

Roland Goertz / Fabian Ladzinski

Konzeptioneller Brandschutz

Konzeptioneller Brandschutz

Von

Prof. Dr. rer. nat. Roland Goertz

Fabian Ladzinski, M.Sc.

ERICH SCHMIDT VERLAG

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

Weitere Informationen zu diesem Titel finden Sie im Internet unter
[ESV.info/978-3-503-18863-5](https://www.esv.info/978-3-503-18863-5)

Gedrucktes Werk: ISBN 978-3-503-18863-5
eBook: ISBN 978-3-503-18864-2

Alle Rechte vorbehalten
© Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2022
[www.ESV.info](https://www.esv.info)

Satz: L101 Mediengestaltung, Fürstenwalde
Druck und Bindung: Hubert & Co., Göttingen

Vorwort

Das vorliegende Werk ist aus den Vorlesungen „Branderkennung und Brandbekämpfung“, „Stationäre und mobile Löschanlagen und -geräte“ sowie „Brandschutzkonzepte“ in den Bachelorstudiengängen der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal entstanden. Es basiert auf den von Roland Goertz seit 2012 gehaltenen Vorlesungen und den Mitschriften von Fabian Ladzinski. Bei der gemeinsamen Aufarbeitung des Lehrstoffs wurden viele Inhalte nochmals auf Aktualität überprüft und, wo es sinnvoll erschien, ergänzt. Gleichzeitig war das Ziel, das „Skripthafte“ ein Stück beizubehalten, da dies die Erlangung eines schnellen Überblickes über einen bestimmten Themenbereich erleichtert. Es ist insofern als Lehrbuch und Nachschlagewerk, nicht nur für Studium und Beruf, sondern auch für die Brandschutzplanung, Brandschutzüberwachung, den Einsatz im Betrieb und darüber hinaus ebenso für die Ausbildung und Praxis des vorbeugenden Brandschutzes in der Feuerwehr oder für das Verständnis vorbeugender Brandschutzmaßnahmen bei der Brandursachenermittlung gedacht.

Um das Ziel, einen „roten Faden“ innerhalb des Buches erkennbar zu machen, wird, gerade bei den zahlreichen Regel/Ausnahme-Formulierungen der Rechtsnormen und technischen Regeln im Brandschutz, zunächst ein Überblick über die Grundsätze gegeben, bevor eine Vertiefung in weitere Details und Ausnahmen erfolgt. Vielfach werden die verschiedenen Klassifizierungen und Ausführungsmöglichkeiten in Form von Organigrammen dargestellt, um die Zusammenhänge der an verschiedenen Stellen in einer Bauvorschrift vorkommenden Regelungen sichtbar in Beziehung zu setzen und Abhängigkeiten deutlich zu machen. Um dem Anspruch der Verständlichkeit gerecht zu werden, bleiben gelegentlich besondere Ausnahmen und Detailregelungen mit Verweis auf die Vorschrift unausgeführt. Zugleich ist das Ziel, zum Teil auch einen Blick hinter die materiellen Vorschriften und Inhalte der Normen zu werfen, und dort, wo Normen und technische Regeln auch auf natur- und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen beruhen, diese zum Verständnis auch aufzuzeigen. Es ist einfach wichtig nachzuvollziehen, wo die Ursprünge bestimmter Regelungen oder Prinzipien liegen, weil auf diese Weise das Verständnis der Zusammenhänge wächst und das erlangte Wissen besser verknüpft werden kann.

Die gelegentlichen Hinweise darauf, dass aus sicherheitswissenschaftlicher Sicht in Fragen der Sicherheit und des Brandschutzes auch übertrieben werden kann, sind alleine konstruktiv gemeint. Die Vorschriftenlage lässt in der Brandschutzplanung und auch im Bestand Vieles zu. Es muss gelegentlich nur der Mut und das Verständnis vorhanden sein, sie auch vollumfänglich anzuwenden und auf sinnfreie Brandschutzmaßnahmen zu verzichten.

Zur Vertiefung des Verständnisses und zur Selbstkontrolle sind den Abschnitten Fragen angehängt, deren Antworten am Ende des Buches zu finden sind. Wir danken den zahlreichen Studierenden der letzten Jahre für ihre bereichernden Fragen, Anregungen, Ergänzungen und auch für ihre zahlreichen, kreativen und falschen Antworten, die gezeigt haben, wo die Darstellung des Stoffs noch unverständlich und verbesserungswürdig war.

Wir würden uns freuen, wenn der „Konzeptionelle Brandschutz“ zur Verbesserung des Verständnisses in der Brandschutzplanung und dem Zusammenwirken der Brandschutzmaßnahmen im Studium und in der Praxis beiträgt.

Fabian Ladzinski

Roland Goertz

Wuppertal und Bad Herrenalb im Juli 2022

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Abkürzungsverzeichnis	13
1 Einleitung	17
A Grundlagen der Brand- und Rauchausbreitung	21
2 Grundlagen der Branddynamik	22
2.1 Brennen	22
2.1.1 Brandklassen	23
2.2 Leuchten und Rußen von Flammen	27
2.2.1 Zündquellen	28
2.2.2 Sauerstoff	30
2.3 Raumbrand	31
2.4 Energie und Wärmefreisetzung	36
2.5 Brandverläufe	39
2.5.1 Quadratisches Brandausbreitungsmodell	39
2.5.2 Geometrisches Ausbreitungsmodell	40
2.5.3 Umrechnung der Brandausbreitungsmodelle	44
2.6 Rauchausbreitung	45
2.7 Brandrauchzusammensetzung	47
2.7.1 Allgemeines	47
2.7.2 Anorganische Brandgase	47
2.7.3 Organische Brandzersetzungsprodukte	48
2.7.4 Konsequenzen für den konzeptionellen Brandschutz	50
Kontrollfragen	51
B Baulicher Brandschutz	55
3 Brandschutzplanung und -konzepterstellung	56
3.1 Risikoangepasste Brandschutzplanung	56
3.2 Brandschutznachweis und Brandschutzkonzept als Mittel der risikoangepassten Brandschutzplanung	57
3.3 Bauordnungsrecht	59
3.3.1 Einleitung	59
3.3.2 Struktur der Musterbauordnung	61
3.3.3 Rechtsvorschriften und Technische Baubestimmungen	62
3.3.4 Muster-Verwaltungsvorschrift technische Baubestimmungen (MVV TB)	64
3.3.5 Schutzziele	65
3.3.6 Gebäudeklassen nach MBO (§ 2 Abs. 3 MBO)	66

