespezifischen Eigenschaften deutlich variieren. Im Rahmen eines Forschungsprojektes sind drei maßgebliche Einflussgrößen auf Durchschnittswerte identifiziert worden. Diese sind das Anlagenalter, die Nutzungsart des Gebäudes und die Gebäudehöhe. Mit Hilfe der Korrekturfaktoren der Einflussgrößen lassen sich jeweilige Ausprägungen der spezifischen Eigenschaften berücksichtigen und der Jahreskostenfaktor entsprechend anpassen. [122, S. 21]

Die erstgenannte Einflussgröße ist das Alter der gebäudetechnischen Ausrüstung. Um den Jahreskostenfaktor anzupassen muss der Korrekturfaktor für das Anlagenalter $f_{\text{Kor_Alter}}$ berücksichtigt werden. Zu beachten ist, dass dieser Faktor nur für die Instandsetzungsmaßnahmen mit einzubeziehen ist. Für die Betrachtung der Wartung/Inspektion/Bedienung ist dieser nicht zu berücksichtigen. Daher beträgt der Faktor für Wartung/Inspektion/Bedienung 1,0 und hat somit keinen Einfluss auf die Instandhaltungsaufwendungen. In Tabelle 3.5 sind alle Korrekturfaktoren für das entsprechende Alter dargestellt.

Tabelle 3.5: Korrekturfaktoren für das Bauteilalter [122, S. 22]

Altersspanne	Korrekturfaktor Alter ($f_{\text{Kor_Alter}}$)
Alter 0 - 5 Jahre (Instandsetzung)	0,5
Alter 6 - 20 Jahre (Instandsetzung)	1,0
Alter ab 21 Jahre (Instandsetzung)	1,8
Alle Altersklassen (Wartung/ Inspektion/Bedienung)	1,0

Der Korrekturfaktor für die Gebäudenutzungsart ($f_{\text{Kor_Nutz}}$) ermöglicht die Berücksichtigung der kostengruppenspezifischen Einflussfaktoren. Die nutzungsspezifischen Einflussfaktoren berücksichtigt die Gebäudenutzung bereits im jeweiligem Jahreskostenfaktor. Mit diesem Jahreskostenfaktor werden unterschiedliche Einflüsse ein-kalkuliert, welche im Rahmen von empirischen Untersuchungen festgestellt worden sind, sich jedoch nicht eindeutig durch Faktoren abbilden lassen. Der Korrekturfaktor für die Gebäudenutzungsart kann in Tabelle 3.6 entnommen werden.

Tabelle 3.6: Korrekturfaktoren für die Gebäudenutzung [122, S. 22]

Gebäudenutzungsart	Korrekturfaktor Gebäudenutzung ($f_{\text{Kor_Nutz}}$)
Instituts-/Lehrgebäude	0,8
Forschungs-/Laborgebäude	0,9
Kindertagesstätten	0,9
Sportbauten	1,1
Schulgebäude	1,3
Büro-/Verwaltungsbauten (kleinere Bauten ohne Repräsentationsanspruch)	1,3
Feuerwehrgebäude	1,4
Büro-/Verwaltungsbauten (Großbauten mit Repräsentationsanspruch)	1,6
Sonstige Gebäudenutzungen	1,0

Zusätzlich zu den Faktoren für das Gebäudealter und die Gebäudenutzungsart gibt es den Faktor anhand der Gebäudehöhe ($f_{\text{Kor_Höhe}}$). Dieser wird nach der Anzahl der Vollgeschosse unterschieden. Es ist festgestellt worden, dass die instandhaltungsbe-zogenen Aufwendungen in Hochhäusern deutlich über denen der niedrigeren Ge-bäuden (Gebäude die nicht unter der Hochhausrichtlinie erbaut werden) liegen. Ein Hochhaus im Sinne der AMEV-Empfehlung ist ein Gebäude mit einer Höhe von mehr als 21 m oder mehr als acht Vollgeschossen. Dies ist widersprüchlich zu der Definition des Bauordnungsrechtes, wonach die Höhe eines Hochhauses mehr als 22 m beträgt. Da sich die Korrekturfaktoren jedoch an der Anzahl der Vollgeschosse

orientieren, bleibt dieser Widerspruch ohne Folgen. Der Tabelle 3.7 sind die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Gebäudehöhe zu entnehmen.

Tabelle 3.7: Korrekturfaktoren für die Gebäudehöhe [122, S. 23]

Gebäudehöhe	Korrekturfaktor Gebäudehöhe ($f_{\text{Kor_Höhe}}$)
Kein Hochhaus (in der Regel 1 bis 8 Vollgeschosse)	1,0
Hochhaus (in der Regel mehr als 8 Vollgeschosse)	1,7

Zur Berücksichtigung aller erläuterten Korrekturfaktoren müssen die folgenden Formeln 3.2 und 3.3 verwendet werden. Die Ergebnisse liefern einen Korrekturfaktor für die Wartung, Inspektion und Bedienung ($f_{\text{Kor_Jkf_WIB}}$) sowie für die Instandsetzung ($f_{\text{Kor_Jkf_In}}$).

$$f_{\text{Kor_Jkf_WIB}} = f_{\text{Kor_Alter}} \cdot f_{\text{Kor_Nutz}} \cdot f_{\text{Kor_Höhe}} \quad (3.2)$$

$$f_{\text{Kor_Jkf_In}} = f_{\text{Kor_Alter}} \cdot f_{\text{Kor_Nutz}} \cdot f_{\text{Kor_Höhe}} \quad (3.3)$$

Mit:

$f_{\text{Kor_Jkf_WIB}}$	=	Korrekturfaktor des Jahreskostenfaktors für die Wartung, Inspektion und Bedienung
$f_{\text{Kor_Jkf_In}}$	=	Korrekturfaktor des Jahreskostenfaktors für die Instandsetzung
$f_{\text{Kor_Alter}}$	=	Korrekturfaktor für das Bauteilalter
$f_{\text{Kor_Nutz}}$	=	Korrekturfaktor für die Gebäudenutzung
$f_{\text{Kor_Höhe}}$	=	Korrekturfaktor für die Gebäudehöhe

Berechnung der Jahresgesamtkosten für operative Aufgaben

Im dritten Schritt zur Berechnung der Jahresgesamtkosten für operative Aufgaben werden die Instandhaltungskosten anhand folgender Formeln (3.4, 3.5 und 3.6) berechnet.

$$K_{Op_WIB} = \sum WBW \cdot f_1 \cdot f_{\text{Kor_Jkf_WIB}} \quad (3.4)$$

$$K_{Op_In} = \sum WBW \cdot f_2 \cdot f_{\text{Kor_Jkf_In}} \quad (3.5)$$

$$K_{Op_Ih} = K_{Op_WIB} + K_{Op_In} \quad (3.6)$$

Mit:

K_{Op_WIB}	=	Kosten für operative Aufgaben für die Wartung, Inspektion und Bedienung
K_{Op_In}	=	Kosten für operative Aufgaben für die Instandsetzung
K_{Op_Ih}	=	Kosten für operative Aufgaben für die Instandhaltung
WBW	=	Wiederbeschaffungswert
f_1	=	Jahreskostenfaktor für Wartung, Inspektion und Bedienung
f_2	=	Jahreskostenfaktor für die Instandsetzung
$f_{Kor_Jkf_WIB}$	=	Korrekturfaktor des Jahreskostenfaktors für Wartung, Inspektion und Bedienung
$f_{Kor_Jkf_In}$	=	Korrekturfaktor des Jahreskostenfaktors für die Instandsetzung

Abschätzung der administrativen Kosten

Die administrativen Kosten werden in der exemplarischen Anwendung in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da keine Fremdvergabe vorliegt, sollten aber unter anderen Bedingungen mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Zur Ermittlung der administrativen Kosten K_{ad} werden die Jahresgesamtkosten für operative Aufgaben mit dem Kostenfaktor für administrative Aufgaben f_{ad} verrechnet. Dieser Faktor ist vom Fremdvergabeanteil abhängig. Bei einem Fremdvergabeanteil von 0 % ist der Faktor 0,1 und bei einem Fremdvergabeanteil von 100 % beträgt dieser 0,2. Wenn ein Fremdvergabeanteil zwischen diesen beiden Prozentzahlen auftritt, so ist dazwischen zu interpolieren. Sind Betreiberverträge zu beachten, so werden administrative Kosten auf den externen Betreiber verschoben. Ein Restanteil von 0,05 % verbleibt jedoch beim Auftraggeber. Administrative Kosten (K_{ad}) werden unter Anwendung der vorher erläuterten Faktoren mit der Formel 3.7 berechnet:

$$K_{ad} = f_{ad} \cdot K_{Op_In} \quad (3.7)$$

Mit:

K_{ad}	=	Administrative Kosten
f_{ad}	=	Kostenfaktor für die Ermittlung administrativer Kosten
K_{Op_Ih}	=	Kosten für operative Aufgaben für die Instandhaltung

Berechnung der Gesamtkosten

Der letzte Schritt ist die Berechnung der Gesamtkosten der brandschutztechnischen Maßnahmen. Diese erfolgt durch die Addition der operativen mit den administrativen Kosten. Die Gesamtkosten K_{Ih} werden mit der nachfolgenden Formel 3.8 berechnet.

$$K_{Ih} = K_{ad} + K_{Op_Ih} \quad (3.8)$$

Mit:

K_{Ih} = Gesamtkosten für die Instandhaltung

K_{ad} = Administrative Kosten

K_{Op_Ih} = Kosten für operative Aufgaben für die Instandhaltung

Abschätzung der Instandhaltungskosten über einen Nutzungszyklus

Mit Hilfe der vorher beschriebenen Vorgehensweise auf Grundlage der AMEV-Empfehlung Nr. 120 können Instandhaltungskosten für brandschutztechnische Maßnahmen für ein Jahr mit dem Ausgangspunkt des Wiederherstellungswertes abgeschätzt werden, jedoch erfolgt die Berechnung der Instandhaltungskosten über einen vollständigen Nutzungszyklus. Um diesen zu berechnen müssen zwei Methoden miteinander verknüpft werden. Der vorherigen Berechnung liegt im Wesentlichen der Wiederherstellungswert zugrunde. Daher wird dieser mit der Kapitalwertmethode für jedes nachfolgende Jahr des Nutzungszyklus berechnet. Auf dieser Grundlage ist das Verfahren der Instandhaltungsbudgetierung für jedes einzelne Jahr zu berechnen, jedoch unter der Berücksichtigung, dass das Bauteilalter jedes Mal angepasst werden muss. Wichtig ist, dass bei einer Erneuerung während des Nutzungszyklus eines Bauteils auch das Alter des Bauteils angepasst wird. Analog zur Budgetierung von Instandhaltungsmaßnahmen findet auch an dieser Stelle eine Berücksichtigung der Kosten für den Rückbau oder der Erneuerung einer jeweiligen Maßnahme am Ende eines Nutzungszyklus statt (vgl. auch [149, S. 12]).

Kapitalwertmethode

Die Nutzungskostenabschätzung verfolgt das Ziel eine ganzheitliche Betrachtung der entstehenden Kosten über einen Nutzungszyklus zu ermöglichen (vgl. auch [150, S. 55]). Mit Hilfe von verschiedenen Ansätzen der Investitionsrechnung können Kosten abgeschätzt werden [[150, S. 57]; [151, S. 18]]. Es gibt innerhalb der Investitionsrechnung drei Gruppen von Verfahren [152, S. 533 f.], die nachfolgend aufgelistet werden:

- statistische Verfahren
- dynamische Verfahren
- Modellansätze des Operations Research

Statistische Verfahren berücksichtigen keine Unterschiede des zeitlichen Anfalls der jeweiligen Rechnungsgrößen und verzichten somit auf ein Auf- und Abzinsen. In den Berechnungen werden in allen Perioden die gleichen Werte verwendet. Somit liegt lediglich nur eine Periode vor. Die statistischen Verfahren sind in der Praxis leicht zu handhaben und kommen dadurch oft zur Anwendung. Jedoch ist dieses Verfahren für eine Kostenabschätzung für einen Nutzungszyklus ungeeignet, da nicht alle anfallenden Kosten über den Betrachtungszeitraum gleich bleiben. [152, S. 533 f.]

Dynamische Verfahren erfassen zeitlich unterschiedlich anfallende Zahlungsströme während der gesamten Nutzungsdauer. Zur Vergleichbarkeit werden diese auf einen bestimmten Zeitpunkt auf- bzw. abgezinst. Dieses Verfahren eignet sich auf Grund der relativ einfachen Handhabung zur Abschätzung der Nutzungszykluskosten. [152, S. 534 f.]

Die Modellansätze des Operations Research beruhen auf umfassenden Entscheidungsmodellen, die eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen verschiedenen Funktionsbereichen berücksichtigen. Da ein hohes Maß an Abstraktion und theoretischer Ausrichtung verlangt wird, sind sie für konkrete Betrachtungen ungeeignet. Daher wird dieses Verfahren auch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. [152, S. 534 f.]

Zur Abschätzung der Nutzungszykluskosten wird daher ein dynamische Verfahren ausgewählt, jedoch wird in dieser Arbeit nur das Verfahren der Kapitalwertmethode beschrieben und aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darlegung weiterer dynamischen Investitionsrechnungen verzichtet.

Die Kapitalwertmethode gehört zu den dynamischen Verfahren [153, S. 98] und ist laut dem Bundesministerium der Finanzen „[...] immer dann anzuwenden, wenn

- die Einnahmen und Ausgaben zu mehreren unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen,
- die Zahlungsströme bei den betrachteten Alternativen unterschiedlich hoch und
- mehrjährige Betrachtungen vorzunehmen sind.“ [112, S. 15]

Die Kapitalwertmethode ist auf dem Gebiet der Nutzungszyklus- bzw. Lebenszyklusanalyse die am weitesten verbreitete Methode und wird vom Bundesministerium der Finanzen empfohlen, um eine Wirtschaftlichkeitsberechnung und -bewertung durchzuführen [[112, S. 15]; [150, S. 60]; [154, S. 51]; [153, S. 98]].

Bei dieser Methodik werden alle künftigen Ein- und Auszahlungen auf den gleichen Zeitpunkt (in der Regel der Betrachtungspunkt im aktuellen Jahr) abgezinst und somit als Kapitalwert vergleichbar gemacht. Dieser stellt den heutigen Gegenwarts- oder auch Barwert einer Investition dar. Um eine Investition in der Zukunft zu tätigen, müssen zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt finanzielle Mittel in Höhe des Kapitalwertes zurückgelegt werden, um die Investition später tätigen zu können. [[155, S. 706]; [112, S. 15]] Der Kapitalwert wird mit der Formel 3.9 berechnet [150, S.60].

$$KW_0 = \sum_{t=0}^T (E_{t_n} + A_{t_n}) \cdot q^{-t} = \sum_{t=0}^T N_{t_n} \cdot q^{-t} \quad (3.9)$$

Mit:

KW_0	=	Kapitalwert zum Zeitpunkt t_0
E_{t_n}	=	Einzahlungen zum Zeitpunkt t_n
A_{t_n}	=	Auszahlungen zum Zeitpunkt t_n
N_{t_n}	=	$(E_t - A_t) =$ Nettozahlung zum Zeitpunkt t_n
q^{-t}	=	$(1 + i)^{-t} =$ Abzinsungsfaktor zum Zeitpunkt t_n
i	=	Kalkulationszinssatz
t	=	$t_n - t_0 =$ Periode
T	=	Zeitpunkt zu dem letzte Zahlungen anfallen

Alle Einzahlungen sind als positive und alle Auszahlungen als negative Zahlenwerte in dieser Formel berücksichtigt [150, S. 60]. Der Kalkulationszinssatz kann unter Berücksichtigung von zwei Ansätzen ausgewählt werden. Bei einem einheitlichen Kalkulationszinssatz über den Betrachtungszeitraum wird von einem vollkommenen Markt ausgegangen. In diesem können finanzielle Mittel zu jeder Zeit zum gleichen

Zinssatz unbeschränkt aufgenommen oder angelegt werden, dies entspricht jedoch nicht der Realität. Das Bundesministerium der Finanzen gibt jährlich einen nominalen Kalkulationszinssatz (Durchschnittszinssatz) für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen heraus, dieser beträgt 0,6 % [156, S. 3]. [[157, S. 178 ff.]; [150, S. 55]]

Für langfristige Maßnahmen kann anstelle eines einheitlichen Kalkulationszinssatzes auch für gleiche Laufzeiten und Stichtage die Zinsstrukturkurve für börsennotierte Bundeswertpapiere verwendet werden [[114, S. 41]; [156, S. 3 f.]]. Die Deutsche Bundesbank veröffentlicht täglich eine Zinsstrukturkurve unter Berücksichtigung der Laufzeit und Kapitalmarktrendite für die Aufnahme von finanziellen Mitteln [158, S. 82]. [112, S. 7] Da es sich in dieser Arbeit bei der Abschätzung der Nutzungszykluskosten um einen langfristigen Betrachtungszeitraum handelt, findet die Zinsstrukturkurve Anwendung.

3.2.3 Abschätzung der Kosten für die Erneuerungsmaßnahmen brandschutztechnischer Maßnahmen

Im Verfahren der Instandhaltungskostenberechnung werden die Kosten für die Erneuerung von Bauteilen, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, nicht betrachtet. Damit alle wesentlichen Kosten während eines Nutzungszyklus Berücksichtigung finden, sind diese Kosten gesondert zu betrachten. Im ersten Schritt zur Abschätzung dieser Kosten müssen die theoretischen Lebensdauern der Bauteile ermittelt werden. Dafür lassen sich verschiedene Datengrundlagen heranziehen. Jedoch sind Randbedingungen zur Erhebung der Daten nicht angegeben, daher ist eine Überprüfbarkeit dieser Daten ausgeschlossen. Eine Übersicht und ein Vergleich dieser Datengrundlagen findet sich in Kornblum [121, S. 101 f.]. Die Daten, die für diese Arbeit relevant sind, können im Anhang der Tabelle B.6 entnommen werden. Ist aus der Analyse der Lebensdauerdaten hervorgegangen, dass eine Erneuerung der Bau- und Anlagenteile innerhalb des Nutzungszykluses notwendig ist, so müssen die für die Erneuerung anfallenden Bauwerkskosten am Ende der Lebensdauer mittels der Kapitalwertmethode auf den heutigen Betrachtungszeitraum umgerechnet werden, damit die Kosten vergleichbar bleiben. Die Bauwerkskosten aus dem Kapitel 3.1.1 „Ermittlung der Bauwerkskosten brandschutztechnischer Maßnahmen“ lassen sich an dieser Stelle heranziehen.

3.3 Einfluss brandschutztechnischer Maßnahmen auf die Prämienkalkulation der Feuerversicherung

Durch die zuvor beschriebenen Verfahren können soweit alle Kosten, die sich auf brandschutztechnische Maßnahmen beziehen, berechnet werden. Jedoch berücksichtigen diese Verfahren keine im Zusammenhang mit den jeweiligen Maßnahmen stehenden Kosten für das Gesamtgebäude. In der Literatur finden sich viele Hinweise [[159, S. 47]; [160, S. 62]; [25, S. 11]] darauf, dass auch brandschutztechnische Maßnahmen die Prämien der Feuerversicherung beeinflussen. Daher sollten diese bei der Betrachtung der brandschutztechnischen Maßnahmen Berücksichtigung finden.

Um die Prämien der Feuer- und der Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung (FBU) ermitteln zu können, stellt der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) seinen Mitgliedsunternehmen unverbindliche Prämienrichtlinien zur Verfügung. Somit können auch kleinere Unternehmen einen statistischen gesicherten Prämienatz zur Deckung der übernommenen Risiken erheben. Die unverbindlichen Risikoprämienrichtlinien können von den Mitgliedsunternehmen angewendet werden, jedoch müssen sie es nicht. [161, S. 117 f.]

Die „Unverbindlichen Netto-Prämienrichtlinien für die Industrie-Feuer und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung“ (Feuer/FBU) wurden im Jahr 2014 durch die „unverbindlichen Risikoprämientarifes Firmen“ abgelöst. Die erstgenannten sahen eine pauschale Rabattierung von brandschutztechnischen Maßnahmen vor. Es konnte im Gesamten pro Komplex eine maximale Rabattierung von bis zu 85 % vorgenommen werden, jedoch ist diese Empfehlung von dem GDV mit Veröffentlichung des „unverbindlichen Risikoprämientarifes Firmen“ zurückgenommen worden. In den neuen Empfehlungen sind keine Basisrisiken mehr enthalten, da in der neuen Rabattierung die Schadenssätze in Kurven verlaufen und abhängig von der versicherten Position (Gebäude, Inhalt, Ertragsausfall) sowie der Versicherungssumme sind. Daher können die Auswirkung von brandschutztechnischen Maßnahmen nur noch im Einzelfall berechnet werden. Ein einheitliches und strukturiertes Verfahren zur Berechnungen von Risikoprämien existiert somit nicht mehr. Einige Versicherungsunternehmen verwendet hingegen weiterhin das frühere Verfahren, obwohl dies unter Berücksichtigung fehlender statistischer Grundlage nicht zu befürworten ist. [[162]; [159, S. 48 ff.]]

Die Rabattierung der Versicherungsprämie auf Grundlagen brandschutztechnischer Maßnahmen ist von einer Vielzahl von anderen Faktoren abhängig, daher ist eine versicherungsübergreifende Abschätzung nicht realisierbar [163]. Aufgrund dieser Problematiken wird im Rahmen dieser Arbeit die Betrachtung der Feuerversicherung außer Acht gelassen, allerdings sollten diese bei der praktischen Anwendung Berücksichtigung finden.

4 Entwicklung der Kosten- und Nutzwertanalyse

In diesem Kapitel wird das aufgestellte Verfahren der Nutzwertanalyse für brandschutztechnische Maßnahmen vorgestellt. Im ersten Schritt erfolgt die Beschreibung der einzelnen Oberziele mit den jeweiligen Mittel- und Unterzielen. Dabei wird gleichzeitig die Vorgehensweise für die Auswertung erläutert. Darauf folgt die Darstellung, welche der Unterziele auf quantitative und welche auf qualitative Art ausgewertet werden. Anschließend erfolgt eine Verknüpfung des aufgestellten Verfahrens mit der Kostenanalyse.

4.1 Nutzwertanalyse für brandschutztechnische Maßnahmen

Um den Nutzen von brandschutztechnischen Maßnahmen bewerten zu können, kann die Nutzwertanalyse eingesetzt werden. Diese wird auf verschiedene Maßnahmenkonzepte des Brandschutzes angewendet. Wie in Kapitel 2.5 erläutert, muss zu Beginn der Analyse eine Zielhierarchie festgelegt werden, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. In der Zielhierarchie wird in dieser Arbeit als Hauptziel die Einhaltung der brandschutzbezogenen Schutzziele nach § 14 der MBO [24] gewählt. Diese bilden in Deutschland die Grundlage der materiellen Vorschriften des Bauordnungsrechts in Bezug auf den Brandschutz. Daher sollten diese im Vordergrund einer schutzzielorientierten Bewertung stehen. Die vier Schutzziele werden in die zweite Hierarchieebene eingeordnet, den sogenannten Oberzielen und entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet. Das Oberziel „Brandentstehung vorbeugen“ erhält eine Gewichtung von 25 %, da mit diesem Schutzziel die Entstehung eines Brandes verhindert werden soll. Die Maßnahmen zur Erreichung dieses Oberzieles bilden zu Beginn des Verlaufes eines Brandereignisses eine Barriere. Wird eine sehr hohe Zielerfüllung erreicht, so ist festzustellen, dass diese Maßnahmen wirken und darauffolgende Maßnahmen nur als Überschuss anzusehen sind.

Das Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ ist mit 20 % anzunehmen, da dies eine weitere zusätzliche Barriere im Verlauf eines Brandes darstellt. Da

die Sicherheit des Lebens, der Gesundheit und der natürlichen Lebensgrundlage die zentrale Forderung der Musterbauordnung darstellt, erhält das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ die höchste Wertigkeit mit 40 %. Das Schutzziel „Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten“ ist mit 15 % zu gewichten, da hier nicht direkt die Rettung von Menschen und Tieren im Vordergrund steht, sondern dieses Schutzziel dem Ziel der Rettung nur unterstützend dient. Die vier Oberziele sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

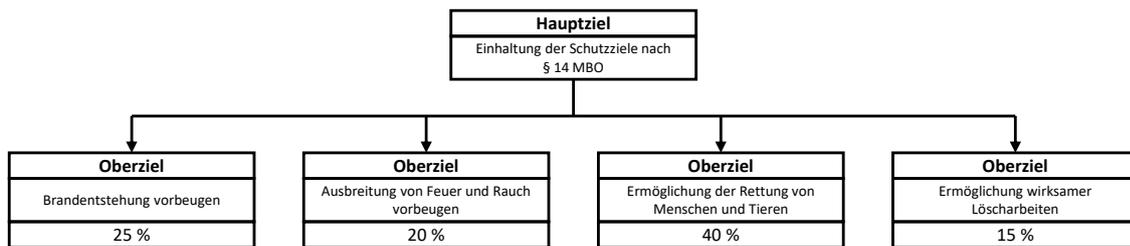


Abbildung 4.1: Darstellung des Hauptzieles mit den zugehörigen Oberzielen für die schutzzielorientierte Nutzwertanalyse

In der dritten Ebene werden jedem Oberziel unterschiedliche Mittelziele zugeordnet. Die vierte Ebene der Hierarchie wird durch die Unterziele abgebildet. Abbildung 4.2 zeigt eine beispielhafte Zielhierarchie mit Ober-, Mittel- und Unterzielen.

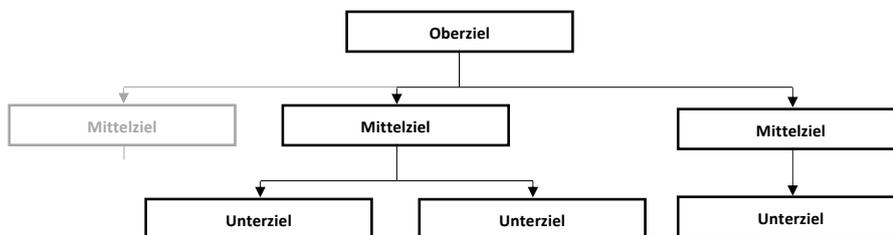


Abbildung 4.2: Darstellung einer beispielhaften Zielhierarchie

Zusätzlich erhalten auch die Mittel- und Unterziele prozentuale Gewichtungen. Um Indikatoren oder Wirksamkeitsmaße festzulegen, besteht die Notwendigkeit den Unterzielen entweder eine quantitative oder eine qualitative Zielbeschreibung zuzuordnen. Die quantitative Zielbeschreibung für die schutzzielorientierte Nutzwertanalyse soll anhand von Grenzwerten festgelegt werden. Die Grenzwerte werden anhand der Zielerfüllung unterteilt und erhalten einen Zielerfüllungsgrad von null bis vier. Bei den Unterzielen, denen kein Grenzwert zugeordnet werden kann, erfolgt die Bewertung anhand von qualitativer Zielbeschreibung.

Diese werden wie folgt beschrieben:

- keine Zielerfüllung (0)
- geringe Zielerfüllung (1)
- mittlere Zielerfüllung (2)
- hohe Zielerfüllung (3)
- sehr hohe Zielerfüllung (4)

Die qualitativen Zielbeschreibungen erhalten ebenso wie die quantitativen Zielbeschreibung einen Zielerfüllungsgrad von null bis vier, sodass die Skalen identisch bleiben. Wobei „keine Zielerfüllung“, analog zu [109, S. 106], der Zielerfüllungsgrad null zugeordnet wird. Abweichend zu [109, S. 106] wird hingegen der letzten Zielerfüllung „sehr hohe Zielerfüllung“ der Zielerfüllungsgrad vier zugeteilt. Um gleich viele negative wie positive Zielerfüllungsgrade zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit zusätzlich eine mittlere Zielerfüllung hinzugefügt. Diese Zielerfüllungsgrade können anschließend zur Berechnung der Teilnutzwerte und des Nutzwertes eingesetzt werden.

Oberziel: Brandentstehung vorbeugen

Dem Oberziel „Brandentstehung vorbeugen“ wird das Mittelziel „Verwendung nicht brennbarer Materialien“ und das darauffolgende Unterziel „Brandverhalten von Materialien“ zugeordnet.

Mittelziel: Verwendung nicht brennbarer Materialien

Die Beurteilung des Mittelzieles wird anhand von qualitativen Zielbeschreibungen festgelegt. Bei diesem Unterziel kann von keiner Zielerfüllung ausgegangen werden, wenn überwiegend brennbare Materialien vorhanden sind. Von einer sehr hohen Erfüllung kann hingegen ausgegangen werden, wenn der größte Anteil aus nicht brennbaren Materialien besteht. Abbildung 4.3 stellt in gekürzter Darstellung das Oberziel „Brandentstehung vorbeugen“ dar, die ausführliche Darstellung befindet sich aus Übersichtsgründen im Anhang in der Abbildung C.1.

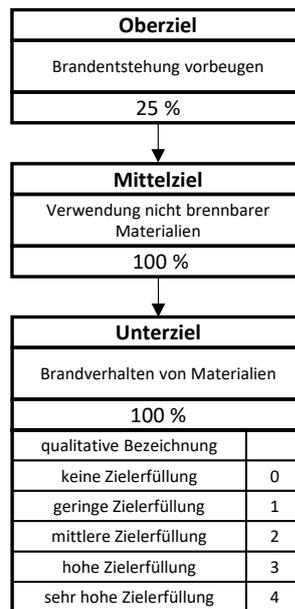


Abbildung 4.3: Darstellung des Oberzieles „Brandentstehung vorbeugen“ mit dem zugehörigem Mittel- und Unterziel

Wenn die Bewertung des Unterzieles auf quantitativer Art stattfinden soll, so könnten als Grenzwerte die Klassifizierungskriterien zum Brandverhalten aus der DIN EN 13501-1 [164] herangezogen werden. Hierbei seien zu nennen:

- gesamte freigesetzte Rauchmenge (engl. „total smoke production“, kurz „TSP“ [165, S. 526])
- Raumentwicklungsrate (engl. „smoke growth rate“, kurz „SMOGRA“ [165, S. 526])
- Brandentwicklungsindex zum Zweck der Klassifizierung (Feuerausbreitungsrate) (engl. „fire growth rate“, kurz „FIGRA“ [165, S. 526])
- Wärmestrom (engl. „heat flux“, kurz „HF“ [164, S. 13])
- kritischer Wärmestrom (engl. „critical heat flux“, kurz „CHF“ [164, S. 14])
- Netto-Verbrennungswärme (franz. „pouvoir calorifique inférieur“, kurz „PCI“ [166, S. 8])
- Brutto-Verbrennungswärme (franz. „pouvoir calorifique supérieur“, kurz „PCS“ [166, S. 8])
- Temperaturanstieg (ΔT) [164, S. 15]
- Massenverlust (Δm) [164, S. 15]
- Dauer einer anhaltenden Entflammung (engl. „duration of flaming“, kurz „ t_f “ [165, S. 526])

- vertikale Flammenausbreitung (engl. „flame spread“, kurz „F_s“ [165, S. 526])
- seitliche Flammenausbreitung (engl. „lateral flame spread“, kurz „LFS“ [165, S. 526])
- Zündtemperatur

Oberziel: Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen

In diesem zugrundeliegendem Konzept werden dem nächsten Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ die folgenden Mittelziele zugeordnet:

- Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum (30 %)
- Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum (30 %)
- Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr (25 %)
- Beschränkung der Großflächigkeit (15 %)

Abbildung 4.4 zeigt eine gekürzte Darstellung des Oberzieles „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“, eine ausführliche Abbildung C.2 ist im Anhang dargestellt.

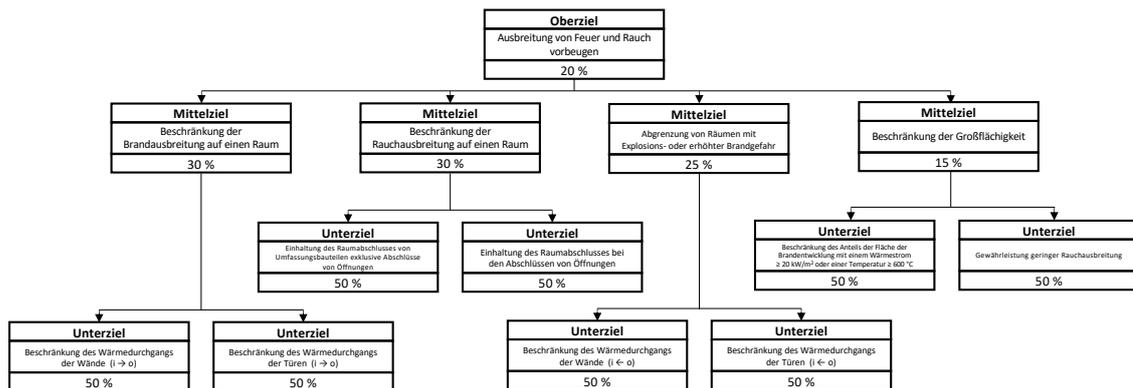


Abbildung 4.4: Darstellung des Oberzieles „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ mit den zugehörigen Mittel- und Unterzielen

Die „Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“ und die „Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum“ sind mit dem gleichen Anteil von 30 % zu gewichten, da sie als gleichwertig angesehen werden können. Auf die „Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr“ entfallen 25 % und auf das Mittelziel „Beschränkung der Großflächigkeit“ 15 %. Dieses Mittelziel gibt innerhalb des Raumes die Beschränkung der Brand- und Rauchausbreitung an. Die Mittelziele lassen sich weiterhin in Unterziele unterteilen.

Mittelziel: Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum

Das Mittelziel „Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“ unterteilt sich in die zwei Unterziele „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i → o)“ und „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i → o)“. Beide Unterziele erhalten eine Gewichtung von 50 %. Die Auswertung erfolgt auf quantitative Art. Das bedeutet, dass die Unterziele anhand von Grenzwerten ausgewertet werden. Die Grenzwertbestimmung der Wände erfolgt nach DIN EN 13501-2 [167]. Dort wird für das Kriterium der Wärmedämmung eine mittlere Temperaturerhöhung auf der vom Feuer abgekehrten Seite von nicht mehr als 140 °C über der mittleren Ausgangstemperatur und eine maximale Temperaturerhöhung (an jeder Stelle) von nicht mehr als 180 °C über der mittleren Ausgangstemperatur angegeben. Die Grenzwerte werden der mittleren Zielerfüllung zugeordnet. Die Grenzwertbereiche der weiteren Zielerfüllungsgrade entstehen durch Festlegung prozentualer Anteile in der Auf- und Abwertung der Zielerfüllung. Abbildung 4.5 zeigt die zugeteilten Grenzwerte mit jeweiligem Zielerfüllungsgrad.

Unterziel	
Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i → o)	
50 %	
Maximaltemperatur / Durchschnittstemperatur	
> 220 °C / > 176 °C	0
> 200 °C bis ≤ 220 °C / > 160 °C bis ≤ 176 °C	1
> 120 °C bis ≤ 200 °C / > 96 °C bis ≤ 160 °C	2
> 80 °C bis ≤ 120 °C / > 64 °C bis ≤ 96 °C	3
≤ 80 °C / ≤ 64 °C	4

Abbildung 4.5: Darstellung des Unterzieles „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i → o)“

Eine sehr hohe Zielerfüllung ist gegeben, wenn der Maximalwert ≤ 80 °C und der Durchschnittswert ≤ 64 °C beträgt. Dem Unterziel wird ein Zielerfüllungsgrad von vier zugeteilt. Die Zahlenwerte ergeben sich daraus, dass von den Grenzwerten ein prozentualer Anteil in Höhe von 40 % der Maximaltemperatur (200 °C) und der Durchschnittstemperatur (160 °C) bestimmt wird. Der Wertebereich (hohe Zielerfüllung) wird zugeordnet, wenn der Maximalwert zwischen 80 °C und 120 °C liegt. Die Obergrenze für die Zielerfüllung von drei ergibt sich durch einen prozentualen Anteil von 60 % des Grenzwertes (200 °C). Die gleiche Vorgehensweise wird bei der Bestimmung des Zielerfüllungsgrades für die Durchschnittstemperatur verwendet. Dieser Zielerfüllung wird ein Zielerfüllungsgrad von drei zugeordnet, wenn

die Durchschnittstemperatur zwischen 64 °C und 96 °C liegt. Die Grenzwerte für die Maximaltemperatur und der Durchschnittstemperatur in der mittleren Zielerfüllung mit dem Zielerfüllungsgrad von zwei werden als obere Grenze gesetzt. So ergeben sich Grenzwertbereiche für die Maximaltemperatur von $> 120\text{ °C}$ bis $\leq 200\text{ °C}$ und für die Durchschnittstemperatur von $> 96\text{ °C}$ bis $\leq 160\text{ °C}$. Um einen Zielerfüllungsgrad von eins zu vergeben, müssen Maximaltemperaturen zwischen $> 200\text{ °C}$ und $\leq 220\text{ °C}$ und Durchschnittstemperaturen zwischen $> 160\text{ °C}$ und $\leq 176\text{ °C}$ vorherrschen. Die Werte stellen 110 % des Grenzwertes dar. Ein Zielerfüllungsgrad von null wird vergeben, wenn die Maximaltemperatur größer als 220 °C und die Durchschnittstemperatur größer als 176 °C ist. Die unteren Grenzen werden aus der vorherigen Zielerfüllung übernommen.

Das Unterziel „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i → o)“ wird durch die Auswahl der Bauteilklassifizierungen ermittelt. Abbildung 4.6 zeigt die Zuordnung der Zielerfüllungsgrade für das Unterziel „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i → o)“.

Unterziel	
Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i → o)	
50 %	
Bauteilklassifizierung	
I ₂ 0	0
I ₂ 30	1
I ₂ 60	2
I ₂ 90	3
>I ₂ 90	4

Abbildung 4.6: Darstellung des Unterzieles „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i → o)“

Der Zielerfüllungsgrad steigt in 30 Minuten-Schritten von keiner Wärmedämmung unter Brandeinwirkung I₂ 0 (Zielerfüllungsgrad 0) bis auf eine Wärmedämmung größer als 90 Minuten (Zielerfüllungsgrad 4).

Mittelziel: Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum

Das Mittelziel „Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum“ unterteilt sich in zwei Unterziele, in die „Einhaltung des Raumabschlusses von Umfassungsbauteilen exklusive Abschlüsse von Öffnungen“ und in die „Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen“. Die Unterziele erhalten die gleiche Gewichtung von jeweils 50 %. Die Grenzwerte für die Bestimmung der „Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum“ werden wie bei dem vorherigen Mittelziel

„Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“ zugeteilt. Bei dem Unterziel „Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen“ wird die Bauteilklassifizierung für den Raumabschluss (E) bewertet. Abbildung 4.7 zeigt die zugeordneten Bauteilklassifizierungen mit jeweiligem Zielerfüllungsgrad.

Unterziel	
Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen	
50 %	
Bauteilklassifizierung	
E 0	0
E 30	1
E 60	2
E 90	3
> E 90	4

Abbildung 4.7: Darstellung des Unterzieles „Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen“

Ein Zielerfüllungsgrad von null wird vergeben für E 0 (kein Raumabschluss), Zielerfüllungsgrad eins für E 30, Zielerfüllungsgrad zwei für E 60, Zielerfüllungsgrad von drei für E 90 und ein Zielerfüllungsgrad von vier für > E 90.

Mittelziel: Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr

Das Mittelziel „Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr“ unterteilt sich wie das erste Mittelziel „Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“ in die Unterziele „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i ← o)“ und „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i ← o)“, jedoch ist hier die Betrachtungsrichtung eine andere. Die Bewertung erfolgt auf dieselbe Weise wie beim Mittelziel „Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“.

Mittelziel: Beschränkung der Großflächigkeit

Das Mittelziel „Beschränkung der Großflächigkeit“ wird in zwei Unterziele „Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20\text{kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600\text{ °C}$ “ und „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“ unterteilt. Die Kriterien zur Auswertung der Brandentwicklung stammen aus einer Veröffentlichung von Waterman [168]. Dort legt Waterman Kriterien fest, ab wann es zu einem Flashover kommen kann. Am Boden des Raumes muss ein Wärmestrom $\geq 20\text{kW/m}^2$ oder an der Decke eine Temperatur $\geq 600\text{ °C}$ vorhanden sein. Diese Kriterien werden in vielen Untersuchungen verwendet [[169]; [170]; [171];

[172]; [173]; [174]]. In der Nutzwertanalyse kann dies anhand von Flächenanteilen ermittelt werden. Abbildung 4.8 zeigt die prozentuale Aufteilung der Flächenanteile mit jeweiligem Zielerfüllungsgrad.

Unterziel	
Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600 \text{ }^\circ\text{C}$	
50 %	
Flächenanteil	
> 80 % bis ≤ 100 %	0
> 60 % bis ≤ 80 %	1
> 40 % bis ≤ 60 %	2
> 20 % bis ≤ 40 %	3
≤ 20 %	4

Abbildung 4.8: Darstellung des Unterzieles „Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600 \text{ }^\circ\text{C}$ “

Der Zielerfüllungsgrad steigt in 20 %-Schritten von unter 20 % (Zielerfüllungsgrad 4) bis auf den Bereich zwischen 80 % und 100 % (Zielerfüllungsgrad 0).

Das zweite Unterziel „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“ (Abb. 4.9) wird mittels eines Bewertungskonzeptes für die Rauchausbreitung bestimmt (Abb. 4.10).

Unterziel	
Gewährleistung geringer Rauchausbreitung	
50 %	
Punktwert Bewertungskonzept Rauchausbreitung	
0	0
1	1
2	2
3	3
4	4

Abbildung 4.9: Darstellung des Unterzieles „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“

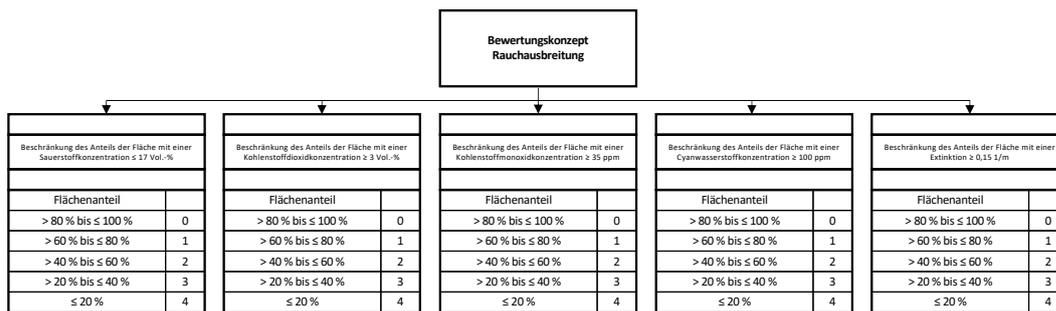


Abbildung 4.10: Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“

Das „Bewertungskonzept Rauchausbreitung“ wird anhand von fünf Bewertungskriterien ausgewertet. Die einzelnen Kriterien werden mittels Flächenanteilen mit einem Grenzwert bestimmt. Die Aufteilung der Flächenanteile ist gleich der Aufteilung des Unterzieles „Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom ≥ 20 kW/m² oder einer Temperatur ≥ 600 °C“. Die prozentuale Aufteilung der Flächenanteile ist in Abbildung 4.10 mit den zugeordneten Zielerfüllungsgraden dargestellt. Alle fünf Bewertungskriterien werden einzeln bewertet, wobei der niedrigste Punktwert den Zielerfüllungsgrad des Unterzieles „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“ vorgibt.

Die ersten vier Kriterien werden anhand von Konzentrationsanteilen für Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Sauerstoff, Cyanwasserstoff bestimmt. Das fünfte Kriterium ist die Extinktion. Alle Grenzwerte stellen die niedrigste Schwelle dar, bei der keine nachteilige Auswirkung auf den Menschen oder eine Gefahr besteht. Nachfolgend sind alle Kriterien mit jeweiligem Grenzwert aufgelistet:

- Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration ≥ 3 Vol.-% [175, S. 14-114]
- Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffmonoxidkonzentration ≥ 35 ppm [176, S. 194]
- Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Sauerstoffkonzentration ≤ 17 Vol.-% [177, S. 1-50]
- Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Cyanwasserstoffkonzentration ≥ 100 ppm [178, S. 2359]
- Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Extinktion $\geq 0,15$ 1/m [178, S. 2198]

Zur Rauchkonzentration sei anzumerken, dass diese in der verwendeten Version von FDS deutlich überschätzt wird [179, S. 14 f.]. Da die Extinktionskoeffizienten (in FDS) linear von der Dichte des Rauchs abhängen, werden diese auch überschätzt. Gottuk et al. zeigen in ihrer Untersuchung, dass die von FDS berechneten Rauchkonzentrationen in der Nähe von Rauchmeldern fünfmal größer waren als die gemessenen Rauchkonzentrationen [180]. Hamins et al. führten Experimente in Brandabschnitten durch, welche für die Validierung verschiedener Brandmodelle von FDS verwendet werden sollten. Dabei fanden sie heraus, dass die Rauchkonzentration von FDS bis zu fünfmal höher waren als die gemessenen Rauchkonzentrationen in den Experimenten. [181] Im FDS Validation Guide werden weitere Experimente (FM Burner Experiments, FM/FPRF Data Center Experiments und NIST/NRC Experiments) zum Vergleich der Rauchkonzentrationen im Experiment mit denen in FDS dargestellt. Diese zeigen wieder, dass die Rauchkonzentrationen überschätzt werden. [179, S. 464 ff.]

Aufgrund dessen wird im „Bewertungskonzept Rauchausbreitung“ zwar der Extinktionskoeffizient mit dargestellt, jedoch in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Für die Analyse der Szenarien wird das Konzept ohne den Extinktionskoeffizienten verwendet.

Oberziel: Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren

Das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ unterteilt sich in die folgenden Mittelziele:

- Zwei voneinander unabhängige Rettungswege (25 %)
- Alarmierung der anwesenden Menschen (20 %)
- Rauchfreiheit der Flure (20 %)
- Rauchfreiheit der Treppenträume (20 %)
- Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO (15 %)

Abbildung 4.11 zeigt das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ in gekürzter Ausführung. Die gesamte Abbildung C.3 findet sich im Anhang wieder.

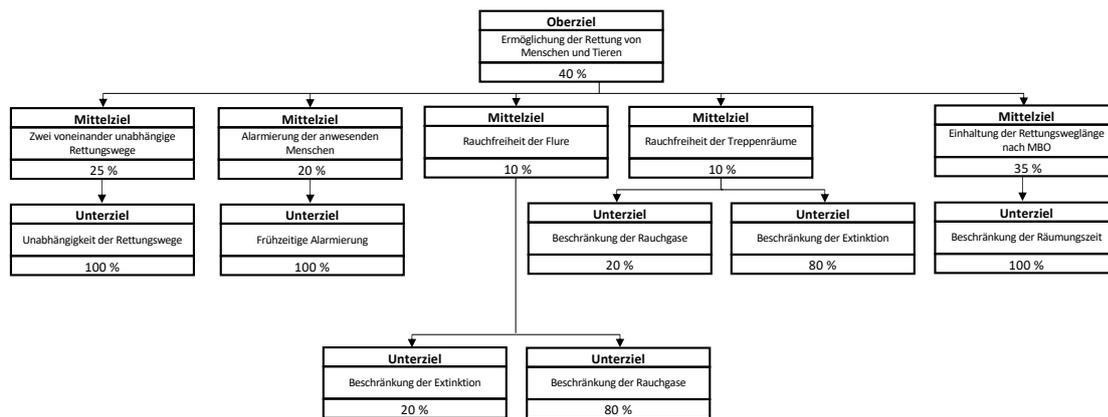


Abbildung 4.11: Darstellung des Oberzieles „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ mit den zugehörigen Mittel- und Unterzielen

Mittelziel: Zwei voneinander unabhängige Rettungswege

Geprüft wird mit dem Mittelziel „Zwei voneinander unabhängige Rettungswege“, ob grundsätzlich zwei voneinander unabhängige bauliche Rettungswege oder ein Sicherheitstreppenraum vorhanden sind oder einer der beiden über die Rettungsgeräte der Feuerwehr verläuft. Grundsätzlich sollte dann überprüft werden, wie viele Personen über die Rettungsgeräte der Feuerwehr in Sicherheit gebracht werden müssen. Für dieses Schutzziel wird eine Bewertung mittels verbal beschriebener qualitativer Zielerträge durchgeführt.

Mittelziel: Alarmierung der anwesenden Menschen

Das Mittelziel „Alarmierung der anwesenden Menschen“ und das darauffolgende Unterziel „Frühzeitige Alarmierung“ wird hier aufgelistet, da es entscheidet ist, wie schnell die Personen aus dem Gebäude flüchten können, da dies von der Alarmierungszeit und -art abhängig ist. Als Beispiel zur Bewertung des Unterzieles werden noch zwei weitere Ziele aufgelistet: „Beschränkung der Zeit des Wirksamwerden erster Maßnahmen (keine Anlagentechnik vorhanden)“ und „Beschränkung der Zeit des Wirksamwerden erster Maßnahmen (Brandmeldeanlage)“. Diese Ziele werden jedoch in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, da sie von weiteren Umgebungsparametern (örtlichen Parametern) abhängen, die nicht verallgemeinert werden können.

Mittelziele: Rauchfreiheit der Flure und Rauchfreiheit der Treppenträume

Den Mittelzielen „Rauchfreiheit der Flure“ und „Rauchfreiheit der Treppenträume“ können die gleichen Unterziele mit entsprechender Gewichtung und Zielerfüllungs-

graden zugeordnet werden. Die Zielerfüllungsgrade ergeben sich aus dem Unterziel „Beschränkung der Rauchgase“ (Abb. 4.12), das mit dem „Bewertungskonzept Rauchgase“ (Abb. 4.13) bestimmt wird und dem Unterziel „Beschränkung der Extinktion“ (Abb. 4.14).

Unterziel	
Beschränkung der Rauchgase	
80 %	
Punktwert Bewertungskonzept Rauchgase	
0	0
1	1
2	2
3	3
4	4

Abbildung 4.12: Darstellung des Unterzieles „Beschränkung der Rauchgase“

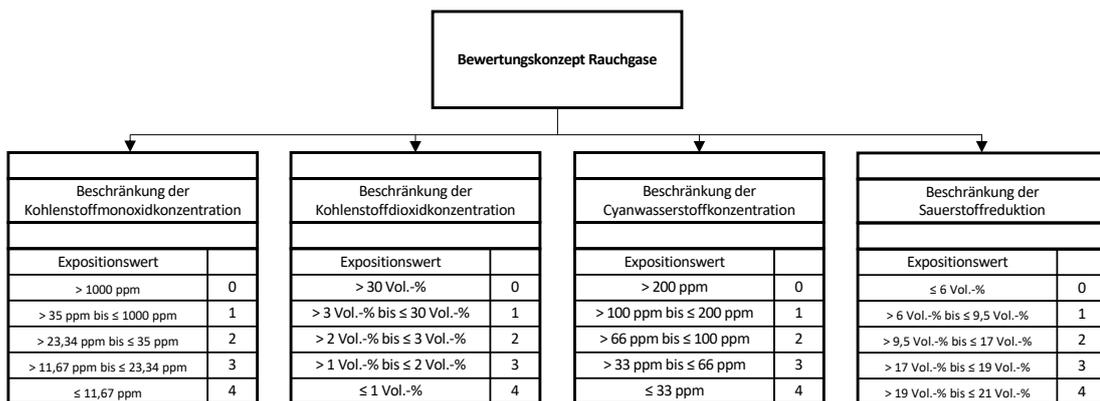


Abbildung 4.13: Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchgase“

Das Unterziel die „Beschränkung der Rauchgase“ erhält eine Gewichtung von 80 %. Die Auswertung erfolgt durch das „Bewertungskonzept Rauchgase“ anhand der Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration, der Cyanwasserstoffkonzentration, der Kohlenstoffmonoxidkonzentration und der Sauerstoffreduktion. Die Grenzwerte für die mittlere Zielerfüllung sind die Gleichen, die in der Auswertung des Oberzieles „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ verwendet werden. Keine Zielerfüllung wird der Grenzwert für die tödliche Rauchgaskonzentration zugeordnet. Die restlichen Anteile entstehen durch dritteln des Grenzwertes.

Das Unterziel „Beschränkung der Extinktion“ bekommt eine Gewichtung von 20 % zugeordnet (siehe Abb. 4.14). Die Aufteilung der Zielerfüllungsgrade gleicht der Aufteilung des „Bewertungskonzept der Rauchgase“.

Unterziel	
Beschränkung der Extinktion	
20 %	
Expositionswert	
> 1 1/m	0
> 0,15 1/m bis ≤ 1 1/m	1
> 0,10 1/m bis ≤ 0,15 1/m	2
> 0,05 1/m bis ≤ 0,10 1/m	3
≤ 0,05 1/m	4

Abbildung 4.14: Darstellung des Unterzieles „Beschränkung der Extinktion“

Die Auswertung für das „Bewertungskonzept Rauchgase“ und für das Unterziel „Beschränkung der Extinktion“ kann durch Bestimmung von Flächenanteilen der jeweiligen Grenzwertbereiche erfolgen. Wenn mehr als 5 % der Fläche des Rettungsweges einem Grenzwertbereich zugeordnet werden können, wird der Zielerfüllungsgrad vergeben. Grundsätzlich wird immer der schlechteste Zielerfüllungsgrad ausgewählt. Für diese Bestimmung wird ein Vertrauensintervall von 95 % angenommen [182, S. 214]. Vertrauensintervalle oder -bereiche dienen zur Bestimmung von statistischen Unsicherheiten, die mit einem Schätzwert auf Basis der Stichprobe verbunden sind und dadurch quantitativ zum Ausdruck gebracht werden. [183, S. 69]

Mittelziel: Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO

Dem Mittelziel „Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO“ unterliegt nur ein Unterziel, die „Beschränkung der Räumungszeit“. Zur Auswertung des Unterzieles kann die ASET/RSET-Methode verwendet werden. Jedoch gibt es immer wieder Kritik an dieser Methode. So werden die Annahmen zur Beurteilung von ASET und RSET sowie auch das Konzept an sich in Frage gestellt. Zum Beispiel kritisiert Babrauskas [184], dass durch das starre binäre Prinzip nicht die größtmögliche Sicherheit ermittelt wird. Wenn beispielsweise für ein Gebäude eine RSET von 100 Sekunden berechnet wird und durch zwei unterschiedliche bauliche Maßnahmen eine ASET von 105 Sekunden und eine von 1000 Sekunden ermittelt wird [184, S. 353], diese sind größer als RSET und somit sind beide Konzepte gleich gut geeignet. Um diese Konzepte nach ihrer Sicherheit zu bewerten, sollen in dieser Arbeit der Sicherheitsfaktor (SF) zur Bewertung herangezogen werden. Dieser berechnet sich durch

das Dividieren von ASET durch RSET. Poon [185] definiert Grenzen für den Sicherheitsfaktor. Dieser sollte typischerweise größer 1 sein, aber nicht größer als 3 und bestenfalls zwischen 1,5 und 2 liegen. [185, S. 175] Diese Grenzen werden in die Nutzwertanalyse übertragen. Die einzelnen Grenzen für den Sicherheitsfaktor mit zugehörigem Zielerfüllungsgrad sind in Abbildung 4.15 dargestellt.

Unterziel	
Beschränkung der Räumungszeit	
100 %	
Sicherheitsfaktor	
≤ 1,0	0
> 1,0 bis ≤ 1,5	1
> 1,5 bis ≤ 2,0	2
> 2,0 bis ≤ 2,5	3
> 2,5	4

Abbildung 4.15: Darstellung des Unterzieles „Beschränkung der Räumungszeit“

Es wird ein Zielerfüllungsgrad von null vergeben wenn $SF \leq 1$. Für die Bestimmung der weiteren Grenzwerte wird der Sicherheitsfaktor in halben Schritten bis zur 3 unterteilt. Zusätzlich sollen die Kriterien nicht nur punktweise im Raum ausgewertet werden, sondern über Flächenanteile. Es wird ein Vertrauensintervall von 95 % angenommen. Daher müssen 5 % der Fläche über dem Grenzwert liegen. Ein ähnlicher Ansatz für die Auswertung findet sich im Artikel von Schröder et. al [186].

Oberziel: Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten

Das Oberziel „Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten“ unterteilt sich in zwei Mittelziele mit jeweils einem Unterziel. Abbildung 4.16 stellt das letzte Oberziel dar, wie auch im Anhang in Abbildung C.4 zu sehen ist.

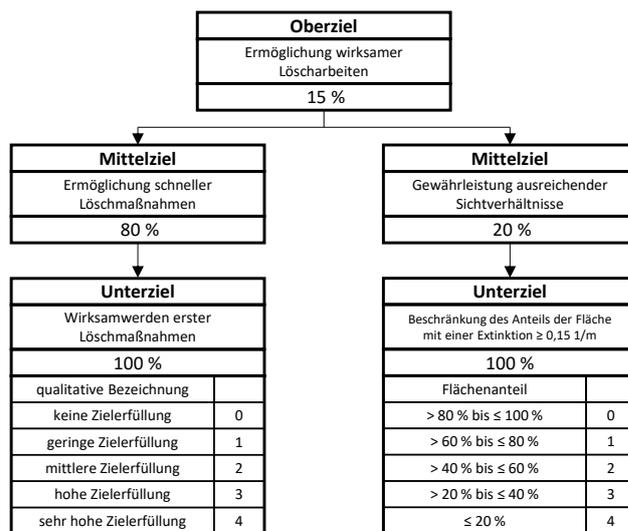


Abbildung 4.16: Darstellung des Oberzieles „Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten“ mit den zugehörigen Mittelzielen und Unterzielen

Mittelziel: Ermöglichung schneller Löscharbeiten

Das Mittelziel „Ermöglichung schneller Löscharbeiten“ mit dem Unterziel „Wirksamwerden erster Löscharbeiten“ erhält eine Gewichtung von 80 %. Das Unterziel „Wirksamwerden erster Löscharbeiten“ wird auf qualitativer Art bewertet, jedoch werden an dieser Stelle drei beispielhafte Ziele für die Auswertung genannt. Die Beschränkung der Zeit des Wirksamwerdens erster Maßnahmen für eine Sprinkleranlage, einer Brandmeldeanlage und keiner Anlagentechnik können dazu überprüft werden. Die Ziele sind mit einer Oder-Verknüpfung verbunden. Diese werden jedoch in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da diese von der örtlichen Umgebung abhängig sind. Je nach Standort können dort andere Möglichkeiten zur Verfügung gestellt werden. Zur Hilfestellung der Bewertung des Unterzieles „Wirksamwerden erster Löscharbeiten“, werden Randbedingungen für die einzelnen Zielerfüllungsgrade genannt. Ein Zielerfüllungsgrad von null kann vergeben werden, wenn keine frühzeitigen Löscharbeiten vorgesehen sind. Ein Zielerfüllungsgrad von eins ist sinnvoll für organisatorische Maßnahmen ohne Aufschaltung zur Feuerwehr und ein Zielerfüllungsgrad von zwei mit Aufschaltung zur Feuerwehr. Weiterhin kann ein Zielerfüllungsgrad von drei für das Vorhandensein einer Löschanlage ohne Brandmeldeanlage und ein Zielerfüllungsgrad von vier für das Vorhandensein einer Löschanlage mit Brandmeldeanlage zugeteilt werden.

Mittelziel: Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse

Das Mittelziel „Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse“ mit dem Unterziel „Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Extinktion $\geq 0,15 \text{ 1/m}^2$ “ [178, S. 2198] erhält eine Gewichtung von 20 %. Die Ermittlung des Unterzieles erfolgt durch Auswertung von Flächenanteilen. Es wird die gesamte Fläche des zu betrachteten Szenarios ausgewertet. Es muss überprüft werden, wie viel Prozent der Fläche über dem ausgewiesenen Grenzwert liegt. Die Zuteilung der Flächenanteile und die Angabe des Grenzwertes erfolgt auf die gleiche Weise wie bei dem „Bewertungskonzept Rauchausbreitung“.

4.2 Verknüpfung der Nutzwertanalyse mit der Kostenanalyse

Ein kontroverser Punkt bei der Auswertung des Kosten-Nutzen-Verhältnis ist die Verrechnung des Nutzwertes mit den entstehenden Kosten. Der „Leitfaden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (WU) bei der Vorbereitung von Hochbaumaßnahmen des Bundes“ untersagt grundsätzlich die Verrechnung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse mit den Kosten. Die Ergebnisse der monetären Untersuchungen der Kosten sollen nur mit den Ergebnissen der nicht monetären bzw. qualitativen Untersuchung gegenübergestellt und nicht verrechnet, lediglich vom Anwender ausgewertet werden. [114, S. 168] Nach einer Stellungnahme des Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (BMI) hat dies zwei Gründe. Zum einen soll nach der Arbeitsanleitung „Einführung Wirtschaftlichkeitsuntersuchung“ zu den Verwaltungsvorschriften (VV) zum § 7 Bundeshaushaltsordnung (BHO) vollständig geprüft werden, ob eine Monetarisierung der qualitativen Analyseergebnisse nicht doch möglich ist. Zum anderen ist nach dem Leitfaden beim Vorliegen nicht monetärer Aspekte die Nutzwertanalyse explizit vorgesehen. Diese Analyse ergibt jedoch nach der Definition ein rein qualitatives Ergebnis, welches explizit nicht mit einem monetären verrechnet werden darf.

Die durch Hanusch [116] beschriebene Möglichkeit zur Verrechnung der beiden Komponenten findet keine Berücksichtigung, eine klare Begründung dafür lässt sich jedoch auch nach Recherchen durch das BMI nicht finden. Das BMI verweist lediglich auf das Bundesministerium der Finanzen (BMF), die zur Beurteilung des Nutzwertes und der Kosten das „Mehraugenprinzip“ angeben. Dies soll die subjektive und leicht angreifbare Wahl des Anwenders minimieren.

In einer Stellungnahme des BMF wird dargestellt, dass bei Entscheidungen zur Aus-

wahl von Projekten, monetäre Verfahren den Schwerpunkt bilden und nicht monetäre Aspekte, die mittels der Nutzwertanalyse ermittelt worden sind, nur als Nebenbetrachtung in die Entscheidung mit eingehen dürfen. Die nicht monetären Ziele dienen oftmals zur Bestimmung des Mindesterreichungsgrades. Würde der bei einer Nebenbetrachtung berechnete Nutzwert einer zuvor mit ungünstigeren Kostenanalyse berechneten Variante deutlich besser ausfallen, durfte dieser Wert keinesfalls die Gesamtbeurteilung maßgeblich beeinflussen, indem ein bloßer Wertevergleich (Aufrechnung der Ergebnisse) erfolgt. Die Gewichtung der monetären Bewertung muss in einem angemessenen Verhältnis zu der Gewichtung der qualitativen Bewertung stehen. Bei einem widersprüchlichen Ergebnis ist ein darauf beruhender Entscheidungsvorschlag ausführlich zu begründen. [187, 188]

Um einen Wert für die Vergleichbarkeit der Konzepte zu erhalten, werden in dieser Arbeit, trotz der Empfehlungen des BMF, die Kosten und der Nutzwert mit einander verrechnet. Im Unterschied zur Stellungnahmen des BMF, die eine qualitative Bewertung vornehmen, wird in dieser Arbeit ein semi-quantitativer Ansatz verfolgt, weshalb der Einfluss der subjektiven Betrachtung in den Hintergrund fällt. Im Gegensatz zu Schleich [16, S. 484 ff.], der den Nutzwert durch die Kosten teilt, werden in dieser Arbeit aufgrund einer einfacheren Interpretation die Kosten durch den Nutzwert dividiert, also das Kosten-Nutzen-Verhältnis berechnet. Dies führt dazu, dass eine Normierung der Kosten auf einen gleichen Nutzen Berücksichtigung findet. Das kleinste Kosten-Nutzen-Verhältnis ist für die Beurteilung maßgebend.

5 Anwendung der Kosten- und Nutzwertanalyse

Um das aufgestellte Verfahren der Kosten- und Nutzwertanalyse zu überprüfen, werden zwei verschiedene Szenarien dargestellt. Damit soll die praktische Eignung überprüft, mögliche Schwachstellen aufgezeigt und auf eventuelle Optimierungen hingewiesen werden. Dabei werden für beide Szenarien drei unterschiedliche Maßnahmenkonzepte aufgestellt und innerhalb eines Szenarios verglichen. Die betrachteten Szenarien sind eine Tiefgarage und eine Etage eines Verwaltungsgebäudes. Im ersten Schritt wird das Szenario der Tiefgarage anhand der erstellten numerischen Brandsimulation mittels FDS beschrieben. Darauf basierend wird eine Erläuterung der drei unterschiedlichen Maßnahmenkonzepte gegeben. Im nächsten Schritt wird die Kosten- und Nutzwertanalyse auf diese Maßnahmenkonzepte angewendet. Das Verwaltungsgebäude wird in der gleichen Verfahrensweise wie die Tiefgarage beschrieben. Anschließend wird die Etage in gekürzter Form der Kosten- und Nutzwertanalyse unterzogen.

5.1 Szenario 1: Tiefgarage

5.1.1 Beschreibung des Szenarios

Das zu betrachtende Szenario ist eine mittelgroße geschlossene Tiefgarage in einem Bürogebäude. Das Szenario beschränkt sich auf eine Tiefgarage mit zwölf Stellplätzen, einem Zugangstor, einer Zugangstür zum Verwaltungsgebäude und acht Luftschächten. Die Tiefgarage ist 15,6 m breit, 16,6 m lang und 3 m hoch. Daraus ergibt sich ein Gesamtvolumen des primären Brandabschnitts von 776,88 m³. An den Längsseiten (parallel zur Abszissenachse) der Garage befinden sich jeweils vier Öffnungen für Lüftungsschächte mit jeweils einer Fläche von 2,38 m² mit einer Breite von 1,4 m und einer Höhe von 1,7 m. Diese Öffnungen befinden sich in einer Höhe von 1,5 m über dem Boden und sind 1,2 m voneinander entfernt. Die Lüftungsschächte, die sich hinter den Öffnungen befinden, haben eine Grundfläche von 0,84 m² mit einer Breite von 1,4 m und einer Tiefe von 0,6 m. Diese be-

sitzen außerdem eine Höhe von 2 m. Das Zugangstor befindet sich zentral auf der Querseite (parallel zur Ordinatenachse) der Tiefgarage und besitzt eine Fläche von $8,36 \text{ m}^2$ (3,8 m breit und 2,2 m hoch). Das Zugangstor wird als vollständig offen angenommen und dient als primäre Luftzufuhr. Es wird davon ausgegangen, dass die gegenüberliegende Zugangstür von einer Breite von 2,6 m und einer Höhe von 2,2 m geschlossen ist.

In der Simulation wird als Brandquelle ein Fahrzeug angenommen. Die Brandfläche ist $2,94 \text{ m}^2$ groß. Diese ist 1,4 m breit und 2,1 m lang. In der Brandsimulation sind zwei Fahrzeuge dargestellt, jedoch ist nur in einem Fahrzeug eine Brandfläche vorhanden. Das zweite Fahrzeug wird simuliert, um die Strömungsbedingungen und Strahlungseffekte mit einem benachbarten Fahrzeug zu berücksichtigen. Abbildung 5.1 zeigt die Geometrie der Brandsimulation dargestellt in Smokeview.

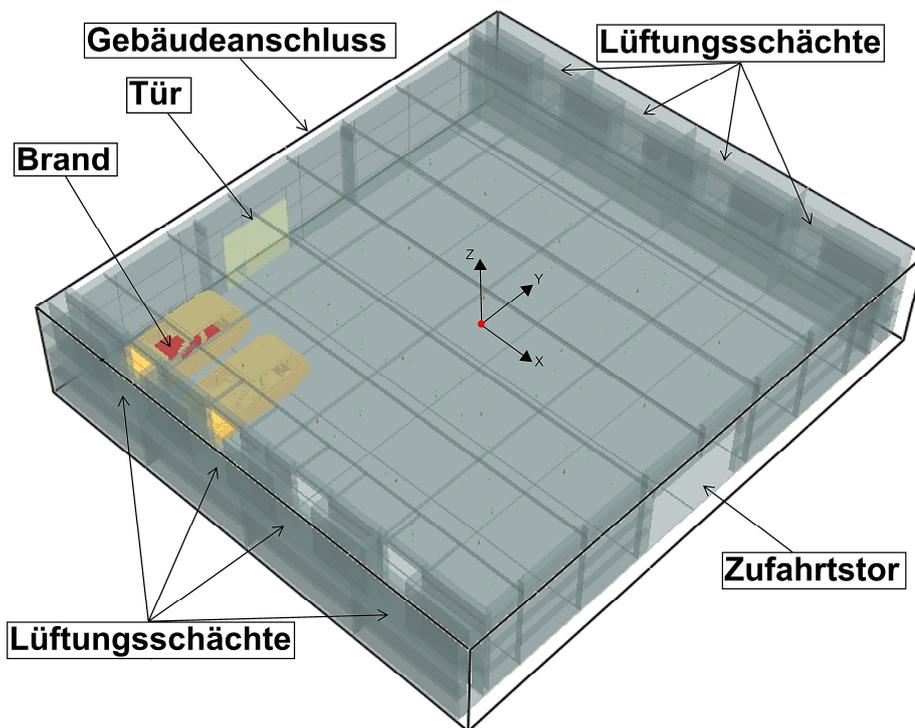


Abbildung 5.1: Darstellung der Tiefgarage mit zwei Fahrzeugen, einem Zufahrtstor, einer Zugangstür und acht Lüftungsschächten in Smokeview

Die Tiefgarage befindet sich in einem Simulationsraum mit einer Breite von 16,4 m, einer Länge von 19,2 m und einer Höhe von 3,6 m (x: -8,4 m bis 8,4 m; y: -9,5 m bis 9,7 m; z: -0,1 m bis 3,5 m). Der Nullpunkt (in Abbildung 5.1 der rote Punkt auf dem Koordinatensystem) des verwendeten Koordinatensystems befindet sich mittig auf der Oberkante der Garagenbodenplatte. Die Kennwerte der Tiefgarage sind in der Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Übersichtstabelle der Kennwerte der Tiefgaragensimulation

Geometrie	Größe
Innenabmessung Tiefgarage	15,6 m · 16,6 m · 3 m (Breite · Länge · Höhe)
Gesamtvolumen der Tiefgarage	776,88 m ³
Abmessungen Öffnungen zum Luftschaft	1,4 m · 1,7 m (Breite · Höhe)
Abmessungen der Luftschächte	1,4 m · 0,6 m (Breite · Tiefe)
Abmessungen des Zugangstors	3,8 m · 2,2 m (Breite · Höhe)
Abmessungen Zugangstür	2,6 m · 2,2 m (Breite · Höhe)
Abmessungen Parkplätze (Randparkplatz)	2,65 m · 5 m (Breite · Länge)
Abmessungen Parkplätze (Innenparkplatz)	2,5 m · 5 m (Breite · Länge)
Maximale HRRPUA	2.823 kW/m ²
Abmessungen der Brandfläche	1,4 m · 2,1 m (Breite · Länge)
Brandfläche	2,94 m ²

Es gibt zahlreiche Untersuchungen von Fahrzeugbränden in der Literatur, wie beispielsweise von [129, 189–196]. Weiterhin gibt es Untersuchungen exemplarisch von [197–200] zur Brandausbreitung mehrerer Fahrzeuge. Außerdem simulieren viele Autoren Fahrzeugbrände, um unterschiedlichste Parameter zu bestimmen, exemplarisch seien zu nennen [199, 201–206].

Für diese Arbeit wird die Wärmefreisetzungscurve von Schleich [129] herangezogen, da diese weitverbreitet ist und eine breite Akzeptanz in der Fachwelt findet [202, 203, 206]. Für ein Fahrzeug wird eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 8,3 MW angesetzt. Abbildung 5.2 zeigt die Brandkurve nach Schleich et al. [129, S. 30]. Die Zeit in Minuten ist gegenüber der Wärmefreisetzungsrate in Megawatt aufgetragen. Zu Beginn steigt die Kurve linear bis zu 1,4 MW an. Danach verläuft diese für 16 Minuten konstant (Schwelbrandphase), bis diese in wenigen Minuten aufgrund des Feuerübersprungs stark auf etwa 8,3 MW zum Vollbrand ansteigt. Nach der Vollbrandphase beginnt die Abkühlphase, die nach 70 Minuten beendet ist. Die maximale Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit (HRRPUA) für die Brandfläche beträgt 2.823 kW/m².

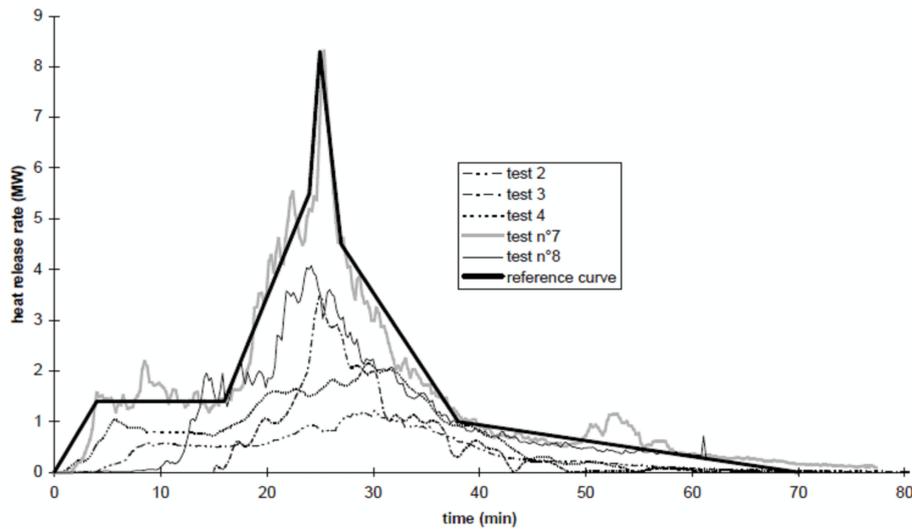


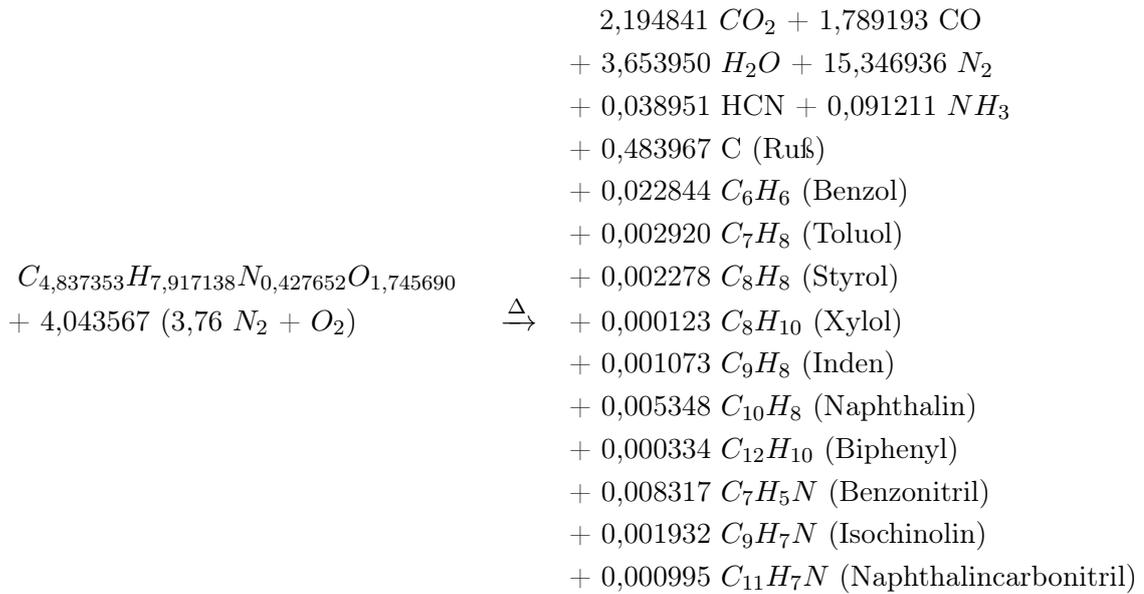
Abbildung 5.2: Wärmefreisetzungskurve für ein Fahrzeug [129, S. 30]

In Tabelle 5.2 sind für jeden Zeitschritt die HRR und der prozentuale Anteil für die Kurve nach Schleich et al. [129] angegeben. Diese Informationen werden für die Berechnung der Brandkurve in FDS herangezogen.

Tabelle 5.2: Wärmefreisetzungsrates für ein Fahrzeug [129]

Zeit [s]	HRR [MW]	Prozentualer Anteil [%]
0	0	0
240	1,4	16,87
960	1,4	16,87
1440	5,5	66,27
1500	8,3	100
1620	4,5	54,22
2280	1	12,05
4200	0	0

Zur Abbildung der chemischen Reaktionen wird eine Reaktionsgleichung für Polyurethan (PUR) verwendet. Diese, auf Literaturangaben [207–210] basierende Gleichung, wird durch Annahmen, Vereinfachungen und experimentellen Daten aufgestellt [211]. Die verwendete Reaktionsgleichung lautet:



Die in der Simulation verwendeten Fahrzeuggeometrien werden mit dem 3D-Grafikprogramm Blender (Version: 2.79) [212] modelliert und mit BlenderFDS (Version: 4.3.0) [213] konvertiert. Die Fahrzeugmodelle geben die Geometrie eines VW Golf wieder. Dieser ist in Deutschland das Fahrzeug in der Kompaktklasse mit den höchsten Neuzulassungszahlen im Jahr 2018 und 2019 [214, 215]. Er hat eine Länge von 4,26 m, eine Breite ohne Spiegel von 1,80 m und eine Höhe von 1,45 m. Beide Fahrzeuge sind mittig auf den jeweiligen Parkplätzen positioniert. Ein Fahrzeug hat eine Brandfläche von 2,94 m², welche auf dem Boden des Innenraums positioniert ist (zusammengefasst in Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Übersicht über die Abmessungen für ein Fahrzeug (Länge, Breite, Höhe) mit zugehöriger Brandfläche

Angaben Fahrzeug	Größe
Länge	4,26 m
Breite ohne Spiegeln	1,80 m
Breite mit Spiegeln	2,02 m
Höhe	1,45 m
Brandfläche im Innenraum des Fahrzeugs	2,94 m ²

Die Gittergröße für den gesamten Simulationsraum beträgt 0,05 m. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von ca. 9 Millionen Zellen für die gesamte Simulation. Für eine Parallelberechnung zur Rechenzeitreduzierung ist der Simulationsraum in 120 Gitter unterteilt.

Zur Auswertung von Gastemperaturen sowie Rauchgaskonzentrationen in der Tiefgarage werden Schnitte in der YZ-Ebene, XZ-Ebene und XY-Ebene eingebaut. In einem Abstand von 1 m werden sie auf der Ordinatenachse sowie auf der Abszissenachse verteilt. Die Schnitte in der Z-Ebene werden ab einer Höhe von 0,5 m alle 0,1 m sowie zusätzlich auf einer Höhe von 1,75 m und 1,85 m berechnet. Neben den Schnitten sind einzelne Messpunkte in der Tiefgarage verteilt, um damit punktweise Gastemperaturen, Rauchgaskonzentrationen und Wärmestrahlungen zu erfassen. Weiterhin werden Messpunkte in der Wand verteilt, um die Wandtemperaturen zu ermitteln.

Allgemeine Anforderungen

Für die Tiefgarage werden drei Konzepte auf Basis unterschiedlicher brandschutztechnischer Maßnahmen entwickelt. Eines dieser Konzepte berücksichtigt die baulichen Anforderungen der MBO (Wände mit Brandschutzanforderungen). Das zweite Konzept basiert auf der Annahme, dass der Überwachungsbereich der Brandmeldeanlage die gesamte Tiefgarage umfasst und eine Aufschaltung zu einer hilfeleistenden Stelle installiert ist. Weiterhin wird bei dem dritten Konzept eine vollflächig wirkende Sprinkleranlage und eine Brandmeldeanlage, die zu einer hilfeleistenden Stelle aufgeschaltet wird, berücksichtigt. Die Simulation wird lediglich auf das Rauminnere begrenzt. Tragende und aussteifende Bauteile (dies schließt die Decke ausdrücklich mit ein) werden aufgrund der Komplexität der Auslegung nicht betrachtet. Außerdem finden bautechnische Anforderungen an die Verbindung unterschiedlicher Bauteile miteinander keine Berücksichtigung. Weiterhin wird angenommen, dass das Gebäude in die Gebäudeklasse 5 eingeordnet wird. Das Gebäude erfüllt somit keinen der festgelegten Sonderbautatbestände der MBO, jedoch fällt es in den Regelungsbereich der Muster-Garagenverordnung [216, § 1 Abs. 8]. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit der Art und Nutzung der Garage eine mit den Sonderbauten der MBO vergleichbare Gefahr verbunden ist. Daher stellt das Gebäude einen Sonderbau im Sinne des § 2 Abs. 4 Nr. 20 dar. Daher muss für eine von den Sonderbauverordnung abweichende brandschutztechnische Maßnahme eine Abweichung auf Grundlage von § 67 der MBO erfolgen (Abweichung). Für von den Anforderungen der MBO abweichende Lösungen genügt eine Erleichterung auf Basis von § 51 der MBO (vergleiche hierzu Kapitel 2.1 „Bauordnungsrecht“).

In der Kostenrechnung wird die Elektro- und EDV-Versorgung getrennt voneinander berücksichtigt. Eine EDV-Anbindung erfolgt für das Konzept „Brandmeldeanlage“ und „Sprinkleranlage“. Weiterhin ist für das Konzept „Sprinkleranlage“ ein Rohrschott für die Wasserversorgung vorgesehen.

Die Tiefgarage grenzt an einen Raum mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr, jedoch nicht an einen Treppenraum, weshalb das Mittelziel „Rauchfreiheit der Treppenträume“ in der Bewertung keine Berücksichtigung findet. Aufgrund dessen muss die Nutzwertanalyse angepasst werden und die anderen Mittelziele erhalten eine prozentuale Neuverteilung.

Wände mit Brandschutzanforderungen

Die Tiefgarage fällt in den Geltungsbereich der Muster-Garagenverordnung. Daher muss diese mit einer feuerbeständigen Wand und einer Sicherheitsschleuse vom angrenzenden Gebäude abgetrennt werden. Die Wand zwischen der Tiefgarage und dem angrenzenden Gebäude wird als feuerbeständige Stahlbetonwand (EI 90) ausgebildet. Nach DIN EN 1992-1-2 (Tabelle 5.3) besitzt eine Wand aus Stahlbeton mit der Klassifizierung EI 90 eine Mindestdicke von 0,1 m [64, S. 50]. Für Stahlbeton wird eine Wärmeleitfähigkeit von $2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, eine Dichte von $2.300 \text{ kg}/\text{m}^3$ und eine Wärmekapazität von $1,00 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ angenommen [217, S. 15].

Brandmeldeanlage

Aufgrund der Verwendung einer Brandmeldeanlage können Anforderungen im Gebäude, die sich auf den Rauchabschluss beziehen, gesenkt werden, da davon ausgegangen wird, dass die Personen schon vor dem Wirksamwerden des Rauchabschlusses das Gebäude verlassen haben. Grundsätzlich kann der Feuerwiderstand von Bauteilen gesenkt werden, da durch eine frühzeitigere Alarmierung der Feuerwehr die Zeit bis zu den ersten wirksamen Löschmaßnahmen herabgesetzt wird. Die Wand zwischen der Tiefgarage und dem angrenzenden Gebäude wird als hochfeuerhemmende Stahlbetonwand (EI 60) ausgebildet. Nach DIN EN 1992-1-2 (Tabelle 5.3) [64, S. 50] besitzt eine Wand aus Stahlbeton mit der Klassifizierung EI 60 eine Mindestdicke von 0,08 m. Die Kennzahlen für die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und die Dichte verändern sich in der Simulation nicht gegenüber dem Konzept mit „Wänden mit Brandschutzanforderungen“. Weiterhin wird eine Sicherheitsschleuse zwischen der Garage und dem angrenzenden Gebäude als nicht notwendig erachtet, da durch eine frühzeitige Alarmierung der Personen im Gebäude der rauchabschließenden Funktion der Sicherheitsschleuse eine niedrigere Bedeutung zugemessen werden kann, vergleiche hierzu auch den Artikel von Dietrich [218].

In der Tiefgarage werden, auf Grundlage der DIN VDE 0833-2 [219, Tabelle 2, Bild 3, Bild 4 und Tabelle C.1] und der DIN EN 54-5 [220], 16 Wärmemelder installiert.

Sprinkleranlage

Das Maßnahmenkonzept auf Basis der Sprinkleranlage beinhaltet eine Sprinkleranlage, die beim Auslösen auch die Aufschaltung zur Feuerwehr betätigt. Bei diesem Konzept kann ebenso wie bei dem Konzept „Brandmeldeanlage“ die Anforderungen an dem Feuerwiderstand von Bauteilen herabgesetzt werden. Das Konzept „Sprinkleranlage“ enthält die gleichen Anforderungen an die Wand zwischen der Tiefgarage und dem angrenzenden Gebäude wie das Konzept „Brandmeldeanlage“.

Bei der Auslegung der Sprinkleranlage wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Nassanlage für die Brandgefahrenklasse von OH 2 handelt. Außerdem wird eine versetzte Anordnung der Sprinkler gewählt. Nach DIN EN 12845 [52] besitzt eine Nassanlage für die Brandgefahrenklasse OH eine maximale Schutzfläche je Sprinkler von 12 m^2 . Dabei ist zu beachten, dass der maximale Abstand zwischen Sprinkler und Wand für eine versetzte Anordnung $2,3 \text{ m}$ beträgt und der Abstand zwischen den Sprinklern untereinander nicht kleiner als 2 m sein darf. [52, S. 77 ff.] Daher werden für den Sprinklerschutz der Tiefgarage insgesamt 22 Sprinkler benötigt. Daraus ergibt sich die in Abbildung 5.3 dargestellte Verteilung der Sprinkler.

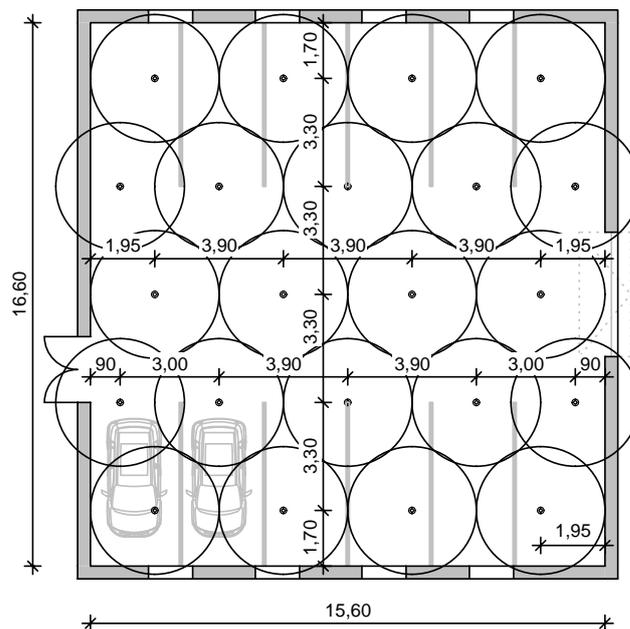


Abbildung 5.3: Anordnung der Sprinkler in der Tiefgarage

Zur Simulation der Sprinkleranlage wird die Wärmefreisetzungskurve zur Darstellung einer Brandkontrolle herabgesetzt. Dafür werden Simulationen durchgeführt, um die Aktivierungszeiten der Sprinkler zu erhalten. Dabei wird eine Aktivierungstemperatur der Sprinkler von 74 °C [52, S. 109], ein Wärmeleitfaktor (C-Faktor) von

0,7 (m/s)^{1/2} [221, S. 25] und ein Response Time Index (RTI) von 100 (m·s)^{1/2} [[222, S. 15]; [75, S. 228]] angenommen. Bei 95 % der gemeldeten Bränden in Deutschland, bei denen eine Sprinkleranlage installiert gewesen ist, lösen nach Frank et al. fünf Sprinkler aus [223, S. 14]. Daher wird bei dieser Simulation nach dem Auslösen des fünften Sprinklers die Wärmefreisetzungskurve konstant gehalten. Dies wird als Brandkontrolle bezeichnet [48, S. 213]. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass nach 226,1 Sekunden der fünfte Sprinkler auslöst. Die daraus entstehende herabgesetzte Wärmefreisetzungskurve (rote Kurve (HRR SA)) wird in Abbildung 5.4 dargestellt. Die blaue Kurve stellt die HRR für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (HRR WB) und für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (HRR BMA) dar.

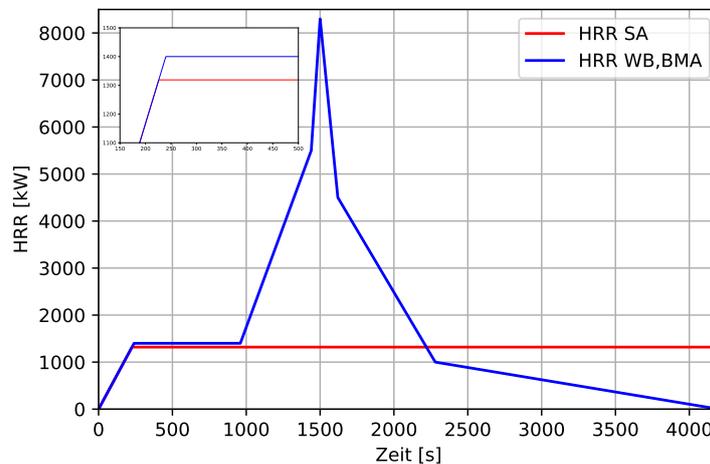


Abbildung 5.4: Wärmefreisetzungskurve für die Tiefgarage für das Konzept „Sprinkleranlage“ (HRR SA) im Vergleich zu den Konzepten „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (HRR WB) und „Brandmeldeanlage“ (HRR BMA)

5.1.2 Beurteilung der Maßnahmenkonzepte

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Auswertung der Simulation mittels der Kosten- und Nutzwertanalyse für das Szenario der Tiefgarage. Für das Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderung“ wird es eine ausführliche Beurteilung geben. Dort werden alle einzelnen Schritte detailliert erläutert. In der Nutzwertanalyse wird jedes einzelne Unterziel betrachtet und ausgewertet. Die Auswertung der zu ermittelnden Parameter, um diese nachfolgend zu einen Zielerfüllungsgrad zuzuordnen, wird ausführlich beschrieben. Die zwei weiteren Maßnahmenkonzepte werden in jedem Unterziel kurz dargestellt und beurteilt.

Bei der Auswertung des Konzeptes „Brandmeldeanlage“ wird nicht die gesamte Simulationszeit betrachtet, sondern ein kürzerer Zeitraum. Vorteil des Konzeptes soll

sein, dass die Feuerwehr durch die Alarmierung der Brandmeldeanlage schneller eintrifft. Aufgrund dessen wird eine Zeit bestimmt, bis zu der die Simulation ausgewertet wird. Diese Zeit umfasst das Auslösen des Wärmemelders, die Gesprächs- und Dispositionszeit, die Ausrücke- und Anfahrtszeit und die Erkundungs- und Entwicklungszeit. Diese einzelnen Zeiten werden zu einer Gesamtzeit aufaddiert. Tabelle 5.4 stellt die einzelnen Zeiten mit der jeweiligen Quelle dar.

Tabelle 5.4: Übersicht der Zeitabschnitte mit jeweiligen Sekunden für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Zeitabschnitt	Zeit [s]	Quelle
Auslösen des ersten Wärmemelders	117,5	Simulation
Dispositionszeit	90,0	in Anlehnung an [224, S. 3]
Ausrücke- und Anfahrtszeit	480,0	[224, S. 3]
Erkundungs- und Entwicklungszeit	782,4	[225, S. 73]
Gesamtzeit	1469,9	

Vorteil von dem Konzept „Sprinkleranlage“ ist die zusätzlich installierte Brandmeldeanlage, die beim Auslösen des ersten Sprinklers die Alarmierung zur hilfeleistenden Stelle auslöst. Daher wird auch für dieses Konzept eine neue Zeitspanne zur Auswertung bestimmt. Eine Darstellung der berechneten Zeitspanne findet sich in Tabelle 5.5 wieder.

Tabelle 5.5: Übersicht der Zeitabschnitte mit jeweiligen Sekunden für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Zeitabschnitt	Zeit [s]	Quelle
Auslösen des ersten Sprinklers	178,0	Simulation
Dispositionszeit	90,0	in Anlehnung an [224, S. 3]
Ausrücke- und Anfahrtszeit	480,0	[224, S. 3]
Erkundungs- und Entwicklungszeit	782,4	[225, S. 73]
Gesamtzeit	1530,4	

5.1.2.1 Nutzwertanalyse der Maßnahmenkonzepte

Anhand der Unterziele werden in diesem Kapitel die einzelnen Zielerfüllungsgrade ermittelt. Eine Beschreibung der Ermittlung der einzelnen Parameter zu jedem Unterziel wird gegeben. Anschließend werden alle Zielerfüllungsgrade addiert und ein gesamter Nutzwert für jedes Maßnahmenkonzept ermittelt.

Mittelziel: Verwendung nicht brennbarer Materialien

Abbildung 5.5 stellt das Mittelziel „Verwendung nicht brennbarer Materialien“ mit zugehörigem Unterziel „Brandverhalten von Materialien“ dar. Beide Ziele erhalten einen prozentualen Anteil von 100 %, da jeweils nur eins vorhanden ist. Das Unterziel wird qualitativ zur Bestimmung des Zielerfüllungsgrades ausgewertet.

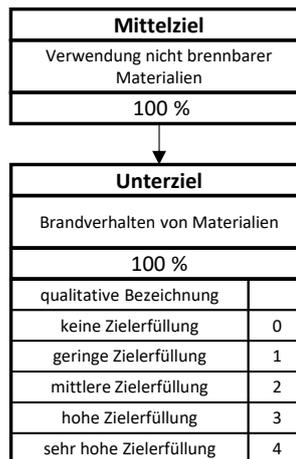


Abbildung 5.5: Darstellung des Mittelzieles „Verwendung nicht brennbarer Materialien“ mit Unterziel

Unterziel: Brandverhalten von Materialien

In der Tiefgarage werden in baulicherseits keiner der drei Maßnahmenkonzepte brennbare Materialien verwendet. Daher ergeben sich für alle drei Konzepte eine sehr hohe Zielerfüllung (Zielerfüllungsgrad: 4) für die qualitative Auswertung des Unterzieles.

Mittelziel: Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum

Das Mittelziel „Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“ unterteilt sich in zwei Unterziele (Abbildung 5.6). Einerseits in die „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände ($i \rightarrow o$)“ und andererseits in „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen ($i \rightarrow o$)“. Beide Unterziele erhalten einen prozentualen Anteil von 50 % und werden auf qualitativer Art mittels Kennwerten ausgewertet.