3.4	Sonderbauvorschriften	72
3.4.1	Allgemeines	72
3.4.2	Sonderbauvorschriften in der Praxis	73
3.4.3	Abweichungen und Erleichterungen	74
3.5	Bauproduktenrecht	76
3.5.1	Europäisches Bauproduktenrecht	76
3.5.2	Deutsches Bauproduktenrecht	80
3.5.3	Bauaufsichtliche Regelungen für Bauarten	82
3.5.4	Bauaufsichtliche Regelungen für Bauprodukte	86
3.5.5	Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung auf Grundlage der EU-BauPVO	86
3.5.6	Nicht harmonisierte Bauprodukte	87
3.5.7	Bauprodukte nach Vorschriften anderer Vertragsstaaten des EWR	90
4	Baustoffe	94
5	Bauteile	101
5.1	Allgemeines	101
5.2	Verglasungen	105
5.3	Tragwerksanforderungen für die Gebäudeklassen	107
6	Lage auf dem Grundstück	108
6.1	Abstandsflächen	108
6.2	Brandwände	110
6.2.1	Allgemeines	110
6.2.2	Äußere Brandwände	110
6.2.3	Innere Brandwände	111
6.2.4	Anforderungen an Brandwände	112
7	Wände und Decken	115
7.1	Trennwände (§ 29 MBO)	115
7.2	Decken	116
8	Rettungswege, Türen, Fenster	117
8.1	Erster und zweiter Rettungsweg	117
8.2	Notwendige Flure (§ 36 MBO)	122
8.3	Notwendige Treppen und Treppenräume (§§ 34, 35 MBO)	124
8.3.1	Notwendige Treppe	124
8.3.2	Notwendiger Treppenraum	124
8.3.3	Raum zwischen dem Treppenraum und dem Ausgang ins Freie	125
8.4	Sicherheitstreppe	126
8.5	Türen und Fenster	128
8.5.1	Allgemeines	128
8.5.2	Rettungsfenster	131
8.6	Rettungsgerät der Feuerwehr	131

8.6.1	Allgemeines	131
8.6.2	Zugänge, Zufahrten und Flächen für die Feuerwehr	134
9	Gebäudetechnik	150
9.1	Aufzüge	150
9.1.1	Fahrschachttüren nach nationaler Klassifikation	151
9.1.2	Fahrschachttüren nach europäischer Klassifikation E 30, E 60 und E 90	152
9.1.3	Brandfallsteuerung	152
9.2	Leitungsanlagen	155
9.2.1	Leitungsanlagen in Rettungswegen	157
9.2.2	Führung von Leitungen durch raumabschließende Bauteile (Wände und Decken)	159
10	Sonderbauvorschriften	165
10.1	Allgemeines	165
10.2	Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO)	166
10.3	Muster-Verkaufsstättenverordnung (MVKVO)	173
10.4	Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR)	180
10.5	Muster-Garagenverordnung (M-GarVO)	185
10.6	Muster-Beherbergungsstättenverordnung (MBeVO)	192
10.7	Muster-Schulbau-Richtlinie (MSchulbauR)	195
11	Brandschutzplanung im Industriebau	201
11.1	Allgemeines	201
11.2	Allgemeine Anforderungen (Abschnitt 5)	204
11.2.1	Löschwasserbedarf	204
11.2.2	Lage und Zugänglichkeit	204
11.2.3	Rettungswege	204
11.2.4	Rauchableitung	205
11.3	Verfahren ohne Brandlastermittlung (Abschnitt 6 MIndBauRL)	212
11.4	Verfahren mit Brandlastermittlung (Abschnitt 7)	216
11.4.1	Begriffe und Konzepte	217
11.4.2	Rechnerische Brandbelastung	223
11.4.3	Umrechnungsfaktor c	226
11.4.4	Wärmeabzugsfaktor w	227
11.4.5	Eingeschossige Industriebauten ohne Ebenen und mit einem Tragwerk in F 0	229
11.4.6	Der weitere regulatorische Teil des Verfahrens – Allgemeines	230
11.4.7	Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer der Bau- teile	231
11.4.8	Sicherheitsbeiwert	233
11.4.9	Zusatzbeiwert α_L	235
11.4.10	Zulässige Brandbekämpfungsabschnittsflächen $\leq 60.000 \text{ m}^2$.	237
11.4.11	Brandbekämpfungsabschnittsflächen $> 60.000 \text{ m}^2$	240
	Kontrollfragen	242

C Branderkennung	249
12 Brandmeldeanlagen	250
12.1 Allgemeines	250
12.2 Normung von Brandmeldeanlagen	252
12.3 Konzeption von Brandmeldeanlagen	252
12.4 Brandmeldeanlagen-Peripherie	257
12.4.1 Feuerwehr-Bedienfeld	257
12.4.2 Feuerwehrschlüsseldepot (FSD)	260
12.4.3 Freischaltelement	261
13 Brandmelder	263
13.1 Handfeuermelder	263
13.2 Grundlagen automatischer Brandmelder	264
13.2.1 Allgemeines	264
13.3 Testfeuer	265
13.4 Rauchmelder	268
13.4.1 Optische Rauchmelder	269
13.4.2 Ionisationsrauchmelder	272
13.4.3 Infrarot-Linearmelder (Lichtstrahlrauchmelder)	274
13.5 Ansaugrauchmelder	278
13.6 Flammenmelder	283
13.6.1 Grundlagen	283
13.6.2 Infrarot-Flammenmelder	286
13.6.3 UV-Flammenmelder	289
13.7 Wärmemelder	290
13.8 Gassensoren	294
13.9 Videosysteme	297
13.10 Auswertung	297
13.11 Auswahl automatische Brandmelder	299
13.12 Rauchwarnmelder in Wohnungen	300
Kontrollfragen	307
D Löschanlagen	309
14 Stationäre Löschanlagen	310
15 Automatische Sprinkleranlagen	312
15.1 Anwendungsbereiche	313
15.2 Brandgefahrenklassen	314
15.3 Auslegung einer Sprinkleranlage	316
15.3.1 Brandgefahrenklasse	316
15.3.2 Wirkfläche und Wasserbeaufschlagung	317
15.3.3 Anlagenart	318
15.4 Sprinkler	319
15.4.1 Auslöseverhalten automatischer Sprinkler	320