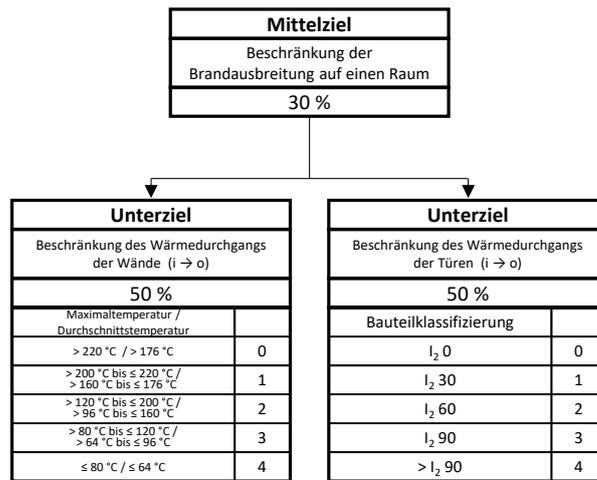


Abbildung 5.6: Darstellung des Mittelzieles „Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“ mit jeweiligen Unterzielen

Unterziel: Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i → o)

Das Kriterium des Wärmedurchgangs wird für das Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ auf Basis von Simulationen quantitativ ausgewertet. In der Simulation werden Temperaturen an der Wand zwischen der Tiefgarage und dem angrenzenden Gebäudeteil gemessen. Zuerst wird das Kriterium der Maximaltemperatur ermittelt. Dafür wird auf der brandabgewandten Seite die Position, unter den verschiedenen Messstellen, herausgesucht, die den maximalen Wert angibt. Abbildung 5.7 zeigt die maximale Temperatur auf der brandabgewandten Seite über die Zeit.

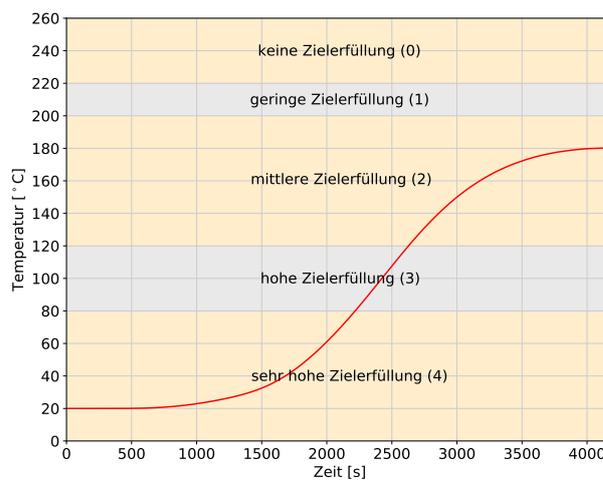


Abbildung 5.7: Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)

Nach der Betrachtung der Maximaltemperatur erfolgt die Bewertung der Durchschnittstemperatur. Dabei wird ein Mittelwert aus fünf Temperaturwerten auf der brandabgewandten Seite berechnet. Abbildung 5.8 zeigt den Verlauf der Durchschnittstemperatur, auf der Abszissenachse ist die Zeit und auf der Ordinatenachse die Temperatur abgetragen.

Es tritt eine Maximaltemperatur von 180,31 °C und eine Durchschnittstemperatur von 69,07 °C auf, somit ergibt sich eine mittlere Zielerfüllung.

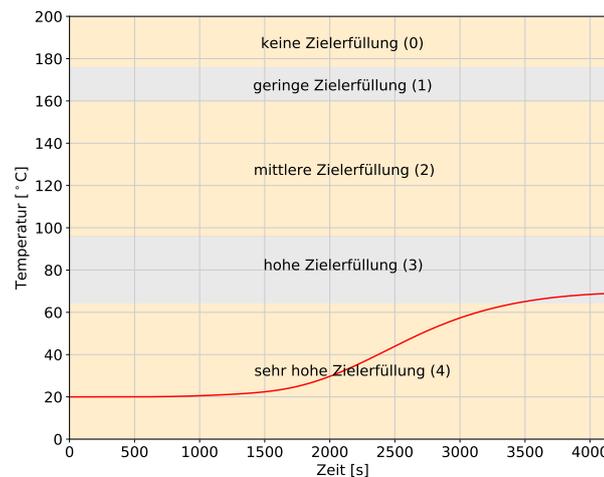


Abbildung 5.8: Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)

Für das Maßnahmenkonzept „Brandmeldeanlage“ beträgt die Maximaltemperatur 49,94 °C (Abb. D.1) und die Durchschnittstemperatur 36,37 °C (Abb. D.2), daraus resultiert eine sehr hohe Zielerfüllung. Für das Konzept „Sprinkleranlage“ ergibt sich aufgrund der Maximaltemperatur von 80,19 °C (Abb. D.13) und der Durchschnittstemperatur von 36,16 °C (Abb. D.14) eine hohe Zielerfüllung.

Unterziel: Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen ($i \rightarrow o$)

In allen drei Maßnahmenkonzepten wird eine EI₂ 30-S₂₀₀C5 Tür zum angrenzenden Gebäudeteil ausgewählt. Daraus resultiert eine geringe Zielerfüllung für alle Konzepte.

Mittelziel: Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum

In Abbildung 5.9 wird die Unterteilung des Mittelzieles „Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum“ dargestellt. Beide Unterziele werden gleichermaßen mit 50 % gewichtet. Die Auswertung erfolgt mittels Simulation und die Kriterien werden quantitativ ausgewertet.

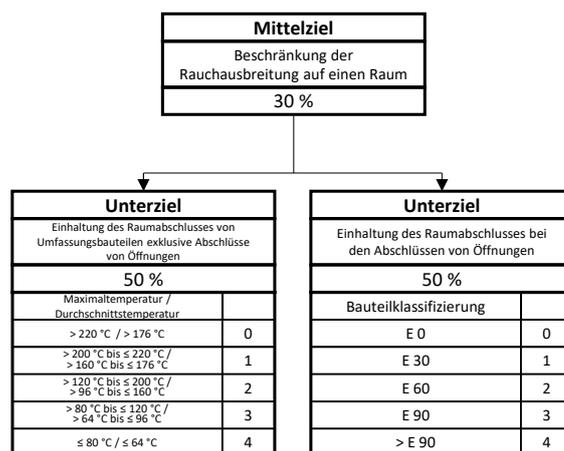


Abbildung 5.9: Darstellung des Mittelzieles „Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum“ mit jeweiligen Unterzielen

Unterziel: Einhaltung des Raumabschlusses von Umfassungsbauteilen exklusive Abschlüsse von Öffnungen

Dieses Unterziel wird durch das Kriterium des Raumabschlusses überprüft. Dieses Kriterium wird nach der DIN 4102-2 [226] mit Hilfe eines Wattebauschtest durchgeführt. Dabei wird ein Wattebausch auf der brandabgekehrten Seite in einer bestimmten Entfernung an den Prüfkörper gehalten. Der Raumabschluss gilt als nicht gewährleistet, wenn der Wattebausch sich entzündet, entflammt oder glimmt. [226, S. 6] Jedoch kann dieser Test nicht vollständig mit Hilfe von Simulationen durchgeführt werden. Daher wird auch hier die Bewertung des Wärmedurchgangs qualitativ ausgeführt. Es ist davon auszugehen, dass bei einem hohen Wärmedurchgang auch kein Raumabschluss mehr gegeben ist. Dieses Unterziel wird auf die gleiche Weise ausgewertet wie das Unterziel „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände“, daher kann auch hier eine mittlere Zielerfüllung für das Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“, für das Konzept „Brandmeldeanlage“ eine sehr hohe und für das Konzept „Sprinkleranlage“ eine hohe Zielerfüllung abgeleitet werden.

Unterziel: Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen

In allen drei Maßnahmenkonzepten wird eine EI₂ 30-S₂₀₀C5 Türqualität zum angrenzenden Gebäude eingebaut. Daraus resultiert für alle drei Konzepte eine geringe Zielerfüllung.

Mittelziel: Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr

Das Mittelziel „Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr“ teilt sich in zwei Unterziele. Das Unterziel „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände ($i \leftarrow o$)“ erhält so wie das Unterziel „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen ($i \leftarrow o$)“ eine Gewichtung von 50 % (Abbildung 5.10).

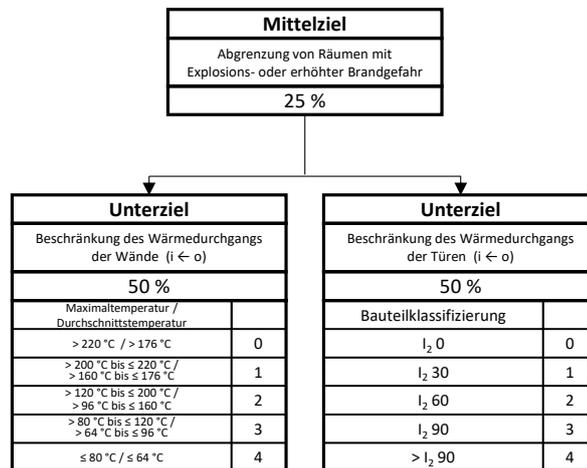


Abbildung 5.10: Darstellung des Mittelzieles „Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr“ mit jeweiligen Unterzielen

Unterziel: Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände ($i \leftarrow o$)

Auch dieses Unterziel wird wie das Unterziel „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände ($i \rightarrow o$)“ ausgewertet. Für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ resultiert eine mittlere Zielerfüllung, für das Konzept „Brandmeldeanlage“ eine sehr hohe und für das Konzept „Sprinkleranlage“ eine hohe Zielerfüllung.

Unterziel: Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen ($i \leftarrow o$)

Wie zuvor erwähnt wird in diesem Konzept eine EI₂ 30-S₂₀₀C5 Türqualität eingebaut. Aufgrund dessen ergibt sich eine geringe Zielerfüllung für alle drei Konzepte.

Mittelziel: Beschränkung der Großflächigkeit

Abbildung 5.11 zeigt die Unterteilung des Mittelzieles „Beschränkung der Großflächigkeit“. Die Zielerfüllungsgrade der Unterziele werden mittels Simulationen festgelegt, wobei das Unterziel „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“ anhand des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“ ausgewertet wird.

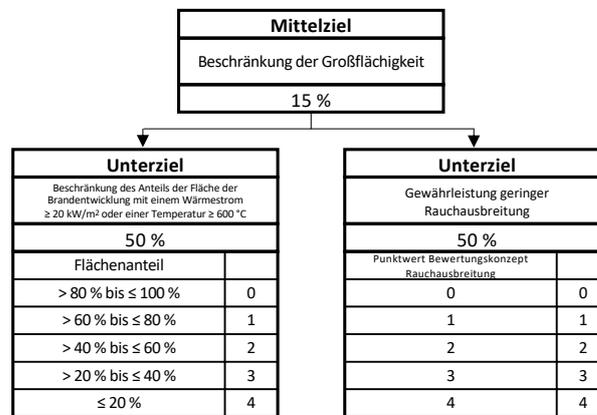


Abbildung 5.11: Darstellung des Mittelzieles „Beschränkung der Großflächigkeit“ mit zugehörigen Unterzielen

Unterziel: Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600 \text{ °C}$

Bei diesem Unterziel wird der Wärmestrom am Boden und die Temperatur an der Decke ausgewertet. Dabei müssen über die Zeit die Maximalwerte betrachtet werden. Es wird kontrolliert, ob der Wert nur kurz (Schwankungen) oder auch über mehrere Zeitschritte auftritt. Beide Kriterien können anhand der Flächenanteile über zwei Zeitschritte bewertet werden. Über die gesamte Fläche wird untersucht, wie groß der Flächenanteil ist, der über dem Grenzwert liegt. In Abbildung 5.12 ist der Wärmestrom für das Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ am Boden dargestellt. 99,48 % liegen unterhalb des Grenzwertes von 20 kW/m^2 und 0,52 % über diesem Grenzwert. Auf Basis dessen ergibt sich für dieses Konzept eine sehr hohe Zielerfüllung.

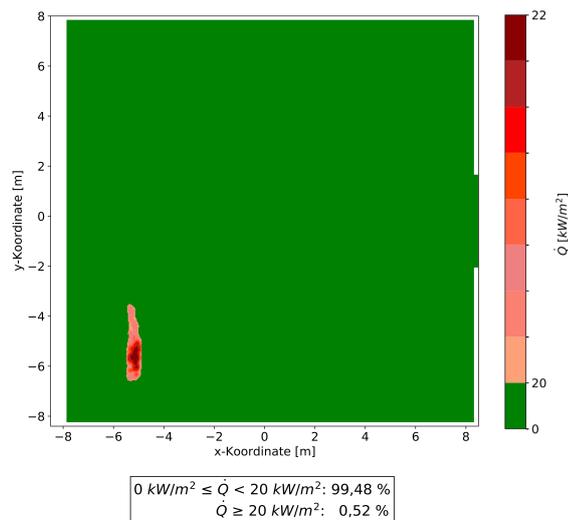


Abbildung 5.12: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Abbildung 5.13 zeigt die Auswertung der Flächenanteile für die Temperatur an der Decke für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“. Dort liegen 77,23 % unterhalb des Grenzwertes von 600 °C. Jedoch sind 22,77 % über dem angegebenen Grenzwert. Daher ergibt sich für die Bewertung der Temperatur eine hohe Zielerfüllung. Da es sich bei der Bewertung des Unterzieles um eine oder-Verknüpfung handelt, resultiert daraus ein gemeinsamer Zielerfüllungsgrad von drei für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“.

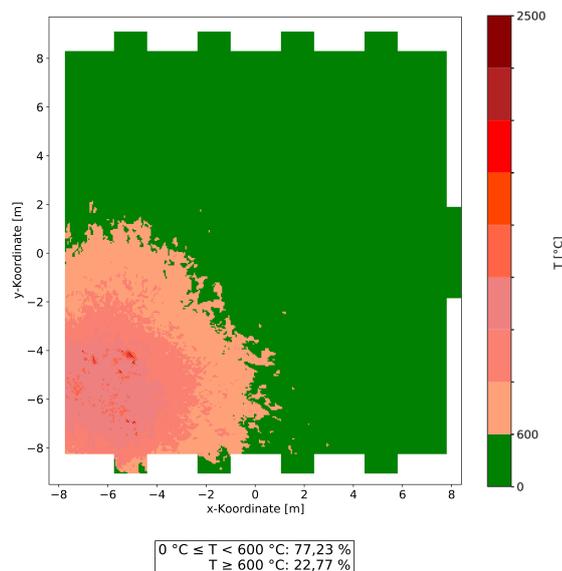


Abbildung 5.13: Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Ein sehr hohe Zielerfüllung ergibt sich für das Konzept „Brandmeldeanlage“ und für das Konzept „Sprinkleranlage“. 6,89 % liegen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über dem Grenzwert von 600 °C (Abb. D.4) und 0 % über dem Grenzwert von 20 kW/m² (Abb. D.3). In dem Konzept „Sprinkleranlage“ werden beide Grenzwerte nicht überschritten.

Unterziel: Gewährleistung geringer Rauchausbreitung

Das Unterziel „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“ wird mittels des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“ (Abb. 5.14) ausgewertet.

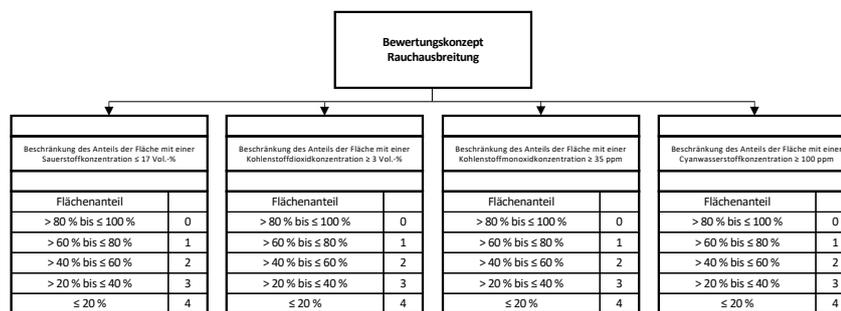


Abbildung 5.14: Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Sauerstoffkonzentration ≤ 17 Vol.-%

Für dieses Kriterium wird, anders als bei den anderen Kriterien, der Minimalwert über den Zeitraum der Simulation bestimmt. Abbildung 5.15 stellt die minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ dar.

Die Auswertung der Flächenanteile zeigt, dass 17,57 % der Fläche eine Konzentration ≤ 17 Vol.-% besitzt. Daraus resultiert eine sehr hohe Zielerfüllung für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“.

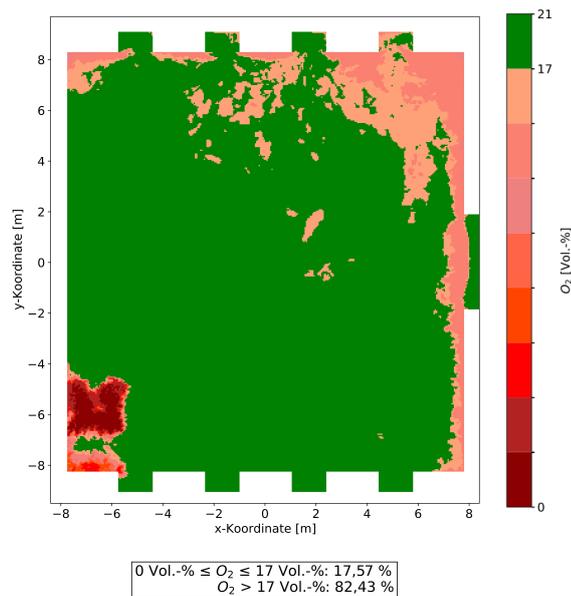


Abbildung 5.15: Darstellung die minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Aus der Auswertung der Flächenanteile für das Konzept „Brandmeldeanlage“ ergibt sich, dass 8,29 % unter dem Grenzwert von 17 Vol.-% (Abb. D.6) liegen und für das Konzept „Sprinkleranlage“ 1,55 % (Abb. D.18). Daraus resultiert eine sehr hohe Zielerfüllung für beide Maßnahmenkonzepte.

Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration ≥ 3 Vol.-%

Das Kriterium ist auf die gleiche Weise zu bewerten. Die Auswertung erfolgt durch eine Berechnung der maximalen Flächenanteile über die Zeit. Es wird geprüft, wie viel Prozent der Fläche über dem Grenzwert von 3 Vol.-% liegt. Zur Bestimmung der Auswertungshöhe wird das 95. Perzentil der Augenhöhe von Männern in einem Alter zwischen 18 und 65 Jahre (1,735 m) [227, Tabelle 4] mit einem Faktor für schnelles Gehen und Laufen (0,1 m) [228, S. 12] verrechnet. Diese Höhe wird auf die Simulation mittels FDS angepasst und eine Höhe von 1,85 m gewählt. Abbildung 5.16 zeigt die Auswertung der Kohlenstoffdioxidkonzentration auf einer Höhe von 1,85 m.

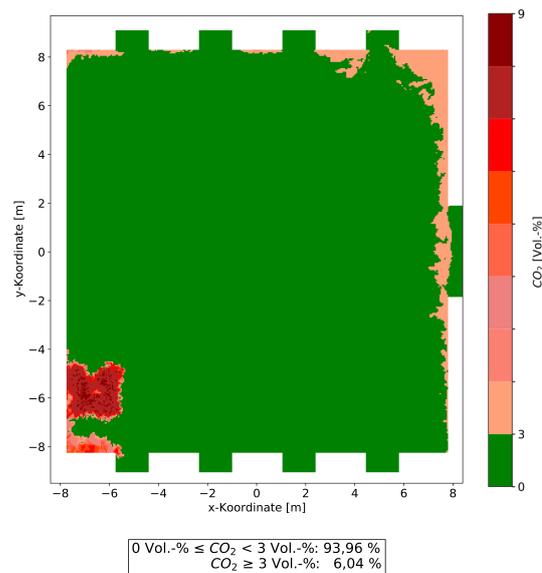


Abbildung 5.16: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Die Auswertung zeigt, dass 6,04 % der Fläche eine Kohlenstoffdioxidkonzentration ≥ 3 Vol.-% aufweisen. Daher ergibt sich für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ eine sehr hohe Zielerfüllung.

Bei den Konzepten „Brandmeldeanlage“ und „Sprinkleranlage“ sind die Flächenanteile, die größer als der Grenzwert sind, kleiner als 20 % (Abb. D.5, Abb. D.17). Daraus geht ebenfalls eine sehr hohe Zielerfüllung für beide Konzepte hervor.

Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffmonoxidkonzentration ≥ 35 ppm

Abbildung 5.17 zeigt die Flächenanteile für Kohlenstoffmonoxid auf einer Höhe von 1,85 m für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“. Die Auswertung zeigt, dass 98,89 % der Fläche über den Grenzwert von 35 ppm liegen. Daraus ergibt sich keine Zielerfüllung für dieses Kriterium.

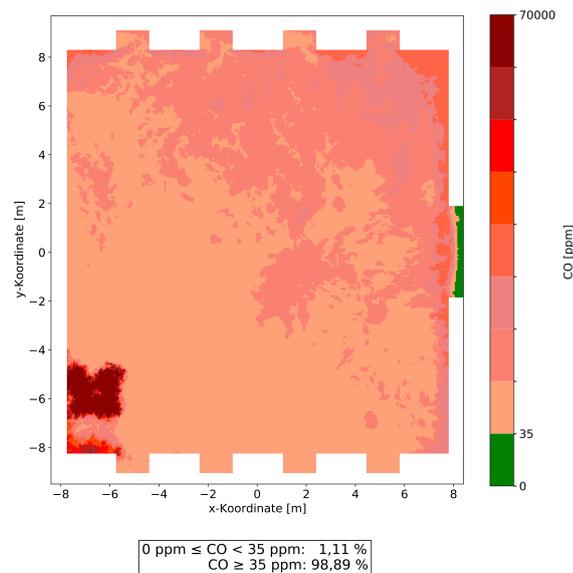


Abbildung 5.17: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Die Fläche, die größer als der Grenzwert ist, beträgt bei dem Konzept „Brandmeldeanlage“ 98,81 % und bei dem Konzept „Sprinkleranlage“ 98,80 %. Darauf basierend ergibt sich keine Zielerfüllung für beide Maßnahmenkonzepte.

Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Cyanwasserstoffkonzentration ≥ 100 ppm

Abbildung 5.18 werden die maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen über die Zeit dargestellt. Da 73,19 % der Fläche über dem Grenzwert von 100 ppm liegen, ergibt sich eine geringe Zielerfüllung für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“.

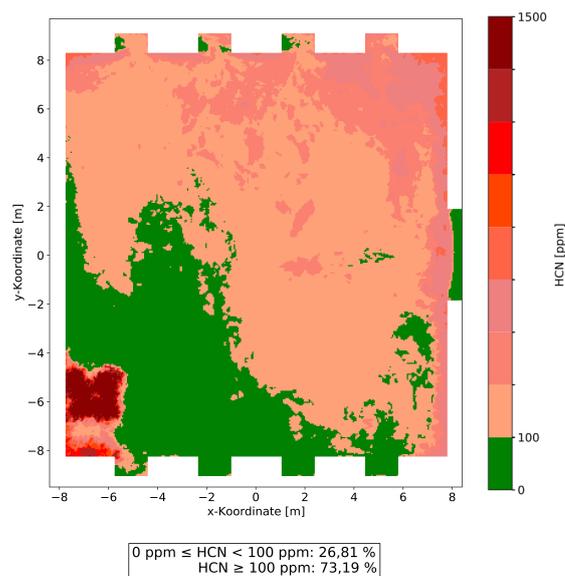


Abbildung 5.18: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Im Konzept „Brandmeldeanlage“ sind 42,21 % der Fläche über dem Grenzwert von 100 ppm (mittlere Zielerfüllung, siehe Abb. D.8) und 9,62 % in dem Konzept „Sprinkleranlage“ über dem Grenzwert (sehr hohe Zielerfüllung, siehe Abb. D.24).

Die Auswertung des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“ ergibt sich aus dem niedrigsten Zielerfüllungsgrad aller Rauchgaskonzentrationen. Für alle drei Maßnahmenkonzepte erfolgt keine Zielerfüllung für das „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“ und somit keine Zielerfüllung für das Unterziel „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“.

Mittelziel: Zwei voneinander unabhängige Rettungswege

Das Mittelziel „Zwei voneinander unabhängige Rettungswege“ wird in Abbildung 5.19 dargestellt und unterteilt sich in ein weiteres Unterziel. Das Unterziel wird anhand von qualitativen Bezeichnung ausgewertet.

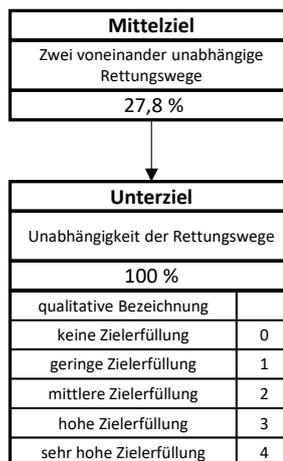


Abbildung 5.19: Darstellung des Mittelzieles „Zwei voneinander unabhängige Rettungswege“ mit Unterziel

Unterziel: Unabhängigkeit der Rettungswege

In allen drei Konzepten stehen als Fluchtweg das Tor und die Tür zur Verfügung. Beide Ausgänge liegen in entgegengesetzter Richtung und sind unabhängig voneinander. Daher ergibt sich für dieses Unterziel eine sehr hohe Zielerfüllung für alle Konzepte.

Mittelziel: Alarmierung der anwesenden Menschen

Die „Alarmierung der anwesenden Menschen“ unterteilt sich in ein Unterziel „Frühzeitige Alarmierung“. Mit diesem Unterziel wird geprüft, ob eine Alarmierung der anwesenden Menschen vorhanden ist und auf welche Weise diese Alarmierung stattfindet. Dieses Unterziel wird auf qualitative Art ausgewertet (Abb. 5.20).

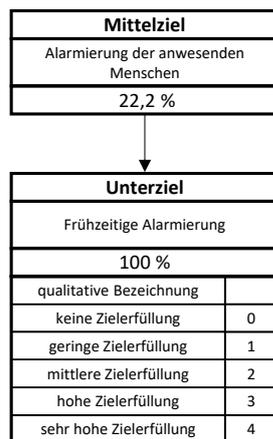


Abbildung 5.20: Darstellung des Mittelzieles „Alarmierung der anwesenden Menschen“ mit Unterziel

Unterziel: Frühzeitige Alarmierung

In dem Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ ist keine Alarmierung der Personen vorgesehen. Es gibt keine Brandmeldeanlage und keine Alarmierungseinrichtung die durch Sprinkler ausgelöst werden. Aus diesen Gründen folgt keine Zielerfüllung.

Die Brandmeldeanlage ist zu einer hilfeleistenden Stelle aufgeschaltet, aufgrund dessen ergibt sich für das Unterziel „Frühzeitige Alarmierung“ eine sehr hohe Zielerfüllung. Eine „Frühzeitige Alarmierung“ ist auch für das Konzept „Sprinkleranlage“ gegeben, da diese eine Brandmeldeanlage ansteuert und diese wiederum auf eine hilfeleistende Stelle aufgeschaltet ist (sehr hohe Zielerfüllung).

Mittelziele: Rauchfreiheit der Flure

Im Gegensatz zu der Auswertung der Flächenanteile wird für dieses Mittelziel (Abb. 5.21) nur der Rettungsweg betrachtet. Die Konzentrationen werden analog zur Auswertung des Mittelzieles „Beschränkung der Großflächigkeit“ auf einer Höhe von 1,85 m ausgewertet. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben erfolgt die Auswertung durch die Bestimmung von Flächenanteilen der jeweiligen Grenzwertbereiche mit dem „Bewertungskonzept Rauchgase“. Können mehr als 5 % der Fläche des Rettungsweges einem Grenzwertbereich zugeordnet werden, so ergibt sich ein Zielerfüllungsgrad. Maßgeblich ist der kleinste Zielerfüllungsgrad.

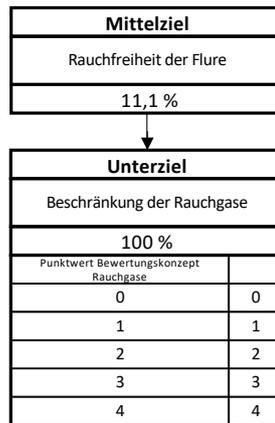


Abbildung 5.21: Darstellung des Mittelzieles „Rauchfreiheit der Flure“ mit Unterziel

Unterziel: Beschränkung der Rauchgase

Das Unterziel „Beschränkung der Rauchgase“ wird mithilfe des „Bewertungskonzeptes Rauchgase“ (Abb. 5.22) ausgewertet. Auch in dieser Auswertung ist der niedrigste Zielerfüllungsgrad aller Kriterien ausschlaggebend.

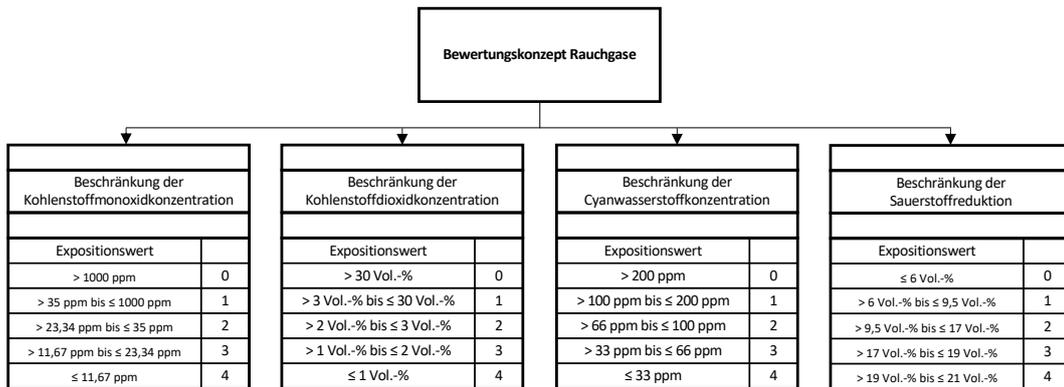


Abbildung 5.22: Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchgase“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration

Abbildung 5.23 stellt die Kohlenstoffdioxidkonzentration auf einer Höhe von 1,85 m für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ dar. Die Grenzwertbereiche für keine Zielerfüllung bis mittlere Zielerfüllung liegen unter den angegebenen 5 % der Fläche. Da 33,85 % der Fläche in diesem Grenzwertbereich liegen, resultiert daraus eine hohe Zielerfüllung.

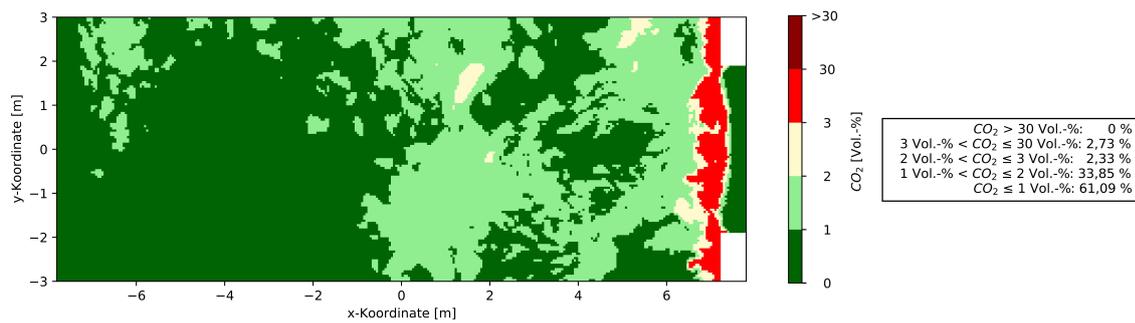


Abbildung 5.23: Übersicht der Flächenanteile für Kohlenstoffdioxid im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

In dem Konzept „Brandmeldeanlage“ sind 93,38 % der Fläche im Rettungsweg ≤ 1 Vol.-%, daraus geht eine sehr hohe Zielerfüllung hervor (Abb. D.9). Auch für das Konzept „Sprinkleranlage“ ergibt sich eine sehr hohe Zielerfüllung, da dort 100 % in diesem Grenzbereich liegen (Abb. D.21).

Beschränkung der Cyanwasserstoffkonzentration

In der Abbildung 5.24 werden die Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ dargestellt. Aus der Bestimmung der Flächenanteile ergibt sich, dass 27,25 % der Fläche eine Konzentration > 200 ppm besitzen. Aufgrund dessen folgt für dieses Kriterium keine Zielerfüllung.

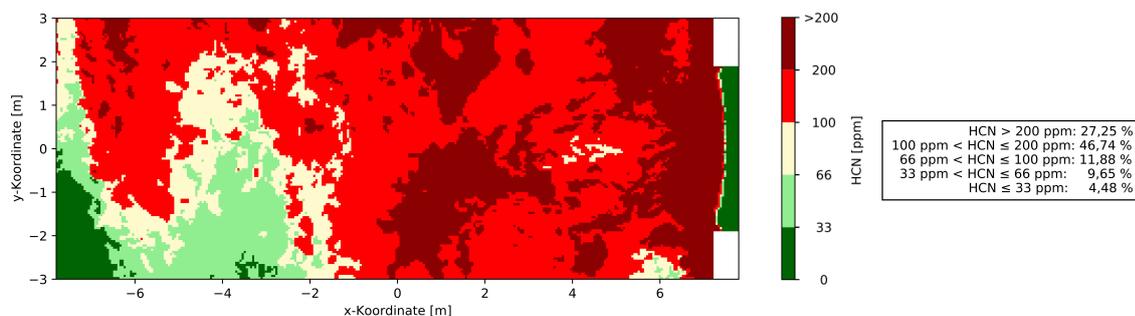


Abbildung 5.24: Übersicht der Flächenanteile für Cyanwasserstoff im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Für das Konzept „Brandmeldeanlage“ ergibt sich keine Zielerfüllung, da 5,39 % der Fläche im Rettungsweg über dem Grenzwert von 200 ppm liegen (Abb. D.12). Aus der Auswertung des Konzeptes „Sprinkleranlage“ resultiert eine mittlere Zielerfüllung (Abb. D.24).

Beschränkung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration

Die Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Rettungsweg werden in Abbildung 5.25 für das Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ dargestellt. Da 96,15 % der Fläche über 1000 ppm liegen ergibt sich keine Zielerfüllung.

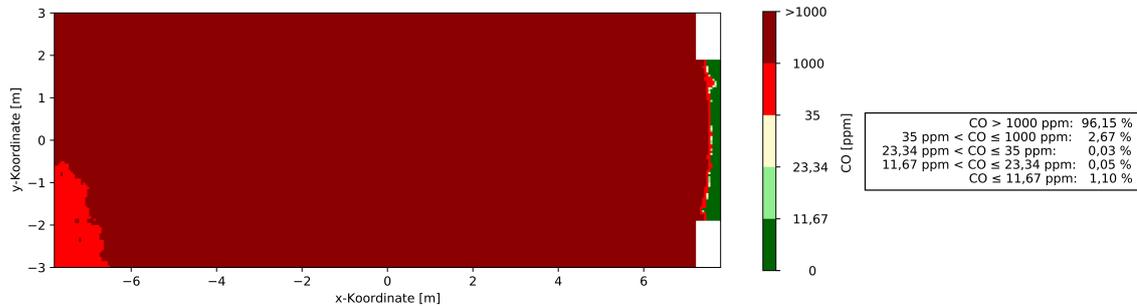


Abbildung 5.25: Übersicht der Flächenanteile für Kohlenstoffmonoxid im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Aus den Maßnahmenkonzepten „Brandmeldeanlage“ und „Sprinkleranlage“ resultiert keine Zielerfüllung, da beide Konzepte im Grenzbereich > 1000 ppm die größten Flächenanteile aufweisen (Abb. D.10 und Abb. D.22).

Beschränkung der Sauerstoffreduktion

Für das Kriterium „Beschränkung der Sauerstoffreduktion“ ergibt sich für das Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzmaßnahmen“ eine mittlere Zielerfüllung, da bei 6,35 % der Fläche eine Sauerstoffkonzentration zwischen $> 9,5$ Vol.-% und ≤ 17 Vol.-% vorhanden ist (Abb. 5.26).

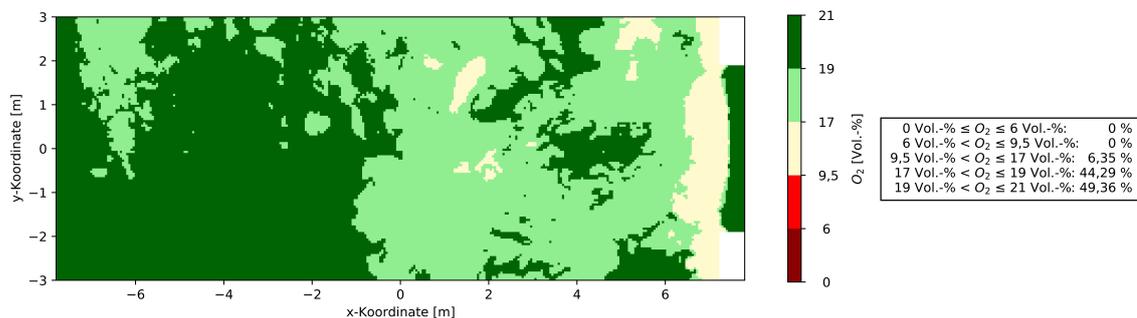


Abbildung 5.26: Übersicht der Flächenanteile für Sauerstoff im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzmaßnahmen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Für die Auswertung der Sauerstoffreduktion für das Konzept „Brandmeldeanlage“ geht eine hohe Zielerfüllung hervor (Abb. D.11). Aus der Auswertung der Sauerstoffreduktion des Konzeptes „Sprinkleranlage“ ergibt sich eine sehr hohe Zielerfüllung (Abb. D.23).

Aus dem „Bewertungskonzept der Rauchgase“ geht für alle drei Maßnahmenkonzepte keine Zielerfüllung hervor.

Mittelziel: Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO

Das Mittelziel „Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO“ beinhaltet ein Unterziel „Beschränkung der Räumungszeit“. Dies wird mit Hilfe des Sicherheitsfaktors ausgewertet. Abbildung 5.27 zeigt die Kriterien mit jeweiligen Zielerfüllungsgraden.

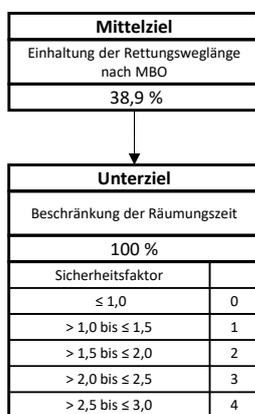


Abbildung 5.27: Darstellung des Mittelzieles „Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO“ mit Unterziel

Unterziel: Beschränkung der Räumungszeit

Zur Ermittlung der Räumungszeit werden Räumungssimulationen mit dem Programm JuPedSim durchgeführt. Dabei wird die Geometrie aus dem FDS-File in einen Geometriefile für JuPedSim umgewandelt. Zur konservativen Betrachtung der Räumungszeit werden zwölf parkende Fahrzeuge mit jeweils zwei Personen berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Reaktionszeitverteilung kann die Methode nach Purser [229] mit leichten Veränderungen der RiMEA [83] verwendet werden. Jedoch ergibt sich durch Zuordnung einzelner Kategorien nach RiMEA für das Szenario Wände mit Brandschutzanforderung eine minimale Reaktionszeit von > 15 min und eine maximale Reaktionszeit von < 30 min. Die RiMEA gibt bei dieser Verteilung an, dass diese Werte eine erhöhte Unsicherheit aufweisen. [83, S. 14 und S. 56] Die durch RiMEA

festgelegten Reaktionszeiten sind nicht mit dem Szenario Tiefgarage vereinbar. Es ist davon auszugehen, dass sobald eine Person in der Tiefgarage den Brand bemerkt, sie die anderen anwesenden Personen in der Tiefgarage warnen wird [229, S. 7], sodass die Reaktionszeit eher geringer sein müsste. Aus verschiedenen Brandversuchen mit Fahrzeugen geht hervor, dass Rauch oder Flammen nach kurzer Zeit sichtbar sind. Daher wird eine Detektionszeit aus der Literatur von 60 Sekunden entnommen. [[230, S. 1531]; [191, S. 146 - 148]] In diesem Konzept ist keine Brandmeldeanlage und kein Hausalarm vorgesehen, aufgrund dessen kann die Warnung ausschließlich durch anwesende Personen durchgeführt werden. Somit ergibt sich für JuPedSim eine Reaktionszeit von 60 Sekunden.

In JuPedSim muss zusätzlich zur Reaktionszeit die Laufgeschwindigkeit angegeben werden. Die RiMEA empfiehlt für die Bestimmung der durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit die Werte der Veröffentlichung von Weidmann [231] zu verwenden [83, S. 14]. Dieser gibt für die durchschnittliche Gehgeschwindigkeit 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s für alle Altersklassen an [231, S. 43]. Es werden pro Fahrzeug zwei Personen angenommen. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 24 Agents für die Tiefgarage, welche frei verteilt werden.

In der Literatur ist keine Regel zu finden, wie oft eine Simulation aufgrund von gewissen Schwankungen durchgeführt werden soll. Die Anzahl der Wiederholungen liegt zwischen 5 und 500 Simulationen [[232, S. 800]; [233, S. 473]; [70, S. 488]; [83, S. 22]]. Aufgrund der geringen Fläche der Tiefgarage und der damit verbundenen kürzeren Laufwege wird in dieser Untersuchung sich an dem Orientierungswert der RiMEA (mindestens zehn Durchläufe für jedes Szenario) gehalten [83, S. 22]. In der Simulation steht nur das Tor als Fluchtweg zur Verfügung. Dies wird angenommen, da dort die Personen direkt ins Freie gelangen und in der Nähe der Tür das Fahrzeug brennt. In der Tabelle 5.6 werden die Zeiten bis die letzte Person den simulierten Raum verlassen hat dargestellt.

Tabelle 5.6: Übersichtstabelle der Ergebnisse der Räumungssimulationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Variable	Zeiten [s]
Mittelwert	80,35
Standardabweichung	3,26
Minimum	76,46
Maximum	86,17
95. Perzentil	85,29

Zur Bestimmung der RSET werden die Detektions-, Alarmierungs-, Reaktions- und Laufzeit addiert. Da diese Zeiten in den Simulationen berücksichtigt worden sind, ist die Simulationszeit auch gleich der RSET. Es wird das 95. Perzentil [234, S. 128] zur Beurteilung herangezogen, somit ergibt sich eine RSET von 85,29 Sekunden.

Die Kriterien zum Nachweis für ASET orientieren sich an denen in der Nutzwertanalyse verwendeten Beurteilungswerten. Dabei wird auf einer Höhe von 1,85 m die Zeit gemessen, zu welchem Zeitpunkt der Grenzwert der Beurteilungswerte überschritten ist. Für die Auswertung werden die Grenzwerte für die Fluchtunfähigkeit oder Bewusstlosigkeit verwendet. Die unmittelbare Umgebung des Fahrzeuges und die Fläche des Fahrzeuges selber werden in der Auswertung nicht betrachtet. Für die Auswertung werden die in der Tabelle 5.7 dargestellten Beurteilungswerte und die dazugehörigen Grenzwerte verwendet.

Tabelle 5.7: Grenzwerte für die Bestimmung von ASET

Beurteilungswert	Grenzwert	Quelle
Kohlenstoffmonoxid	3200 ppm	[176, S. 194]
Kohlenstoffdioxid	10 Vol.-%	[175, S. 14-114]
Cyanwasserstoff	200 ppm	[178, S. 2359]
Sauerstoff	11 Vol.-%	[177, S. 1-50]
Temperatur	150 °C	[176, S. 188]

In Tabelle 5.8 sind die Zeiten dargestellt, bei denen mehr als 5 % der Fläche den Grenzwert überschritten haben.

Tabelle 5.8: Übersichtstabelle der Beurteilungswerte mit jeweiliger Zeit der Überschreitung für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderung“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Beurteilungswert	Zeit [s]
Kohlenstoffmonoxid	273,00
Kohlenstoffdioxid	Grenzwert im betrachteten Zeitraum nicht überschritten
Cyanwasserstoff	1369,20
Sauerstoff	Grenzwert im betrachteten Zeitraum nicht unterschritten
Gastemperatur	Grenzwert im betrachteten Zeitraum nicht überschritten

Als ASET wird die niedrigste Zeit aus der Tabelle 5.8 ausgewählt. Diese beträgt für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderung“ 273,00 Sekunden.

Der Sicherheitsfaktor (SF) stellt eine Division von ASET und RSET dar. Für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von 3,20 und es resultiert daraus eine sehr hohe Zielerfüllung.

In dem Konzept „Brandmeldeanlage“ ergibt sich eine verfügbare Räumungszeit (ASET) von 268,80 Sekunden und eine erforderliche Räumungszeit (RSET) von 58,29 Sekunden. Aus der Division dieser geht ein Sicherheitsfaktor von 3,15 hervor. Daraus resultiert eine sehr hohe Zielerfüllung. ASET beträgt für das Konzept „Sprinkleranlage“ 331,80 Sekunden und RSET 58,20 Sekunden. Daraus ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von 3,89 und somit eine sehr hohe Zielerfüllung.

Mittelziel: Ermöglichung schneller Löschmaßnahmen

Abbildung 5.28 zeigt die Unterteilung des Mittelzieles „Ermöglichung schneller Löschmaßnahmen“. Das Unterziel mit einer Gewichtung von 100 % wird anhand von qualitativen Bezeichnung ausgewertet.



Abbildung 5.28: Darstellung des Mittelzieles „Ermöglichung schneller Löschmaßnahmen“ mit Unterziel

Unterziel: Wirksamwerden erster Löschmaßnahmen

In dem Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ sind keine frühzeitigen Löschmaßnahmen, wie das Vorhandensein einer Sprinkleranlage und Brandmeldeanlage, vorgesehen. Daher geht für dieses Unterziel keine Zielerfüllung hervor.

Das letzte qualitative Unterziel „Wirksamwerden erster Löschmaßnahmen“ erhält aufgrund der organisatorischen Maßnahme mit der Aufschaltung zur hilfeleistenden Stelle eine mittlere Zielerfüllung. Durch das Vorhandensein einer Sprinkleranlage und einer Brandmeldeanlage ergibt sich für das Unterziel „Wirksamwerden erster Löschmaßnahmen“ eine sehr hohe Zielerfüllung.

5.1.2.2 Kostenanalyse der Maßnahmenkonzepte

Die Kostenanalyse wird anhand der im Kapitel 3 beschriebenen Methodik aufgestellt. Das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ erhält nach der Ermittlung der Brutto-Bauwerkskosten einen Wert von 1.701,81 €. Diese Kosten setzen sich zusammen aus den Kosten für die Wände, die Tür, die Brandschutzabschottung und die Brandschutzklappe. Zur Ermittlung der Bauwerkskosten finden sich nicht immer entsprechende statistische Kostenkennwerte für brandschutztechnische Maßnahmen. Für diesen Fall wird die Kostenposition der nächsthöheren brandschutztechnischen Anforderung verwendet, um eine Einhaltung der Mindestanforderungen sicherzustellen.

Die Lebensdauer der Brandschutzabschottungen ist nach 15 Jahren erreicht. Daher fallen dafür Kosten für die Erneuerung an. Die Erneuerungskosten werden mit der Barwertmethode und mittels einer Zinsstrukturkurve berechnet. Diese betragen 36 €. Auf das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ fallen keine gesonderten Fachplanungskosten für technische Ausrüstung an, daher betragen diese Fachplanungskosten 0 €. Zur Ermittlung der Instandhaltungskosten wird mithilfe einer Zinsstrukturkurve der Wiederbeschaffungswert ermittelt. Im zweiten Schritt werden die Jahreskostenfaktoren korrigiert. Dafür wird ein Jahresfaktor für die Wartung von 0,94 % und ein Jahreskostenfaktor für die Instandsetzung von 1,44 % angenommen. Zusätzlich muss das Bauteilalter bei der Abschätzung der Instandhaltungskosten mitbetrachtet werden. Für die ersten fünf Jahre wird ein Faktor von $f_{\text{Kor_Alter}} = 0,5$ und danach von $f_{\text{Kor_Alter}} = 1,0$ verwendet. Die dritte maßgebliche Einflussgröße auf die Jahreskostenfaktoren ist die Gebäudehöhe. Für diese Berechnung wird der Faktor für „Kein Hochhaus“ mit $f_{\text{Kor_Höhe}} = 1,0$ ausgewählt. Nach der Festlegung der zu verwendenden Jahreskostenfaktoren und der Ermittlung der zugehörigen Korrekturfaktoren, erfolgt die Berechnung der Jahresgesamtkosten für operative Aufgaben der Instandhaltung. Im nächsten Schritt wird das Ergebnis mit dem Kostenfaktor für administrative Aufgaben multipliziert. Es wird davon ausgegangen, dass bei der Instandhaltung eine vollständige Fremdvergabe erfolgt. Daher wird ein Kostenfaktor für die Ermittlung administrativer Kosten (f_{ad}) von 0,2 angenommen. Allen Kostenberechnungen liegt als Betrachtungszeitpunkt Januar 2018 und eine Nutzungsdauer

von 19 Jahren zu Grunde. Dies ist auf Grundlage von Offergeld festgelegt, dieser gibt eine mittlere empirische Nutzungszyklusdauer von 19 Jahren an [142]. Die Gesamtkosten für die Instandhaltung brandschutztechnischer Maßnahmen ergeben sich aus der Addition der operativen Kosten und der administrativen Kosten. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können die Instandhaltungskosten mit einem Bruttowert von 810,75 € angerechnet werden. Bei der Umsetzung dieses Konzeptes über einen Nutzungszyklus ergeben sich Gesamtkosten in Höhe von 2.548,75 €. Tabelle 5.9 zeigt eine Übersicht der einzelnen Kostenpositionen.