15.5	Sprinkleranlagen mit Schaummittelzusatz	324
15.6	Wasserversorgung	324
15.6.1	Ausfallsicherheit der Wasserversorgung	325
15.6.2	Möglichkeiten der Wasserversorgung	326
16	Sprühwasserlöschanlagen	330
16.1	Allgemeines	330
16.2	Anwendung von Sprühwasserlöschanlagen	331
17	Feinsprühlöschanlagen	335
17.1	Allgemeines	335
17.2	Anwendungsbereiche	335
17.3	Anlagentechnik	336
17.4	Löscheffekte	337
17.5	Normen für Feinsprühlöschanlagen	339
18	Schaumlöschanlagen	340
18.1	Schaum als Löschmittel	340
18.1.1	Tenside	343
18.1.2	Fluortenside	345
18.2	Schaummittelklassen	348
18.2.1	Proteinschaummittel	348
18.2.2	Synthetische Schaummittel	349
18.2.3	Alkoholbeständigkeit	349
18.2.4	Class-A-Schaummittel	350
18.2.5	Schaumaufbau	350
18.2.6	Allgemeine Schaumparameter	355
18.2.7	Schaumzerstörung	357
18.2.8	Schaumparameter zur Löschleistung	358
18.3	Anwendungsbereiche von Löschsäumen und Schaumlöschanlagen	359
18.4	Arten von Schaumlöschanlagen	360
18.4.1	Unterteilung anhand der Verschäumungszahl	361
18.4.2	Tankbeschäumung – Art der Schaumapplikation	362
18.4.3	Art der Schaumerzeugung und der Luftzufuhr	363
18.4.4	Schaumherstellungsverfahren	365
19	Gaslöschanlagen	368
19.1	Allgemeines	368
19.2	Normen	369
19.3	Löschgase	371
19.3.1	Geschichte chemischer Löschgase und Halone	371
19.3.2	Moderne chemische Löschgase	373
19.3.3	Toxische und korrosive Zersetzungsprodukte	375
19.3.4	Umweltaspekte	375
19.4	Inertgase	376
19.4.1	Allgemein	376

Inhaltsverzeichnis

19.4.2	Mischung von Inertgasen.....	378
19.4.3	CO ₂ -Löschanlagen	378
19.5	Anlagenauslegung.....	380
19.6	Gaslöschanlagen und Personenschutz	383
20	Pulverlöschanlagen	385
20.1	Allgemeines	385
20.2	Raumschutzanlagen	386
20.3	Einrichtungsschutzanlagen.....	387
	Kontrollfragen	389
E	Abwehrender Brandschutz	393
21	Organisatorischer Brandschutz	394
21.1	ASR A2.2 Maßnahmen gegen Brände	394
21.2	Tragbare Feuerlöscher.....	397
21.2.1	Löschmittel	397
21.2.2	Bauarten	402
21.2.3	Klassifizierung von Feuerlöschern nach DIN EN 3-7	404
21.3	Feuerlöschsprays	406
22	Löschwasser	409
22.1	Löschwasseranlagen	409
22.2	Wandhydranten.....	412
22.3	Bereitstellung von Löschwasser	413
	Kontrollfragen	419
	Literaturverzeichnis	421
	Kontrollfragen mit Antworten	435
	Stichwortverzeichnis	471

Abkürzungsverzeichnis

aBG	allgemeine Bauartgenehmigung
abP	allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
ARGEBAU	Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zu-ständigen Minister und Senatoren der 16 Länder der Bundesrepublik Deutschland
Art.	Artikel
ASD	Aspirating Smoke Detection
ASR	Ansaugrauchmelder
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten/Arbeitsstätten-Richtlinien
BA	Brandabschnitt
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BauO Bln	Bauordnung für Berlin
BauO NRW	Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen
BauPG	Bauproduktengesetz
BBA	Brandbekämpfungsabschnitt
BGBl.	Bundesgesetzblatt
BGF	Brutto-Grundfläche
BMA	Brandmeldeanlage
BMZ	Brandmelderzentrale
BPR	Bauproduktenrichtlinie
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
CAFS	Compressed Air Foam System
CEA	Comité Européen des Assurances
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CMSA	control mode specific application
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAD	Europäisches Bewertungsdokument
EG	Europäische Gemeinschaft

EN	Europäische Norm
EOTA	Europäische Organisation für Technische Bewertung
ESFR	early suppression fast response
ETA	Europäische Technische Bewertung
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Europäische Union
EU-BauPVO	EU-Bauproduktenverordnung
EuGH	Gerichtshof der Europäischen Union
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
FAT	Feuerwehr-Anzeigetableau
FBF	Feuerwehr-Bedienfeld
FGB	Feuerwehr-Gebädefunkbedienfeld
Fn.	Fußnote
FSD	Feuerwehrschlüsseldepot
FSE	Freischaltelement
GG	Grundgesetz
GK	Gebäudeklasse
GWP	Global Warming Potential
HH	hohe Brandgefahr
HHP	hohe Brandgefahr, Lagerrisiken
HHS	hohe Brandgefahr, Produktionsrisiken
IMO	International Maritime Organization
IRD	Ionenanlagerungsdetektoren
IRM	Ionisationsrauchmelder
LBK	lebensbedrohliche Konzentration
LBO BW	Landesbauordnung für Baden-Württemberg
LBOAVO	Allgemeine Ausführungsverordnung zur Landesbauordnung
LH	kleine Brandgefahr
LOAEL	lowest observed adverse effect level
MBauVorIV	Musterbauvorlagenverordnung
MBeVO	Muster-Beherbergungsstättenverordnung
MBO	Musterbauordnung
M-GarVO	Muster-Garagenverordnung
MHHR	Muster-Hochhaus-Richtlinie
MIndBauRL	Muster-Industriebau-Richtlinie
MLAR	Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie

MPrüfVO	Muster-Prüfverordnung
MRA	Maschinelle Rauchabzugsanlagen
MSchulbauR	Muster-Schulbau-Richtlinie
MVKVO	Muster-Verkaufsstättenverordnung
MVStättVO	Muster-Versammlungsstättenverordnung
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
NAFS	Nozzle Aspirated Foam System
NE	Nutzungseinheit
NFPA	National Fire Protection Association
NOAEL	no observed adverse effect level
NRA	Natürliche Rauchabzugsanlagen
ODP	Ozon Depletion Potential
OH	mittlere Brandgefahr
OLG	Oberlandesgericht
OVG	Oberverwaltungsgericht
PFT	per- und polyfluorierte Tenside
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
ProdSG	Produktsicherheitsgesetz
RAS	Rauchansaugsysteme
Rn.	Randnummer
RTI	Response-Time-Index
SPEC	Spezifikation
TAB	Technische Bewertungsstelle
TAB	technische Aufschaltbedingungen
ThürBO	Thüringer Bauordnung
TS	Technische Spezifikation
ÜE	Übertragungseinrichtung
ÜH	Übereinstimmungserklärung des Herstellers
ÜHP	Übereinstimmungserklärung des Herstellers nach vorheriger Prüfung
ÜHZ	Übereinstimmungserklärung des Herstellers nach Zertifikatserteilung
vBG	vorhabenbezogene Bauartgenehmigung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VdS	Verband der Sachversicherer

Abkürzungsverzeichnis

VG	Verwaltungsgericht
WA	Wärmeabzüge
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

1 Einleitung

Angst ist gerade im Brandschutz ein schlechter Ratgeber, da dieser stattdessen Wissen, Können, Erfahrung und einen gewissen Überblick erfordert.