Tabelle 5.9: *Kostenanalyse für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)*

Wände mit Brandschutzanforderungen	
Bauwerkskosten (Netto):	1.430,09 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Netto):	36,00 €
Bauwerkskosten (Brutto):	1.701,81 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Brutto):	42,84 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Netto):	30,41 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Brutto):	36,19 €
anrechenbare Kosten Fachplanung:	0,00 €
Fachplanungskosten (Netto):	0,00 €
Fachplanungskosten (Brutto):	0,00 €
Instandhaltungskosten (Netto):	681,30 €
Instandhaltungskosten (Brutto):	810,75 €
Gesamtkosten (Netto):	2.141,80 €
Gesamtkosten (Brutto):	2.548,75 €

Für die Ausführung eines auf einer Brandmeldeanlage beruhenden Konzeptes zur Sicherstellung des Brandschutzes in der Tiefgarage sind Brutto-Herstellungskosten von 24.249,56 € zu veranschlagen. Diese ergeben sich aus den Bauwerkskosten und den Fachplanungskosten. Die Bauwerkskosten setzen sich zusammen aus der Berechnung der Kosten für Wände, die Tür, Brandschutzabschottungen und Brandklappen. Zusätzlich dazu werden die Kosten für die Brandmeldeanlage (Brandmelder, Sirene, Infrastruktur und Schlüsseldepot) berücksichtigt. Die Bauwerkskosten betragen 16.522,07 €.

Zur Berechnung der Fachplanungskosten werden die Leistungsphasen 1 bis 8 der HOAI (Honorarsatz 99 %) verwendet. Die anrechenbaren Kosten für dieses Maßnahmenkonzept belaufen sich auf 12.418,00 €. Brandmeldeanlagen sind der Honorarzone III zuzuordnen. Für diese Berechnung wird der Mittelsatz, der im Sinne des

Gesetzgebers ist, verwendet. Über die Werte der Honorartafel können die Honorare für Grundleistungen der technischen Ausrüstung berechnet werden. Darüber hinaus können für die Ausführung eines Auftrages Nebenkosten in Rechnung gestellt werden. Diese werden jedoch für diese Berechnung nicht betrachtet und betragen 0 €. Somit ergeben sich Fachplanungskosten in Höhe von 7.727,49 €.

Neben den Brandabschottungen haben alle 16 Wärmemelder nach 15 Jahren ihre maximale Lebensdauer erreicht. Daher muss dafür ein Brutto-Barwert in Höhe von 2.461,68 € berücksichtigt werden. Zur Berechnung der Instandhaltungskosten werden die gleichen Jahreskostenfaktoren angenommen wie bei dem Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“. Die Instandhaltungskosten, die auf Basis der Bauwerkskosten ermittelt werden, betragen für einen Nutzungszyklus 7.800,09 €. Die daraus entstehenden Gesamtkosten belaufen sich auf 34.511,33 €. Eine Zusammenfassung der aufgeführten Einzelkosten für das Konzept „Brandmeldeanlage“ bietet Tabelle 5.10.

Tabelle 5.10: *Kostenanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)*

Brandmeldeanlage	
Bauwerkskosten (Netto):	13.884,09 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Netto):	2448,80 €
Bauwerkskosten (Brutto):	16.522,07 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Brutto):	2.914,07 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Netto):	2.068,64 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Brutto):	2.461,68 €
anrechenbare Kosten Fachplanung:	12.418,00 €
Fachplanungskosten (Netto):	6.493,69 €
Fachplanungskosten (Brutto):	7.727,49 €
Instandhaltungskosten (Netto):	6.554,70 €
Instandhaltungskosten (Brutto):	7.800,09 €
Gesamtkosten (Netto):	29.001,12 €
Gesamtkosten (Brutto):	34.511,33 €

Die Brutto-Bauwerkskosten für das Konzept „Sprinkleranlage“ betragen 60.903,87 €. Zur Berechnung der Brutto-Herstellungskosten müssen auch die Brutto-Fachplanungskosten berücksichtigt werden. Zur Berechnung der Fachplanungskosten werden, wie beim Maßnahmenkonzept „Brandmeldeanlage“, die Leistungsphasen 1 bis 8 der HOAI (Honorarsatz 99 %) verwendet. Die anrechenbaren Kosten für dieses Maßnahmenkonzept belaufen sich auf 49.941,86 €. Sprinkleranlagen sind

gleichfalls der Honorarzone III zuzuordnen. Die Fachplanungskosten belaufen sich auf 26.018,63 €.

Weiterhin ist nach 15 Jahren die Lebensdauer der Brandschutzabschottungen und des Rohrschotts erreicht, sodass für diese ein Bruttobarwert für die Erneuerung von 116,61 € anzusetzen ist. Für die Instandhaltungskosten werden die gleichen Faktoren für die Berechnung angenommen wie für die anderen zwei Maßnahmenkonzepte. Die Instandhaltungskosten belaufen sich auf 29.054,41 €. Somit ergeben sich die Brutto-Gesamtkosten von 116.093,52 €. Eine Darstellung aller mit dem Konzept verbundenen Kosten findet sich in Tabelle 5.11 wieder.

Tabelle 5.11: Kostenanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

Sprinkleranlage	
Bauwerkskosten (Netto):	51.179,72 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Netto):	116,00 €
Bauwerkskosten (Brutto):	60.903,87 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Brutto):	138,04 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Netto):	97,99 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Brutto):	116,61 €
anrechenbare Kosten Fachplanung:	49.941,86 €
Fachplanungskosten (Netto):	21.864,40 €
Fachplanungskosten (Brutto):	26.018,63 €
Instandhaltungskosten (Netto):	24.415,47 €
Instandhaltungskosten (Brutto):	29.054,41 €
Gesamtkosten (Netto):	97.557,58 €
Gesamtkosten (Brutto):	116.093,52 €

5.1.2.3 Kosten- und Nutzwertanalyse für das Szenario 1: Tiefgarage

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Konzepte zu erhalten, müssen die jeweiligen Kosten mit dem Nutzwert verrechnet werden. Das niedrigste Verhältnis ist maßgebend. Tabelle 5.12 zeigt die Übersicht der Kosten und des Nutzwertes für alle Konzepte.

Tabelle 5.12: Kosten- und Nutzwertanalyse für das Szenario 1: Tiefgarage

Konzept Analyse	Wände mit Brandschutzan- forderungen	Brandmeldeanlage	Sprinkleranlage
Gesamtkosten [€]	2.548,75	34.511,33	116.093,52
Nutzwert [-]	2,37	3,21	3,34
Kosten-Nutzen- Verhältnis [€]	1.075,42	10.751,19	34.758,54
Rang	1	2	3

Beim Vergleich der drei Konzepte zeigt sich, dass sich diese Konzepte deutlich unterscheiden. Das Konzept „Sprinkleranlage“ erreicht den höchsten Nutzwert (3,34), der sehr nah am Maximum (4) liegt. Daher kann für dieses Konzept geschlussfolgert werden, dass die Schutzziele des Brandschutzes im hohem Maße erfüllt werden. Das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ erhält den niedrigsten Nutzwert 2,37. Das Konzept „Brandmeldeanlage“ liegt zwischen den anderen beiden Nutzwerten.

Die Gesamtkosten der drei Konzepte unterscheiden sich ebenfalls sehr stark. Das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ erhält die niedrigsten Gesamtkosten. Im Vergleich dazu sind die Kosten für das Konzept „Sprinkleranlage“ um den Faktor 45,55 höher als die des Konzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“. Daher kann das auf einer Sprinkleranlage basierende Konzept als zu unwirtschaftlich angesehen werden. Die Kosten für das auf der Brandmeldeanlage basierende Konzept sind um den Faktor 13,54 höher als das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ und es kann somit im Mittelfeld der Rangfolge eingeordnet werden. Da die Kosten für das Konzept Wände mit Brandschutzanforderungen im Vergleich zu den Anderen deutlich niedriger sind und der Nutzwert über der mittleren Zielerfüllung liegt (Kosten-Nutzen-Verhältnis von 1.075,42 €), ist dieses auf Basis der Kosten- und Nutzwertanalyse auszuwählen.

Um zu überprüfen, ob die Subjektivität bei der Festlegung der einzelnen Gewichtungsfaktoren der Oberziele einen Einfluss auf die Nutzwertanalyse hat, werden den vier Oberzielen verschiedene Gewichtungsfaktoren zugeordnet. Für diese unterschiedlichen Gewichtungsverteilungen wird jeweils der Nutzwert für alle drei Maßnahmenkonzepte berechnet. Voraussetzung ist, dass keines der Oberziele eine Gewichtung kleiner als 10 % erhält, als prozentuale Gewichtungsfaktoren nur natürliche Zahlen verwendet werden und die Summe der Gewichtungsfaktoren aller Oberziele zusammen 100 % ergeben müssen. Unter diesen Voraussetzungen entstehen

39.711 Variationen unterschiedlicher Gewichtungsverteilungen. Anschließend wird überprüft, welcher Nutzwert, bei gleicher Gewichtungsverteilung, der höchste ist. Dabei zeigt sich, dass das Konzept „Sprinkleranlage“ (Konzept SA) bei 94,97 % der Varianten den höchsten Nutzwert aufweist. Abbildung 5.29 zeigt die relativen und absoluten Häufigkeiten für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“, für das Konzept „Brandmeldeanlage“ und für das Konzept „Sprinkleranlage“.

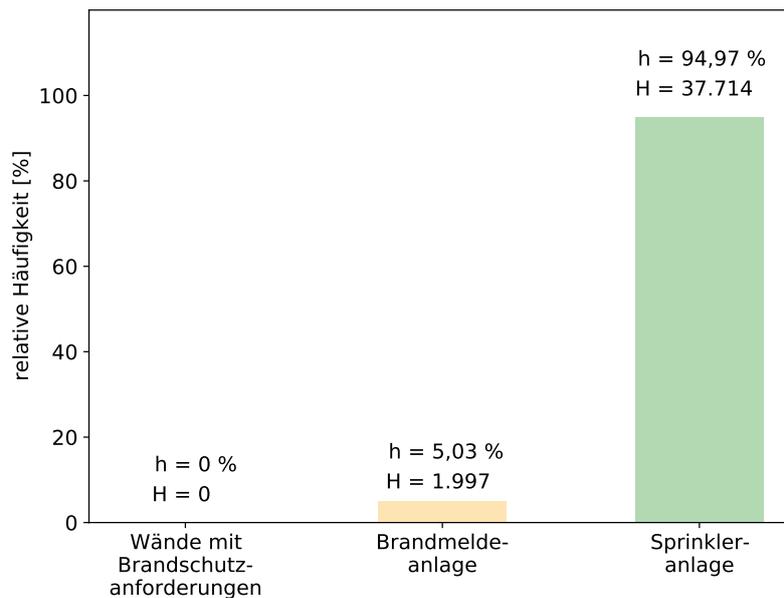


Abbildung 5.29: Darstellung der relativen (h) und absoluten (H) Häufigkeiten der einzelnen Maßnahmenkonzepte (Szenario 1: Tiefgarage)

In Abbildung 5.30 sind die verschiedenen Nutzwerte mit der zugehörigen absoluten Häufigkeit dargestellt. Da die einzelnen Nutzwerte der Maßnahmenkonzepte aufgrund der Gewichtungsverteilungen voneinander abhängig sind und die Gewichtsverteilung in dem Diagramm nicht dargestellt werden, können Mittelwerte miteinander verglichen werden. Für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ ergibt sich ein Mittelwert von 2,05, für das Konzept „Brandmeldeanlage“ ein Mittelwert von 3,00 und für das Konzept „Sprinkleranlage“ ein Mittelwert von 3,33.

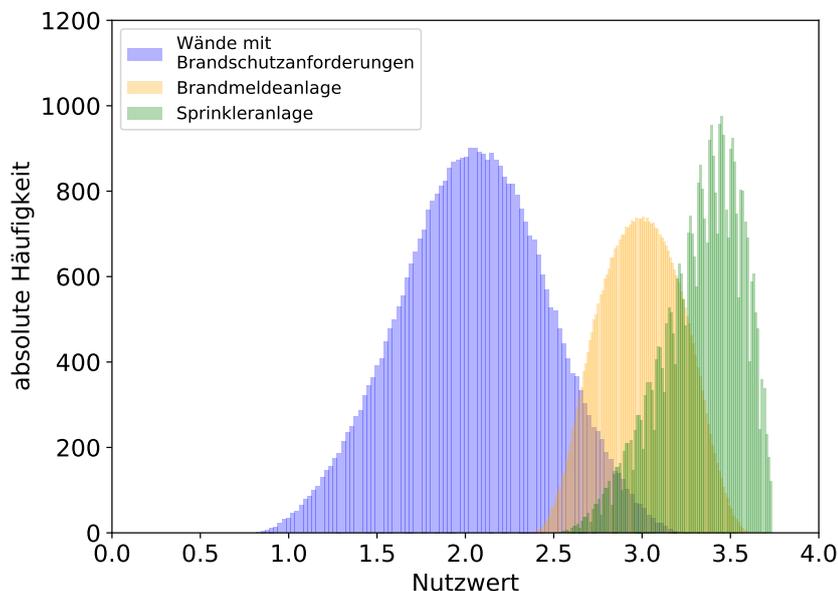


Abbildung 5.30: Darstellung der absoluten Häufigkeiten der Nutzwerte für jedes Maßnahmenkonzept (Szenario 1: Tiefgarage)

Vor diesem Hintergrund ist auch die Verteilung der relativen Nutzwerte zu erklären, da im Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Konzepte bei den bei 94,97 % der Gewichtungverteilungen das Konzept der „Sprinkleranlage“ überwiegt. Die Auswertung hat gezeigt, dass die Nutzwertanalyse bei diesem Szenario mit großer Wahrscheinlichkeit nicht von der subjektiven Festlegung der Gewichtsverteilung der vier Oberziele abhängt.

5.2 Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes

5.2.1 Beschreibung des Szenarios

In dem zweiten Szenario wird eine Etage eines Verwaltungsgebäudes betrachtet. Das Verwaltungsgebäude wird im Gesamten in die Gebäudeklasse 5 eingeordnet. Die betrachtete Etage des Gebäudes ist als eine Nutzungseinheit anzusehen. Die Grundfläche dieser Etage beträgt 447,6 m². Da dies größer als 400 m² ist, erfüllt das Gebäude einen Sonderbautatbestand nach MBO [24, § 2 Abs. 4 Nr. 5]. Die Abbildung 5.31 zeigt den Grundriss der Etage des Verwaltungsgebäudes.

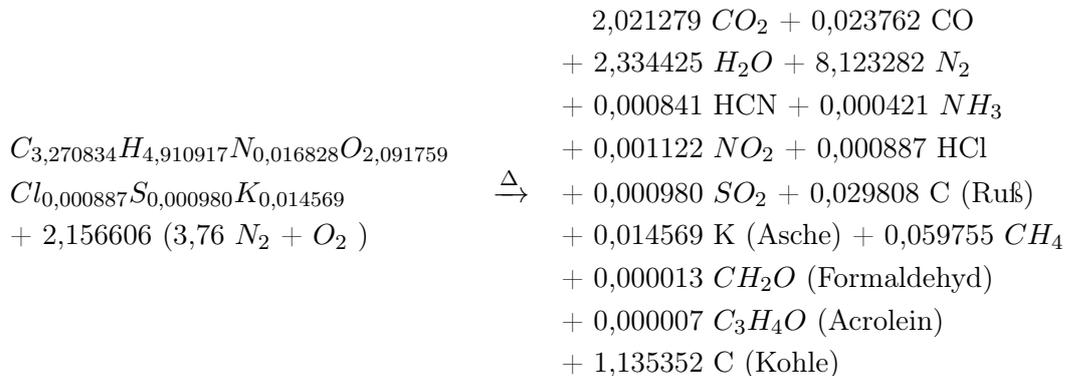
In Tabelle 5.13 sind für jeden Zeitschritt die HRR und die dazugehörigen prozentualen Anteile von der maximalen HRR angegeben. Die maximale HRRPUA für die Brandfläche beträgt $683,59 \text{ kW/m}^2$.

Es wird angenommen, dass die Tür vom Büro zum Flur immer geöffnet ist. Die Fenster im Büro bersten ab einer Temperatur von 600°C und können danach als vollständig geöffnet angesehen werden [237, S. 5]. Die Simulationen werden mit einer Gittergröße von $0,05 \text{ m}$ berechnet.

Tabelle 5.13: Wärmefreisetzungsrate nach Chow für einen Bürobrand [236]

Zeit [s]	HRR [MW]	Prozentualer Anteil [%]
0	0	0
708	1,073	61,31
833	1,750	100
1292	0,500	28,57
1458	0,727	41,54
1875	0,345	19,71
2000	0,618	35,32
3000	0,200	11,43
4250	0,100	5,71

Die Reaktionsgleichung, wird analog zum Vorgehen für das Szenario Tiefgarage, auf Grundlage der Literatur [238–240] und experimentellen Daten [241] ermittelt.



Für die Etage des Verwaltungsgebäudes werden drei Konzepte mit brandschutztechnischen Maßnahmen entwickelt. Eines dieser Konzepte berücksichtigt die baulichen Anforderungen der MBO (Wände mit Brandschutzanforderungen). Das zweite Konzept sieht eine Brandmeldeanlage vor. Der Überwachungsbereich der Brandmeldeanlage umfasst die ganze Etage des Verwaltungsgebäudes und ist auf eine hilfeleistende Stelle aufgeschaltet. Das dritte Konzept basiert auf der Annahme, dass eine vollflächige Sprinkleranlage und eine Brandmeldeanlage, die zu einer hilfeleistenden

Stelle aufgeschaltet ist, installiert wird. Alle drei Konzepte begrenzen sich auf das Gebäudeinnere.

In der betrachteten Etage des Verwaltungsgebäudes gibt es keine Räume, die an einen Raum mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr angrenzen. Daher findet dieses Mittelziel in der Bewertung keine Berücksichtigung. Aufgrund dessen erfolgt auch in diesem Szenario eine prozentuale Neuverteilung der anderen Mittelziele in der Nutzwertanalyse.

Wände mit Brandschutzanforderungen

Das Konzept auf Basis von Wänden mit Brandschutzanforderungen sieht in der Etage zwölf Einzelbüros und sechs Doppelbüros vor. Der Flur wird mit einer Rauchschutztür in zwei Rauchabschnitte getrennt, da die Flurlänge 36,60 m beträgt. In diesem Konzept sind zwei Treppenräume jeweils am Ende des Flures vorhanden mit der Brandschutzanforderung REI-M 90. Dies ist erforderlich zur Einhaltung der maximalen Rettungsweglänge nach MBO. Die einzelnen Vorgaben, die sich an den Brandschutz ergeben, können der Abbildung 5.33 entnommen werden. In den Brandsimulationen wird nicht die ganze Etage simuliert, um Rechenzeit zu sparen. Es wird ein Doppelbüro in dem der Brand stattfindet, der Flur bis zum Rauchabschnitt und der Treppenraum betrachtet. Die Türqualitäten können mittels Brandsimulationen nicht genau abgebildet werden, daher wird der Betrachtungsraum, wie im blauen Kasten dargestellt, simuliert.

Um zu berücksichtigen, dass die flüchtenden Personen Türen öffnen, werden Türöffnungszeiten für die Rauchschutztür zum Treppenraum mittels Räumungssimulationen ermittelt. Diese Zeiten werden der Räumungssimulationen entnommen und in die Brandsimulation überführt.

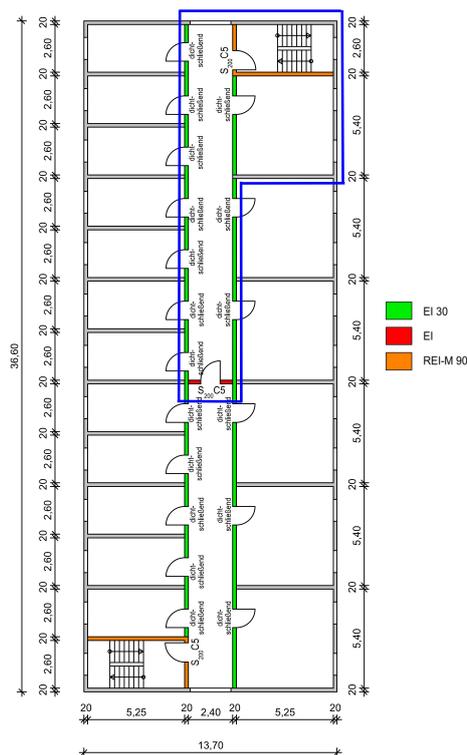


Abbildung 5.33: Darstellung des Maßnahmenkonzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“ für eine Etage eines Verwaltungsgebäudes

Brandmeldeanlage

Durch die Verwendung einer Brandmeldeanlage können die Anforderungen, die sich auf den Rauchabschluss und den Feuerwiderstand beziehen, gesenkt werden. Aufgrund dessen wird die Anforderung an den Treppenraum auf EI 60 reduziert.

Die vorhandene Brandmeldeanlage löst einen frühzeitigen Alarm aus und die Personen im Gebäude werden gewarnt. Durch die Alarmierung kann eine schnellere Evakuierung sichergestellt werden. Aufgrund dessen kann auf einen zweiten baulichen Rettungsweg verzichtet werden und auf die Geräte der Feuerwehr als zweiter Rettungsweg zurückgegriffen werden.

In der Etage wird in jedem Büro ein Brandmelder installiert. Zusätzlich dazu werden im Flur acht und im Treppenraum ein Melder angebracht. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 28 Meldern für die Etage. Abbildung 5.34 zeigt die Anforderungen an den Brandschutz für das Konzept „Brandmeldeanlage“.

Sprinkleranlage

Das Maßnahmenkonzept „Sprinkleranlage“ beruht auf einer Sprinkleranlage und einer Brandmeldeanlage, die von dem ersten Sprinkler ausgelöst wird. Bei diesen Maßnahmen kann ebenso die Anforderungen an den Rauchabschluss sowie an den Feuerwiderstand von Bauteilen herabgesetzt werden. Ebenso wird bei der Sprinkleranlage die Anforderung an die Treppenraumwand herabgesetzt. In diesem Konzept ist ein Feuerwiderstand von EI 30 für die Wand zum Treppenraum notwendig. Es wird eine Nassanlage für eine Brandgefahrenklasse OH 1 ausgewählt. Es werden in der Etage für den Sprinklerschutz insgesamt 55 Sprinkler benötigt. Abbildung 5.35 zeigt die Anforderungen an den Brandschutz für dieses Maßnahmenkonzept. Für dieses Konzept ist der simulierte Bereich größer als für die anderen beiden Maßnahmenkonzepte, da keine zusätzliche Rauchschutztür im Flur vorhanden ist.

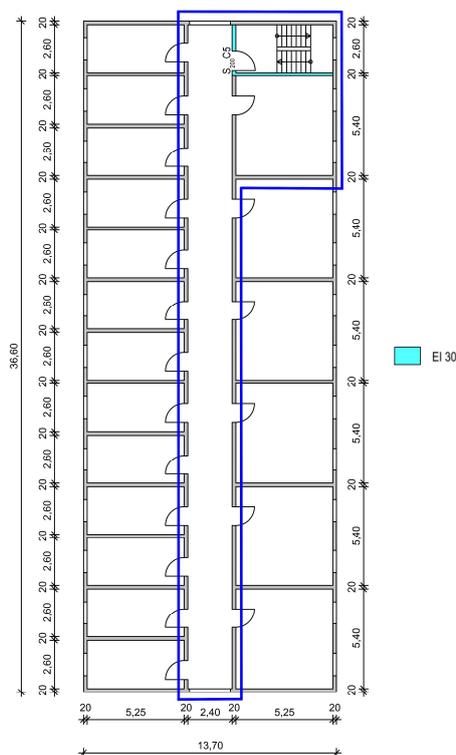


Abbildung 5.35: Darstellung des Maßnahmenkonzeptes „Sprinkleranlage“ für das Szenario Etage eines Verwaltungsgebäudes

Zur Simulation der Sprinkleranlage wird auch in diesem Konzept die Wärmefreisetzungsrate herabgesetzt. Der fünfte Melder löst nach 460,8 Sekunden aus. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Brandkontrolle und die Wärmefreisetzungsrate wird konstant gehalten. Abbildung 5.36 stellt die herabgesetzte Wärmefreisetzungsrate für

das Maßnahmenkonzept „Sprinkleranlage“ dar (rote Kurve (HRR SA)). Die blaue Kurve zeigt die Wärmefreisetzungskurve für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderung“ (HRR WB) und für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (HRR BMA).

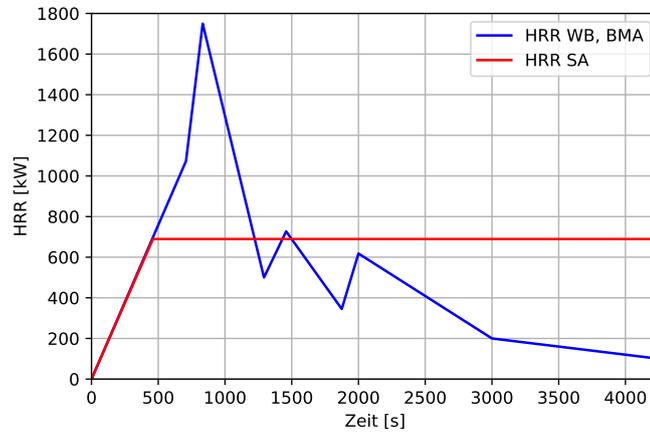


Abbildung 5.36: Wärmefreisetzungskurve für das Verwaltungsgebäude für das Konzept „Sprinkleranlage“ (HRR SA) im Vergleich zu den Konzepten „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (HRR WB) und „Brandmeldeanlage“ (HRR BMA)

Die zusätzlich installierte Brandmeldeanlage löst nach dem Auslösen des ersten Sprinklers die Aufschaltung zur hilfeleistenden Stelle aus. Aufgrund dessen wird auch für dieses Konzept eine kürzere Zeitspanne für die Auswertung berechnet. Eine Darstellung der verwendeten Zeitspanne findet sich in Tabelle 5.15 wieder. Die Türöffnungszeiten werden aus den Räumungssimulationen entnommen und in die Brandsimulation integriert.

Tabelle 5.15: Übersicht der Zeitabschnitte mit jeweiligen Sekunden für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Zeitabschnitt	Zeit [s]	Quelle
Auslösen des ersten Sprinklers	132,0	Simulation
Dispositionszeit	90,0	in Anlehnung an [224, S. 3]
Ausrücke- und Anfahrtszeit	480,0	[224, S. 3]
Erkundungs- und Entwicklungszeit	782,4	[225, S. 73]
Gesamtzeit	1484,4	

5.2.2 Beurteilung der Maßnahmenkonzepte

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Beurteilung der Tiefgarage, erfolgt in diesem Kapitel eine verkürzte Darstellung der Beurteilung der einzelnen Maßnahmenkonzepte für eine Etage eines Verwaltungsgebäudes.

Die Kostenanalyse erfolgt anhand der im Kapitel 3 beschriebenen Methodik und wird auch in tabellarischer Form kurz dargestellt. Es werden die gleichen Randbedingungen wie für das Szenario der Tiefgarage angenommen.

5.2.2.1 Nutzwertanalyse des Konzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“

Ein Teil der Zielerfüllungsgrade für die Nutzwertanalyse für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ wird in den Tabellen 5.16 und 5.17 dargestellt. Die zugehörigen Abbildungen für die Auswertung befinden sich im Anhang E.1. Die fehlenden Unterziele werden nachfolgend erläutert. Aus den Oberzielen werden jeweils die qualitativen und quantitativen Unterziele wie nachfolgend dargestellt.

Für das Unterziel „Brandverhalten von Materialien“ ergibt sich eine sehr hohe Zielerfüllungsgrad, da keine brennbaren Materialien in diesem Konzept vorgesehen sind. Den Unterzielen „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen“ und „Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen“ wird keine Zielerfüllung zugeordnet. Die Tür vom Doppelbüro zum Flur ist als dichtschießende Tür definiert. Diese Türen besitzen keine Feuerwiderstandsdauer. Daher fällt diese in die Kategorie E 0 und I₂ 0.

Das qualitative Unterziel „Unabhängigkeit der Rettungswege“ wird mit einer sehr hohen Zielerfüllung bewertet. Dieses Unterziel erhält den höchsten Zielerfüllungsgrad, da zwei Treppenträume und die Rettungsgeräte der Feuerwehr als Rettungsweg zur Verfügung stehen.

Aus der Auswertung der Räumungssimulation und Brandsimulation resultiert für das Unterziel „Beschränkung der Räumungszeit“ keine Zielerfüllung, da die verfügbare Räumungszeit für dieses Konzept 286 Sekunden und die erforderliche Räumungszeit 318,84 Sekunden beträgt. Daraus ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von 0,90.

Da in diesem Konzept keine Brandmeldeanlage für die Alarmierung der anwesenden Menschen und keine Sprinkleranlage zur Ermöglichung schneller Löschmaßnahmen vorgesehen ist, wird dem Unterziel „Frühzeitige Alarmierung“ und dem Unterziel „Wirksamwerden erster Löschmaßnahmen“ keine Zielerfüllung zugewiesen.

Tabelle 5.16: Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Maßnahmenkonzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“ für das Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Mittelziel	Unterziel	Zielerfüllungsgrad	Abb. / Tab.
Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum	Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i → o)	4	Abb. E.1, E.2
Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum	Einhaltung des Raumabschlusses von Umfassungsbauteilen exklusive Abschlüsse von Öffnungen	4	Abb. E.1, E.2
Beschränkung der Großflächigkeit	Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600 \text{ °C}$	4	Abb. E.3, E.5, E.4, E.6
	Gewährleistung geringer Rauchausbreitung	0	Tab. E.1

Tabelle 5.17: Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“ für das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Mittelziel	Unterziel	Zielerfüllungsgrad	Tab.
Rauchfreiheit der Flure	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	1	E.2
Rauchfreiheit der Treppenträume	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	1	E.3

5.2.2.2 Kostenanalyse des Konzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“

Für das Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ ergeben sich Brutto-Bauwerkskosten von 33.847,88 €. Diese setzen sich zusammen aus den Kosten für die Brandwand im Treppenraum, den Wänden zwischen den Büros und dem Flur, der Wand zur Ausbildung des Rauchabschnittes und den jeweiligen Türen. Zusätzlich dazu werden die Kosten für einen Treppenraum mit Handlauf, Treppe und Treppenpodest berücksichtigt. Es werden die Kosten nur für einen Treppenraum mit eingerechnet, da der zweite aus Nutzungsgründen vorhanden ist. Außerdem werden die Kosten für die Deckenaussparung die durch den zusätzlichen Treppenraum entstehen abgezogen.

Allen Kostenberechnungen liegt als Betrachtungszeitpunkt Januar 2018 und eine Nutzungsdauer von 19 Jahren zu Grunde. Dies ist auf Grundlage von Offergeld festgelegt, dieser gibt eine mittlere empirische Nutzungszykusdauer von 19 Jahren an [142]. Die Gesamtkosten für die Instandhaltung brandschutztechnischer Maßnahmen belaufen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt auf 16.129,53 €. Auf das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ fallen keine Fachplanungskosten für technische Ausrüstungen an.

Als weitere Kostenposition wird die Kaltmiete von einem Büro betrachtet. Durch das Vorhandensein von zwei Treppenträumen im Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“, im Gegensatz zu den anderen zwei Konzepten mit jeweils nur einem Treppenraum, werden in den Gesamtkosten auch Kosten für den Ausfall von Miete für einen zusätzlichen Treppenraum berechnet. Die Netto-Kaltmiete (Einzug im Jahr 2015 oder später) beträgt 7,70 €/m² [242]. Die Fläche, welche vermietet werden könnte, beträgt 13,65 m². Daraus ergibt sich eine Netto-Kaltmiete von 23.346,15 € über eine Nutzungszyklusdauer von 19 Jahren. Da auch die Fläche im Erdgeschoss für ein Büro wegfällt, werden auch dafür Mietkosten angesetzt. Somit entstehen Netto-Kaltmieten für dieses Maßnahmenkonzept von 46.692,29 € (Brutto-Kaltmiete: 55.563,83 €).

Insgesamt ergeben sich für dieses Konzept über einen Nutzungszyklus Gesamtkosten in Höhe von 106.132,34 €. Tabelle 5.18 zeigt die einzelnen Kostenpositionen für dieses Maßnahmenkonzept.

Tabelle 5.18: *Kostenanalyse für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)*

Wände mit Brandschutzanforderungen	
Bauwerkskosten (Netto):	28.443,60 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Netto):	588,00 €
Bauwerkskosten (Brutto):	33.847,88 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Brutto):	699,72 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Netto):	496,72 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Brutto):	591,09 €
anrechenbare Kosten Fachplanung:	0,00 €
Fachplanungskosten (Netto):	0,00 €
Fachplanungskosten (Brutto):	0,00 €
Instandhaltungskosten (Netto):	13.554,23 €
Instandhaltungskosten (Brutto):	16.129,53 €
Kaltmiete über einen Nutzungszyklus (Netto):	46.692,29 €
Kaltmiete über einen Nutzungszyklus (Brutto):	55.563,83 €
Gesamtkosten (Netto):	89.186,842 €
Gesamtkosten (Brutto):	106.132,34 €

5.2.2.3 Nutzwertanalyse des Konzeptes „Brandmeldeanlage“

Tabelle 5.19 und Tabelle 5.20 stellen einen Teil der Zielerfüllungsgrade für das Maßnahmenkonzept „Brandmeldeanlage“ dar. Die verwendeten Auswertungen befinden sich im Anhang E.2. Die fehlenden Unterziele werden nachstehend erläutert. Ebenso wie beim Maßnahmenkonzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ sind auch in diesem Konzept keine brennbaren Materialien vorgesehen. Daher wird dem Unterziel „Verwendung nicht brennbarer Materialien“ eine sehr hohe Zielerfüllung zugeordnet. Die Türen von den Büros zum Flur werden auch in diesem Konzept als dichtschießende Türen ausgewählt. Daher resultiert auch hier für die Unterziele „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen“ und „Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen“ keine Zielerfüllung.

Dem Unterziel „Unabhängigkeit der Rettungswege“ wird eine mittlere Zielerfüllung zugewiesen, da ein baulicher Rettungsweg (Treppenraum) und die Rettung über die Geräte der Feuerwehr vorgesehen sind. Die Kapazitäten der Geräte der Feuerwehr sind jedoch beschränkt, aufgrund dessen ergibt sich eine mittlere Zielerfüllung.

Aus der verfügbaren Räumungszeit von 255 Sekunden und der erforderlichen Räumungszeit von 43,01 Sekunden ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von 5,93. Daher wird das Unterziel „Beschränkung der Räumungszeit“ mit einer sehr hohen Zielerfüllung bewertet. Die vorhandene Brandmeldeanlage ist zur hilfeleistenden Stelle aufgeschaltet. Daraus resultiert für das Unterziel „Frühzeitige Alarmierung“ eine sehr hohe Zielerfüllung.

Das qualitative Unterziel „Wirksamwerden erster Löschmaßnahmen“ wird aufgrund der Aufschaltung zur hilfeleistenden Stelle mit einer mittleren Zielerfüllung bewertet.

Tabelle 5.19: Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Brandmeldeanlage“ für das Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Mittelziel	Unterziel	Zielerfüllungsgrad	Abb. / Tab.
Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum	Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i → o)	4	Abb. E.19, E.20
Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum	Einhaltung des Raumabschlusses von Umfassungsbauteilen exklusive Abschlüsse von Öffnungen	4	Abb. E.19, E.20
Beschränkung der Großflächigkeit	Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600 \text{ °C}$	4	Abb. E.21, E.23, E.22, E.24
	Gewährleistung geringer Rauchausbreitung	0	Tab. E.4

Tabelle 5.20: Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Brandmeldeanlage“ für das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Mittelziel	Unterziel	Zielerfüllungsgrad	Tab.
Rauchfreiheit der Flure	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	1	E.5
Rauchfreiheit der Treppenträume	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	1	E.6

5.2.2.4 Kostenanalyse des Konzeptes „Brandmeldeanlage“

Zur Sicherstellung des Brandschutzes mit dem Maßnahmenkonzept „Brandmeldeanlage“ werden Brutto-Bauwerkskosten von 40.952,07 € und Brutto-Fachplanungskosten von 8.606,59 €, welche zusammen die Brutto-Herstellungskosten von 49.558,66 € ergeben, veranschlagt. Die Brutto-Bauwerkskosten setzen sich zusammen aus den Kosten für die Wände, die Türen, den Treppenraum, die Brandschutzabschottungen, die Brandklappen und den Rohrschotts. Außerdem werden Kosten für die Brandmeldeanlage (Wärmemelder, Sirene, Infrastruktur und Schlüsseldepot) mit betrachtet. Die Fachplanungskosten werden mit den Leistungsphasen 1 bis 8 der HOAI (Honorarsatz 99 %), wie im Szenario der Tiefgarage, berechnet. Die anrechenbaren Kosten für das Maßnahmenkonzept belaufen sich auf 14.200,60 €.

Neben den Brandschutzabschottungen und den Rohrschotts haben auch alle 28 Wärmemelder nach 15 Jahren ihre maximale Lebensdauer erreicht. Daher belaufen sich die Brutto-Erneuerungskosten auf 4.772,37 €. Die mithilfe der Bauwerkskosten ermittelten Instandhaltungskosten betragen 19.379,27 €. Aus der Addition der einzelnen Kostenpositionen ergeben sich die Gesamtkosten von 73.709,30 € für dieses Maßnahmenkonzept. Die Tabelle 5.21 führt die einzelnen Kostenpositionen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ tabellarisch auf.

Tabelle 5.21: Kostenanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Brandmeldeanlage	
Bauwerkskosten (Netto):	34.413,50 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Netto):	4.747,40 €
Bauwerkskosten (Brutto):	40.952,07 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Brutto):	5.649,41 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Netto):	4.010,39 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Brutto):	4.772,37 €
anrechenbare Kosten Fachplanung:	14.200,60 €
Fachplanungskosten (Netto):	7.232,43 €
Fachplanungskosten (Brutto):	8.606,59 €
Instandhaltungskosten (Netto):	16.284,26 €
Instandhaltungskosten (Brutto):	19.379,27 €
Gesamtkosten (Netto):	61.940,59 €
Gesamtkosten (Brutto):	73.709,30 €

5.2.2.5 Nutzwertanalyse des Konzeptes „Sprinkleranlage“

Die Nutzwertanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“ erfolgt auf die selbe Weise wie die Bewertung der anderen Konzepte. Daher wird auch hier auf eine umfassende Darstellung und Erläuterung verzichtet. In den Tabellen 5.22 und 5.23 sind die Zielerfüllungsgrade der quantitativen Unterziele aufgeführt. Die zugehörigen Abbildungen finden sich im Anhang E.3 wieder. Die fehlenden Unterziele werden nachfolgend beschrieben.

Dem Unterziel „Brandverhalten von Materialien“ wird aufgrund der Nichtverwendung von brennbaren Materialien eine sehr hohe Zielerfüllung zugewiesen.

Für die Unterziele „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i → o)“ und „Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen“ ergeben sich keine Zielerfüllungen, da keine Anforderungen an die Türen bestehen. Wie auch im Konzept „Brandmeldeanlage“ steht in diesem Konzept nur ein baulicher Rettungsweg zur Verfügung und als zweiten Rettungsweg werden die Geräte der Feuerwehr genutzt. Aufgrund dessen ergibt sich für das Unterziel „Unabhängigkeit der Rettungswege“ eine mittlere Zielerfüllung.

Die verfügbare Räumungszeit für dieses Konzept beträgt 448 Sekunden und die erforderliche Räumungszeit 37,12 Sekunden. Daraus ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von 12,07. Aus der Auswertung der Räumungs- und der Brandsimulation resultiert

für das Unterziel „Beschränkung der Räumungszeit“ eine sehr hohe Zielerfüllung. Eine sehr hohe Zielerfüllung ergibt sich ebenfalls für das Unterziel „Frühzeitige Alarmierung“, da die Sprinkleranlage beim Auslösen eine Brandmeldeanlage ansteuert und diese zur hilfeleistenden Stelle aufgeschaltet ist. Durch das Vorhandensein einer Sprinkleranlage ergibt sich auch für das Unterziel „Wirksamwerden erster Löschnmaßnahmen“ eine sehr hohe Zielerfüllung.

Tabelle 5.22: Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Sprinkleranlage“ für das Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Mittelziel	Unterziel	Zielerfüllungsgrad	Abb. / Tab.
Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum	Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände ($i \rightarrow o$)	4	Abb. E.37, E.38
Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum	Einhaltung des Raumabschlusses von Umfassungsbauteilen exklusive Abschlüsse von Öffnungen	4	Abb. E.37, E.38
Beschränkung der Großflächigkeit	Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600 \text{ °C}$	4	Abb. E.39, E.41, E.40, E.42
	Gewährleistung geringer Rauchausbreitung	0	Tab. E.7

Tabelle 5.23: Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Sprinkleranlage“ für das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Mittelziel	Unterziel	Zielerfüllungsgrad	Tab.
Rauchfreiheit der Flure	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	1	E.8
Rauchfreiheit der Treppenträume	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	1	E.9

5.2.2.6 Kostenanalyse des Konzeptes „Sprinkleranlage“

Die Brutto-Herstellungskosten für das Maßnahmenkonzept „Sprinkleranlage“ betragen 94.096,30 €. Diese setzen sich zusammen aus den Brutto-Bauwerkskosten von 66.972,13 € und den Fachplanungskosten von 27.124,17 €. Die Bauwerkskosten setzen sich zusammen aus den Kosten für die Wände, die Türen, den Treppenraum, die Brandklappen, den Rohrschotts, die Brandschutzabschottungen, die Sprinkleranlage (Sprinkler, Infrastruktur, Wassertank) sowie die Brandmeldeanlage (Sirene, Infrastruktur, Schlüsseldepot). Die anrechenbaren Kosten für die Berechnung der Fachplanungskosten belaufen sich auf 52.846,85 €. Für die Instandhaltung werden Kosten von 31.933,71 € angesetzt. Aus der Berechnung aller Kostenpositionen resultieren Brutto-Gesamtkosten in Höhe von 126.621,10 €. Eine Auflistung aller mit dem Konzept verbundenen Kosten findet sich in Tabelle 5.24 wieder.

Tabelle 5.24: Kostenanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Sprinkleranlage	
Bauwerkskosten (Netto):	56.279,10 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Netto):	588,00 €
Bauwerkskosten (Brutto):	66.972,13 €
davon Bauwerkskosten mit Erneuerungsbedarf nach 15 Jahren (Brutto):	699,72 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Netto):	496,72 €
Barwert Erneuerungsbedarf (Brutto):	591,09 €
anrechenbare Kosten Fachplanung:	52.846,85 €
Fachplanungskosten (Netto):	22.793,42 €
Fachplanungskosten (Brutto):	27.124,17 €
Instandhaltungskosten (Netto):	26.835,05 €
Instandhaltungskosten (Brutto):	31.933,71 €
Gesamtkosten (Netto):	106.404,29 €
Gesamtkosten (Brutto):	126.621,10 €

5.2.2.7 Kosten- und Nutzwertanalyse für das Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes

Um einen Vergleich der einzelnen Konzepte untereinander zu ermöglichen, werden die jeweiligen Kosten mit dem zugehörigen Nutzwert verrechnet. Das niedrigste Kosten-Nutzen-Verhältnis ist maßgebend. Tabelle 5.25 zeigt die Übersicht der Kosten und des Nutzwertes für alle drei Maßnahmenkonzepte für das Verwaltungsgebäude.

Tabelle 5.25: Kosten- und Nutzwertanalyse für das Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes

Konzept Analyse	Wände mit Brandschutzan- forderungen	Brandmeldeanlage	Sprinkleranlage
Gesamtkosten [€]	106.132,34	73.709,30	126.621,10
Nutzwert [-]	1,88	2,86	3,16
Kosten-Nutzen- Verhältnis [€]	56.453,37	25.772,48	40.069,97
Rang	3	1	2

Der Vergleich aller drei Maßnahmenkonzepte zeigt, dass sich der Nutzwert erheblich unterscheidet. Die Konzepte erfüllen nicht in gleich hohem Maße die Schutzziele der MBO. Der Nutzwert für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ beträgt 1,88 und ist der ungünstigste der drei analysierten Konzepte. Die Konzepte „Brandmeldeanlage“ und „Sprinkleranlage“ weisen einen Nutzwert von 2,86 und 3,16 auf.

Die Gesamtkosten der drei Konzepte unterscheiden sich auch bei diesem Szenario sehr stark. Für das Konzept „Brandmeldeanlage“ ergeben sich die niedrigsten Gesamtkosten. Darauf folgt das Konzept „Sprinkleranlage“ und, mit den höchsten Gesamtkosten, das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“. Das Konzept „Brandmeldeanlage“ hat das bevorzugte Kosten-Nutzen-Verhältnis, wobei das Konzept „Sprinkleranlage“ um den Faktor 1,55 höher liegt. Auf dem dritten Rang befindet sich das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ mit einem Faktor von 2,19. Abschließend ist das Konzept „Brandmeldeanlage“ auf Basis der durchgeführten Analyse auszuwählen.

Zur Beurteilung der festgelegten Gewichtung der Oberziele wird auch in diesem Szenario der Einfluss der Gewichtungsverteilung auf die Nutzwertanalyse überprüft. Dabei hat sich ergeben, dass das Konzept Sprinkleranlage zu 100 %, unabhängig von der Gewichtungsverteilung, den höchsten Nutzwert mit sich bringt. Abbildung E.55 im Anhang zeigt die relativen und absoluten Häufigkeiten der einzelnen Maßnahmenkonzepte für die Etage eines Verwaltungsgebäudes.

Aus der Ermittlung der absoluten Häufigkeiten der Nutzwerte für jedes Maßnahmenkonzept resultieren die Mittelwerte 1,8 für Konzept „Wände mit Brandschutzanforderung“ (Konzept WB), 2,73 für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Konzept BMA) und 3,22 für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Konzept SA). In diesem Szenario ist die Nutzwertanalyse zu 100 % nicht von der subjektiven Festlegung der Gewichtungsverteilung abhängig. Abbildung E.56 im Anhang stellt die absoluten Häufigkeiten der Nutzwerte für die verschiedenen Maßnahmenkonzepte für die Etage eines Verwaltungsgebäudes dar.

6 Diskussion

Wird das System des vorbeugenden Brandschutzes in Deutschland betrachtet, fällt auf, dass es derzeit kein einheitliches, strukturiertes und kriteriengeleitetes Verfahren zur Bewertung alternativer brandschutztechnischer Maßnahmen gibt. Aufgrund dessen wird in dieser Arbeit ein Verfahren zur Berechnung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses von brandschutztechnischen Maßnahmen entwickelt. Um dieses Verfahren aufzustellen wird eine Methode für die Kostenabschätzung und für die Nutzwertanalyse angewendet. Bei der Anwendung der Kosten- und Nutzwertanalyse auf die beiden Szenarien stellt sich heraus, dass dieses Verfahren teilweise mit Unsicherheiten bzw. Ungenauigkeiten aufgrund fehlender konkreter Anwendungsbeispiele verbunden ist. Daher dient dieses lediglich für eine Abschätzung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses von brandschutztechnischen Maßnahmen.

Zur Kostenkalkulation sind vielfältige Kostenpositionen zusammenzutragen, jedoch sind nicht alle Kennwerte präzise zu ermitteln. Mithilfe von statistischen Kostenkennwerten des BKI ist es zumeist einfach Bauwerkskosten für Standardbauteile zu bestimmen. Problematisch hingegen ist die Ermittlung der Baukostenkennwerte für Bauteile, die nicht so weit verbreitet und kaum Relevanz haben, da für diese keine statistischen Kostenkennwerte in der Literatur zu finden sind. Daher kann bei Berücksichtigung umfangreicher, nicht auf Grundlage statistisch abgesicherter Kostenkennwerte eine große Abweichung von den wirklichen Kosten gegeben sein. Weiterhin ist die Unterscheidung, ob ein Bauteil aus architektonischen oder brandschutztechnischen Gründen eingebaut wird, sehr schwierig und kann zu Ungenauigkeiten des Verfahrens führen. Jedoch muss diese Unterscheidung durchgeführt werden, damit die Kosten, die ausschließlich auf den Brandschutz entfallen, ermittelt werden können. Hingegen lassen sich die Fachplanungskosten mit den zur Verfügung stehenden Kennwerten der HOAI für technische Ausrüstungen einfacher abschätzen.

Weiterhin ist die Anwendung des Verfahrens zur Ermittlung der Instandhaltungskosten von technischen Anlagen in öffentlichen Gebäuden auf die Ermittlung der Instandhaltungskosten von brandschutztechnischen Maßnahmen mit einer großen Unsicherheit behaftet. Es ist zu beachten, dass sich dieses Verfahren nur auf standardisierte bautechnische Lösungen übertragen lässt. Problematisch wird es bei

architektonischen Besonderheiten. Diese weisen meist hohe Herstellungskosten auf, wodurch das Verhältnis zu den Instandhaltungskosten verändert wird.

Weitere Ungenauigkeiten ergeben sich bei den Kostenpositionen für den vermietbaren Raum, die nicht allgemein für Deutschland ermittelt werden können, da diese ortsabhängig sind. Daher werden in dieser Arbeit gemittelte Kostenposition für Deutschland verwendet. Bei der Berechnung des vermietbaren Raums müsste grundsätzlich auch der Platzbedarf für die Anlagentechnik berücksichtigt werden, welcher bei Konzepten mit einer Sprinkleranlage und Brandmeldeanlage auftritt. In dieser Arbeit wird angenommen, dass sich die Anlagentechnik im Keller befindet und diese Räume nicht einzeln vermietet werden. Die Mieteinnahmen beziehen sich im Kontext der Gesamtkosten auf eine minimale Kostenposition und sind dementsprechend zu vernachlässigen.

Des Weiteren fehlt ein Verfahren zur Bestimmung der Rabattierung von Prämien der Feuer- und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherungen. Für die Kostenkalkulation müssten die Prämien der Feuer- und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherungen berücksichtigt werden. Die „Unverbindlichen Netto-Prämienrichtlinien für die Industrie-Feuer und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung“ (Feuer/FBU) haben eine pauschale Rabattierung von brandschutztechnischen Maßnahmen vorgesehen. Diese Empfehlungen sind vom GDV zurückgenommen worden und in den neuen Empfehlungen sind keine pauschalen Rabattierungen mehr enthalten. Das Problem könnte in einem konkreten Anwendungsfall für die Auswahl einer Projektalternative entfallen, da die Kalkulation bei den Versicherern angefragt werden kann.

Ein zweiter Schwerpunkt in der Kostenkalkulation ist die Bestimmung des zu betrachtenden Zeitraumes für brandschutztechnische Maßnahmen. Dabei ist es notwendig, die Definition der Begriffe Nutzungsdauer, Nutzungszyklus und Nutzungsart zu beachten.

Die Festlegung der Nutzungsdauer hat einen großen Einfluss auf die Betrachtung der zu berücksichtigenden Erneuerungskosten am Ende der Lebensdauer einzelner Komponenten. Auch die Verwendung der Lebensdauerangaben von Bauteilen ist mit Problemen behaftet, weil diese lediglich auf statistischen Daten beruhen. Dies kann dazu führen, dass Elemente früher ausfallen oder über die Lebensdauer hinaus verwendet werden.

Für die Nutzungsdauer, die der Instandhaltungsbudgetierung zu Grunde liegt, wird im Rahmen dieser Arbeit der Nutzungszyklus verwendet. Jedoch unterscheiden sich nach Offergeld die Nutzungsdauern für Gebäude in der Literatur von der in der Realität. Es wird sich dennoch für das Konzept des Nutzungszykluses als Zeitspanne entschieden, da mit einer Nutzungsänderung in jedem Fall auch eine Neubewertung der brandschutztechnischen Maßnahmen erforderlich ist. Weiterhin sind Beginn und Ende eines Nutzungszyklus klar definiert und im Vorhinein abschätzbar. Entscheidend für die Berechnung der Instandhaltungskosten ist die Wahl der Nutzungsdauer. Je nach angenommener Nutzungsdauer müssen Bauteile früher erneuert werden und die Kosten für ein Konzept können somit höher ausfallen. Die entwickelte Kosten- und Nutzwertanalyse ist für eine Nutzungsart aufzustellen, sodass diese Analyse neu aufgestellt werden muss, wenn sich die Nutzungsart verändert. Durch die Nutzungsänderung können auch andere brandschutztechnische Maßnahmen maßgebend werden. Durch die Verwendung des Nutzungszykluses als Betrachtungszeitraum ist dieses Problem abgedeckt.

Für die Bestimmung des Nutzwertes wird im Rahmen dieser Arbeit eine Nutzwertanalyse entwickelt. Die Anwendung dieser Nutzwertanalyse ist für ein möglichst objektives Ergebnis anhand eines konkreten Anwendungsfalls durchzuführen. Die in dieser Arbeit verwendete schutzzielbasierte Nutzwertanalyse stellt nur zu Teilen einen quantitativen Analyseansatz dar. Da Teilaspekte qualitativ bewertet werden müssen, kann je nach Anwender ein anderer Nutzwert ermittelt werden. In dieser Arbeit ist es nicht möglich gewesen, die qualitativen Schutzziele durch quantitative zu ersetzen, da diese Unterziele nur anhand eines konkreten Beispiels ausgewertet werden können, welches hier nicht gegeben wird. Grundsätzlich sollten für die Anwendung der Analyse an einem konkreten Beispiel die qualitativen Aspekte durch quantitative Aspekte ersetzt werden, sodass eine Absicherung durch messbare Indikatoren oder Wirksamkeitsmaße gegeben ist. Dadurch wird der Einfluss der subjektiven Entscheidungsfindung minimiert.

Die Nutzwertanalyse kann nicht angewendet werden, bevor konkrete Maßnahmenkonzepte für den Anwendungsfall aufgestellt worden sind. Das bedeutet, dass alle alternativen Maßnahmenkonzepte vollständig geplant werden müssen, wodurch zusätzlicher Zeitaufwand und Kosten entstehen.

Neben dem konkreten Anwendungsfall führt die subjektive Zuordnung der Gewichtungsfaktoren in der Nutzwertanalyse zu unterschiedlichen Ergebnissen. In dieser Arbeit wird dem Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ die höchste Gewichtung zugeordnet. Da die öffentliche Sicherheit und

Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen nicht gefährdet werden darf und die Kernforderung der MBO darstellt. Für die weiteren Oberziele wird die Fortentwicklung eines Brandes als Grundlage für die Verteilung der Gewichtungsfaktoren gewählt.

Bereits in der Auswertung der zwei Szenarien wird der Einfluss der Gewichtungsverteilungen auf die Nutzwertanalyse untersucht. Die Betrachtung umfasst bisher nur die Verteilung der vier Oberziele. Um die gesamte Nutzwertanalyse zu objektivieren, müsste diese Überprüfung auf alle Mittel- und Unterziele angewendet werden.

Eine andere Möglichkeit als die vorgestellte Entscheidung der Gewichtung wäre, Befragungen durchzuführen, wie die Gewichtung der Oberziele für andere Personen ausfällt. Jedoch wird dieser Ansatz in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, da der Fokus auf der Entwicklung eines Gesamtsystems liegt, bei der die Gewichtung jederzeit anpassbar ist.

Zur Anwendung der Nutzwertanalyse ist es notwendig verschiedene Szenarien aufzustellen. Da es kein etabliertes Verfahren für brandschutztechnische Maßnahmen gibt, wird in dieser Arbeit ein Verfahren neu entwickelt. Dabei ist kritisch zu betrachten, dass dieses lediglich auf zwei Szenarien angewendet wird und dadurch Ungenauigkeiten akzeptiert werden müssen. Um das Verfahren an heterogenen Immobilien anwenden zu können, muss die Nutzwertanalyse anhand einer größeren Anzahl von verschiedenen Gebäudetypen weiter entwickelt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Auswahl relevanter Szenarien konservative Ansätze im Sinne von „worst case“ Szenarien verfolgt. Problematisch ist, dass immer vom schlechtesten Fall und ungünstigsten Ereignis ausgegangen wird, was nicht der Realität entspricht. Jedoch wird damit eine größere Sicherheit für die Analyse mit eingerechnet. Anwendungsszenarien und -bedingungen müssen in FDS validiert werden, um Unsicherheiten zu vermeiden. Für den Brand in der Tiefgarage und im Verwaltungsgebäude gibt es keine Validierungsbeispiele, daher sind diese Simulationen mit Unsicherheiten behaftet. Bei der Auswahl der Szenarien sind dennoch diese Gebäude ausgewählt worden, da alle drei Maßnahmenkonzepte denkbar aufzustellen sind, um das Verfahren möglichst realistisch zu entwickeln.

Für eine objektive Nutzwertanalyse sind FDS-Simulationen notwendig, um möglichst präzise Daten zu erhalten. Jedoch sind bei der Erstellung von Simulationen Annahmen zu treffen, die auf Erfahrungswerten z. B. aus der Literatur beruhen.

Simulationen von Bränden sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Der Real-

brandverlauf ist in der Regel unbekannt. So können bei der Erstellung von Verbrennungsreaktionen mit komplexen chemischen Prozessen Unsicherheiten resultieren. Bei der Berechnung gleicher Versuche können die Ergebnisse sogar stark variieren. Unsicherer werden die Berechnungen, wenn für die Materialien, die bei einem Brand an der Verbrennung mitwirken, nur unzureichende Daten über die Verbrennungseigenschaften bekannt sind. [243, S. 1]

Bei der Simulation der Tiefgarage wird davon ausgegangen, dass der Brand von einem Fahrzeug ausgeht und lediglich ein weiteres daneben steht. Andere Ergebnisse würden sich ergeben, wenn ein Brand mit mehreren Fahrzeugen simuliert wird. Zur Implementierung des Brandes der Tiefgarage werden Vereinfachungen getroffen. Es wird die Brandkurve nach Schleich [129, S. 30] in FDS eingesetzt. Diese Veröffentlichung ist allerdings aus dem Jahr 1999. Die Fahrzeuge und deren Materialien haben sich in den letzten Jahren verändert [244, S. 16], daher ist fraglich, ob diese Brandkurve noch zeitgemäß ist. In diesem praktischen Beispiel führt es dazu, dass der Brand eher unterschätzt wird. Es ist davon auszugehen, dass eine höhere Rauchentwicklung entsteht. Diese Brandkurve ist trotzdem verwendet worden, da diese weitverbreitet ist und eine breite Akzeptanz in der Fachwelt findet [202, 203, 206]. Auch zur Simulation des Brandes in dem Verwaltungsgebäude sind zur Implementierung Vereinfachungen getroffen worden. Es wird die Wärmefreisetzungskurve von Chow verwendet. Chow betrachtet in seinem Experiment einen Stuhl, einen Schreibtisch, Papiere sowie Bücher auf dem Schreibtisch, einen Computer und einen Schrank. [236, S. 3-4] Die Wärmefreisetzungskurve ist abhängig von den gewählten Gegenständen und kann sich aufgrund dessen von anderen gemessenen Wärmefreisetzungsraten unterscheiden.

Eine weitere Unsicherheit stellt die Implementierung der Reaktionsgleichung in FDS für beide Szenarien dar. Diese Gleichungen sind eine Vereinfachung auf Basis von Literaturwerten sowie experimentellen Daten und bilden nicht ansatzweise alle in einem Brand auftretenden Prozesse ab.

Außerdem ist die Implementierung der Sprinkleranlage in FDS mit Unsicherheiten behaftet. Die Simulation der Sprinkleranlage in beiden Szenarien bildet eine Brandkontrolle ab. Die Wärmefreisetzungskurve wird nach dem Auslösen des fünften Sprinklers herabgesetzt und konstant gehalten. Nach Bittern unterscheiden sich die simulierten Temperaturen in FDS zu denen im Experiment anhand von Stuhlbränden gemessenen Temperaturen um 20 %. [245, S. 134] Aufgrund dessen sind die gemessenen Temperaturen und die Auslösezeit in FDS mit Unsicherheiten behaftet. Es wird der fünfte Sprinkler gewählt, weil dies nach Frank et al. [223, S. 14] 95 % der Brände abbildet und es damit eine hinreichende Abdeckung der zu

betrachtenden Fälle berücksichtigt. Sollten spezifischere Daten vorliegen, sind diese heranzuziehen.

Nach der Erstellung der Simulation erfolgt die Auswertung der gewonnenen Daten für die Nutzwertanalyse. Dazu werden Annahmen getroffen, um die Daten entsprechend der alternativen Maßnahmenkonzepte auszuwerten. In den Maßnahmenkonzepten „Brandmeldeanlage“ und „Sprinkleranlage“ ist eine Annahme die Verkürzung der Auswertungszeit. Dies soll das Auslösen des Alarms und dadurch das Eintreffen der Feuerwehr abbilden. Die Gesamtzeit wird aus dem Auslösen des ersten Melders oder Sprinklers, der Dispositionszeit, der Ausrücke- und Anfahrtszeit, sowie der Erkundungs- und Entwicklungszeit berechnet. Diese Angaben sind aus der Literatur entnommen, jedoch sind diese Werte standortabhängig und werden durch die Leistungsfähigkeit der Feuerwehr bestimmt. Sollten ortsabhängige Daten im Feuerwehrbedarfsplan angegeben sein, sind diese zu verwenden.

Für die Auswertung des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“, der Mittelziele „Rauchfreiheit der Flure“ und „Rauchfreiheit der Treppenträume“ wird eine Auswertungshöhe von 1,85 m angenommen. Dies resultiert aus dem 95. Perzentil der Augenhöhe von Männern in einem Alter zwischen 18 und 65 Jahren und einem Faktor für schnelles Gehen und Laufen. Die angenommene Auswertungshöhe bildet jedoch einen Großteil der Bevölkerung ab. Zudem kommt, dass für alle Personen die kleiner als 1,85 m sind, Werte mit höherer Sicherheit angenommen werden. Die jeweiligen Auswertungen der Unterziele sind anhand von Flächenanteilen auf dieser Höhe ausgewertet. Es findet aufgrund der Umsetzbarkeit keine Betrachtung der Fluchtwege einzelner Personen statt.

Im Szenario des Verwaltungsgebäudes werden verschiedene Türöffnungszeiten zum Treppenraum betrachtet. Diese simulieren das Flüchten der Personen und verändern die Ventilationsbedingungen im Gebäude. Diese Türöffnungszeiten sind aus Räumungssimulationen entnommen worden. Auch Räumungssimulationen müssen validiert werden, jedoch gibt es für diese Szenarien keine Validierungsbeispiele.

Die Annahme, dass die Fenster im zweiten Szenario bersten, beruht auf Daten aus der Literatur [237, S. 5]. Auch diese Annahme ist mit Ungenauigkeiten behaftet, da es situations- und materialabhängig ist, ob die Fenster bersten. Diese Ungenauigkeiten würde entfallen, wenn bei einem konkreten Beispiel die entsprechenden Materialparameter mit betrachtet werden.

Im Gesamten ist zu sehen, dass viele Annahmen für die Kosten- und Nutzwertanalyse getroffen werden müssen, jedoch wird dadurch eine Berechnung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses von brandschutztechnischen Maßnahmen ermöglicht. Trotz aller genannten Problematiken und Unsicherheiten ist davon auszugehen, dass die entwickelte Vorgehensweise eine Abschätzung von alternativen Maßnahmenkonzepten bietet.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Forschungsansätze

Aus der Entwicklung und Auswertung der Kosten- und Nutzwertanalyse von brandschutztechnischen Maßnahmen zeigt sich, dass es unterschiedliche Betrachtungsschwerpunkte gibt, bei denen weitere Alternativen und Optimierungen betrachtet werden können.

Es zeigt sich, dass die Kosten- und Nutzwertanalyse stellenweise noch optimiert und verbessert werden kann. So lässt sich die Ermittlung der Bauwerkskosten durch den Einsatz von Building Information Modeling (BIM) vereinfachen. Durch die Bauteilorientierung können bereits während der Planungsphase des Gebäudes 3D-Modelle erzeugt werden, um Fachplanungen einzelner Gewerke zu verbinden und Probleme im Vorhinein festzustellen. Durch die Verknüpfung von nicht-geometrischen Zusatzinformationen, wie z. B. statischen Kostenkennwerte des BKI, können bereits zu Beginn der Entwurfsphase genauere Kostenanalysen zum jeweiligen Bauvorhaben aufgestellt werden.

Ein Betreiber von mehreren Immobilien könnte auf Basis von verschiedenen BIM-Daten selbst statistische Kostenkennwerte generieren, die für die Vergleiche verwendet werden könnten. Durch eine höhere Anzahl an spezifischen Kostenkennwerten kann sich dies auf die Kostenkalkulation, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, positiv auswirken. Außerdem ist von Vorteil, dass zu Beginn der Planung des Gebäudes das BIM-Modell zur Planung, Koordinierung, Überwachung und Kostenkalkulation der Wartungs-, Prüfungs- und Instandhaltungsmaßnahmen beitragen kann. Die Verknüpfung von statistischen Lebensdauerdaten kann eine frühzeitige Planung von Instandhaltung- und Erneuerungsmaßnahmen herbeiführen und so unter Umständen Einfluss auf die Kosten nehmen. Außerdem können Kosten der jeweiligen Einzelmaßnahme bauteilspezifisch gespeichert und in einer gebäudeübergreifenden Datenbank erfasst werden. [[246, S. 96]; [247]; [248, S. 70]; [249]; [250, S. 94]; [251, S. 58 ff.]; [252]; [253]]

Aus Sicht der Versicherungswirtschaft eignen sich solche Modelle für die digitale Risikoerfassung und -bewertung eines Gebäudes und können bei der Berechnung einer Prämie behilflich sein. Da BIM-Modelle noch nicht so häufig realisiert werden, finden sie auch noch keine Berücksichtigung in der Versicherungswirtschaft. [163, 249] Ab dem Jahr 2019 bis 2022 gibt es ein Forschungsprojekt für Risikomanagementprozesse unter der Anwendung der Methode BIM am BIM Institut der Bergischen Universität Wuppertal [254].

Das BIM-Modell könnte in FDS importiert werden und die Erstellung einer Geometrie in FDS wäre teils vereinfacht [85, 255, 256]. Durch den geringeren Arbeitsaufwand bei der Erstellung der Geometrie könnten mehr Anwendungsbeispiele simuliert und ausgewertet werden. Dadurch ist es möglich das vorgestellte Verfahren zur Kosten- und Nutzwertanalyse zu optimieren.

In dieser Arbeit wird das Sicherheitsniveau der MBO als Grundlage für die Nutzwertanalyse gewählt. Es sollte eine sozialwissenschaftlich orientierte Untersuchung hinsichtlich des notwendigen sowie akzeptierten Sicherheitsniveaus beim Brandschutz von Gebäuden erstellt werden. Es muss herausgearbeitet werden, wie hoch das Gesamtsicherheitsniveau sein sollte, welches von der Gesellschaft akzeptiert wird. Ein Modell zur Bestimmung des gesellschaftlichen Sicherheitsniveaus als Akzeptanzkriterium gibt es bisher nur in den Konzepten des Rechenverfahrens der DIN 18230-1 [257] und in der Muster-Industriebau-Richtlinie (MIndBauRL) [258]. Dieses Modell könnte auf andere Konzepte innerhalb des Brandschutzes bezogen werden.

Zusätzlich dazu muss erarbeitet werden, wie die einzelnen Komponenten gewichtet werden müssten, um das gewählte Sicherheitsniveau der Gesellschaft zu erreichen und dadurch die subjektive Entscheidungsfindung zu minimieren.

Abschließend lässt sich feststellen, dass auf dem Forschungsgebiet der Abschätzung von Kosten ein weiterer Bedarf besteht. Insbesondere bei der Ermittlung des Nutzwertes von brandschutztechnischen Maßnahmen bedarf es weiterer Analyseverfahren und Anwendungsbeispiele. Im Vordergrund sollte stehen, dass die einzelnen Schritte des entwickelten Verfahrens zur Ermittlung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses statistisch abgesichert werden, damit dieses Analyseverfahren bei der Planung von brandschutztechnischen Maßnahmen eine größere Allgemeingültigkeit findet.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Maßnahmenbasierte, leistungs- und risikobasierte Vorgehensweise bei der Brandschutzbemessung	27
2.2	Bemessungsverfahren der brandschutztechnischen Teile der Eurocodes	32
2.3	Ablaufschema für eine Brandsimulation	35
2.4	Struktureller Zusammenhang zwischen FDS und Smokeview	36
2.5	Beispielhafte Zielhierarchie	40
2.6	Beispielhafte Nutzwertermittlung	41
3.1	Lebens- und Nutzungsdauer von Gebäuden	55
4.1	Darstellung des Hauptzieles mit den zugehörigen Oberzielen für die schutzzielorientierte Nutzwertanalyse	72
4.2	Darstellung einer beispielhaften Zielhierarchie	72
4.3	Darstellung des Oberzieles „Brandentstehung vorbeugen“ mit dem zugehörigem Mittel- und Unterziel	74
4.4	Darstellung des Oberzieles „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ mit den zugehörigen Mittel- und Unterzielen	75
4.5	Darstellung des Unterzieles „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände (i → o)“	76
4.6	Darstellung des Unterzieles „Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen (i → o)“	77
4.7	Darstellung des Unterzieles „Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen“	78
4.8	Darstellung des Unterzieles „Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ oder einer Temperatur $\geq 600 \text{ °C}$ “	79
4.9	Darstellung des Unterzieles „Gewährleistung geringer Rauchausbreitung“	79
4.10	Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“	80
4.11	Darstellung des Oberzieles „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ mit den zugehörigen Mittel- und Unterzielen	82
4.12	Darstellung des Unterzieles „Beschränkung der Rauchgase“	83

4.13	Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchgase“	83
4.14	Darstellung des Unterzieles „Beschränkung der Extinktion“	84
4.15	Darstellung des Unterzieles „Beschränkung der Räumungszeit“	85
4.16	Darstellung des Oberzieles „Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten“ mit den zugehörigen Mittelzielen und Unterzielen	86
5.1	Darstellung der Tiefgarage mit zwei Fahrzeugen	90
5.2	Wärmefreisetzungskurve für ein Fahrzeug	92
5.3	Anordnung der Sprinkler in der Tiefgarage	96
5.4	Wärmefreisetzungskurve für die Tiefgarage für das Konzept „Sprinkleranlage“ (HRR SA) im Vergleich zu den Konzepten „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (HRR WB) und „Brandmeldeanlage“ (HRR BMA)	97
5.5	Darstellung des Mittelzieles „Verwendung nicht brennbarer Materialien“ mit Unterziel	99
5.6	Darstellung des Mittelzieles „Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum“ mit jeweiligen Unterzielen	100
5.7	Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage) . .	100
5.8	Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)	101
5.9	Darstellung des Mittelzieles „Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum“ mit jeweiligen Unterzielen	102
5.10	Darstellung des Mittelzieles „Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr“ mit jeweiligen Unterzielen . .	103
5.11	Darstellung des Mittelzieles „Beschränkung der Großflächigkeit“ mit zugehörigen Unterzielen	104
5.12	Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage) . .	105
5.13	Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	105
5.14	Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung“ (Szenario 1: Tiefgarage)	106
5.15	Darstellung die minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage) . .	107

5.16	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	108
5.17	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	109
5.18	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	110
5.19	Darstellung des Mittelzieles „Zwei voneinander unabhängige Rettungswege“ mit Unterziel	111
5.20	Darstellung des Mittelzieles „Alarmierung der anwesenden Menschen“ mit Unterziel	112
5.21	Darstellung des Mittelzieles „Rauchfreiheit der Flure“ mit Unterziel	113
5.22	Darstellung des „Bewertungskonzeptes Rauchgase“ (Szenario 1: Tiefgarage)	113
5.23	Übersicht der Flächenanteile für Kohlenstoffdioxid im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	114
5.24	Übersicht der Flächenanteile für Cyanwasserstoff im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	114
5.25	Übersicht der Flächenanteile für Kohlenstoffmonoxid im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	115
5.26	Übersicht der Flächenanteile für Sauerstoff im Rettungsweg für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	115
5.27	Darstellung des Mittelzieles „Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO“ mit Unterziel	116
5.28	Darstellung des Mittelzieles „Ermöglichung schneller Löschrmaßnahmen“ mit Unterziel	119
5.29	Darstellung der relativen (h) und absoluten (H) Häufigkeiten der einzelnen Maßnahmenkonzepte (Szenario 1: Tiefgarage)	125
5.30	Darstellung der absoluten Häufigkeiten der Nutzwerte für jedes Maßnahmenkonzept (Szenario 1: Tiefgarage)	126
5.31	Darstellung des Grundrisses der Etage des Verwaltungsgebäudes	127

5.32	Darstellung der Wärmefreisetzungskurve für einen Bürobrand	127
5.33	Darstellung des Maßnahmenkonzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“ für eine Etage eines Verwaltungsgebäudes	130
5.34	Darstellung des Maßnahmenkonzeptes „Brandmeldeanlage“ für eine Etage eines Verwaltungsgebäudes	131
5.35	Darstellung des Maßnahmenkonzeptes „Sprinkleranlage“ für das Szenario Etage eines Verwaltungsgebäudes	132
5.36	Wärmefreisetzungskurve für das Verwaltungsgebäude für das Konzept „Sprinkleranlage“ (HRR SA) im Vergleich zu den Konzepten „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (HRR WB) und „Brandmeldeanlage“ (HRR BMA)	133
A.1	Vorgehenssystematik der DIN 18009-1 für ingenieurtechnische Verfahren im Rahmen der Brandschutzplanung	195
C.1	Vollständige Übersicht des Oberzieles „Brandentstehung vorbeugen“ .	199
C.2	Vollständige Übersicht des Oberzieles „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“	200
C.3	Vollständige Übersicht des Oberzieles „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“	201
C.4	Vollständige Übersicht des Oberzieles „Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten“	202
D.1	Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)	203
D.2	Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)	203
D.3	Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	204
D.4	Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	204
D.5	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	205
D.6	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	205
D.7	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	206

D.8	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	206
D.9	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	207
D.10	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	207
D.11	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage) . .	207
D.12	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	207
D.13	Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)	208
D.14	Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)	208
D.15	Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	209
D.16	Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	209
D.17	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	210
D.18	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	210
D.19	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	211
D.20	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	211
D.21	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage) .	212
D.22	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	212
D.23	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	212
D.24	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage) .	212

E.1	Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	218
E.2	Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	218
E.3	Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Büro für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	219
E.4	Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	219
E.5	Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	220
E.6	Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	220
E.7	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	221
E.8	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	222
E.9	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	222
E.10	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	223
E.11	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	224
E.12	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	224

E.13 Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	225
E.14 Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	225
E.15 Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	226
E.16 Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	226
E.17 Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	227
E.18 Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	227
E.19 Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes) .	228
E.20 Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	228
E.21 Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Büro für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	229
E.22 Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	229
E.23 Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	230
E.24 Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	230
E.25 Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	231

E.26	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	232
E.27	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	232
E.28	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	233
E.29	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	234
E.30	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	234
E.31	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	235
E.32	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	235
E.33	Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	236
E.34	Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	236
E.35	Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	237
E.36	Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	237
E.37	Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	238
E.38	Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	238

E.39 Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Büro für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	239
E.40 Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	239
E.41 Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	240
E.42 Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	240
E.43 Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	241
E.44 Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	242
E.45 Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	242
E.46 Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	243
E.47 Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	244
E.48 Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	244
E.49 Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	245
E.50 Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	245
E.51 Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	246

E.52 Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	246
E.53 Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	247
E.54 Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	247
E.55 Darstellung der relativen (h) und absoluten (H) Häufigkeiten der einzelnen Maßnahmenkonzepte (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	253
E.56 Darstellung der absoluten Häufigkeiten der Nutzwerte für jedes Maßnahmenkonzept (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	253

Tabellenverzeichnis

2.1	Gebäudeklassen nach § 2 Abs. 3 MBO	10
2.2	Bauordnungsrechtliche Anforderungen an tragende Wände, Stützen nach § 27 MBO	14
2.3	Bauordnungsrechtliche Anforderungen an Trennwände nach § 29 MBO	15
2.4	Bauordnungsrechtliche Anforderungen an innere Brandwände nach § 30 MBO	16
2.5	Bauordnungsrechtliche Anforderungen an notwendige Treppenräume nach § 35 MBO	18
2.6	Bauordnungsrechtliche Anforderungen an notwendige Flure nach § 36 MBO	19
2.7	Übersichtstabelle der brandschutzrelevanten Regelungen der Eurocodes	31
2.8	Beispielhafte Ermittlung von Zielerfüllungsgraden auf Basis unterschiedlicher Zielerträge	41
3.1	Auflistung der Kostengruppen der ersten Gliederungsebene der DIN 276	45
3.2	Exemplarische Darstellung der verwendeten statistischen Kennwerte	47
3.3	Leistungsphasen im Leistungsbild Technische Ausrüstung der HOAI .	52
3.4	Auflistung der Nutzungskostengruppen der ersten Gliederungsebene der DIN 18960	54
3.5	Korrekturfaktoren für das Bauteilalter	61
3.6	Korrekturfaktoren für die Gebäudenutzung	61
3.7	Korrekturfaktoren für die Gebäudehöhe	62
5.1	Übersichtstabelle der Kennwerte der Tiefgaragensimulation	91
5.2	Wärmefreisetzungsrate für ein Fahrzeug	92
5.3	Übersicht über die Abmessungen für ein Fahrzeug (Länge, Breite, Höhe) mit zugehöriger Brandfläche	93
5.4	Übersicht der Zeitabschnitte mit jeweiligen Sekunden für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	98
5.5	Übersicht der Zeitabschnitte mit jeweiligen Sekunden für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	98

5.6	Übersichtstabelle der Ergebnisse der Räumungssimulationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	117
5.7	Grenzwerte für die Bestimmung von ASET	118
5.8	Übersichtstabelle der Beurteilungswerte mit jeweiliger Zeit der Überschreitung für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderung“ (Szenario 1: Tiefgarage)	118
5.9	Kostenanalyse für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 1: Tiefgarage)	121
5.10	Kostenanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	122
5.11	Kostenanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)	123
5.12	Kosten- und Nutzwertanalyse für das Szenario 1: Tiefgarage	124
5.13	Wärmefreisetzungsrate nach Chow für einen Bürobrand	128
5.14	Übersicht der Zeitabschnitte mit jeweiligen Sekunden für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	131
5.15	Übersicht der Zeitabschnitte mit jeweiligen Sekunden für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	133
5.16	Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Maßnahmenkonzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“ für das Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	135
5.17	Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Wände mit Brandschutzanforderungen“ für das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	136
5.18	Kostenanalyse für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	137
5.19	Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Brandmeldeanlage“ für das Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	138
5.20	Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Brandmeldeanlage“ für das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	140
5.21	Kostenanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	141

5.22	Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Sprinkleranlage“ für das Oberziel „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	142
5.23	Übersichtstabelle der Nutzwertanalyse des Konzeptes „Sprinkleranlage“ für das Oberziel „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	143
5.24	Kostenanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	144
5.25	Kosten- und Nutzwertanalyse für das Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes	144
B.1	Nettopreise ausgewählter Kostenpositionen für Türen und Wände . .	196
B.2	Nettopreise ausgewählter Kostenpositionen für Brandschutzklappen und Brandschutzabschottungen	196
B.3	Nettopreise ausgewählter Kostenpositionen für Sprinkler- und Brandmeldeanlagen	196
B.4	Kostengruppenspezifische Jahreskostenfaktoren	197
B.5	Gebäudenutzungsspezifische Jahreskostenfaktoren	197
B.6	Nutzungsdauern ausgewählter Bau- und Anlagenteile	198
D.1	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Brandentstehung vorbeugen)	213
D.2	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen)	214
D.3	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren)	215
D.4	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten) .	216
D.5	Gesamtbewertung der Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage	217
E.1	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	220

E.2	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Flure“) für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	223
E.3	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Treppenträume“) für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	226
E.4	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	231
E.5	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Flure“) für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	233
E.6	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Treppenträume“) für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	236
E.7	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	241
E.8	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Flure“) für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	243
E.9	Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Treppenträume“) für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)	246
E.10	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Brandentstehung vorbeugen)	248
E.11	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen)	249
E.12	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren)	250
E.13	Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten)	251

E.14 Gesamtbewertung der Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutz- technischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes . . .	252
---	-----

Literaturverzeichnis

- [1] D. Asendorf: Die Diktatur der Feuermelder – Wenn Schulen wie Strafanstalten aussehen, Bauprojekte immer teurer und Flughäfen nicht fertig werden, geht es meist um ausufernden Brandschutz. Der droht das Land zu ersticken. *Die Zeit*, S. 29–30, 2016.
- [2] S. Balzter: Brandschutzrepublik Deutschland, Die Gefahr in Deutschland durch Rauch und Feuer zu sterben, ist im Vergleich zu anderen Risiken äußerst gering. Aber der Brandschutz wird immer teurer. *Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung*, S. 21, 2017.
- [3] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Kostengünstiges Bauen durch Vereinheitlichung und Deregulierung des Bauordnungsrechts: Dezember 2017.
- [4] B. H. Schulte: Entwicklung, Bedeutung und Zielsetzung des öffentlichen Bau- und Bauordnungsrechts (2004). In G. H. Reichel und B. H. Schulte, Herausgeber, *Handbuch Bauordnungsrecht*, S. 1–117. C. H. Beck, München, 2004.
- [5] G. Robbers: Einführung in das deutsche Recht. Nomos, Baden-Baden, 6. Auflage, 2017.
- [6] B. H. Schulte: Rechtsgüterschutz durch Bauordnungsrecht: Zugl.: Diss. FU Berlin: Volume 404 *Schriften zum öffentlichen Recht*. Duncker & Humblot, Berlin, 1982.
- [7] A. Wirth und A. Schneeweiß: Öffentliches Baurecht praxisnah. Springer, Wiesbaden, 2016.
- [8] V. Haug: Staats- und Verwaltungsrecht. Fallbearbeitung, Übersichten, Schemata. C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 2002.
- [9] G. H. Reichel und B. H. Schulte, Herausgeber: Handbuch Bauordnungsrecht: Das Bauordnungsrecht aller Bundesländer. C. H. Beck, München, 2004.
- [10] Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634): BauGB.

- [11] M. Colussi: Einführung in das Recht: Grundlagen des Zivilrechts und der juristischen Fallbearbeitung: Volume 55 *Schriftenreihe/Fachhochschule des Bundes für Öffentliche Verwaltung*. Fachhochsch. des Bundes für Öffentliche Verwaltung, Brühl/Rheinland, 2010.
- [12] H. Locher und U. Locher: Das private Baurecht. Studium und Praxis. Beck, München, 8., neubearbeitete Auflage, 2012.
- [13] K. Czepuck, H. Gädtke, M. Johlen, A. Plietz, G. Wenzel und A. Pollner: BauO NRW: Kommentar. Werner-Verlag, Köln, 12., überarbeitete Auflage, 2011.
- [14] A. Wirth, C. Pfisterer und A. Schmidt: Privates Baurecht praxisnah. Springer, Wiesbaden, 2016.
- [15] U. Battis: Öffentliches Baurecht und Raumordnungsrecht. Studienbücher Rechtswissenschaft. Kohlhammer, Stuttgart, 7., überarbeitete Auflage, 2017.
- [16] M. Schleich: Kosteneinsparpotenziale einer effizienteren Landesbauordnung. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2017.
- [17] C.-W. Otto: Öffentliches Baurecht: Band II: Bauordnungsrecht, Nachbarschutz, Rechtsschutz: Volume Band 108 *JuS-Schriftenreihe*. C.H. Beck, München, 7., neu bearbeitete Auflage, 2018.
- [18] K. Scheuermann: Organisation des Baurechts in Deutschland – Bauordnung. In Klaus Scheuermann, Herausgeber, *Praxishandbuch Brandschutz, Sicherheit DIN*. Beuth and Heymanns, Berlin and Köln, 2016.
- [19] M. Schubert und W. Erbguth: Öffentliches Baurecht: Mit Bezügen zum Umwelt- und Raumplanungsrecht. Juris. Schmidt, Berlin, 6., neu bearbeitete Auflage, 2015.
- [20] Bundesverfassungsgericht (1954): Rechtsgutachten vom 16.06.1954, Aktenzeichen: 1 PBvV 2/52, BVerfGE 3, 407.
- [21] F. Stollmann: Öffentliches Baurecht. Beck, München, 6. Auflage, 2009.
- [22] Zusammenarbeit zwischen Bund und Ländern auf dem Gebiet der Baugesetzgebung: Bad Dürkheimer Vereinbarung: 21. Januar 1955.
- [23] G. Famers: Brandschutz im Bauordnungsrecht. In N. A. Fouad, Herausgeber, *Bauphysik-Kalender 2011: Brandschutz*. Wiley, Hoboken, 1. Auflage, 2011.

- [24] MBO (2019): Musterbauordnung in der Fassung vom November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 27.09.2019.
- [25] T. A. Hoffmann: Brandschutz. DETAIL Praxis. Detail Business Information GmbH, München, 2018.
- [26] D. Wilke: Anwendungsbereich, Grundbegriffe, allgemeine Anforderungen und bauordnungsrechtliche Generalklausel, Nachbarschutz. In G. H. Reichel und B. H. Schulte, Herausgeber, *Handbuch Bauordnungsrecht*, S. 119–214. C. H. Beck, München, 2004.
- [27] J. Meißner: Befreiung? Erleichterung? Abweichung? – Ordnung in Begriffe und Verfahren gebracht. In *Tagungsband der EIPOS-Sachverständigentage Brandschutz 2017*, S. 1–9, 2017.
- [28] MBauVorIV (2007): Muster einer Verordnung über Bauvorlagen und bauaufsichtliche Anzeigen (Musterbauvorlagenverordnung) in Fassung vom Februar 2007.
- [29] S. Koch: Brandschutz und Baurecht: Rechtssichere Beurteilung von Neubau und Bestand; mit Tabellen. FeuerTrutz Network, Köln, 2011.
- [30] G. Famers: Die Brandschutzvorschriften der neuen Musterbauordnung. *Bauphysik*, 25, Ausgabe: 3, S. 131–136, 2003.
- [31] H. Jäde: Musterbauordnung 2002 – Wandlungen und Konstanten. *DIBt Mitteilungen*, 35, Ausgabe: 6, S. 182–183, 2004.
- [32] J. Mayr und L. Battran, Herausgeber: Handbuch Brandschutzatlas: Baulicher Brandschutz; Grundlagen, Planung, Ausführung. FeuerTrutz Network GmbH, Köln, 4. Auflage, 2018.
- [33] B. Schretter und F. Schenk: Bauaufsichtliches Verfahren. In G. H. Reichel und B. H. Schulte, Herausgeber, *Handbuch Bauordnungsrecht*, S. 771–1010. C. H. Beck, München, 2004.
- [34] M. Johlen: § 73 – Abweichungen. In Knut Czepuck, Horst Gädtke, Markus Johlen, Andreas Plietz, Gerhard Wenzel und Andreas Pollner, Herausgeber, *BauO NRW*, S. 1622–1641. Werner-Verlag, Köln, 2011.
- [35] M. Dietrich: Erleichterung oder Abweichung – der feine Unterschied. *Feuertrutz Magazin*, 11, Ausgabe: 3, S. 65, 2018.

-
- [36] C. Kaiser, J. Nusser und F. Schrammel: Praxishandbuch Facility Management. Springer, Wiesbaden, 2018.
- [37] DIN EN 54-1:2011-06 (2011): Brandmeldeanlagen – Teil 1: Einleitung.
- [38] MVSTÄTTVO (2014): Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten.
- [39] MHHR (2012): Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern.
- [40] M-GarVO (2008): Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen.
- [41] MBeVO (2000): Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Beherbergungsstätten.
- [42] 2015/C 378/03 (2015): Mitteilung der Kommission im Rahmen der Durchführung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates (ABl. EU C 378, S. 6-53).
- [43] DIN 14675-1:2018-04 (2018): Brandmeldeanlagen – Teil 1: Aufbau und Betrieb.
- [44] BHE Bundesverband Sicherheitstechnik et al. (2018): Begehung und Instandhaltung von Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch/Überfall und Sprachalarm gemäß DIN VDE 0833-1: Merkblatt Begehung und Instandhaltung.
- [45] DIN 14489:1985-05 (1985): Sprinkleranlagen – Allgemeine Grundlagen.
- [46] VdS 2815:2018-05 (2018): Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA).
- [47] MVKVO (2014): Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten.
- [48] H.-J. Gressmann: Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz: Für Architekten, Bauingenieure und Feuerwehringenieur: mit 185 Bildern und 118 Tabellen. Reihe Technik. Expert Verlag, Renningen, 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2017.
- [49] VdS CEA 4001:2018-01 (2018): VdS CEA-Richtlinien für Sprinkleranlagen: Planung und Einbau.

- [50] E. Götsch: Neue Sprinkler-Norm; DIN EN 12845 im Vergleich zur VdS CEA 4001. *Moderne Gebäudetechnik*, 2010. GEP Industrie-Systeme GmbH.
- [51] Deutsches Institut für Bautechnik (2019): Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen, mit Druckfehlerberichtigung vom 7. August 2020: Ausgabe 2019/1.
- [52] DIN EN 12845:2020-11 (2020): Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Automatische Sprinkleranlagen – Planung, Installation und Instandhaltung.
- [53] FM Global Data Sheet 2-0 (2014): FM Global Property Loss Prevention Data Sheets - 2-0 Installation guidelines for automatic sprinklers.
- [54] NFPA 13 (2019): Standard for the Installation of Sprinkler Systems.
- [55] J. Wilms-Vahrenhorst: Sprinkleranlagen – Trends und Entwicklung: Anwendbare Regelwerke in Deutschland und in Europa. München.
- [56] E. Götsch: Neue Sprinkler-Norm DIN EN 12845: Anerkannte Regel der Technik bei bestehendem Schutzniveau. *Schadensprisma*, 60, Ausgabe: 2, S. 26–29, 2010.
- [57] E DIN 14489:2010-11 (2010): Sprinkleranlagen – Allgemeine Grundlagen – Anforderungen für die Anwendung von Sprinkleranlagen nach DIN EN 12845, Entwurf.
- [58] K. Fischer, M. H. Faber, M. Fontana und J. Kohler: Wirtschaftliche Optimierung im vorbeugenden Brandschutz. Technischer Bericht, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, 2012.
- [59] G. Geburtig: Basiswissen Brandschutz: Band 1: Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [60] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesministerium der Verteidigung: Brandschutzleitfaden für Gebäude des Bundes: 3. Auflage: 2006.
- [61] DIN 18009-1:2016-09 (2016): Brandschutzingenieurwesen - Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung.
- [62] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09 (2015): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.

- [63] DIN EN 1991-1-2:2010-12 (2010): Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [64] DIN EN 1992-1-2:2010-12 (2010): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [65] DIN EN 1993-1-2:2010-12 (2010): Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [66] DIN EN 1994-1-2:2010-12 (2010): Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [67] DIN EN 1995-1-2:2010-12 (2010): Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [68] DIN EN 1996-1-2:2011-04 (2011): Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [69] DIN EN 1999-1-2:2010-12 (2010): Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken – Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [70] J. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), 4., überarbeitete und ergänzte Auflage, 2020.
- [71] DIN 4102-4:2016-05 (2016): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile.
- [72] K.-J. Schneider: Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Werner Verlag, 20. Auflage, 2012.
- [73] Swanson Analysis Systems, Inc.: CFX-10, User Documentation.
- [74] Fluent Inc.: FLUENT 6.2 User's Guide.
- [75] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd und M. Vanella: Fire Dynamics Simulator 6.7.5 User's Guide.

- [76] V. Hohm: Wärmetransportmodell für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2010.
- [77] B. Stock und K. Wallasch: Brandsimulationen mit FDS. Das Fire Dynamics Simulator Handbuch. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2008.
- [78] M. Münch: Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz. In Nabil A. Fouad, Herausgeber, *Bauphysik-Kalender 2015: Simulations- und Berechnungsverfahren*. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., 2015.
- [79] VDI 6019 Blatt 2 (2009): Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Ingenieurmethoden.
- [80] R. Schwarze: CFD-Modellierung, Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen. Springer, 2013.
- [81] P. Moin und K. Mahesh: Direct numerical simulation: A tool in turbulence research. In *Annual Review of Fluid Mechanics*, S. 539–578, 1998.
- [82] Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katarophenschutz: Wörterbuch des Zivil- und Katastrophenschutzes. https://www.lv-saarland.drk.de/fileadmin/user_upload/Wo%CC%88rterbuch_KatS.pdf, February 2003. zuletzt geprüft: 01.10.2020.
- [83] RiMEA e. V. (2016): Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 3.0.0: 3.0.0 Auflage.
- [84] H. Klüpfer und T. M. König: Modelle für die Berchnung von Personenströmen und Evakuierungssimulationen. *VdS Fachtagung*, 2005.
- [85] P. Abolghasemzadeh und M. Rätzke: Building Information Model (BIM) basierte, immersive Evakuierungssimulation. *Technische Universität Darmstadt, Institute für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen (IIB)*, 2009.
- [86] M. Schreckenber: Perspektiven der Evakuierungsberechnung. In Nabil A. Fouad, Herausgeber, *Bauphysik-Kalender 2011: Brandschutz*. Wiley, Hoboken, 1. Auflage, 2011.
- [87] M. Schleich: DIN 18009 Teil 2: Räumungssimulation und Personensicherheit – Stand der Forschung. In J. Zehfuß, Herausgeber, *Braunschweiger Brandschutz-Tage 2019: 33. Fachtagung Brandschutz – Forschung und Praxis, 25. und*

26. September 2019: Tagungsband, S. 55 – 84. Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Braunschweig, 2019.
- [88] L. Y. Cooper und D. W. Stroup: Calculating available safe egress time (ASET) – A Computer Programm and Users Guide. *NBSIR 82-2578*, 1982.
- [89] Forschungszentrum Jülich GmbH: Jülich Pedestrian Simulator – Users Guide Version 0.8.2.
- [90] J. Perrey: Nutzenorientierte Marktsegmentierung: Ein integrativer Ansatz zum Zielgruppenmarketing im Verkehrsdienstleistungsbereich. Springer, 34. Auflage, 1998.
- [91] W. Vershofen: Handbuch der Verbraucherforschung – Grundlegung. Heymanns Verlag, Berlin, 1940.
- [92] H. Proesler: Handbuch der Verbraucherforschung – Gesamtauswertung. Heymanns Verlag, Berlin, 1940.
- [93] H. Moser: Wilhelm Vershofens Beitrag zu einer Theorie des Verbraucherverhaltens. Dunker und Humblot, 1. Auflage, 1963. Die Unternehmung im Markt.
- [94] F. Schläpfer und P. Zweifel: Nutzenmessung bei öffentlichen Gütern: Konzeptionelle und empirische Probleme in der Praxis. *Wirtschaftsdienst*, 88, Ausgabe: 3, S. 210–216, 2008.
- [95] Sozialgesetzbuch (SGB): Fünftes Buch (V) – Gesetzliche Krankenversicherung.
- [96] J. Köbberling: Wirksamkeit, Nutzen und Notwendigkeit – Versuch einer wissenschaftlichen Definition. *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, 103, Ausgabe: 5, S. 249–252, 2009.
- [97] J. Windeler: Nutzen und Nutzenbewertung. *DMW – Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 131, Ausgabe: 1, S. 12–15, 2006.
- [98] J. Schmidt-Wilke: Nutzenmessung im Gesundheitswesen. Deutscher Universitätsverlag, 2004.
- [99] I. Heeschen und P. Wendisch: Vorbeugender Brandschutz – Bewertung durch Sachversicherer, Der Maschinenschaden. 59, Ausgabe: 1, S. 33–38, 1986.