Doch bei einer immer komplexeren Verzahnung von Gebäuden mit technischen Anlagen und einer damit einhergehenden Zunahme technischer Normen und Regelwerke sowie der nahezu unendlichen bauordnungsrechtlichen Regelwerke und Rechtsnormen, die allesamt brandschutztechnische Detailfragen behandeln, fällt es schwer, den Überblick zu behalten.

Das vorliegende Lehr- und Nachschlagewerk möchte einen Überblick geben und Zusammenhänge aufzeigen, so dass ein roter Faden im Brandschutz erkennbar wird.

Dazu ist es in fünf Abschnitte gegliedert.

- A Grundlagen der Brand- und Rauchausbreitung
- B Baulicher Brandschutz
- C Branderkennung
- D Löschanlagen
- E Abwehrender Brandschutz

Im Abschnitt B, dem baulichen Brandschutz, finden sich alle wichtigen Aspekte der materiellen Brandschutzanforderungen für normale Gebäude, wie beispielsweise das Brandverhalten der Baustoffe und Bauteile, Brandwände und Brandabschnitte, die Ausbildung von baulichen ersten und alternativen zweiten Rettungswegen, notwendige Türqualitäten, Maßnahmen zur Rauchableitung, Anforderungen an Aufzüge. Da gerade auch in der betrieblichen Praxis oft Leitungsanlagen bei ihrer Durchführung durch Wände mit Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit Fragen hervorrufen, wird auch die Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie ausführlich anhand von Organigrammen dargestellt, die die zahlreichen Erleichterungen und Zusammenhänge sichtbar und für die Praxis leichter anwendbar machen.

Im Anschluss an die Betrachtung der Grundsätze bei Standardbauten folgt eine teils sehr detaillierte, teils skizzenhafte Übersicht über wichtige Sonderbauvorschriften und vor allem die jeweiligen materiellen Anforderungen. Gerade im Industriebau erschien es wichtig, die enge Verzahnung der Muster-Industriebau-Richtlinie mit dem Rechenverfahren der DIN 18230-1 sehr ausführlich und an Beispielen darzulegen. In der Lehre zeigt sich oft, dass es zunächst schwierig scheint, beide umfangreichen Regelwerke zu überblicken und richtig anzuwenden.

Moderne Gebäude außerhalb der üblichen bauordnungsrechtlichen Grenzen sind ohne anlagentechnischen Brandschutz kaum realisierbar. Eine wichtige Rolle spielen die Brandmeldeanlagen, die sehr häufig als Kompensationsmaßnahme zum Einsatz kommen. Hier bestehen beispielsweise wichtige Zusammenhänge zwischen Brandgut, Brandkenngrößen und der richtigen Brandmeldetechnik, die anhand der naturwissenschaftlichen Grundlagen erläutert werden. Dabei wird auch deutlich, warum gelegentlich Systeme nicht den gewünschten Erfolg bringen. In der Praxis sind manchmal brandschutztechnisch formal richtige Lösungen zu finden, die jedoch nicht gut in den Kontext des Gebäudes zu passen scheinen. Die Möglichkeiten der Branderkennung sind unglaublich vielfältig; es gibt zahlreiche hier aufgezeigte Möglichkeiten, Brandmeldeanlagen passgenau an das Umfeld, wie beispielsweise Baudenkmäler, anzupassen.

Löschanlagen spielen in vielen Fällen, insbesondere bei den Sonderbauten eine große und wichtige Rolle. Insofern erscheint es wichtig, auch die Grundlagen der Auslegung von Sprinkleranlagen anhand des Regelwerks aufzuzeigen. Dies geschieht vor allem vor dem Hintergrund des Bauens im Bestand. Wer gesehen hat, wie detailliert eine Anlagenauslegung an das zu schützende Risiko angepasst werden kann, wird leichter verstehen, warum alleine der Blick nach oben zur Feststellung, dass Sprinkler erkennbar sind, nicht ausreicht, um beurteilen zu können, ob die zukünftig geplante Nutzung wirklich möglich oder die Anlage an die Planung anpassbar ist.

Auch die Löschanlagentechnik ist so vielfältig, dass der Blick geweitet werden soll. Feinsprühlöschanlagen haben beispielsweise Vorteile bei der Wasserbevorratung, während Wassernebel als Löschmittel sehr interessante Löscheffekte aufweist, die ausführlich beschrieben werden, um die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes verstehen zu können. Gaslöschanlagen lassen sich bei Auswahl des Löschmittels auch hinsichtlich des Personenschutzes sehr gut an die örtlichen Gegebenheiten und Bedürfnisse anpassen. Bei den Schaumlöschanlagen gibt es noch Unsicherheiten wegen der Umweltfreundlichkeit der Schaummittel, so dass dieses Thema auch von den Grundlagen her ausführlich dargestellt wird.

Im Betrieblichen Brandschutz sind tragbare Feuerlöschgeräte in Form von Feuerlöschern und Feuerlöschspraydosen kaum wegzudenken und eng mit der ASR A2.2 verknüpft, die gerade für die betriebliche Praxis eine wichtige Grundlage ist. Der Aufbau und die Wirkung von Feuerlöschern und Feuerlöschsprays sowie die Darstellung der üblichen Löschmittel mit ihren Vor- und Nachteilen sollen auch bei der betrieblichen Gefährdungsbeurteilung für den Brandschutz Hilfestellung geben.

Die ausreichende Bereitstellung von Löschwasser ist eine wichtige Voraussetzung für den Brandschutz. Neben den Grundlagen für die abhängige

und unabhängige Löschwasserversorgung sind auch die Löschwassereinrichtungen in Gebäuden wichtige Bestandteile des Brandschutzes, die durch die Anforderungen an die Trinkwasserhygiene eine besondere Aufmerksamkeit erfordern. Dazu finden sich die wichtigsten Regeln und Normen übersichtlich aufbereitet.

Es versteht sich von selbst, dass für die Nutzung des Buches als Lehr- und auch als Nachschlagewerk in der Praxis die behandelten Rechtsnormen und technischen Regeln „griffbereit“ danebenliegen müssen. Das Werk ist so konzipiert, dass es bei der Bearbeitung von Brandschutzkonzepten und bei der sinnvollen Durcharbeitung der zugrundeliegenden Rechts- und DIN-Normen helfen, sie jedoch nicht ersetzen kann und will.