- [100] S. Brütsch: Wirtschaftlichkeit einer Berufsfeuerwehr oder der Versuch einer Kosten-Nutzen-Analyse am Beispiel der Feuerwehr Wuppertal. *vfdb - Zeitschrift für Forschung und Technik im Brandschutz*, 40, Ausgabe: 4, S. 148–150, 1991.
- [101] S. Brütsch: Die Wirtschaftlichkeit und Effektivität einer Feuerwehr. *BRAND-Schutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung*, 39, Ausgabe: 5, S. 159–161, 1985.
- [102] T. Pflüger: Nachweisbarkeit des wirtschaftlichen Nutzens einer Feuerwehr. In *Tagungsband der 58. Jahresfachtagung der vfdb in Köln*, S. 711–721. VdS-Verlag, 2011.
- [103] M. Spearpoint: Cost-benefit study of domestic smoke alarms. *Fire safety engineering*, 2 S. 24–27, 1997.
- [104] L. Loweth: Cost of living. *Fire Engineers Journal*, 12, Ausgabe: 6, S. 30–32, 2002.
- [105] A. Hasofer und I. Thomas: Cost Benefit Analysis of a Fire Safety System Based on the Life Quality Index. In *Fire Safety Science - Proceedings of the Ninth International Symposium*, Volume 9, S. 969–980, 2008.
- [106] C. Papp und M. Marx: Kosten-Nutzen-Analyse für Heimrauchmelder unter Anwendung des Life-Quality-Index. *Technische Sicherheit*, 1, Ausgabe: 4, S. 26–28, 2011.
- [107] C. Albrecht: Quantifying life safety: Part I: Scenario-based quantification. *Fire Safety Journal*, 64 S. 87–94, 2014.
- [108] C. Albrecht: Quantifying life safety Part II: Quantification of fire protection systems. *Fire Safety Journal*, 64 S. 81–86, 2014.
- [109] L. Siepelmeyer-Kierdorf: Entwicklung und vergleichende Bewertung unterschiedlicher Brandschutz-Konzepte für Industriegebäude: Zugl.: Wuppertal, Berg. Univ.- Gesamthochsch., Diss., 2001: Volume 3 *Wuppertaler Berichte zum Brand- und Explosionsschutz*. VdS Schadenverhütung-Verl., 2001.
- [110] H. J. Blätte: Vom Risiko. *vfdb-Zeitschrift - Forschung, Technik und Management im Brandschutz*, 55, Ausgabe: 1, S. 3–10, 2006.
- [111] G. Ramachandran: *The Economics of Fire Protection*. Routledge, 2015.

- [112] Bundesministerium der Finanzen: Arbeitsanleitung Einführung in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen: Rundschreiben des Bundesministerium der Finanzen vom 12. Januar 2011, geändert durch Rundschreiben vom 2.10.2017 (GMBI 2017 Nr. 45, S. 834): 2011.
- [113] U. Schneider und T. Kolb: Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. Grundlagen, Normung, Brandsimulationen, Materialdaten und Brandsicherheit. ISBN 978-3-8169-3238-3. Expert Verlag, 7. Auflage, 2014.
- [114] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Leitfaden WU Hochbau: Leitfaden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (WU) bei der Vorbereitung von Hochbaumaßnahmen des Bundes. https://www.fib-bund.de/Inhalt/Leitfaden/Wirtschaftlichkeit/2014-08_LFWU_Hochbau_3-Auflage_BMUB_2014.pdf. zuletzt geprüft: 22. Januar 2019.
- [115] G. Westermann und S. Finger: Kosten-Nutzen-Analyse: Einführung und Fallstudien. E. Schmidt, Berlin, 2012.
- [116] Horst Hanusch: Nutzen-Kosten-Analyse. Vahlen, 2011.
- [117] C. Zangemeister: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen: Teilw. zugl.: Berlin, Univ., Diss., 1970. Books on Demand, Norderstedt, 5., erweiterte Auflage, 2014.
- [118] VDI 3780:2000-09 (2000): Technikbewertung: Begriffe und Grundlagen.
- [119] N. Drews, G. and Hillebrand: Lexikon der Projektmanagement-Methoden: Die besten Methoden für jede Situation; Werkzeugkasten für effizientes Projektmanagement. Haufe-Praxisratgeber. Haufe, Freiburg, 2. Auflage, 2010.
- [120] G. Ramachandran und D. Charters: Quantitative Risk Assessment in Fire Safety. Spon Press, 2011.
- [121] Florian Kornblum: Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation, Technische Universität München, 2017.
- [122] C. Bahr, J. Bossmann, M. Kahle, J. Liers, R.-D. Person und G. Printz: Ermittlung der Kosten für das Betreiben von technischen Anlagen in öffentlichen

- Gebäuden: TGA-Kosten Betreiben 2013. <https://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Organisation/TGA-Kosten%20Betreiben/tga2013.pdf>. zuletzt geprüft: 22. Januar 2019.
- [123] DIN 276:2018-12 (2018): Kosten im Bauwesen.
- [124] DIN 18960:2008-02 (2008): Nutzungskosten im Hochbau.
- [125] W. Kalusche und S. Herkel, Herausgeber: BKI Baukosten 2018 Neubau Teil 1: Statistische Kostenkennwerte für Gebäude. BKI Baukosteninformationszentrum, 2018.
- [126] F. Ritter, W. Kalusche und A.-K. Kalusche, Herausgeber: BKI Baukosten 2018 Neubau Teil 2: Statistische Kostenkennwerte für Bauelemente. Müller Rudolf, 2018.
- [127] R. Fetzer, J. Luther, J. Letsch und A. Wagner, Herausgeber: BKI Baukosten 2018 Neubau Teil 3: Statistische Kostenkennwerte für Positionen. BKI Baukosteninformationszentrum, 2018.
- [128] Oberverwaltungsgericht für das Land Nordrhein-Westfalen: Haftung des Architekten: Baukostenüberschreitung, Urteil vom 29.03.1990, Aktenzeichen:21 U 139/89, BauR Baurecht - Zeitschrift für das gesamte öffentliche und private Baurecht.
- [129] J.-B. Schleich, L.-G. Cajot und M. Pierre: Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks. European Commission. Science Research Development, 1999.
- [130] USTG (2018): Umsatzsteuergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Februar 2005 (BGBl. I S. 386), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 11. Dezember 2018 (BGBl. I S. 2338) geändert worden ist.
- [131] L. Battran und T. Schütz: 6.20 Kosten beim Brandschutz - Brandschutzmaßnahmen und einrichtungen. In J. Mayr und L. Battran, Herausgeber, *Handbuch Brandschutzatlas*. FeuerTrutz Network, 2014.
- [132] Statistisches Bundesamt Deutschland: Fachserie 17 Reihe 4, Preisindex für den Neubau von „Wohngebäuden insgesamt“. https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-preise.pdf?__blob=publicationFile. zuletzt geprüft: 17. November 2020.

- [133] C. Bahr: Realdatenanalyse zum Instandhaltungsaufwand öffentlicher Hochbauten: Ein Beitrag zur Budgetierung. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2008.
- [134] J. H. Bossmann: Kalkulationsverfahren zur Instandhaltungsbudgetierung gebäudetechnischer Anlagen öffentlicher Immobilienportfolien. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [135] Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung; Bundesanzeiger Verlag GmbH (2015): Leistungen für Brandschutz: 3., vollst. überarb. Auflage: Stand: Juni 2015.
- [136] E. Nachtigall: Dynamische Ansteuerungen gebäudetechnischer Brand- schutzeinrichtungen: Ein Konzept zur sicherheitstechnischen Quantifizierung. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2013.
- [137] HOAI (2013): Honorarordnung für Architekten und Ingenieure vom 10. Juli 2013 (BGBl. I S. 2276): HOAI.
- [138] HOAI (2021): HOAI-Änderungsverordnung 2020, Kabinettsentwurf Teil 1: Allgemeine Vorschriften.
- [139] Gerichtshof der Europäischen Union (04.07.2019): Feststellungsurteil vom 04.07.2019, Aktenzeichen: C-377/17.
- [140] A. Enseling, M. Vaché und E. Hinz: Weiterentwicklung der Lebenszykluskosten-Methodik: Endbericht: Forschungsprogramm „Zukunft Bau“.
- [141] M. Wernecke und N. Rottke: Lebenszyklus von Immobilien. In Karl-Werner Schulte, Herausgeber, *Immobilienökonomie*, S. 209–230. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, Oldenbourg, 2008.
- [142] B. Offergeld: Bestimmung von Immobiliennutzungszyklen am Beispiel von Bürogebäuden: Ein ökonometrischer Ansatz. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2012.
- [143] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.: Das deutsche Gütesiegel nachhaltiges Bauen: Aufbau – Anwendung – Kriterien: 03/2009: 2. Auflage.

- [144] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB): Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem.html>. zuletzt geprüft: 17. November 2020.
- [145] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010): Bekanntmachung des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über die Nutzung und die Anerkennung von Bewertungssystemen für das nachhaltige Bauen vom 15.04.2010.
- [146] GEFMA / FMA 220-2 (2010): Lebenszykluskosten-Ermittlung im FM – Anwendungsbeispiel, Entwurf 2010-09. Germany Facility Management Association und International Facility Management Association, Entwurf 2010-09.
- [147] DIN EN 13306:2018-02 (2018): Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung.
- [148] DIN 31051:2019-06 (2019): Grundlagen der Instandhaltung: Entwurf.
- [149] A. Pelzeter: Lebenszykluskosten zum Mitmachen. *Der Facility Manager*, 18, Ausgabe: 1, S. 10–13, 2011.
- [150] S. Engelhardt: Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken: Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2015.
- [151] IFMA-Schweiz: Lebenszykluskosten-Ermittlung von Immobilien: Modell inkl. Anwendungstool. vdf Hochschulverlag, Zürich, 1. Auflage, 2011.
- [152] J.-P. Thommen: Managementorientierte Betriebswirtschaftslehre. Versus, Zürich, 8., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2008.
- [153] L. Meynerts: Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalysen und -bewertungen im Rahmen der Fabrikplanung: Entwicklung eines Analyse- und Bewertungsinstrumentariums unter besonderer Berücksichtigung der Energieeffizienz. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2015.
- [154] W. Krull: Life-Cycle-Betrachtung bezüglich Interdependenzen zwischen Investitions- und Betriebskosten bei Geschäftshäusern. Master Thesis, Universität Zürich, 2007.
- [155] F. Schmoll: Immobilieninvestition und Immobilienfinanzierung. In Fritz Schmoll, Herausgeber, *Basiswissen Immobilienwirtschaft: Vermietung und*

- Verwaltung, Marketing und Maklerrecht, Grundstück und Grundstückskauf, Wertermittlung, Immobilieninvestition, Immobilienfinanzierung, Immobilienbesteuerung, Planungs- und Baurecht, Grundlagen der Bautechnik, Projektentwicklung, Unternehmensführung, Staat und Markt*, S. 691–848. GEV Grundeigentum-Verlage, Berlin, 3. Auflage, 2016.
- [156] Bundesministerium der Finanzen: 1. Personal- und Sachkosten in der Bundesverwaltung für Kostenberechnungen/WU: 2. Kalkulationszinssätze für WU. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finanzen/Bundeshaushalt/personalkostensaetze-2017-anl.pdf?__blob=publicationFile&v=4. zuletzt geprüft am: 22. Januar 2019.
- [157] R. Volkart und A. F. Wagner: *Corporate Finance: Grundlagen von Finanzierung und Investition*. Versus Verlag AG, Zürich, 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage, 2014.
- [158] H. Mühlenkamp: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei ÖPP: Zwischen methodischer Konsistenz und interessengeleiteter Ergebnisdarstellung. In H. Mühlenkamp, Herausgeber, *Öffentlich-Private Partnerschaften*, Zeitschrift für öffentliche und gemeinwirtschaftliche Unternehmen Beiheft, S. 60–85. Nomos, 2016.
- [159] K. W. Usemann: *Brandschutz in der Gebäudetechnik: Grundlagen Gesetzgebung Bauteile Anwendungen*. VDI-Buch. Springer, Berlin, 2., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2003.
- [160] W. J. Friedl: *Ökologische und ökonomische Bedeutung des Brand- und Explosionsschutzes: Volume 7 Brand- und Explosionsschutz*. Kohlhammer, Stuttgart, 1998.
- [161] N. Rautmann: *Risikogerechte Prämienkalkulation im Versicherungsunternehmen am Beispiel der industriellen Feuerversicherung: Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 1997: Volume 10 Veröffentlichungen des Seminars für Versicherungswissenschaft der Universität Hamburg und des Vereins zur Förderung der Versicherungswissenschaft in Hamburg e.V Reihe B, Wirtschaftswissenschaft*. VVW, Karlsruhe, 1998.
- [162] S. Weber: GDV-Prämienrichtlinien: E-Mail: 13.12.19.

- [163] S. Weber und C. Martial: Auswirkungen des Nutzens brandschutztechnischer Maßnahmen auf die Prämienkalkulation der Sachversicherer: Gespräch: 09.01.2019.
- [164] DIN EN 13501-1:2019-05 (2019): Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten.
- [165] M. M. Hirschler: Polyurethane foam and fire safety. *Polymers for Advanced Technologies*, 19, Ausgabe: 6, S. 521–529, 2008.
- [166] DIN EN ISO 1716 (2018): Prüfungen zum Brandverhalten von Produkten - Bestimmung der Verbrennungswärme.
- [167] DIN EN 13501-2: 2016-12 (2016): Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen.
- [168] T. E. Waterman: Room flashover – Criteria and synthesis. *Fire Technology*, 4 S. 25–31, 1968.
- [169] F. Salzberg und T. E. Waterman: Studies of building fires with models. *Fire Technology*, 2, Ausgabe: 3, S. 196–203, 1966.
- [170] D. Cortés, D. Gil, J. Azorín, F. Vandecasteele und S. Verstockt: A Review of Modelling and Simulation Methods for Flashover Prediction in Confined Space Fires. *Applied Sciences*, 10, Ausgabe: 16, S. 5609, 2020.
- [171] R. D. Peacock, P. A. Reneke, R. W. Bukowski und V. Babrauskas: Defining flashover for fire hazard calculations. *Fire Safety Journal*, 32, Ausgabe: 4, S. 331–345, 1999.
- [172] V. Babrauskas, R. D. Peacock und P. A. Reneke: Defining flashover for fire hazard calculations: Part II. *Fire Safety Journal*, 38, Ausgabe: 7, S. 613–622, 2003.
- [173] S. R. Bishop und D. D. Drysdale: Fires in compartments: the phenomenon of flashover. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356, Ausgabe: 1748, S. 2855–2872, 1998.

- [174] V. Babrauskas: Estimating room flashover potential. *Fire Technology*, 16 S. 94–103, 1980.
- [175] A. Cote: Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Quincy, Mass, 2008.
- [176] R. Könnecke: Computersimulation der Brandentwicklung in Räumen: Auswirkungen auf Personen und ihr Umfeld. In *Hyperthermie, Brand und Kohlenmonoxid*. Schmidt-Römhild, 2000.
- [177] W. Jessel: Gase – Dämpfe – Gasesstechnik ein Kompendium für die Praxis. Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck, 2001.
- [178] M. J. Hurley: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer-Verlag New York Inc., 2016.
- [179] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd und M. Vanella: Fire Dynamics Simulator 6.7.5 Technical Reference Guide, Volume 3: Validation.
- [180] D. Gottuk, C. Mealy und Jason Floyd: Smoke Transport and FDS Validation. *Fire Safety Science*, 9 S. 129–140, 2008.
- [181] A. Hamins, A. Maranghides, E. Johnsson, M. Donnelly, J. Yang, G. Mulholland und R. Anleitner: Report of Experimental Results for the International Fire Model Benchmarking and Validation Exercise 3., Special Publication (NIST SP). Technischer Bericht, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2005.
- [182] W. A. Stahel: Statistische Datenanalyse; Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Vieweg, 3. durchgesehene Auflage, 2000.
- [183] M. H. Schlummer: Beitrag zur Entwicklung einer alternativen Vorgehensweise für eine Proven-in-Use-Argumentation in der Automobilindustrie. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2012.
- [184] V. Babrauskas, J. M. Fleming und B. D. Russell: RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment. *Fire and Materials*, 34, Ausgabe: 7, S. 341–355, 2010.
- [185] S. L. Poon: A Dynamic Approach to ASET/RSET Assessment in Performance based Design. *Procedia Engineering*, 71 S. 173–181, 2014.

- [186] B. Schröder, L. Arnold und A. Seyfried: A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*, 115, 2020.
- [187] D. Topp: Stellungnahme Verrechnung Nutzwert mit Kosten. Referat BW I 6 - Bauwirtschaft, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, E-Mail: 28.09.2020.
- [188] U. Bunk: Stellungnahme Verrechnung Nutzwert mit Kosten. Referat II A3, Bundesministerium der Finanzen, E-Mail: 02.10.2020.
- [189] J. Mangs und O. Keski-Rahkonen: Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part I: Car fire experiments. *Fire Safety Journal*, 23, Ausgabe: 1, S. 17–35, 1994.
- [190] J. Mangs und O. Keski-Rahkonen: Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part II: Parametrization of measured rate of heat release curves. *Fire Safety Journal*, 23, Ausgabe: 1, S. 37–49, 1994.
- [191] M. Shipp und M. Spearpoint: Measurements of the severity of fires involving private motor vehicles. *Fire and Materials*, 19, Ausgabe: 3, S. 143–151, 1995.
- [192] B. Merci und M. Shipp: Smoke and heat control for fires in large car parks: Lessons learnt from research? *Fire Safety Journal*, 57 S. 3–10, 2013.
- [193] I. Horváth, J. van Beeck und B. Merci: Full-scale and reduced-scale tests on smoke movement in case of car park fire. *Fire Safety Journal*, 57 S. 35–43, 2013.
- [194] S. Krüger, A. Hofmann, A. Berger und N. Gude: Investigation of smoke gases and temperatures during car fire - large-scale and small-scale tests and numerical investigations. *Fire and Materials*, 40, Ausgabe: 6, S. 785–799, 2015.
- [195] M. M. Tohir und M. Spearpoint: Distribution analysis of the fire severity characteristics of single passenger road vehicles using heat release rate data. *Fire Science Reviews*, 2, Ausgabe: 1, S. 5, 2013.
- [196] D. W. Stroup, L. DeLauter, J. Lee und G. Roadarmel: Passenger Minivan Fire Tests. Technischer Bericht, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [197] G. Zhu, X. Jiang, H. Zhu und D. Li: Full-scale Experimental Study of Fire Spread Behavior of Cars. *Procedia Engineering*, 211 S. 297–305, 2018.

- [198] G. Zhu, D. Li, H. Zhu, Z. Yu, Y. Gao und X. Jiang: Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10 S. 315–324, 2017.
- [199] L. Noordijk und T. Lemaire: Modelling of fire spread in car parks. *HERON*, 50, Ausgabe: 4, S. 209–218, 2005.
- [200] C. Steinert: Feuerübersprung und Abbrandverhalten von Personenkraftwagen. Bauforschung. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 1999.
- [201] N. Tilley, X. Deckers und B. Merci: CFD study of relation between ventilation velocity and smoke backlayering distance in large closed car parks. *Fire Safety Journal*, 48 S. 11–20, 2012.
- [202] P. C. R. Collier: Car Parks - Fires Involving Modern Cars and Stacking System. Technischer Bericht, Branz, 2011.
- [203] E. Annerel, L. Taerwe, B. Merci, D. Jansen, P. Bamonte und R. Felicetti: Thermo-mechanical analysis of an underground car park structure exposed to fire. *Fire Safety Journal*, 57 S. 96–106, 2013.
- [204] P. Weisenpacher, J. Glasa und L. Halada: Parallel computation of smoke movement during a car park fire. *Computing and Informatics*, 35 S. 1416–1437, 2016.
- [205] W. K. Chow: Simulation of Car Park Fires using Zone Models. *Journal of Fire Protection Engineering*, 7, Ausgabe: 2, S. 65–74, 1995.
- [206] B. S. Nielsen und H. T. Lauridsen: Fire modelling in FDS: Fire spread in modern cars. Master Thesis, Technical University of Denmark, 2019.
- [207] D. M. Marquis und É. Guillaume: Effects of under-ventilated conditions on the reaction-to-fire of a polyisocyanurate foam. Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Januar 2013.
- [208] D. A. Purser und J. A. Purser: HCN yields and fate of fuel nitrogen for materials under different combustion conditions in the ISO 19700 tube furnace and large-scale fires. In *Fire Safety Science*, Volume 9, S. 1117–1128, 2008.
- [209] S. T. McKenna und T. R. Hull: The fire toxicity of polyurethane foams. In *Fire Science Reviews*. Springer Open, 2016.

- [210] M. Herrera, G. Matuschek und A. Kettrup: Thermal degradation of thermoplastic polyurethane elastomers (tpu) based on mdi. In *Polymer Degradation and Stability*, Volume 78, S. 323–331. Elsevier ScienceDirekt, 2002.
- [211] A. Schaberg: Aufstellen der Reaktionsgleichung für PUR: E-Mail vom 13.08.2020.
- [212] Stichting Blender Foundation: Blender 2.79. <https://www.blender.org/>.
- [213] Blenderfds 4.3.0. <https://github.com/firetools/blenderfds>.
- [214] Kraftfahrt-Bundesamt: Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen im Dezember 2018. https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2018_monatlich/FZ11/fz11_2018_12_xlsx.xlsx;jsessionid=9FF6F2ACCAE780F93DE53F88958CDF9D.live11293?__blob=publicationFile&v=31. zuletzt geprüft: 15. Oktober 2020.
- [215] Kraftfahrt-Bundesamt: Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen im Dezember 2019. https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019_monatlich/FZ11/fz11_2019_12_xlsx.xlsx;jsessionid=9FF6F2ACCAE780F93DE53F88958CDF9D.live11293?__blob=publicationFile&v=4. zuletzt geprüft: 15. Oktober 2020.
- [216] M-GarVO (2008): Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen.
- [217] DIN EN ISO 10456:2010-05 (2010): Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte.
- [218] M. Dietrich: Sind Sicherheitsschleusen in Garagen noch zeitgemäß? *Feuertrutz Magazin*, 10, Ausgabe: 6, S. 48, 2017.
- [219] DIN VDE 0833-2:2017-10 (2017): Gefahrenmeldeanlage für Brand, Einbruch und Überfall – Teil 2: Festlegungen für Brandmeldeanlagen.
- [220] DIN EN 54-5:2018-10 (2018): Brandmeldeanlagen – Teil 5: Wärmemelder – Punktförmige Melder.

- [221] VDI 6019 Blatt 1 (2006): Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit.
- [222] DIN EN 12259-1:2006-03 (2006): Ortsfeste Löschanlagen – Bauteile für Sprinkler- und Sprühwasseranlagen – Teil 1: Sprinkler.
- [223] K. Frank, N. Gravestock, M. Spearpoint und C. Fleischmann: A review of sprinkler system effectiveness studies. *Fire Science Reviews*, 2, Ausgabe: 1, S. 6, 2013.
- [224] AGBF bund im Deutschen Städtetag: Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren für Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten: 19. November 2015.
- [225] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Mal über Tabuthemen reden. Sicherung gleichwertiger Lebensbedingungen, Mindeststandards, Wüstungen ... – worüber nur hinter vorgehaltener Hand diskutiert wird.: Dezentertagung des DGD-Arbeitskreises „Städte und Regionen“ in Kooperation mit dem BBSR Bonn am 1. und 2. Dezember 2016 in Berlin. BBSR-Online-Publikation 02/2018, Bonn, Februar 2018.
- [226] DIN 4102-2:1977-09 (1977): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen.
- [227] DIN 33402-2:2005-12 (2012): Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte.
- [228] DIN EN 547-1:2009-01 (2009): Sicherheit von Maschinen – Körpermaße des Menschen – Teil 1: Grundlagen zur Bestimmung von Abmessungen für Ganzkörper-Zugänge an Maschinenarbeitsplätzen.
- [229] D. A. Purser: Behaviour and Travel Interactions in Emergency Situations and Data needs for Engineering Design. In *Pedestrian and evacuation dynamics conference*, S. 355–370, 2003.
- [230] Y. Hu, X. Zhou, J. Cao, L. Zhang, G. Wu und L. Yang: Interpretation of Fire Safety Distances of a Minivan Passenger Car by Burning Behaviors Analysis. *Fire Technology*, 56, Ausgabe: 4, S. 1527–1553, 2020.

- [231] U. Weidmann: Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literaturlauswertung. Technischer Bericht, 1992.
- [232] S. Jafer und R. Lawler: Emergency crowd evacuation modeling and simulation framework with cellular discrete event systems. *SIMULATION*, 92, Ausgabe: 8, S. 795–817, 2016.
- [233] E. Galea, Z. Wang, A. Veeraswamy, F. Jia, P. Lawrence und J. Ewer: Coupled Fire/Evacuation Analysis of the Station Nightclub Fire. *Fire Safety Science*, 9, S. 465–476, 2008.
- [234] B. Schröder: Multivariate methods for life safety analysis in case of fire. Dissertation, Jülich, 2017.
- [235] DGUV Information 2015-410: Bildschirm- und Büroarbeitsplätze; Leitfaden für die Gestaltung. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Dezember 2019.
- [236] W. K. Chow: Comment on estimating heat release rate for a design fire in Sprinkler protected area. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 7, Ausgabe: 1, S. 1–5, 2005.
- [237] V. Babrauskas: Glass breakage in fires. *Fire Science and Technology Inc.*, 2021.
- [238] E. Alakangas: Eigenschaften von festen Biomassebrennstoffen und Vergleich zu fossilen Brennstoffen. Technical Research Centre of Finland VTT.
- [239] E. Alakangas: Properties of wood fuels used in Finland - BIOSOUTH -project. Technischer Bericht, Technical Research Centre of Finland VTT, 2005.
- [240] T. Puttkamer: Charakterisierung biogener Festbrennstoffe. Dissertation, Universität Stuttgart, 2005.
- [241] A. Schaberg: Aufstellen der Reaktionsgleichung für Sperrholz: E-Mail vom 03.05.2021.
- [242] Statistisches Bundesamt: Nettokaltmieten 2018. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/_Grafik/_Interaktiv/nettokaltmieten.html. zuletzt geprüft: 22. Januar 2019.

- [243] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd und M. Vanella: Fire Dynamics Simulator 6.7.5 Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model.
- [244] H. E. Friedrich, Herausgeber: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [245] A. Bittern: Analysis of FDS Predicted Sprinkler Activation Times with Experiments. *Fire Engineering Research Report 04/8*, 2004.
- [246] W. Grawe und M. Wichers: Zur Einführung der BIM-Methode in den Planungs- und Herstellungsprozess. *Stahlbau*, 87, Ausgabe: 2, S. 95–101, 2018.
- [247] J. Otto und N. Bartels: Integration von FM-Prozessdaten in ein digitales Gebäudemodell. *Bautechnik*, 95, Ausgabe: 12, S. 823–831, 2018.
- [248] O. Geibig und N. Krönert: Effizienz in der Brandschutzplanung – Hilti Button für Brandabschottungen: Von der Bedeutung der BIM-Methode am Beispiel des Brandschutzes und der Überwindung von Hemmschwellen. *Bautechnik*, 90, Ausgabe: Sonderheft: BIM – Building Information Modeling, S. 70–72, 2013.
- [249] Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Planen und Bauen: Chancen von BIM für die Versicherungswirtschaft [online]. <https://www.kompetenzzentrum-planen-und-bauen.digital/kos/WNetz?art=News.show&id=324>, 2018. zuletzt geprüft: 31. Januar 2019.
- [250] H. Hardt: Instandhaltungsverträge: Grundlagen und Vertragserstellung nach DIN EN 13269. Beuth Praxis. Beuth Verlag, 1. Auflage, 2018.
- [251] J. Neubert: Studie zur Qualifizierung der Kostenplanung und Kostensteuerung im BIM-geprägten Planungsprozess. Diplomarbeit, Staatliche Studienakademie Glauchau, Glauchau, 21.08.2017.
- [252] VDI 6009-3:2003-12 (2003): Facility Management: Einführung eines Computer aided Facility Management-Systems (CAFM).
- [253] T. Bahnert, D. Heinrich und R. Johrendt: Planungsleistungen und Honorare mit BIM. W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2020.
- [254] BIM Institut, Bergische Universität Wuppertal: Massnahmen zur Umsetzung eines effizienten Projektrisikomanagements durch Einsatz der Methode BIM. <https://biminstitut.uni-wuppertal.de/de/forschung/>

- forschungsprojekte/bim-basiertes-risikomanagement.html. zuletzt geprüft: 6. Juli 2019.
- [255] J. Dimyadi, M. Spearpoint und R. Amor: Generating fire dynamics simulator geometrical input using an IFC-based building information model. *Journal of Information Technology in Construction*, 13, Ausgabe: 12, S. 443–457, 2007.
- [256] J. Dimyadi, M. Spearpoint und R. Amor: Sharing Building Information using the IFC Data Model for FDS Fire Simulation. *Fire Safety Science*, 9 S. 1329–1340, 2008.
- [257] DIN 18230-1:2010-09 (2010): Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer.
- [258] MIndBauRL (2014): Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau.
- [259] Hauptverband der allgemein beeideten und gerichtlich zertifizierten Sachverständigen Österreichs Landesverband Steiermark und Kärnten: Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile. Graz, 3. Auflage, 2006.
- [260] Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen: Endbericht: Forschungsprogramm „Zukunft Bau“. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2009/LebensNutzungsdauer/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2. zuletzt geprüft: 22. Januar 2019.

A Vorgehenssystematik der DIN 18009-1

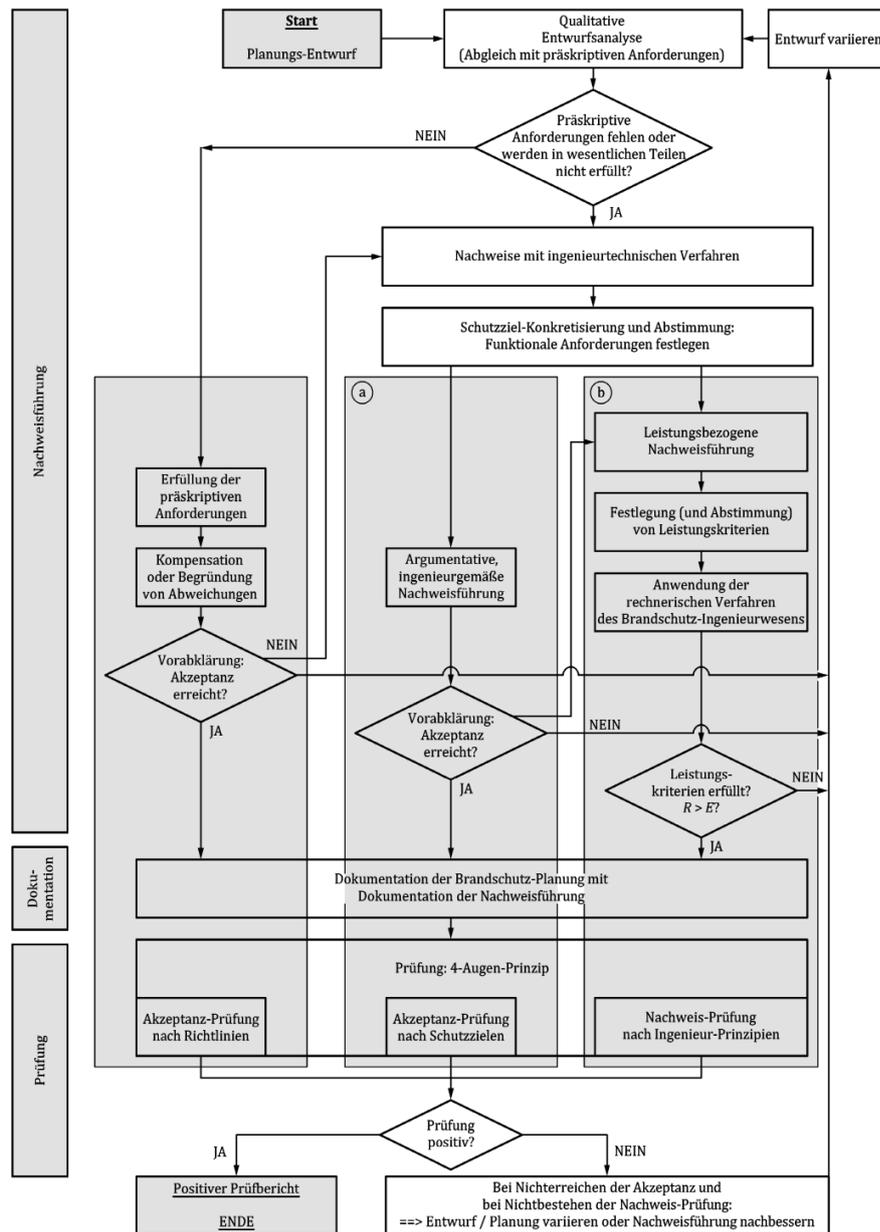


Abbildung A.1: Vorgehenssystematik der DIN 18009-1 für ingenieurtechnische Verfahren im Rahmen der Brandschutzplanung [61, S. 11]

B Kennwerte für die Kostenanalyse

Tabelle B.1: Nettopreise ausgewählter Kostenpositionen für Türen und Wände

Bezeichnung	Größe	Nettopreis in €					Quelle
		▶	▷	∅	◁	◀	
Stahltür, zweiflügelig	Stück	1.128	1.737	2.154	2.791	3.958	[127, S. 536]
Stahltür, Brandschutz, T 30 RS, zweiflügelig	Stück	1.325	2.207	2.545	3.839	6.594	[127, S. 542]
Montagewand, Metall-UK, 0,10 m, Gipsplatten, einlagig, MW 0,04 m	m ²	37	48	52	61	80	[127, S. 660]
Montagewand, Metall-UK, 0,15 m, Gipsplatten, zweilagig, MW 0,04 m, EI 30	m ²	39	52	57	67	91	[127, S. 661]
Montagewand, Metall-UK, 0,10 m, Gipsplatten DF zweilagig, MW 0,05 m, EI 90	m ²	46	58	63	74	102	[127, S. 658]

Tabelle B.2: Nettopreise ausgewählter Kostenpositionen für Brandschutzklappen und Brandschutzabschottungen

Bezeichnung	Größe	Nettopreis in €					Quelle
		▶	▷	∅	◁	◀	
Brandschutzklappen	Stück	176	394	504	549	691	[127, S. 799]
Brandschutzabschottungen, R90, DN20	Stück	31	35	36	37	42	[127, S. 766]

Tabelle B.3: Nettopreise ausgewählter Kostenpositionen für Sprinkler- und Brandmeldeanlagen

Bezeichnung	Größe	Nettopreis in €					Quelle
		▶	▷	∅	◁	◀	
Sprinkler nach VdS CEA4001							
Sprinklerköpfe an den Decken (ca. 1 Sprinkler/m ²)	Stück			88,03 ¹			[32, S. 6]
Infrastruktur (Sprinklerzentrale und Druckluftwasserbehälter bis 1.000 Sprinkler)	Stück			33.012,17 ¹			[32, S. 6]
Wassertank	Stück			33.012,17 ¹			[32, S. 6]
Brandmeldeanlage nach DIN 14675							
Brandmelder (ca. 1 Melder/60 m ²) ²	Stück			148,55 ¹			[32, S. 6]
Sirene	Stück			137,55 ¹			[32, S. 6]
Infrastruktur (Zentrale, Feuerwehrbedienfeld und Weiterleitung)	Stück			6.602,43 ¹			[32, S. 6]
Schlüsseldepot FSD 3	Stück			3.301,22 ¹			[32, S. 6]

¹ Die hier dargestellten Nettopreise wurden auf das erste Quartal 2018 mittels der Baupreisindizes des statistischen Bundesamtes auf Basis der Originalwerte aus dem dritten Quartal 2014 umgerechnet.

² Bei einer ungünstigen Deckenaufteilung verkleinert sich die Bezugsgröße

Tabelle B.4: Kostengruppenspezifische Jahreskostenfaktoren [122, S. 27]

Kosten- gruppe	Anlagenart	Jahreskostenfaktor	
		Wartung/ Inspektion/ Bedienung (f_1)	Instand- setzung (f_2)
410	Abwasser-, Wasser-, Gas- und Feuerlöschanlagen	1,11 %	0,98 %
420	Wärmeversorgungsanlagen	0,71 %	0,66 %
430	Lufttechnische Anlagen	1,26 %	1,10 %
440	Starkstromanlagen	0,75 %	0,70 %
450	Fernmelde- und Informationsanlagen	1,24 %	1,04 %
460	Förderanlagen	1,96 %	1,78 %
470	Nutzungsspezifische Anlagen	0,86 %	0,59 %
480	Gebäudeautomation	1,16 %	0,76 %

Tabelle B.5: Gebäudenutzungsspezifische Jahreskostenfaktoren [122, S. 27]

Gebäudenutzungsart	Jahreskostenfaktor	
	Wartung/ Inspektion/ Bedienung (f_1)	Instand- setzung (f_2)
Kindertagesstätten	0,51 %	1,16 %
Schulgebäude	1,19 %	1,25 %
Büro-/Verwaltungsbauten (mit geringem Repräsentationsanspruch)	0,94 %	1,44 %
Büro-/Verwaltungsbauten (mit hohem Repräsentationsanspruch)	1,74 %	1,11 %
Instituts-/Lehrgebäude	0,70 %	0,72 %
Forschungs-/Laborgebäude	0,94 %	0,73 %
Sportbauten	0,91 %	1,17 %
Feuerwehrgebäude	1,25 %	1,32 %
Sonstige Gebäudearten	0,97 %	0,85 %

Tabelle B.6: Nutzungsdauern ausgewählter Bau- und Anlagenteile

Ort/Art	Material	Beschaffenheit	Nutzungsdauer		Quelle
			►	◄	
Innenwände					
tragend	Beton/Ziegel	-	80	-	[259, S. 25]
tragend	Leichtbeton	-	60	-	[259, S. 25]
tragend	Holz	weich	40	70	[259, S. 25]
tragend	Holz	hart	40	70	[259, S. 25]
tragend	Stahl	-	60	-	[259, S. 25]
nicht tragend	Leichtbeton/Ziegel	-	50	-	[259, S. 25]
nicht tragend	Gibskarton	Ständerwände	30	50	[259, S. 25]
Glas					
-	Verglasung	-	-	30	[260, S. 3]
Brandwände					
-	Stahlbeton	-	80	-	[259, S. 119]
-	Ziegel	-	100	-	[259, S. 119]
-	Leichtwand	-	30	-	[259, S. 119]
Innentüren					
-	Aluminium	-	50	70	[259, S. 25]
-	Holz	weich	40	70	[259, S. 25]
-	Holz	hart	50	-	[259, S. 25]
-	Stahl	-	60	-	[259, S. 25]
Rauchschutzabschlüsse					
in Ziegelmauern/ Stahlbeton	Holz/Stahl	E 30-C (R 30)	20	40	[259, Ergänzung S. 2]
in Leichtwänden	Holz/Stahl	E 30-C (R 30)	-	30	[259, Ergänzung S. 2]
Feuerschutzabschlüsse					
in Ziegelmauern/ Stahlbeton	Holz/Stahl	T 30, T 60, T 90 (EI ₂ 30-C, EI ₂ 60-C, EI ₂ 90-C)	20	40	[259, Ergänzung S. 2]
in Leichtwänden	Holz/Stahl	T 30, T 60, T 90 (EI ₂ 30-C, EI ₂ 60-C, EI ₂ 90-C)	-	30	[259, Ergänzung S. 2]
Brandschutzklappen					
in Ziegelmauern/ Stahlbeton	Stahl	EI 60, EI 90 (K 60, K 90)	10	30	[259, Ergänzung S. 2]
Abschottungen					
Hartschott	in Ziegelmauern/ Stahlbeton	EI 30, EI 60, EI 90 (S 30, S 60, S 90)	40	-	[259, Ergänzung S. 2]
Weichschott	-	EI 30, EI 60, EI 90 (S 30, S 60, S 90)	-	15	[259, Ergänzung S. 2]
Löschanlagen - Vollschutz oder Brandabschnittsschutz					
Sprinkleranlagen	-	bei Vollwartung	20	30	[259, S. 121]
Gaslöschanlagen	-	bei Vollwartung	20	30	[259, S. 121]
Brandmeldeanlage					
Zentrale	-	-	20	30	[259, S. 118]
Optischer Rauchmelder	-	-	10	15	[259, S. 118]
Thermischer Brandmelder	-	-	10	15	[259, S. 118]
Linearmelder	-	-	10	15	[259, S. 118]

C Vollständige Übersichten der Nutzwertanalyse

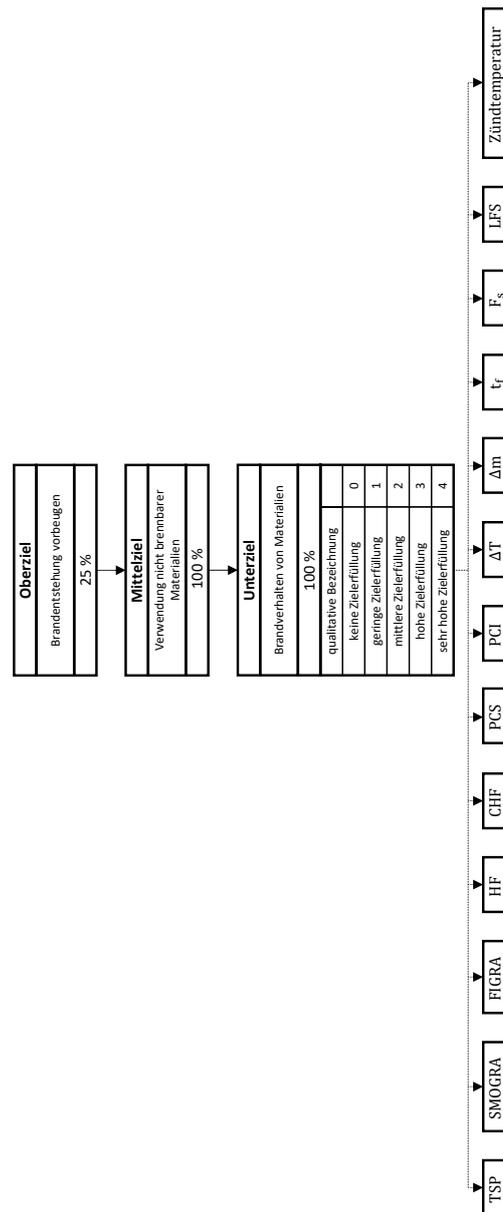


Abbildung C.1: Vollständige Übersicht des Oberzieles „Brandentstehung vorbeugen“

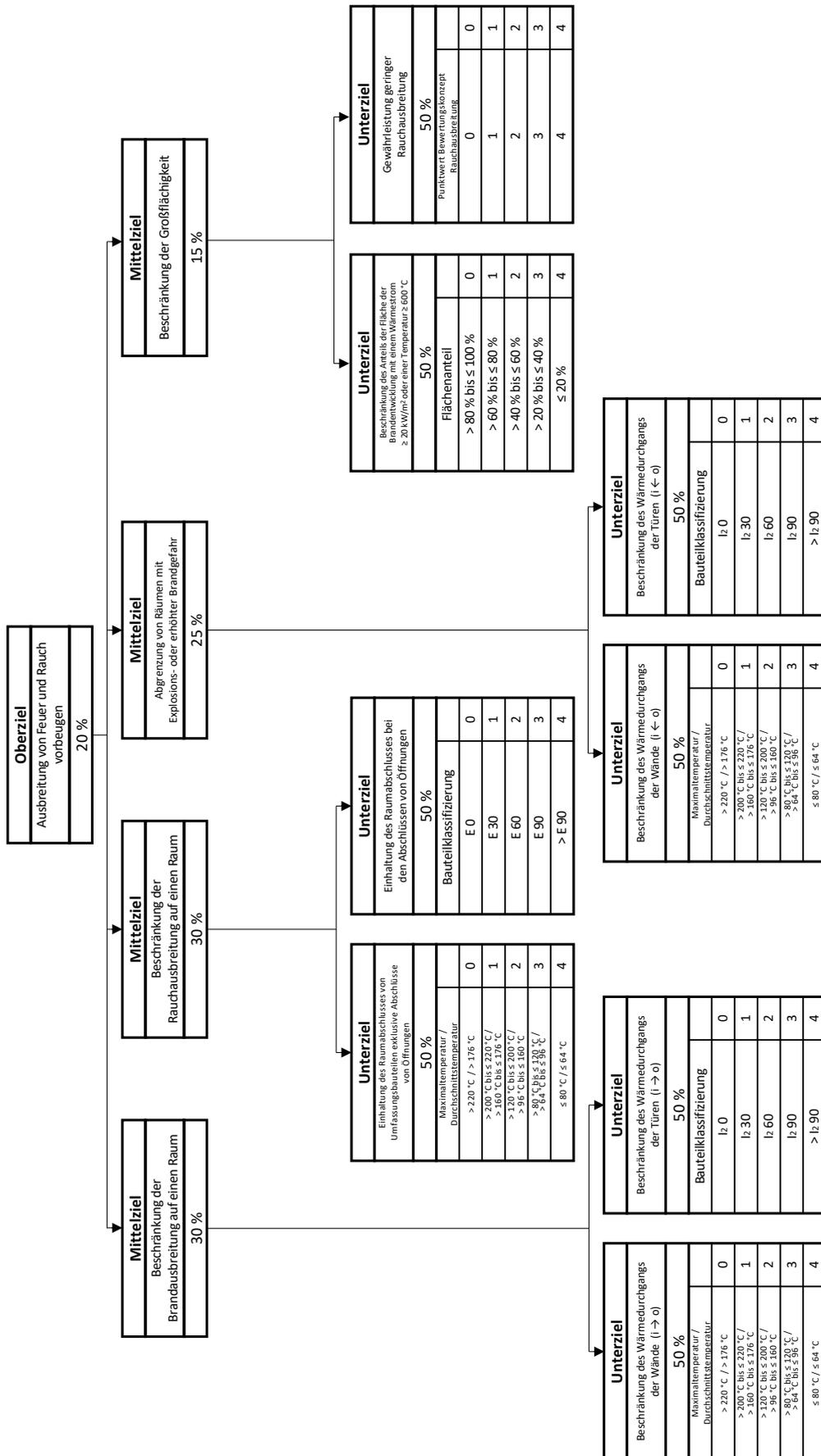


Abbildung C.2: Vollständige Übersicht des Oberzieles „Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen“