A Grundlagen der Brand- und Rauchausbreitung

2 Grundlagen der Branddynamik

2.1 Brennen

Brennen ist nach DIN 14011 eine mit Flamme und/oder Glut selbständig ablaufende exotherme Reaktion zwischen einem brennbaren Stoff und Sauerstoff. Brennen setzt bei der räumlichen und zeitlichen Koinzidenz von brennbarem Stoff, Sauerstoff und Zündquelle ein (Zündung). Für eine Verbrennung mit üblicher Geschwindigkeit spielen die Konzentrationen der beteiligten Stoffe eine untergeordnete Rolle. Liegen jedoch brennbarer Stoff und Sauerstoff in einem bestimmten Konzentrationsbereich vor, so verläuft das Brennen schneller und kann als Explosion (Verpuffung, Deflagration oder Detonation) ablaufen.

Die beiden Erscheinungsformen des Brennens sind Flamme und Glut. Glut tritt nur bei festen Stoffen (Brandklassen A und D), Flammen nur in Verbindung mit gasförmigen Stoffen auf, die durch Verdunsten/Verdampfen von Flüssigkeiten oder durch Pyrolyse von Feststoffen entstehen können. Dies ist auch für die Auswahl von Löschmitteln wichtig, da Glut zum vollständigen Verlöschen abgekühlt werden muss, während Flammen durch Ersticken gelöscht werden können.

Grundvoraussetzungen der Verbrennung:

räumliche und zeitliche Koinzidenz der nachfolgenden Voraussetzungen:

- stoffliche Voraussetzungen:
 - Brennstoff (brennbarer Stoff)
 - Sauerstoff
- erforderliche Aktivierungsenergie (Zündenergie)

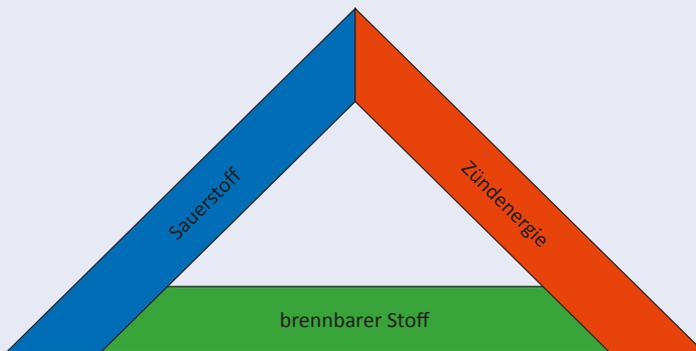


Abb. 1: Verbrennungsdreieck

Im Verlauf der Zeit kam auf internationaler Ebene noch die „ungehinderte Kettenreaktion“ als vierter Faktor hinzu, welche auf die für die Fortsetzung der Verbrennung notwendigen Radikalkettenreaktionen hinweist. In diesem Fall wird aus dem Dreieck ein Tetraeder („Fire Tetrahedron“ oder auch „Emmons-Tetraeder“). [1, S. 7]

2.1.1 Brandklassen

Brände werden nach DIN EN 2 anhand des beteiligten brennbaren Stoffs in fünf Klassen eingeteilt. Sie dienen vornehmlich der Festlegung von Löschmitteln, insbesondere bei der Auswahl von tragbaren Feuerlöschgeräten.

Tab. 1: Brandklassen nach DIN EN 2

Klasse	Bezeichnung
A	Brände fester Stoffe, hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Glutbildung verbrennen
B	Brände von flüssigen oder flüssig werdenden Stoffen
C	Brände von Gasen
D	Brände von Metallen
F	Brände von Speiseölen/-fetten (pflanzliche oder tierische Öle und Fette) in Frittier- und Fettbackgeräten und anderen Kücheneinrichtungen und -geräten

Brandklasse A:

Brennbare feste Stoffe umgeben uns quasi überall. Exemplarisch seien hier nur Holz, Möbel, Textilien sowie Kunststoffe zu nennen. Sie unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht, z. B.

- Entzündbarkeit
- thermische Trägheit
- Abbrandgeschwindigkeit
- Heizwert (z. B. Polyethylen 46,5 kJ/g; Cellulose 16,1 kJ/g; Polyurethanschaum 24,4 kJ/g) [2, S. 4]
- Abbrand mit oder ohne Flamme

Die Art der Zündung von Feststoffen (Zündung durch Wärme, mit oder ohne Flamme sowie Funken) hat unter Umständen auch Einfluss auf die Art ihres Abbrandes (glimmen, schwelen oder offener Flammenbrand). Polyurethanweichschaum beispielsweise geht bei Kontakt mit einer Flamme leicht in einen sich schnell ausbreitenden offenen Flammenbrand über, während eine rein thermische Zündung gegebenenfalls nur einen

sich langsam ausbreitenden Schwelbrand verursacht. Der Abbrand ist auch von der Anwesenheit von Flammschutzmitteln abhängig, die vor allem bei Kunststoffen häufig zum Einsatz kommen.

Brandklasse B:

Für die Beurteilung der Brandgefahr von entzündbaren Flüssigkeiten ist der Flammpunkt eine wesentliche zu beachtende Größe. So gibt dieser die Temperatur der Flüssigkeit in Grad Celsius an, bei der eine ebene Flüssigkeitsoberfläche im Tiegel (mit – c. c. closed cup – oder ohne Deckel – open cup –), so viele Dämpfe abgibt, dass sich diese bei Annäherung einer geeigneten Zündquelle zünden lassen, dann aber wieder verlöschen. Die Dämpfe flammen also nur kurz auf und es kommt erst bei noch höherer Temperatur der Flüssigkeit zu einem fortdauernden Brennen (Brennpunkt).

Für die Beurteilung der Brandgefahr ist weiterhin bedeutsam, ob die Flüssigkeit mit Wasser mischbar ist oder nicht. Während bei entzündbaren Flüssigkeiten mit Siedetemperaturen unter 100°C die brennende Flüssigkeit „nur“ aufschwimmt und sich beispielsweise durch Zugabe von Wasser in Behälter brennend ausbreiten kann, kann es bei Flüssigkeiten mit Siedetemperaturen über 100 °C zur Fettexplosion (siehe hierzu Brandklasse F) oder bei Tanks zum sogenannten Boil-Over kommen. Beim Boil-Over befindet sich das Wasser im flüssigen Zustand am Boden des Tanks zunächst noch in Bereichen mit einer Temperatur unter 100 °C. Mit Fortschreiten des Brandes heizt sich diese Schicht auf und das Wasser beginnt zu siedeln. Der Wasserdampf führt dann zum „Überkochen“ der brennenden Flüssigkeit, wodurch es gegebenenfalls auch zum Überlaufen der aufschäumenden, brennenden Flüssigkeit sowie zur enormen Vergrößerung der Flamme über dem Tank kommen kann.

Generell wichtig im Kontext entzündbarer Flüssigkeiten ist, dass ihre Dämpfe schwerer als Luft sind, sich demnach am Boden ausbreiten und in Kellern, Schächten sowie anderen tiefergelegenen Punkten sammeln sowie anreichern können. Bei einer Zündung kann hierdurch die entstehende Flamme bis zur Austrittsstelle zurückschlagen.