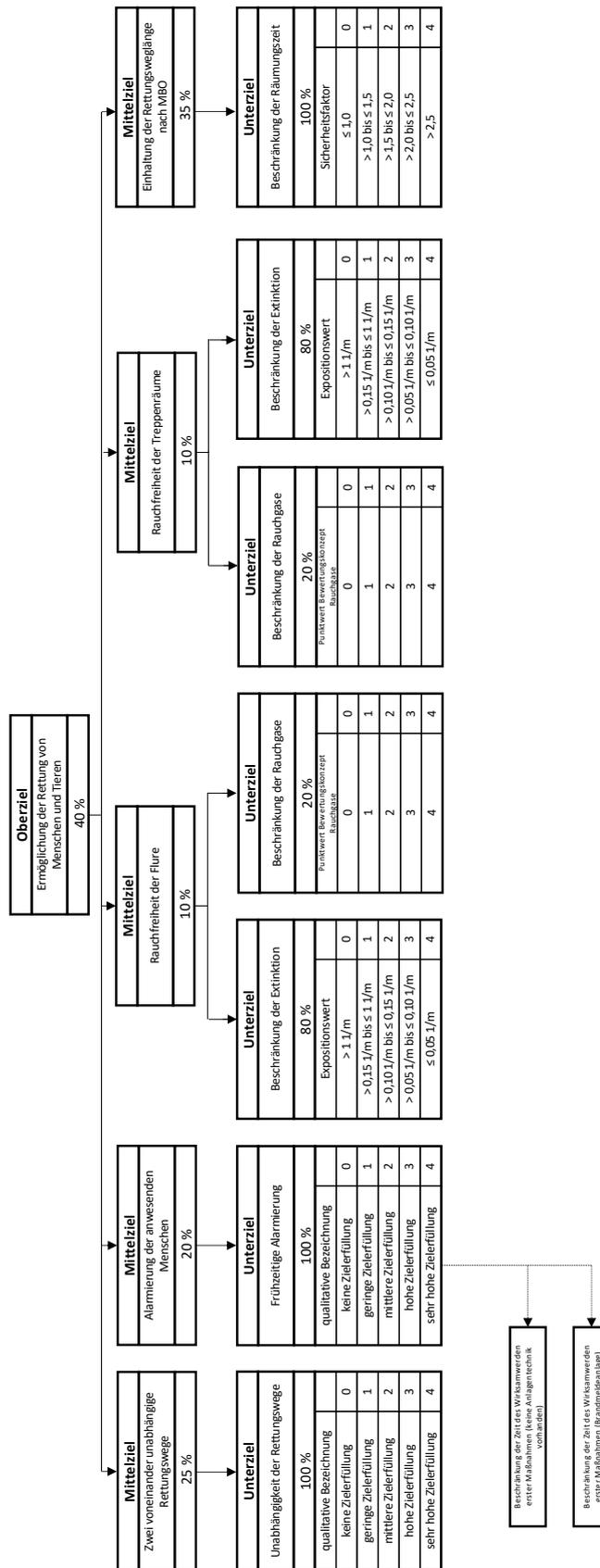


Abbildung C.3: Vollständige Übersicht des Oberzieles „Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren“

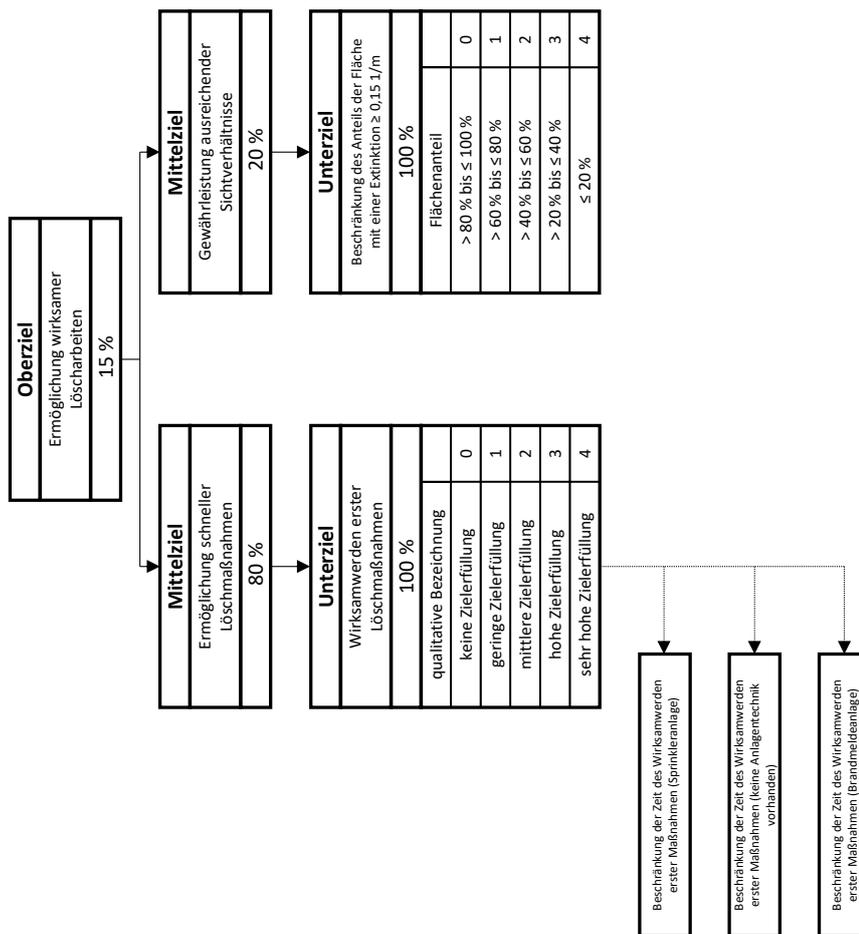


Abbildung C.4: Vollständige Übersicht des Oberzieles „Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten“

D Auswertung für das Szenario 1: Tiefgarage

D.1 Nutzwertanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“

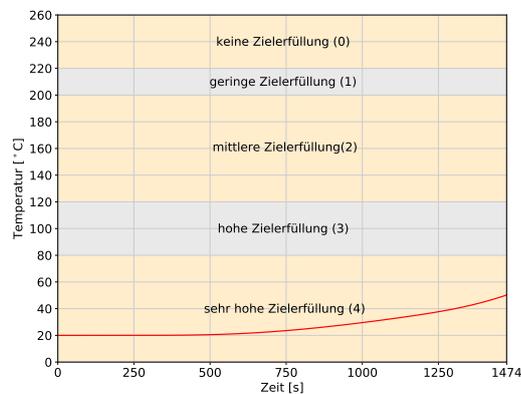


Abbildung D.1: Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)

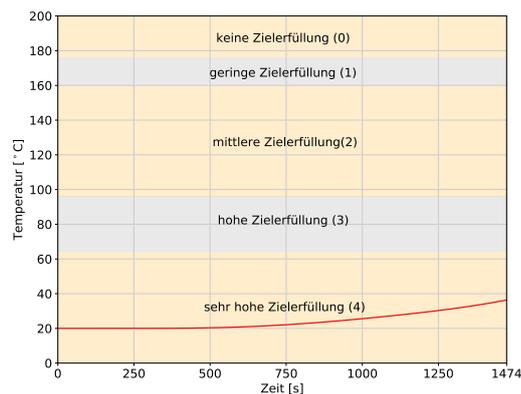


Abbildung D.2: Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)

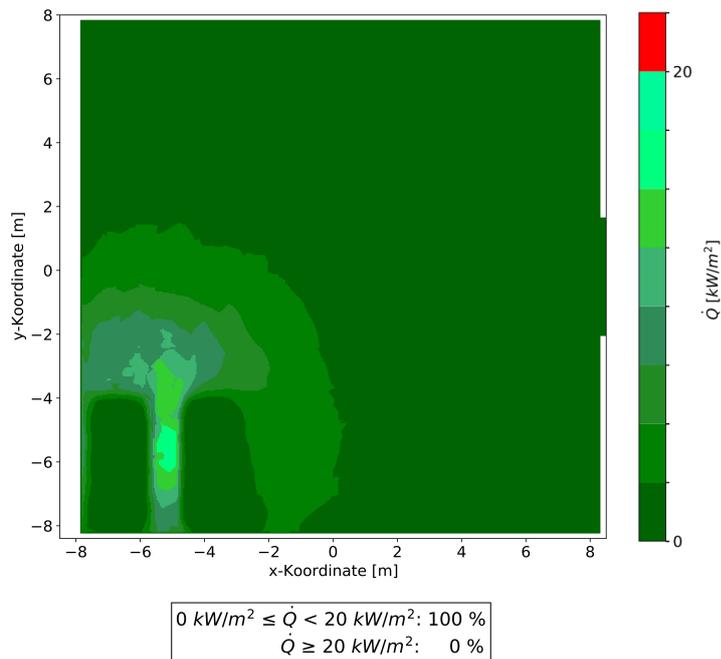


Abbildung D.3: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

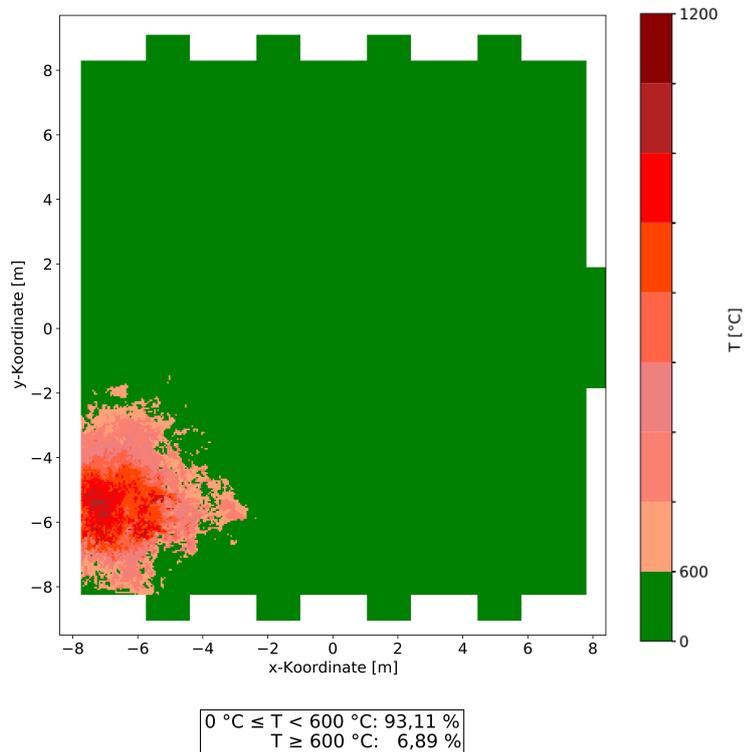


Abbildung D.4: Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

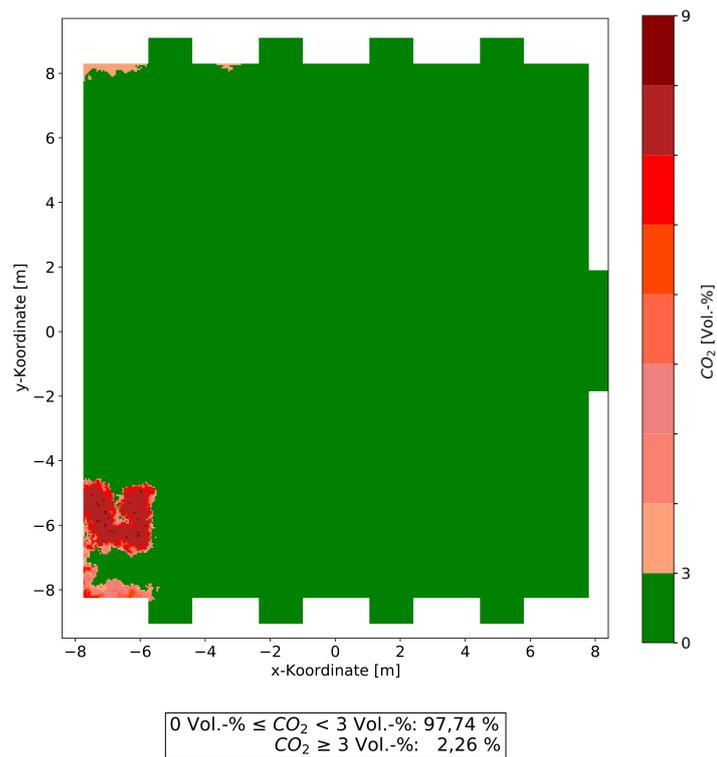


Abbildung D.5: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

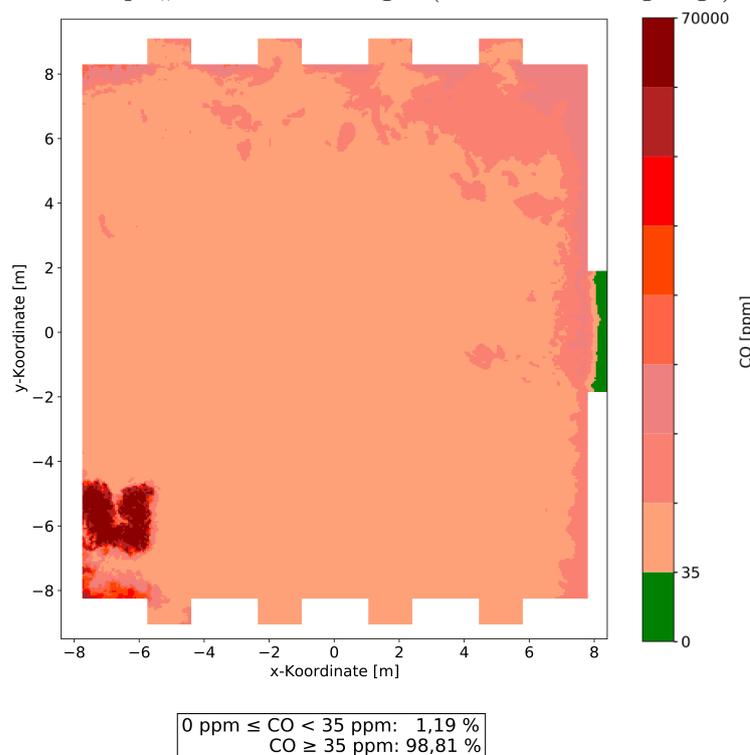


Abbildung D.6: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

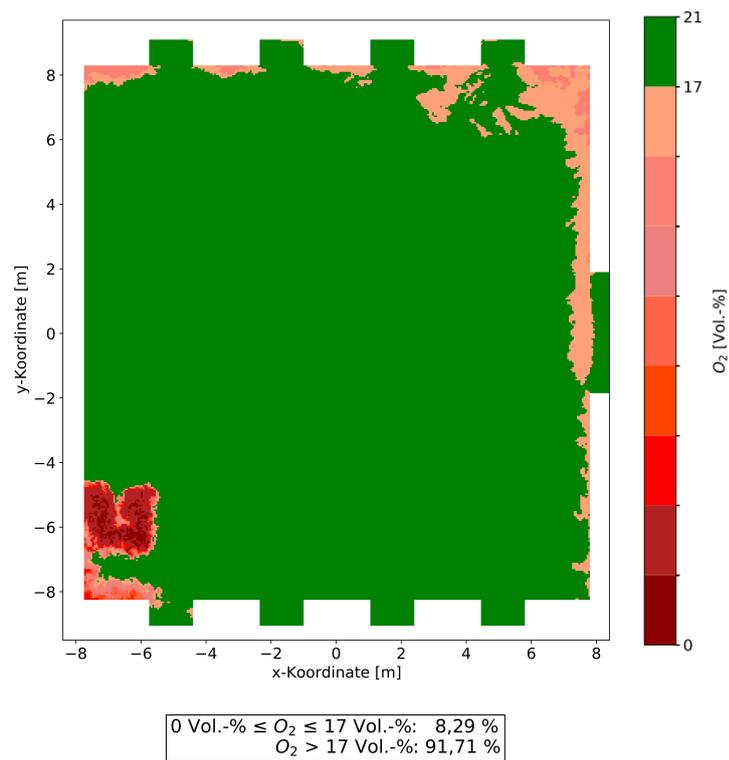


Abbildung D.7: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

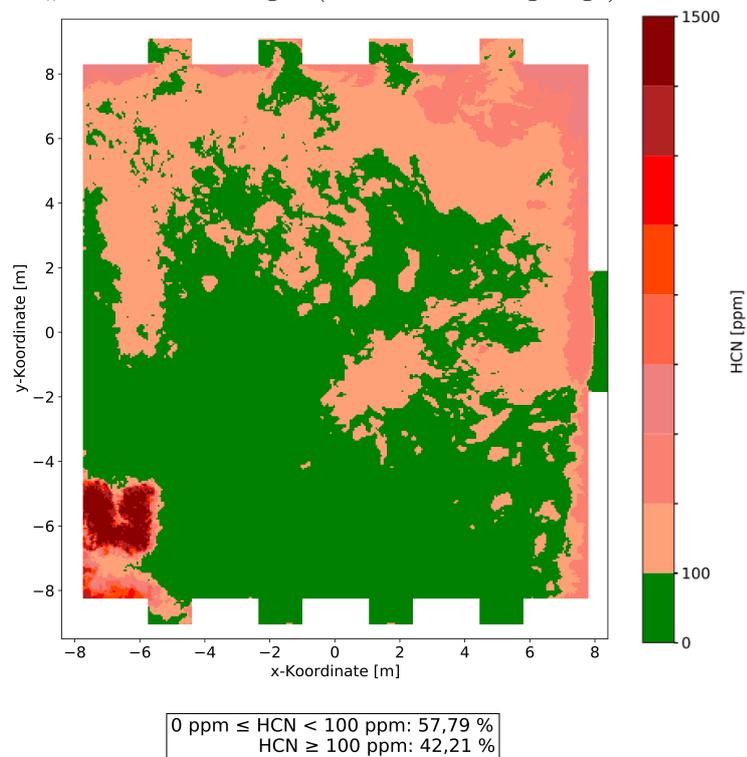


Abbildung D.8: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

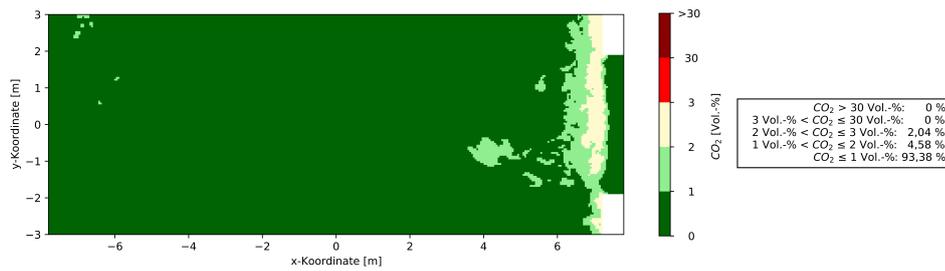


Abbildung D.9: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

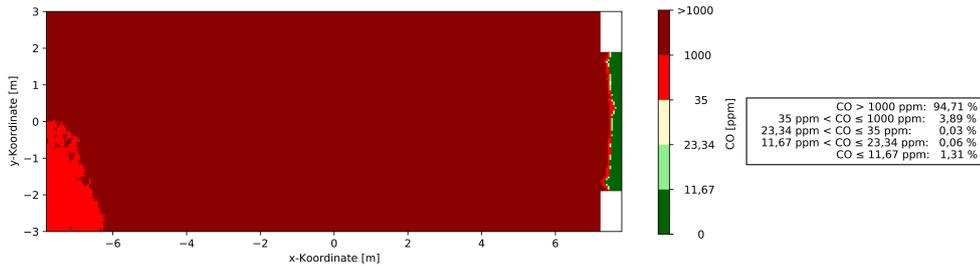


Abbildung D.10: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

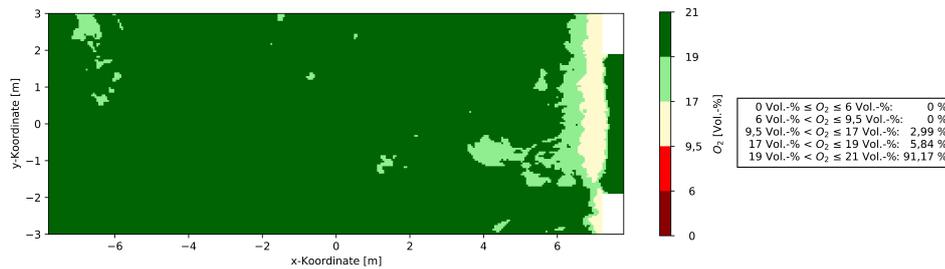


Abbildung D.11: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

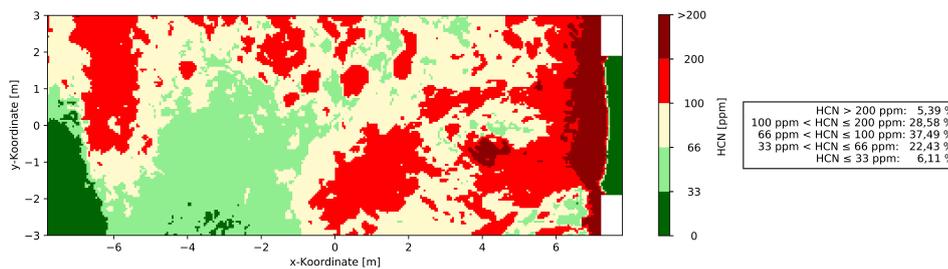


Abbildung D.12: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

D.2 Nutzwertanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“

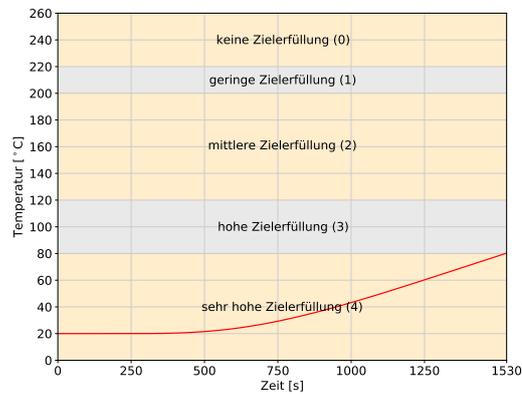


Abbildung D.13: Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)

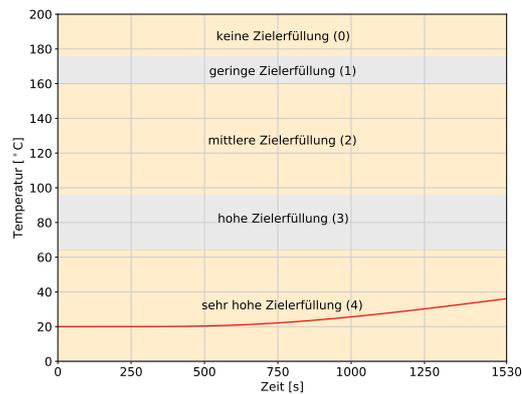


Abbildung D.14: Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 1: Tiefgarage)

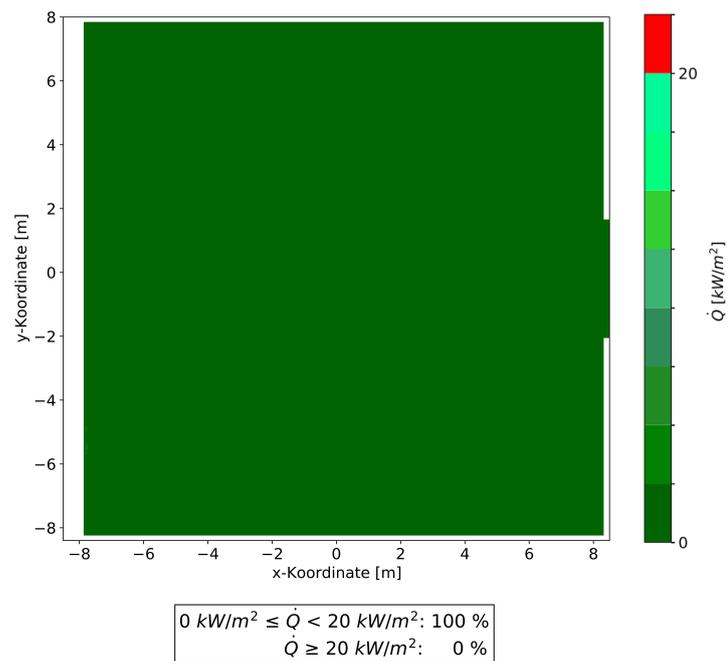


Abbildung D.15: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

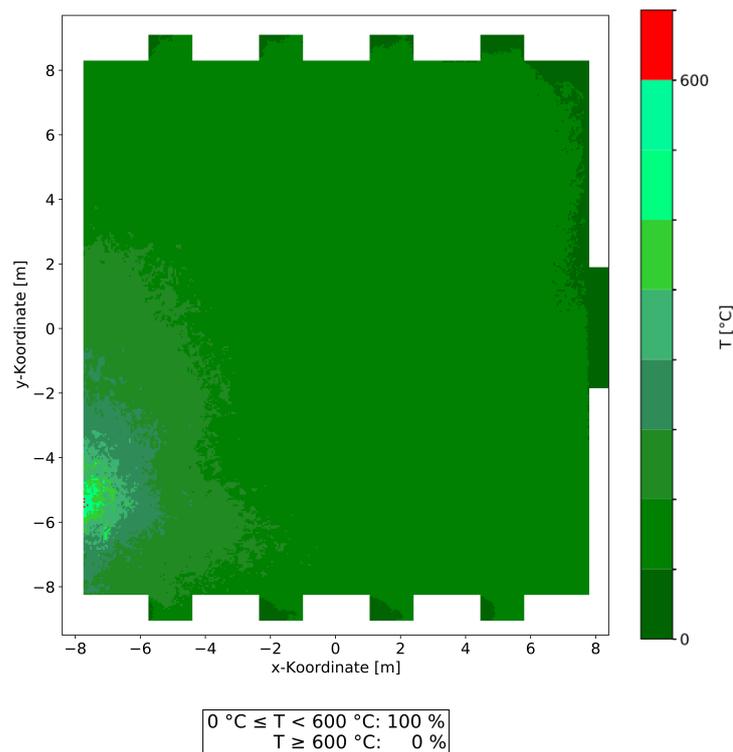


Abbildung D.16: Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

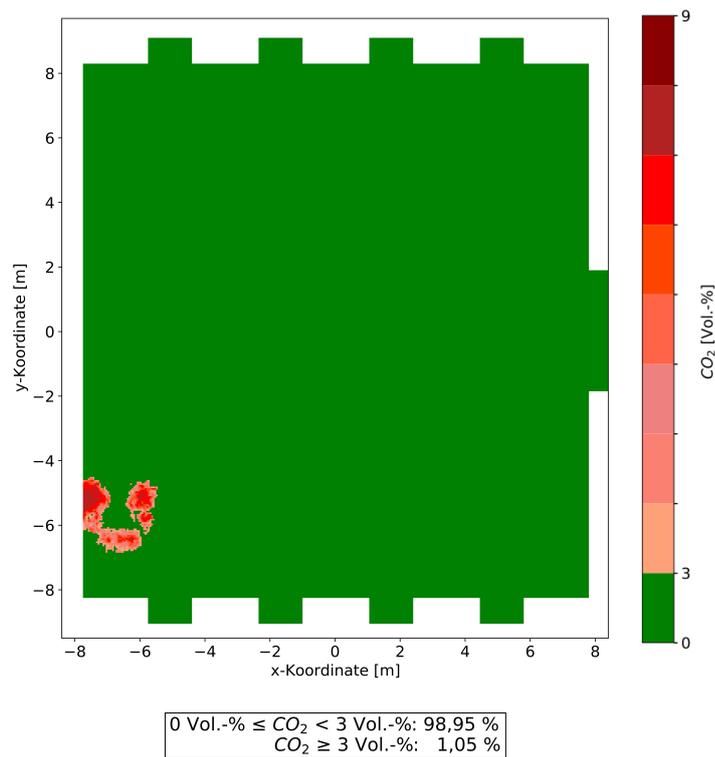


Abbildung D.17: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

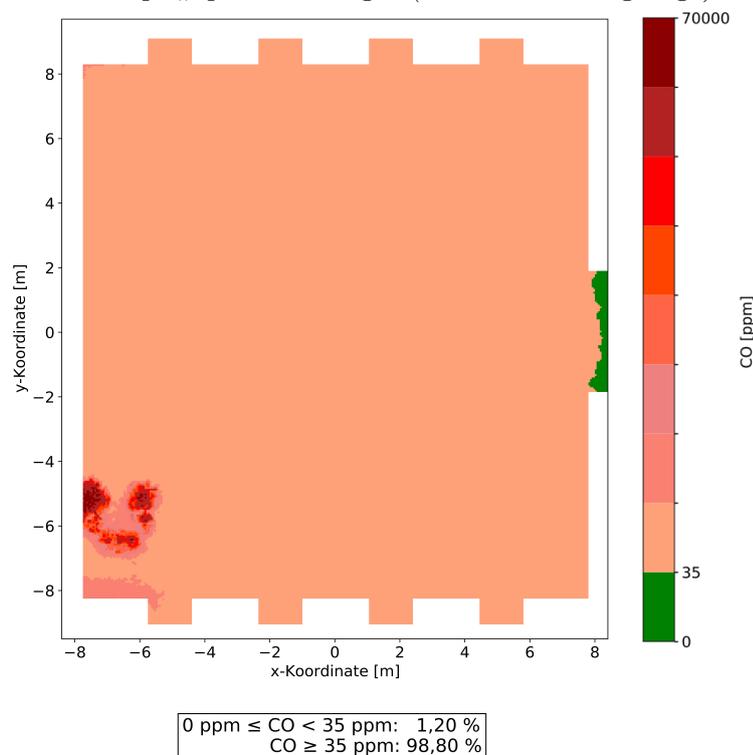


Abbildung D.18: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

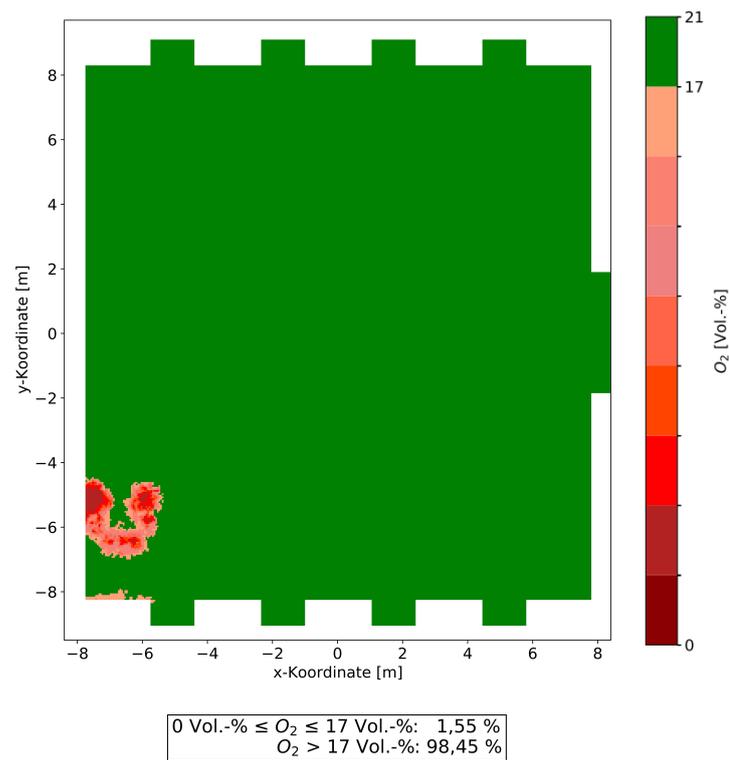


Abbildung D.19: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

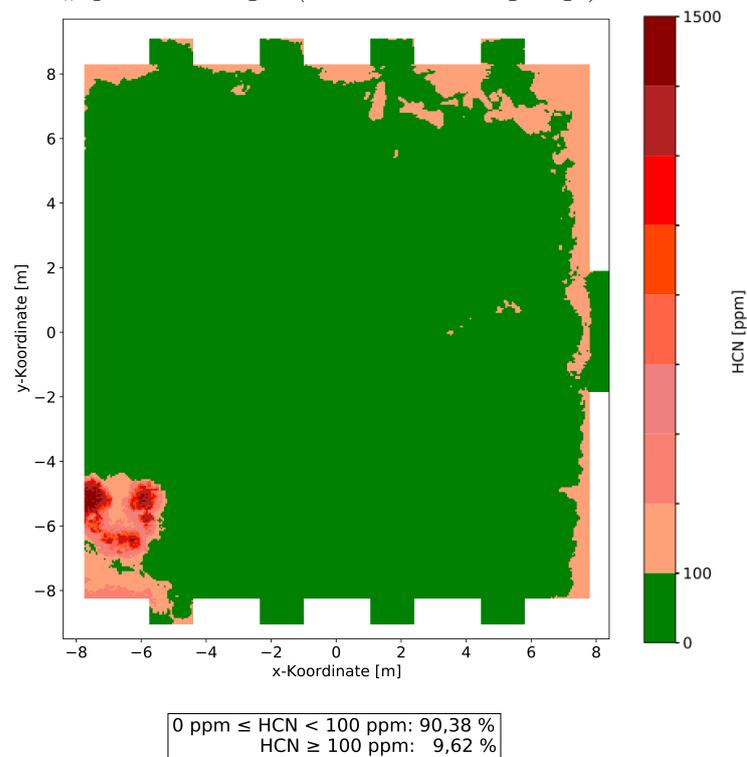


Abbildung D.20: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

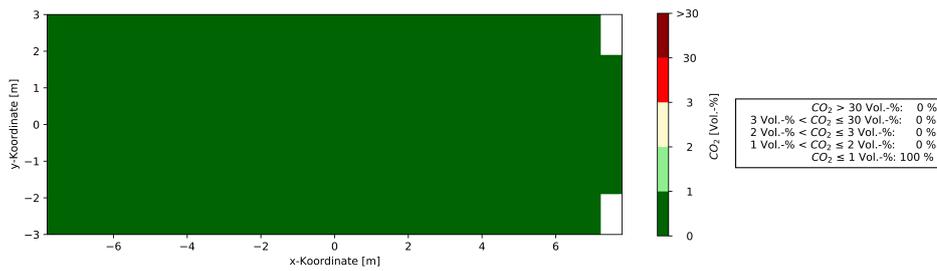


Abbildung D.21: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

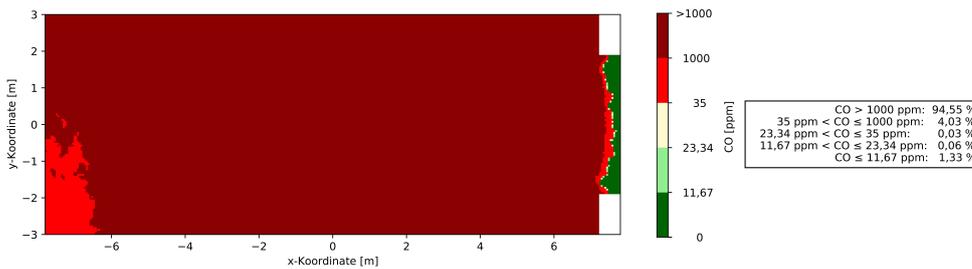


Abbildung D.22: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

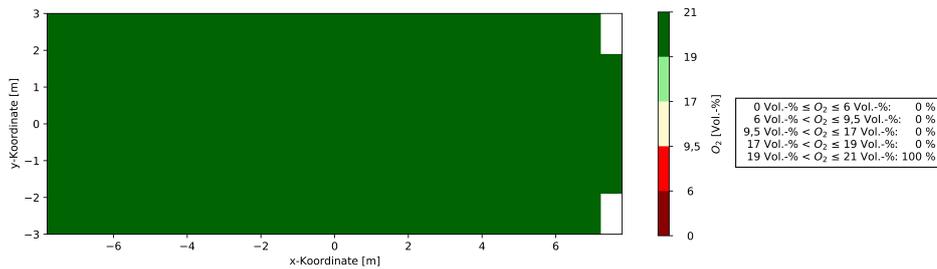


Abbildung D.23: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

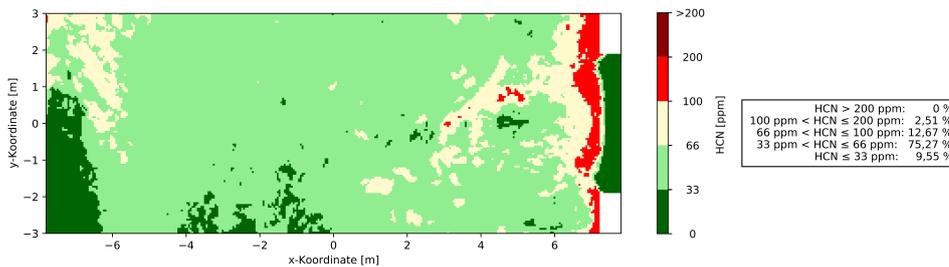


Abbildung D.24: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Rettungsweg für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 1: Tiefgarage)

D.3 Zusammenfassende Darstellung der Nutzwertanalyse

Tabelle D.1: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Brandentstehung vorbeugen)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Verwendung nicht brennbarer Materialien	100 %	Brandverhalten von Materialien	100 %	4	4	4	4	4	4
					4		4		4

Tabelle D.2: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum	30 %	Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände	50 %	2	1	4	2	3	1,5
		Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen	50 %	1	0,5	1	0,5	1	0,5
					0,45		0,75		0,60
Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum	30 %	Einhaltung des Raumabschlusses von Umfassungsbauteilen exklusive von Öffnungen	50 %	2	1	4	2	3	1,5
		Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen	50 %	1	0,5	1	0,5	1	0,5
					0,45		0,75		0,60
Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr	25 %	Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände	50 %	2	1	4	2	3	1,5
		Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen	50 %	1	0,5	1	0,5	1	0,5
					0,38		0,63		0,50
Beschränkung der Großflächigkeit	15 %	Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom oder einer Temperatur	50 %	3	1,5	4	2	4	2
		Gewährleistung geringer Rauchausbreitung	50 %	0	0	1	0	1	0
					0,23		0,30		0,30

Tabelle D.3: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Zwei voneinander unabhängige Rettungswege	27,8 %	Unabhängigkeit der Rettungswege	100 %	4	4	4	4	4	4
					1,11		1,11		1,11
Alarmierung der anwesenden Menschen	22,2 %	Frühzeitige Alarmierung	100 %	0	0	4	4	3	3
					0		0,89		0,67
Rauchfreiheit der Flure	11,1 %	Beschränkung der Rauchgase	100 %	0	0	0	0	0	0
					0		0		0
Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO	38,9 %	Beschränkung der Räumungszeit	100 %	4	4	4	4	4	4
					1,56		1,56		1,56

Tabelle D.4: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage (Oberziel: Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Ermöglichung schneller Löscharbeiten	100 %	Wirksamwerden erster Löscharbeiten	100 %	0	0	2	2	4	4
					0		2		4

Tabelle D.5: Gesamtbewertung der Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Tiefgarage

Oberziel	Gewichtung	Mittelziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen	Brandmeldeanlage	Sprinkleranlage
				Teilnutzwert	Teilnutzwert	Teilnutzwert
Brandentstehung vorbeugen	25 %	Verwendung nicht brennbarer Materialien	100 %	4	4	4
				1	1	1
Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen	20 %	Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum	30 %	0,45	0,75	0,60
		Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum	30 %	0,45	0,75	0,60
		Abgrenzung von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr	25 %	0,38	0,63	0,50
		Beschränkung der Großflächigkeit	15 %	0,23	0,30	0,30
				0,30	0,49	0,40
Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren	40 %	Zwei voneinander unabhängige Rettungswege	27,8 %	1,11	1,11	1,11
		Alarmierung der anwesenden Menschen	22,2 %	0	0,89	0,67
		Rauchfreiheit der Flure	11,1 %	0	0	0
		Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO	38,9 %	1,56	1,56	1,56
				1,07	1,42	1,34
Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten	15 %	Ermöglichung schneller Löscharbeiten	100 %	0	2	4
				0	0,30	0,60
				2,37	3,21	3,34

E Auswertung für das Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes

E.1 Nutzwertanalyse für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“

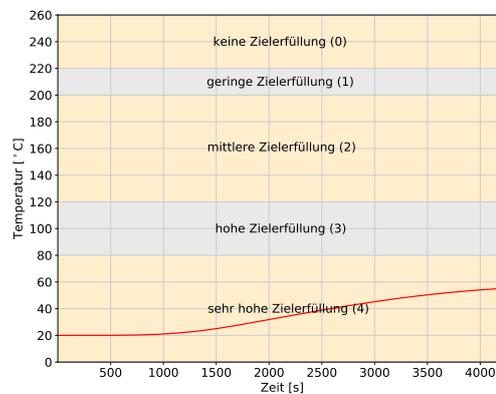


Abbildung E.1: Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

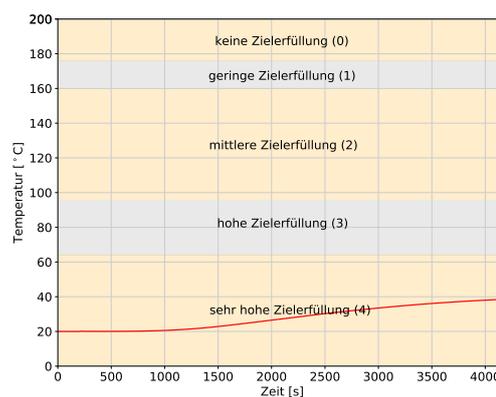


Abbildung E.2: Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

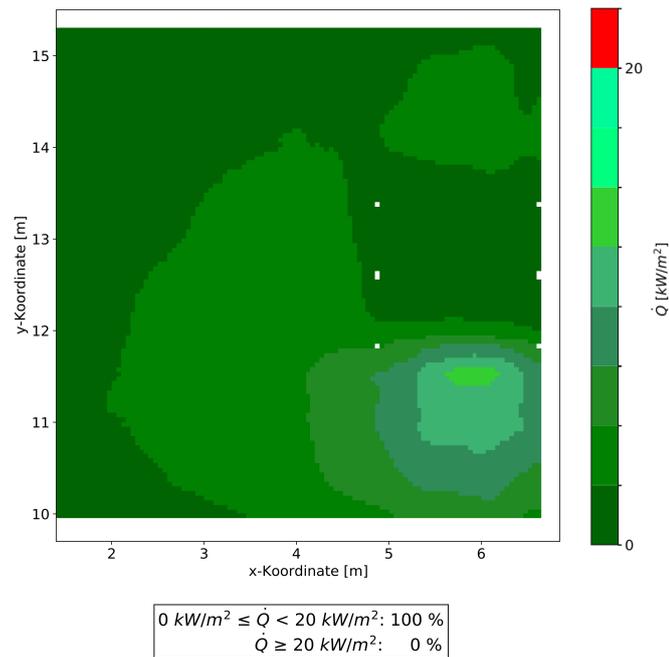


Abbildung E.3: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Büro für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

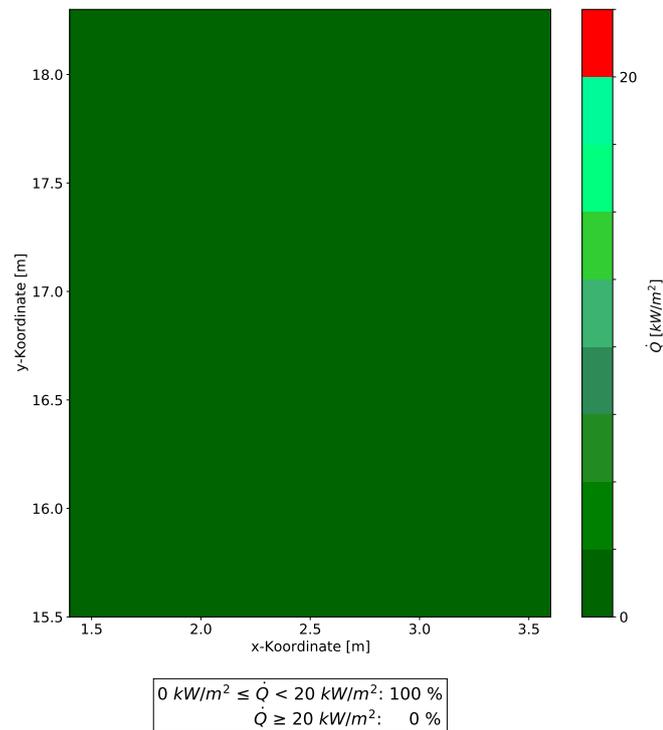


Abbildung E.4: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

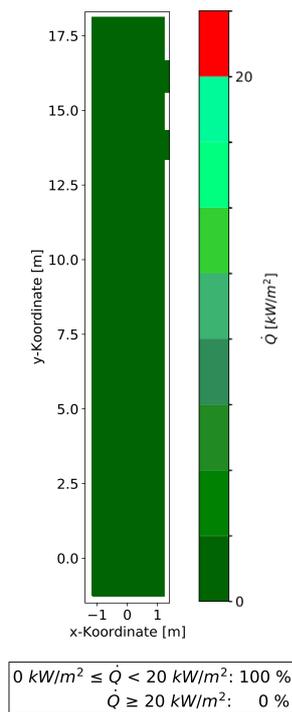


Abbildung E.5: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

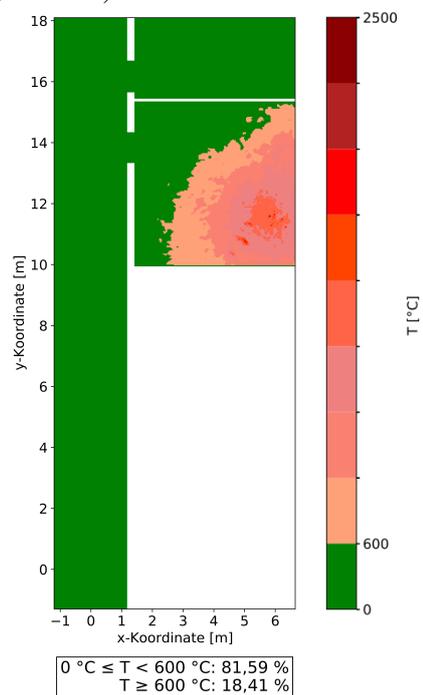


Abbildung E.6: Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.1: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration ≥ 3 Vol.-%	0	E.7
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffmonoxidkonzentration ≥ 35 ppm	0	E.8
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Sauerstoffkonzentration ≤ 17 Vol.-%	0	E.9
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Cyanwasserstoffkonzentration ≥ 100 ppm	4	E.10
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	0	

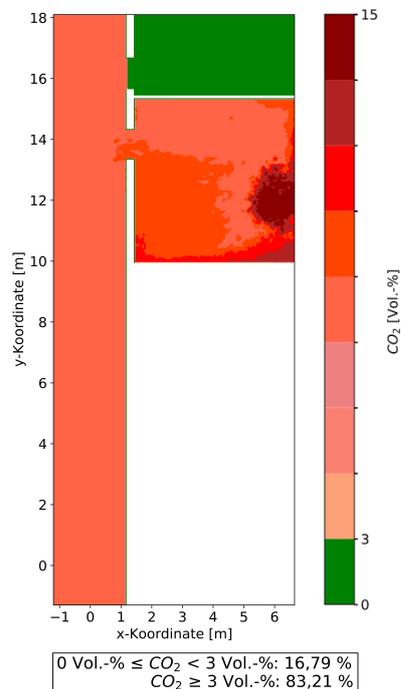


Abbildung E.7: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

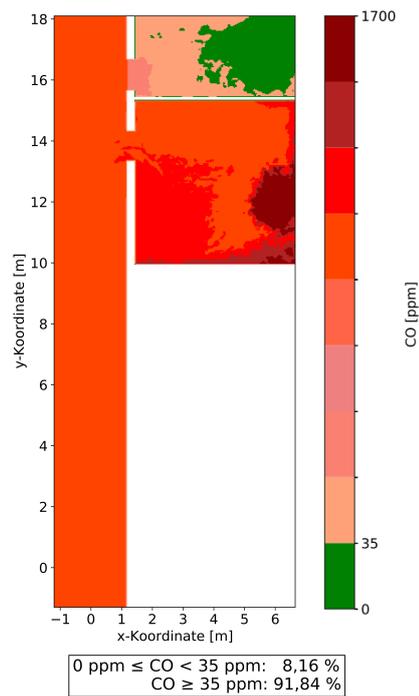


Abbildung E.8: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

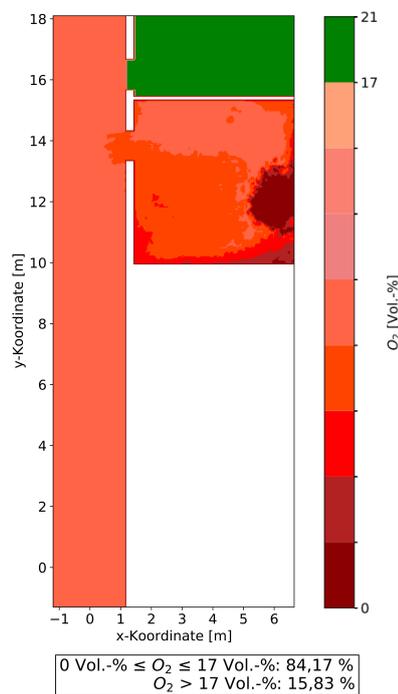


Abbildung E.9: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

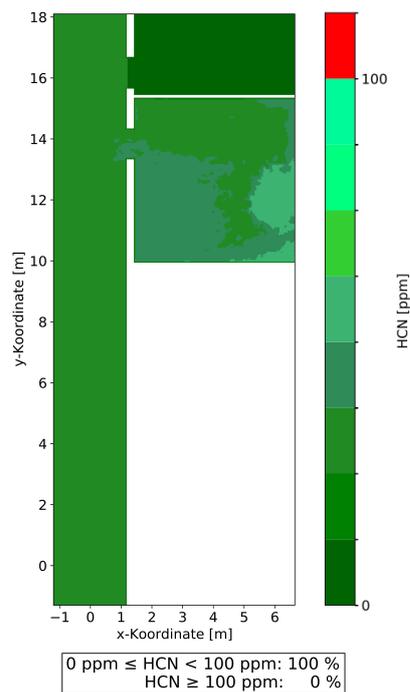


Abbildung E.10: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.2: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Flure“) für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration	1	E.11
Beschränkung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration	1	E.12
Beschränkung der Sauerstoffreduktion	1	E.13
Beschränkung der Cyanwasserstoffkonzentration	3	E.14
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	1	

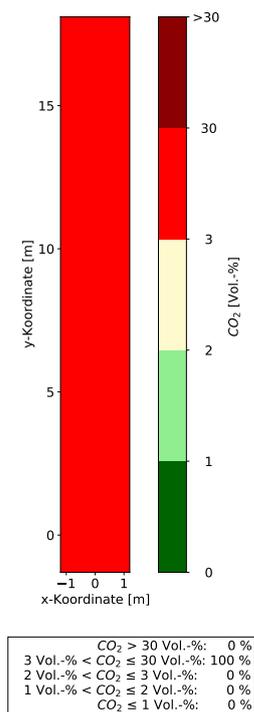


Abbildung E.11: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

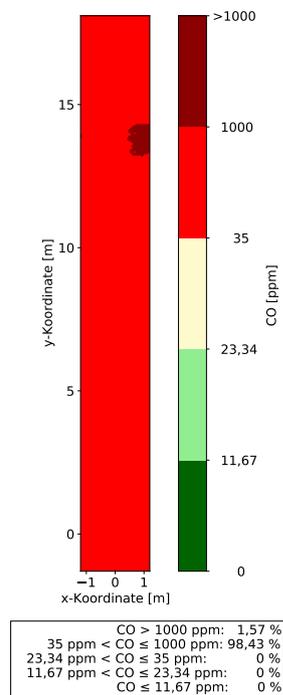


Abbildung E.12: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

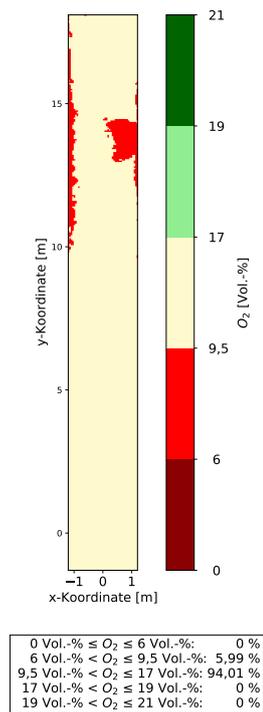


Abbildung E.13: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

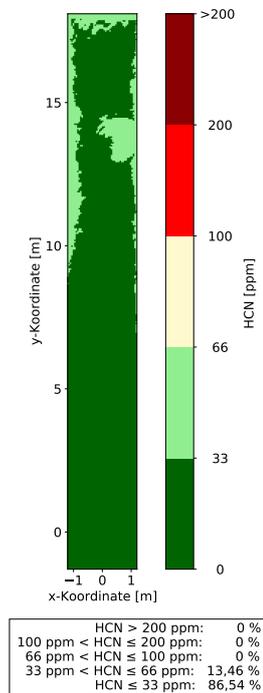


Abbildung E.14: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.3: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Treppenträume“) für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration	2	E.11
Beschränkung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration	1	E.12
Beschränkung der Sauerstoffreduktion	3	E.13
Beschränkung der Cyanwasserstoffkonzentration	4	E.14
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	1	

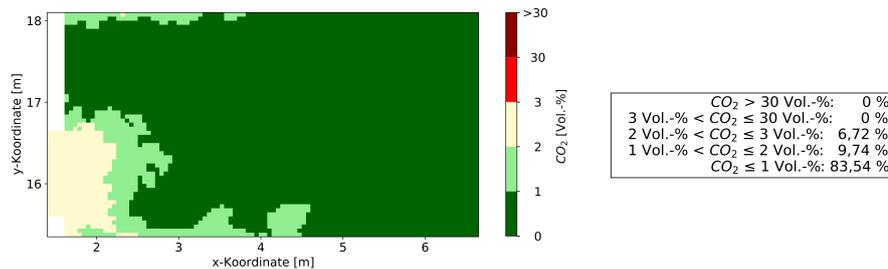


Abbildung E.15: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

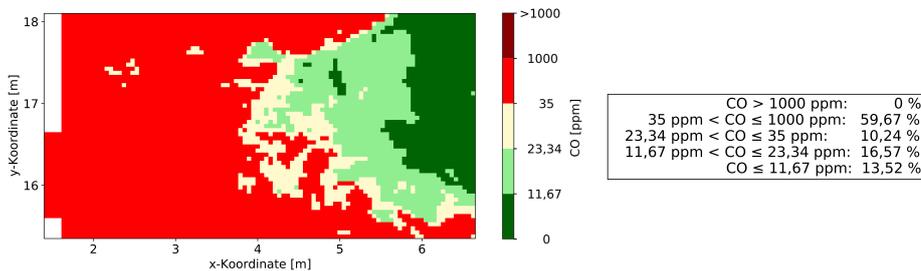


Abbildung E.16: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

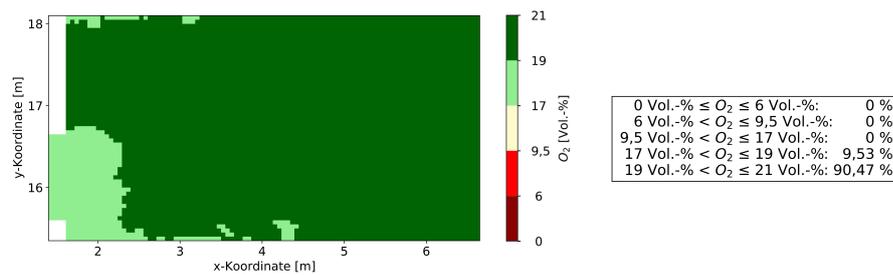


Abbildung E.17: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

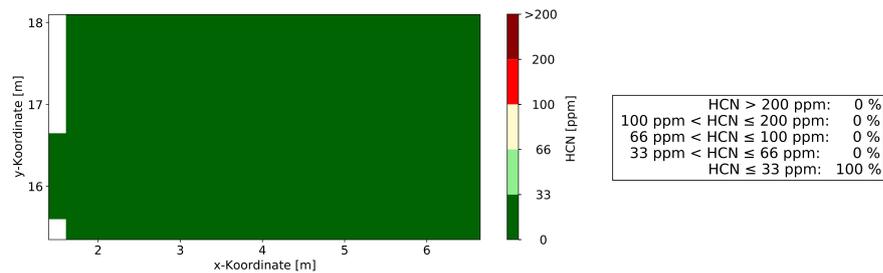


Abbildung E.18: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Wände mit Brandschutzanforderungen“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

E.2 Nutzwertanalyse für das Konzept „Brandmeldeanlage“

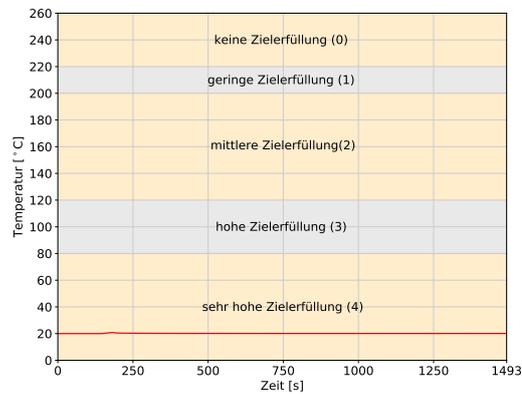


Abbildung E.19: Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

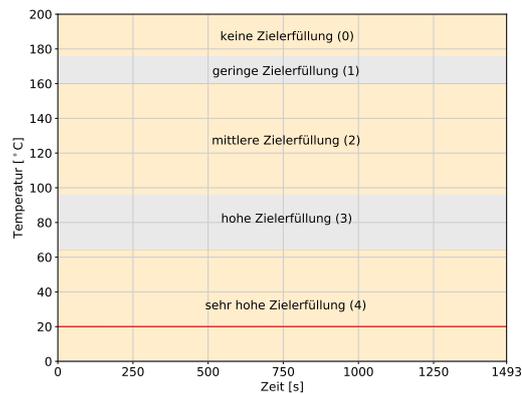


Abbildung E.20: Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

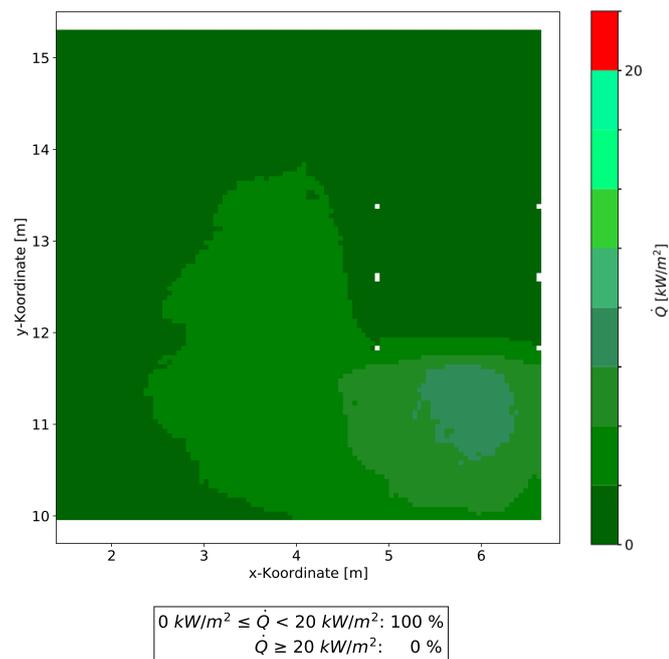


Abbildung E.21: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Büro für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

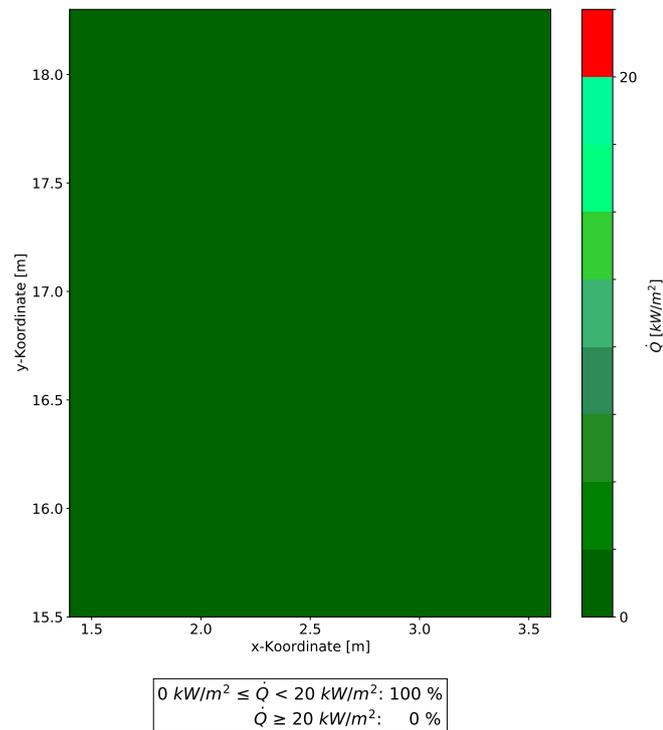


Abbildung E.22: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

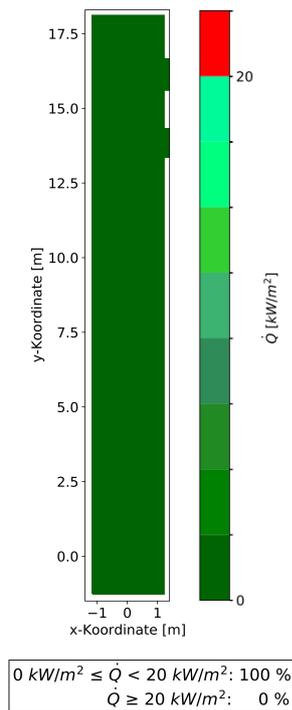


Abbildung E.23: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

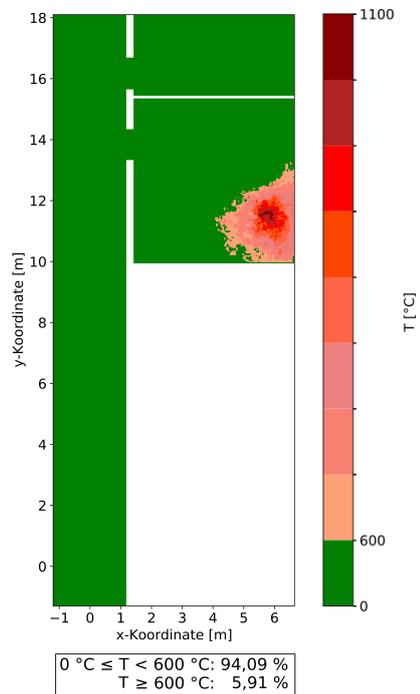
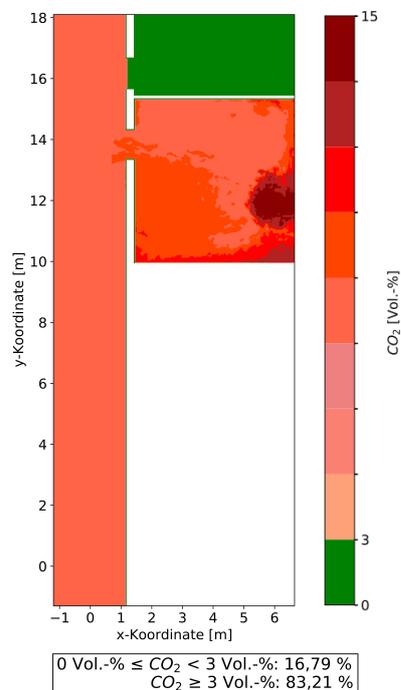


Abbildung E.24: Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.4: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration ≥ 3 Vol.-%	0	E.25
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffmonoxidkonzentration ≥ 35 ppm	0	E.26
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Sauerstoffkonzentration ≤ 17 Vol.-%	0	E.27
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Cyanwasserstoffkonzentration ≥ 100 ppm	4	E.28
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	0	

**Abbildung E.25:** Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

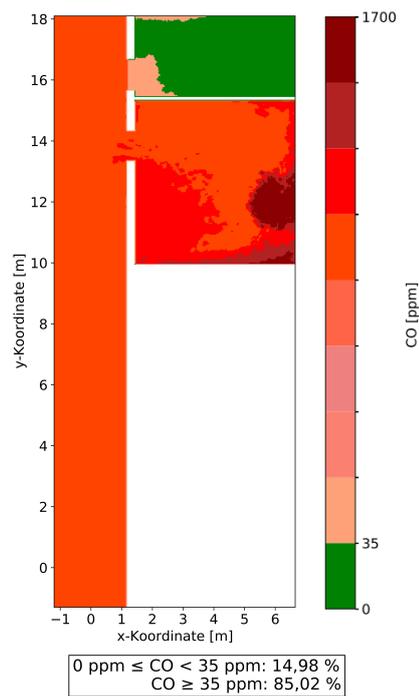


Abbildung E.26: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

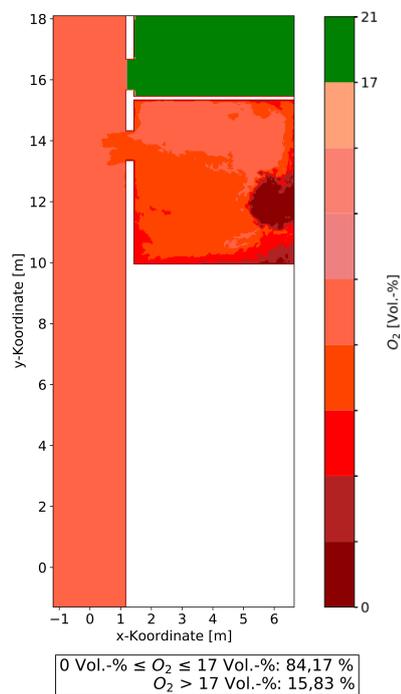


Abbildung E.27: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

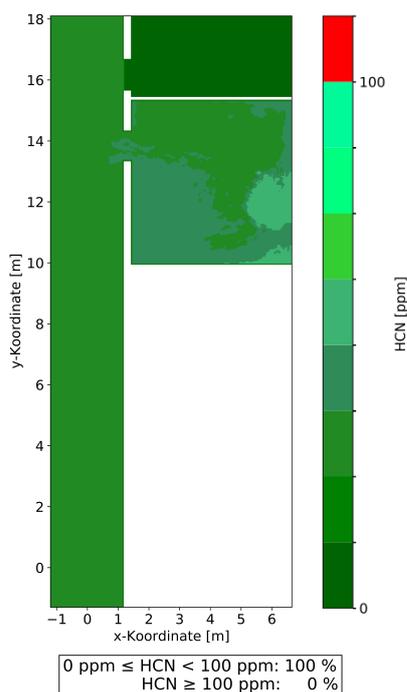


Abbildung E.28: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.5: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Flure“) für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration	1	E.29
Beschränkung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration	1	E.30
Beschränkung der Sauerstoffreduktion	1	E.31
Beschränkung der Cyanwasserstoffkonzentration	3	E.32
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	1	

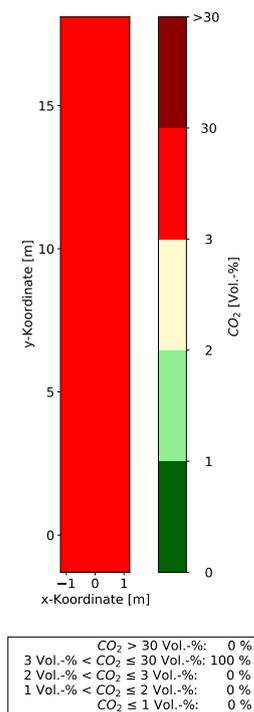


Abbildung E.29: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

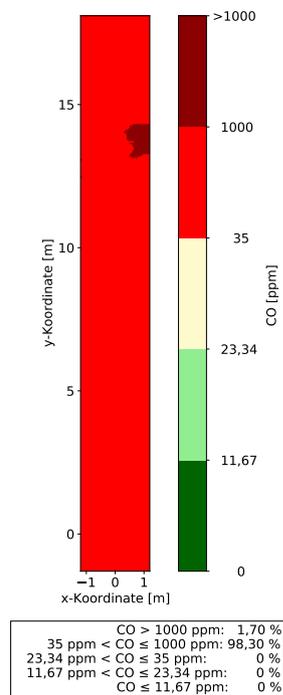


Abbildung E.30: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

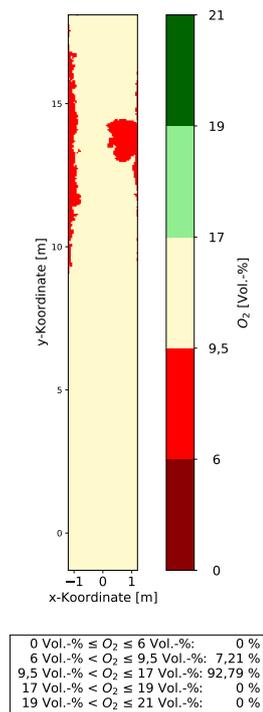


Abbildung E.31: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

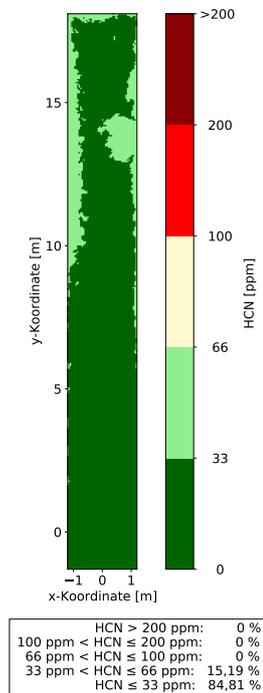


Abbildung E.32: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.6: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Treppenträume“) für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration	4	E.29
Beschränkung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration	1	E.30
Beschränkung der Sauerstoffreduktion	4	E.31
Beschränkung der Cyanwasserstoffkonzentration	4	E.32
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	1	

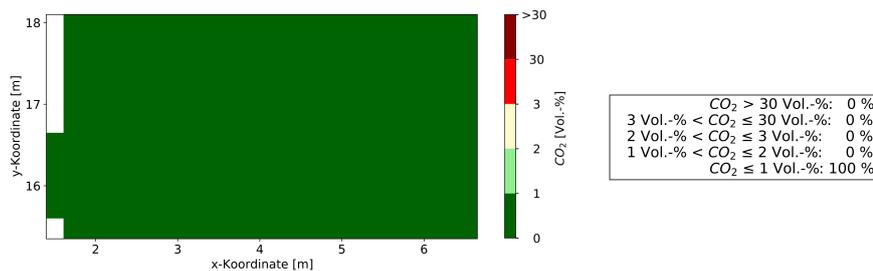


Abbildung E.33: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

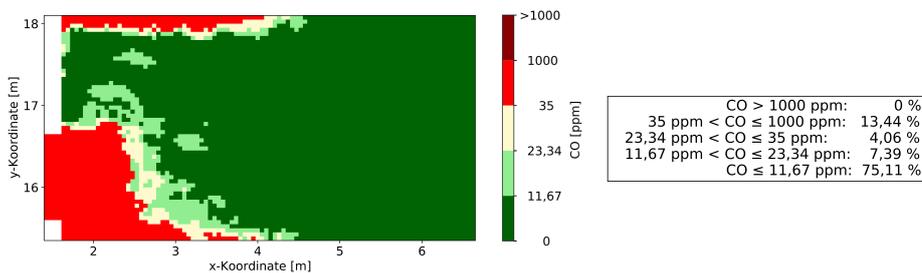


Abbildung E.34: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

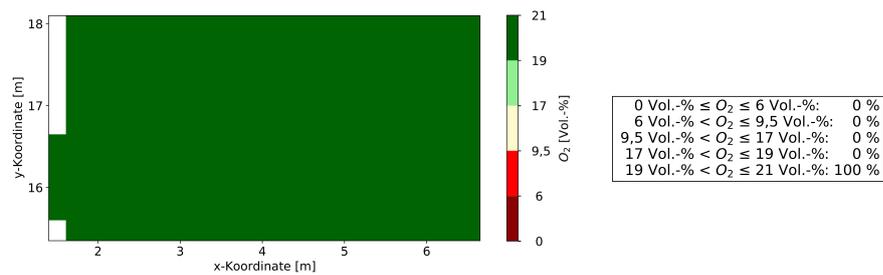


Abbildung E.35: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

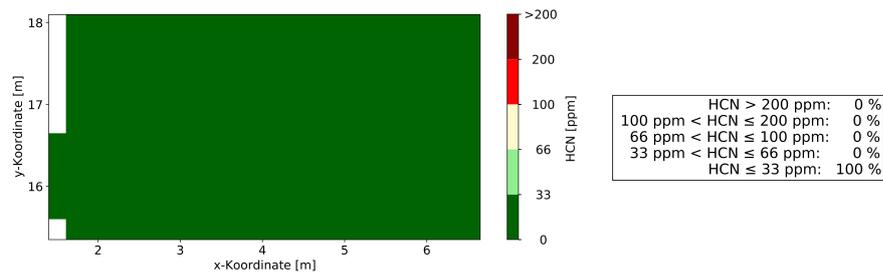


Abbildung E.36: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Brandmeldeanlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

E.3 Nutzwertanalyse für das Konzept „Sprinkleranlage“

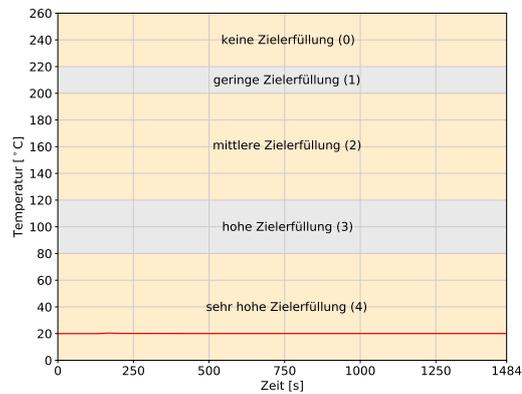


Abbildung E.37: Darstellung der Maximaltemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

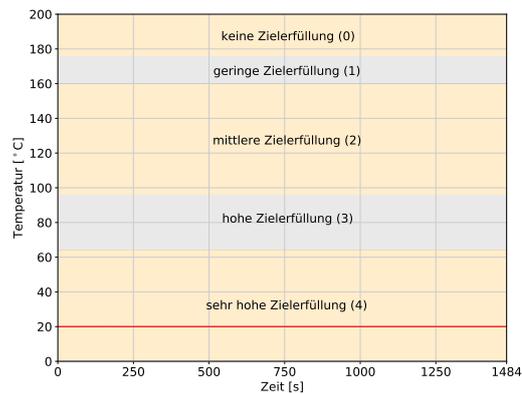


Abbildung E.38: Darstellung der Durchschnittstemperatur für das Konzept „Sprinkleranlage“ über die Zeit (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

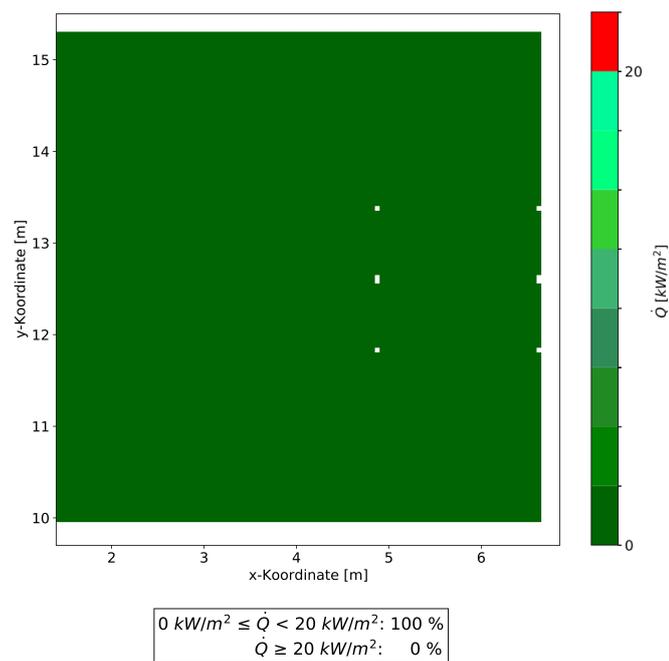


Abbildung E.39: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Büro für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

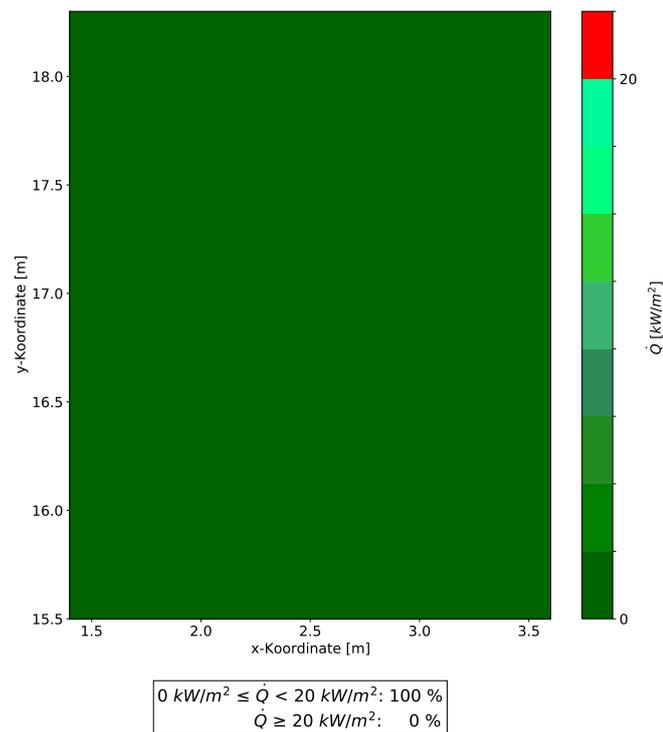


Abbildung E.40: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

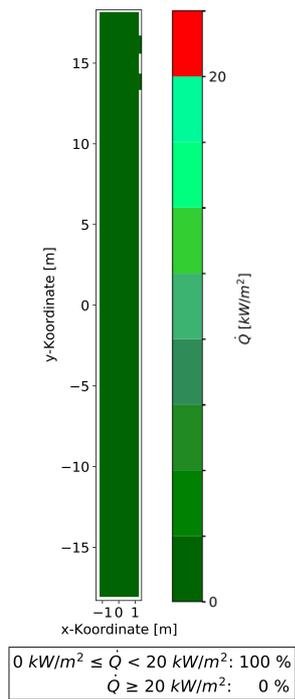


Abbildung E.41: Darstellung des Netto-Wärmestroms am Boden im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

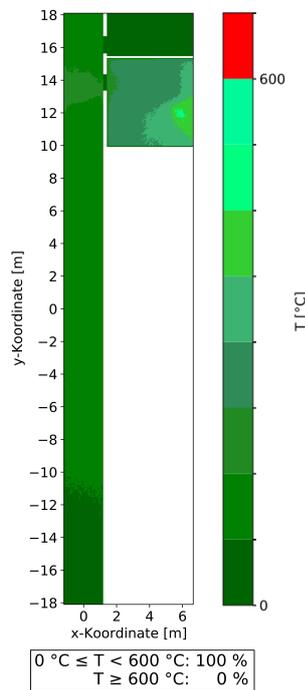


Abbildung E.42: Darstellung der Temperatur an der Decke für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.7: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchausbreitung für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration ≥ 3 Vol.-%	0	E.43
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Kohlenstoffmonoxidkonzentration ≥ 35 ppm	0	E.44
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Sauerstoffkonzentration ≤ 17 Vol.-%	0	E.45
Beschränkung des Anteils der Fläche mit einer Cyanwasserstoffkonzentration ≥ 100 ppm	4	E.46
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	0	

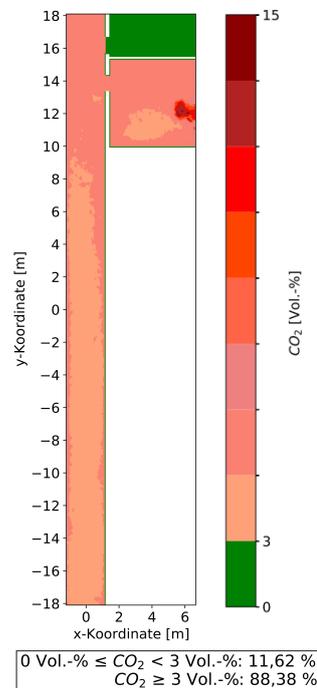


Abbildung E.43: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

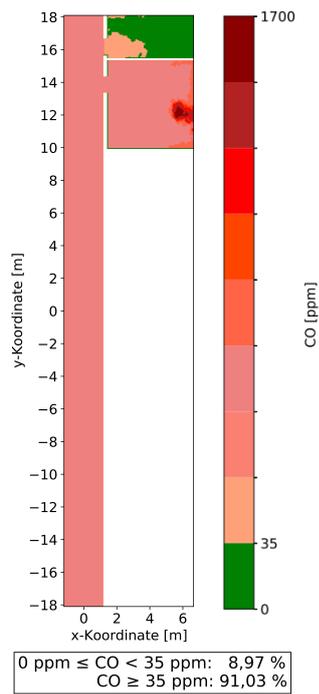


Abbildung E.44: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

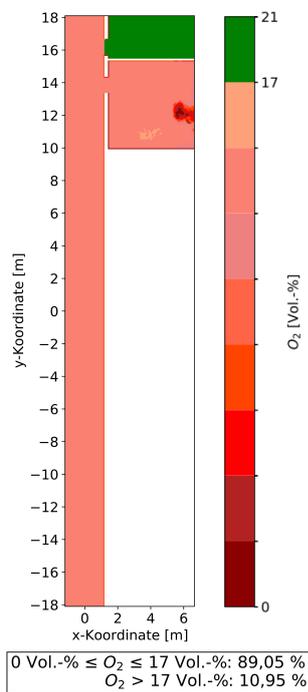


Abbildung E.45: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

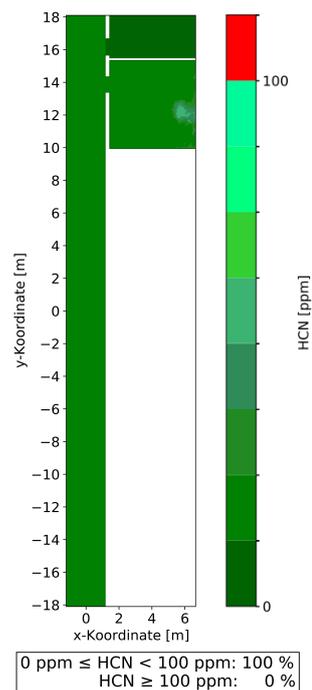


Abbildung E.46: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.8: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Flure“) für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration	1	E.47
Beschränkung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration	1	E.48
Beschränkung der Sauerstoffreduktion	2	E.49
Beschränkung der Cyanwasserstoffkonzentration	4	E.50
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	1	

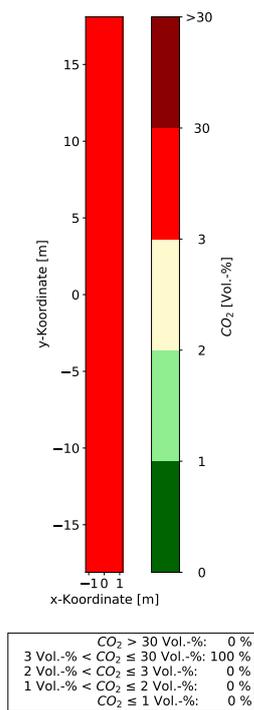


Abbildung E.47: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

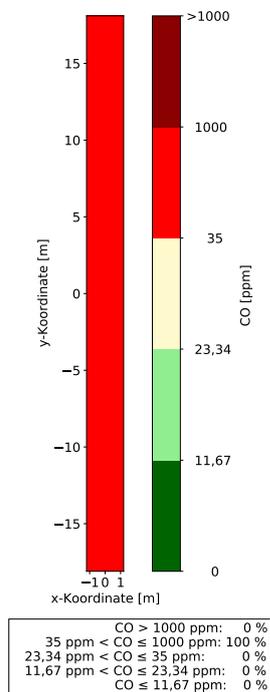


Abbildung E.48: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

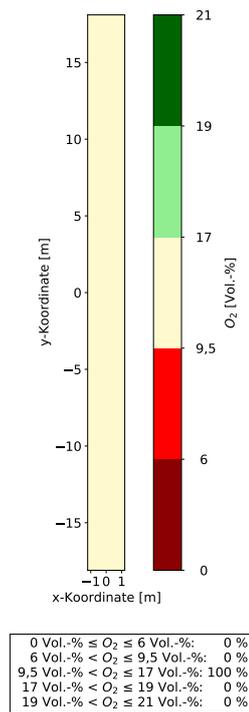


Abbildung E.49: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

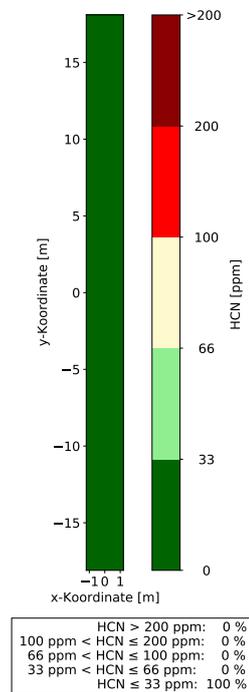


Abbildung E.50: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Flur für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Tabelle E.9: Übersichtstabelle des Bewertungskonzeptes Rauchgase (Mittelziel: „Rauchfreiheit der Treppenträume“) für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

Beschränkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration	4	E.47
Beschränkung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration	1	E.48
Beschränkung der Sauerstoffreduktion	4	E.49
Beschränkung der Cyanwasserstoffkonzentration	4	E.50
Gesamtbewertung Bewertungskonzept Rauchausbreitung	1	

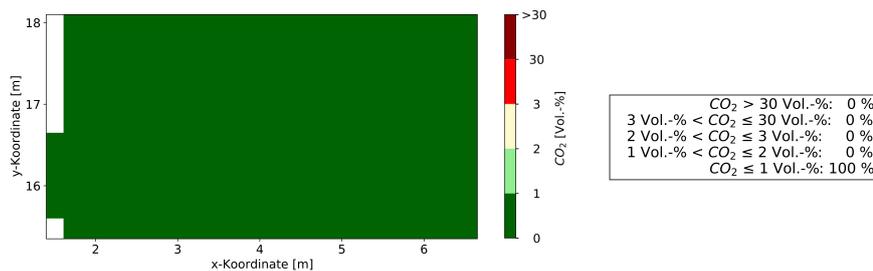


Abbildung E.51: Darstellung der maximalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

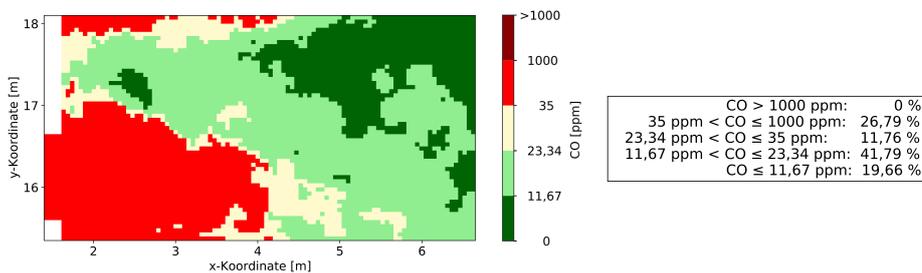


Abbildung E.52: Darstellung der maximalen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

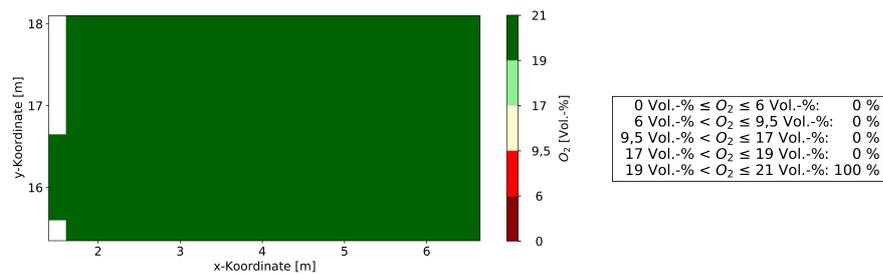


Abbildung E.53: Darstellung der minimalen Sauerstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

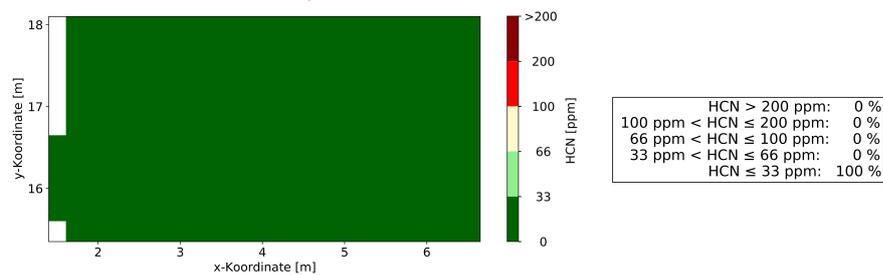


Abbildung E.54: Darstellung der maximalen Cyanwasserstoffkonzentrationen im Treppenraum für das Konzept „Sprinkleranlage“ (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

E.4 Zusammenfassende Darstellung der Nutzwertanalyse

Tabelle E.10: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Brandentstehung vorbeugen)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Verwendung nicht brennbarer Materialien	100 %	Brandverhalten von Materialien	100 %	4	4	4	4	4	4
					4		4		4

Tabelle E.11: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum	40 %	Beschränkung des Wärmedurchgangs der Wände	50 %	4	2	4	2	4	2
		Beschränkung des Wärmedurchgangs der Türen	50 %	0	0	0	0	0	0
					0,80		0,80		0,80
Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum	40 %	Einhaltung des Raumabschlusses von Umfassungsbauteilen exklusive von Öffnungen	50 %	4	2	4	2	4	2
		Einhaltung des Raumabschlusses bei den Abschlüssen von Öffnungen	50 %	0	0	0	0	0	0
					0,80		0,80		0,80
Beschränkung der Großflächigkeit	20 %	Beschränkung des Anteils der Fläche der Brandentwicklung mit einem Wärmestrom oder einer Temperatur	50 %	4	2	4	2	4	2
		Beschränkung der Rauchausbreitung	50 %	0	0	0	0	0	0
					0,40		0,40		0,40

Tabelle E.12: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Zwei voneinander unabhängige Rettungswege	25 %	Unabhängigkeit der Rettungswege	100 %	4	4	2	2	2	2
					1,00		0,50		0,50
Alarmierung der anwesenden Menschen	20 %	Frühzeitige Alarmierung	100 %	0	0	4	4	4	4
					0		0,80		0,80
Rauchfreiheit der Flure	10 %	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	100 %	1	1	1	1	1	1
					0,10		0,10		0,10
Rauchfreiheit der Treppenträume	10 %	Gewährleistung begrenzter Rauchgaskonzentrationen	100 %	1	1	1	1	1	1
					0,10		0,10		0,10
Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO	35 %	Beschränkung der Räumungszeit	100 %	0	0	4	4	4	4
					0		1,40		1,40

Tabelle E.13: Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes (Oberziel: Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten)

Mittelziel	Gewichtung	Unterziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen		Brandmeldeanlage		Sprinkleranlage	
				Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Ermöglichung schneller Löscharbeiten	100 %	Wirksamwerden erster Löscharbeiten	100 %	0	0	2	2	4	4
					0		2,00		4,00

Tabelle E.14: Gesamtbewertung der Nutzwertanalyse für Konzepte brandschutztechnischer Maßnahmen einer Etage eines Verwaltungsgebäudes

Oberziel	Gewichtung	Mittelziel	Gewichtung	Wände mit Brandschutzanforderungen	Brandmeldeanlage	Sprinkleranlage
				Teilnutzwert	Teilnutzwert	Teilnutzwert
Brandentstehung vorbeugen	25 %	Verwendung nicht brennbarer Materialien	100 %	4	4	4
				1,00	1,00	1,00
Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen	20 %	Beschränkung der Brandausbreitung auf einen Raum	40 %	0,80	0,80	0,80
		Beschränkung der Rauchausbreitung auf einen Raum	40 %	0,80	0,80	0,80
		Beschränkung der Großflächigkeit	20 %	0,40	0,40	0,40
		0,40	0,40	0,40		
Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren	40 %	Zwei voneinander unabhängige Rettungswege	25 %	1,00	0,50	0,50
		Alarmierung der anwesenden Menschen	20 %	0	0,80	0,80
		Rauchfreiheit der Flure	10 %	0,10	0,10	0,10
		Rauchfreiheit der Treppenträume	10 %	0,10	0,10	0,10
		Einhaltung der Rettungsweglänge nach MBO	35 %	0	1,40	1,40
0,48	1,16	1,16				
Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten	15 %	Ermöglichung schneller Löscharbeiten	100 %	0	2	4
				0	0,30	0,60
				1,88	2,86	3,16

E.5 Untersuchung des Einflusses der Gewichtungsverteilungen der Oberziele

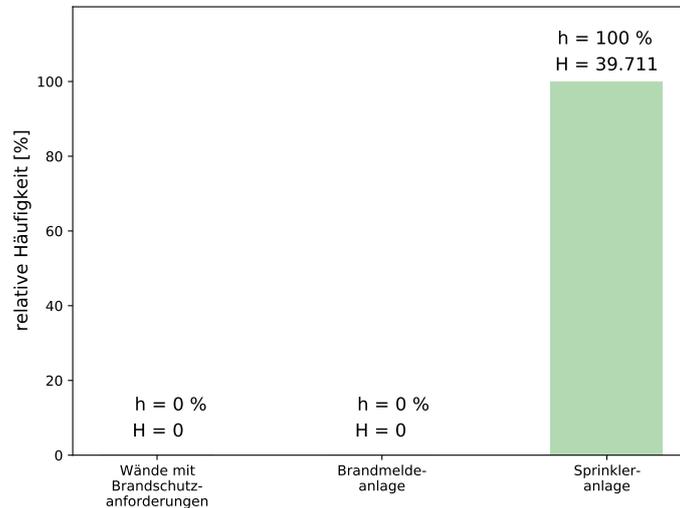


Abbildung E.55: Darstellung der relativen (h) und absoluten (H) Häufigkeiten der einzelnen Maßnahmenkonzepte (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)

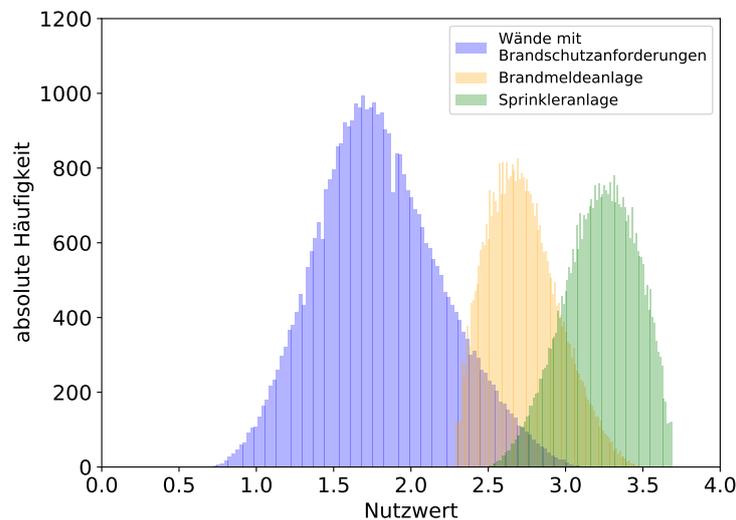


Abbildung E.56: Darstellung der absoluten Häufigkeiten der Nutzwerte für jedes Maßnahmenkonzept (Szenario 2: Etage eines Verwaltungsgebäudes)