Innerhalb des Konzentrationsbereichs, der von der unteren (UEG) und der oberen Explosionsgrenze (OEG) begrenzt wird, bei denen gerade noch keine Zündung erfolgen (UEG) oder gerade keine Zündung mehr eintreten kann (OEG), ist eine Explosion möglich.

Brandklasse C:

Gase unterscheiden sich unter anderem durch ihre Gasdichte im Verhältnis zur umgebenden Luft und damit in der Eigenschaft, sich entweder nach unten und bodennah, wie die Dämpfe entzündbarer Flüssigkeiten, oder nach oben auszubreiten.

Maßstab dafür ist die sogenannte Luftvergleichszahl, also die mittlere Molmasse von Luft, die sich wie folgt berechnen lässt. Luft besteht in den wesentlichen Bestandteilen aus ca. 78 Vol.-% Stickstoff ($M(\text{N}_2) = 28 \text{ g/mol}$), ca. 21 Vol.-% Sauerstoff ($M(\text{O}_2) = 32 \text{ g/mol}$) und 1 Vol.-% Argon ($M(\text{Ar}) = 40 \text{ g/mol}$). Die mittlere Molmasse dieses Gemischs ergibt sich dann ungefähr zu

$$M(\text{Luft}) = 0,78 \cdot 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 0,21 \cdot 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 0,01 \cdot 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 28,96 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Da sich nach dem Satz von Avogadro Gase hinsichtlich Druck, Temperatur, Volumen und Stoffmenge gleich verhalten, genügt es, die Molmassen der Gase mit der mittleren Molmasse von Luft zu vergleichen, um herauszufinden, ob die Gase eine höhere oder geringere Dichte als Luft haben, sich also nach oben oder unten ausbreiten.

Tab. 2: Luftzusammensetzung

Gas	Volumenanteil
N_2	78,084 %
O_2	20,942 %
Ar	0,934 %
CO_2	0,038 %

Beim Vergleich der Molmassen von Propan $M(\text{C}_3\text{H}_8) = 44 \text{ g/mol}$ und Methan $M(\text{CH}_4) = 17 \text{ g/mol}$ mit der Luftvergleichszahl 29 g/mol zeigt sich, dass Methan deutlich leichter als Luft ist und sich nach oben ausbreitet, während sich Propangas am Boden sammelt und nach unten ausbreitet. Schwere Gase dürfen dementsprechend nicht unter Erdgleiche aufbewahrt werden, also beispielsweise in Kellern, da ansonsten die Gefahr besteht, dass sich bei Undichtigkeiten Gase anreichern und zündfähige Gemische bilden können.

$$\text{CH}_4 \text{ Methan } M(\text{CH}_4) = 1 \cdot 12 + 4 \cdot 1 = 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ (leichter als Luft)}$$

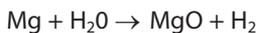
$$\text{C}_3\text{H}_8 \text{ Propan } M(\text{C}_3\text{H}_8) = 3 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ (schwerer als Luft)}$$

Brandklasse D:

Die Brennbarkeit von Metallen hängt nicht nur vom Metall selbst, sondern auch stark vom jeweiligen „Zerteilungsgrad“ ab, weshalb sich ein Eisennagel selbstverständlich nicht entzünden lässt, während dies bei fein zer-

teiltem Eisen in Form von Stahlwolle, Eisenfeilspänen oder Eisenpulver möglich ist.

In der Praxis können Metallstäube und -späne in Schleifereien und in der Metallverarbeitung auch in großen Mengen auftreten. Neben den hohen Verbrennungstemperaturen der Metalle, der Freisetzung auch von UV-Strahlung im Fall von Magnesium und anderen leicht brennbaren Metallen, ist sicherlich die Reaktivität mit Wasser für die Brandschutzplanung von besonderer Bedeutung. Brennende Metalle reagieren in Form einer Redoxreaktion miteinander, da Magnesium eine höhere Bindungsaffinität zum Sauerstoff hat als der Wasserstoff. Die Reaktion verläuft sehr heftig, da das flüssige Wasser eine sehr hohe „Sauerstoffdichte“ mit sich bringt. So enthalten 18 g Wasser bei 0 °C, vollständig in die Elemente zerlegt, 11,2 Liter reinen, gasförmigen Sauerstoff. Die Verbrennung der Metalle verläuft also deutlich heftiger als an der Luft; es sprühen Funken und glühendes Material fliegt umher. Aber nicht nur das, es entsteht auch noch Wasserstoff.



Die immer wieder erwähnte thermische Dissoziation des Wassers bei Temperaturen von $> 2.000 \text{ °C}$ spielt bei der Reaktion keine beziehungsweise eine sehr untergeordnete Rolle, da hier eine triebkräftige Redoxreaktion stattfindet. So findet bei hohen Temperaturen vielmehr ein „Angriff“ des Metalls auf das Wasser statt, bei dem das Metall mit dem Sauerstoff reagiert und Wasserstoff zurücklässt. Dieser Wasserstoff kann sich dann mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft zum explosiven Knallgas vermischen, welches bei Zündung explodieren kann.

Brandklasse F:

Die Aufnahme der Brandklasse F in die DIN EN 2 erfolgte erst im Jahr 2005. Bis dahin waren Speiseöle und -fette der Brandklasse B zugeordnet. Hintergrund der Einführung der neuen Brandklasse war, dass sehr leistungsfähige und sehr spezifische Fettbrandlöschmittel entwickelt wurden und zur Verfügung standen, so dass die Definition einer eigenen Brandklasse gerechtfertigt war. Die Brandklasse F betrifft ausschließlich natürlich Fette, die chemisch gesehen Fettsäureester des Glycerins sind. Fettbrandlöschmittel erzeugen das eigentliche Löschmittel ausschließlich in Anwesenheit und durch chemische Reaktion mit solchen Triglyceriden. Der genaue Mechanismus wird in Kapitel 21.2.1. beschrieben.

Das Grundproblem aller Speisefette und -öle sowie aller brennbarer Flüssigkeiten mit Siedetemperaturen deutlich über 100 °C ist, dass es im Brandfall beim Aufbringen von Wasser zu einer Fettexplosion kommt. Wasser hat eine höhere Dichte als die Fette und Öle, auch die der Brand-

klasse B, so dass das Wasser unter die Oberfläche der brennenden Flüssigkeit absinkt. Da die Flüssigkeiten durch ihre hohe Siedetemperatur eine Temperatur über 100 °C aufweisen, kommt es nach einem Siedeverzug zum plötzlichen Sieden und spontanen Verdampfen des Wassers. Der dabei entstehende Wasserdampf nimmt das etwa 1.600-fache Volumen des flüssigen Wassers ein. Dieser schlagartig freiwerdende Wasserdampf führt zur plötzlichen Zerteilung des flüssigen Brandgutes in viele kleine Tröpfchen, die bei der Fettexplosion in einem Feuerball in Flammen aufgehen. Insofern sind gerade bei Fritteusen besondere Löschmittel (vor allem Fettbrandlöschmittel oder Wassernebel) erforderlich. Aufgrund der kleinen Tröpfchengröße und der besonderen Löscheffekte ist Wassernebel hier, anders als „flüssiges“ Wasser, gut geeignet und wird auch in Industriefritteusen sicher, erfolgreich und ohne Folgeschäden durch Verunreinigungen durch das Löschmittel eingesetzt.

2.2 Leuchten und Rußen von Flammen

Gerade für die Auswahl geeigneter Brandmeldeprinzipien ist es wichtig zu wissen, ob beispielsweise gelagerte Stoffe mit oder ohne sichtbare Flamme beziehungsweise mit oder ohne Rußfreisetzung verbrennen.

Leuchten und Rußen von Flammen [3, S. 118f.]:

- Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen
 - brennen mit leuchtender Flamme
 - je größer das Molverhältnis C:H, umso stärker die Rußbildung

Tab. 3: Leuchten und Rußen von Flammen bei Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen

Molverhältnis C:H	Flammenverhalten
1:3	leuchtend
1:2	leuchtend und rußend
1:1	leuchtend und stark rußend

- Kohlenstoff-Wasserstoff-Sauerstoff-Verbindungen
 - entscheidend ist der prozentuale Anteil von Sauerstoff in der Verbindung
 - je geringer der Sauerstoffgehalt, umso stärker die Rußbildung

Tab. 4: Leuchten und Rußen von Flammen
bei Kohlenstoff-Wasserstoff-Sauerstoff-Verbindungen

Massen- % Sauerstoff im Mol	Flammenverhalten
> 35	nicht leuchtend (blau)
27–35	leuchtend
< 27	leuchtend und rußend

– Beispiele

■ Methanol (CH_3OH)

- $m(\text{Gesamt}) = 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

- $m(\text{O}) = 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

- $\frac{m(\text{O})}{m(\text{Gesamt})} = \frac{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,5 = 50 \% \Rightarrow$ nicht leuchtend

■ Ethanol

- $m(\text{Gesamt}) = 46 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

- $m(\text{O}) = 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

- $\frac{m(\text{O})}{m(\text{Gesamt})} = \frac{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{46 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,347 = 34,7 \% \Rightarrow$ leuchtend

- Kohlenstoffdisulfid und ähnliche Flüssigkeiten
 - brennen mit blauer (nichtleuchtender) Flamme
- halogenhaltige brennbare Flüssigkeiten
 - brennen immer mit leuchtender Flamme

2.2.1 Zündquellen

Damit das Brennen, die Oxidation, mit einer entsprechenden Reaktionsgeschwindigkeit selbständig ablaufen kann, muss eine gewisse Energiebarriere überwunden werden, die sogenannte Aktivierungsenergie. Ohne diese Energiebarriere könnten oxidierbare Stoffe in unserer sauerstoffhaltigen Atmosphäre nicht existieren. Je nach den Eigenschaften des brennbaren Stoffs reichen sehr geringe Energiemengen aus, um eine sich selbst unterhaltende Verbrennung hervorzurufen. Sprichwörtlich könnte jeder

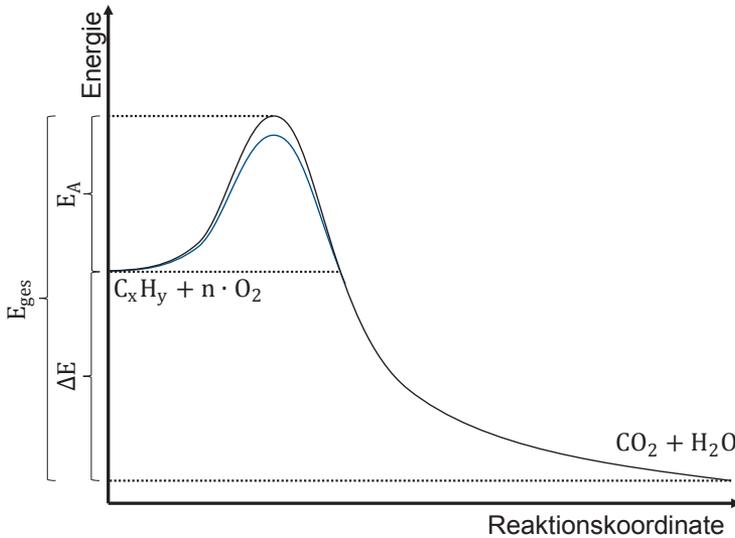


Abb. 2: Darstellung der Aktivierungsenergie einer Oxidation

noch so große Großbrand im Augenblick seiner Zündung noch mit einem Fingerhut voll Wasser gelöscht werden.

Es gibt eine Vielzahl an möglichen Zündquellen, die Menschen mitunter seit Jahrtausenden verwenden, um eine chemische Reaktion zu starten und sich so das Feuer kontrolliert nutzbar zu machen. So ist die Entwicklung der Feuerzeuge gleichermaßen auch eine Geschichte der Zündquellen. Angefangen von der Reibungswärme, über mechanisch erzeugte Funken, pneumatische Feuerzeuge (adiabatische Kompression), chemische Reaktionen und die katalytische Zündung von Wasserstoff an Platin, gab es im Lauf der Geschichte eine Fülle von phantasievollen Feuerzeugen, von denen nur noch wenige in Gebrauch sind. Alle Zündprinzipien finden sich in folgender Systematik wieder.

Nach DIN EN 1127-1 „Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1: Grundlagen und Methodik“ werden folgende Zündquellen unterschieden.

Tab. 5: Zündquellenarten nach DIN EN 1127-1 [4, S. 13–18]

Flammen und heiße Gase (einschließlich heißer Partikel)
Mechanisch erzeugte Schlag-, Reib- und Abtragvorgänge
Elektrische Geräte und Komponente
Elektrische Ausgleichsströme, kathodischer Korrosionsschutz
Statische Elektrizität
Blitzschlag
Elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von 10^4 Hz bis $3 \cdot 10^{11}$ Hz (Hochfrequenz)
Elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von $3 \cdot 10^{11}$ Hz bis $3 \cdot 10^{15}$ Hz
Ionisierende Strahlung
Ultraschallwellen
Adiabatische Kompression und Stoßwellen
Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

2.2.2 Sauerstoff

Es gibt eine in den Normen DIN EN 14034-4 und DIN EN 1839 definierte Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK), die sinngemäß die höchste Sauerstoffkonzentration in einem Gemisch einer brennbaren Substanz (Gas, Dampf, Staub) mit Luft und Inertgas, bei dem noch keine Explosion ausgelöst wird, bezeichnet. Neben der unteren und oberen Explosionsgrenze, die sich auf die Konzentration des Gases, Dampfes oder Staubes in der Luft beziehen, gibt es demnach auch eine Grenzkonzentration für den Sauerstoff, die sich insbesondere auf Inertisierungsprozesse bezieht. Die Sauerstoffgrenzkonzentration ist nicht nur stoffspezifisch, sondern auch vom jeweiligen Inertisierungsgas (z. B. N_2 oder CO_2) abhängig.

Bei Gasen und Dämpfen liegt sie z. B. im Bereich um 10 Vol.-%, bei Feststoffen kann sich auch noch < 5 Vol.-% O_2 ein Verbrennungsprozess weiter ausbreiten. [1]

Die DIN EN 16750 „Ortsfeste Löschanlagen – Sauerstoffreduktionsanlagen – Auslegung, Einbau, Planung und Instandhaltung“ definiert eine „Entzündungsgrenze“ als maximale Sauerstoffkonzentration in einem Gemisch eines brennbaren Stoffes mit Luft und Inertgas, bei der keine Zündung auftreten kann. Sie liegen nach Anhang A der Norm je nach brennbarem Stoff zwischen 11 Vol.-% O_2 und 17 Vol.-% O_2 für Methanol bzw. Fichtenholz.

2.3 Raumbrand

Ein Schadenfeuer, also ein Brand, ist ein selbständig fortschreitendes, unkontrollierbares Feuer außerhalb einer Feuerstätte, das nicht zum Verbrennen bestimmte oder nicht wertlose Gegenstände vernichtet und Personenschäden verursachen kann [5, § 1 Rn. 37].

Phasen des Raumbrandes:

Der Ablauf eines Raumbrandes kann, in Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung und der Dauer, in mehrere Phasen unterteilt werden:

- Zündphase
- Schwelbrandphase
- Ausbreitungsphase
- Abkühlphase

In Abhängigkeit von den Ventilationsverhältnissen im Brandraum können folgende Phasen unterschieden werden:

- brandlastkontrollierte Phase
- ventilationskontrollierte Phase

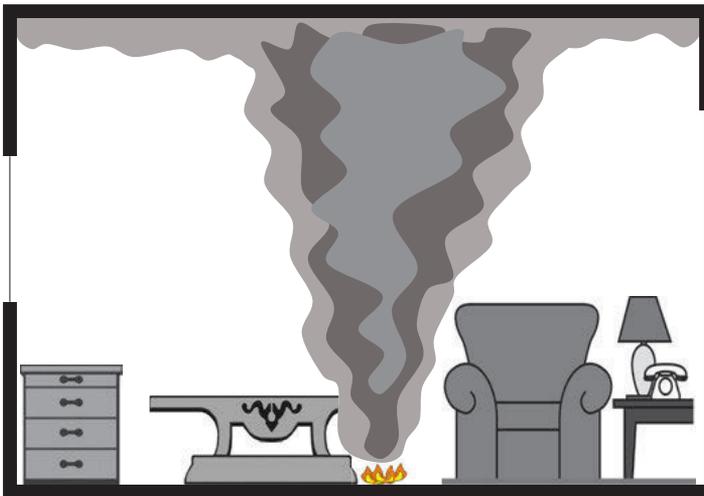


Abb. 3: Frühe Phase eines Raumbrandes

Ein Brand kann, wie in Abbildung 3 dargestellt, in der Mitte eines Raumes beginnen (Zündphase). Nach der Schwelbrandphase breiten sich die Flammen am Boden nur langsam und – unter der Annahme einer gleichmäßigen Brandlastverteilung – kreisförmig aus. Eine typische Brandausbreitungsgeschwindigkeit liegt bei Feststoffen im Bereich von 0,5 m/min. Der aufsteigende Rauch verbreitet sich axialsymmetrisch unter der Decke

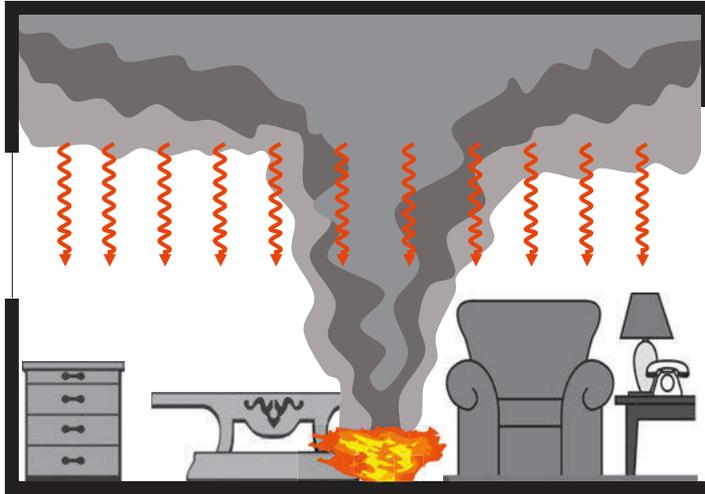


Abb. 4: Fortentwickelter Raumbrand

mit einer Geschwindigkeit von circa 1 m/s, so dass der Deckenbereich des Raumes recht schnell mit Rauch gefüllt ist. In dieser brandlastkontrollierten Phase des Brandes bestimmen die Eigenschaften des Brandgutes den Brandverlauf, da noch ein Überschuss an Luftsauerstoff im Raum vorhanden ist. Der entstehende Rauch füllt den Raum weiter von oben her, die Rauchsicht wird immer mächtiger und die Brandfläche am Boden wird nur langsam größer. Die Sauerstoffkonzentration im Raum sinkt und der Brand geht in die ventilationskontrollierte Phase über. Nun bestimmt der Volumenstrom an einströmender Luft, und damit die vorhandenen Öffnungen und Undichtigkeiten in den raumabschließenden Bauteilen, das Brandgeschehen.

Von den Flammen und dem aufströmendem Rauch geht Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) aus. Insbesondere die Wärmestrahlung der Heißgaschicht unter der Decke führt zu einer Erwärmung auch weiter vom Brandgut gelegenen Oberflächen. Mittlerweile werden alle im Raum befindlichen Oberflächen durch die Infrarotstrahlung aufgeheizt und damit für eine Zündung thermisch aufbereitet. Holz lässt sich beispielsweise durch eine Pilotflamme bei einer Wärmestromdichte von $12,5 \text{ kW/m}^2$ leicht zünden, während es bei 29 kW/m^2 von selbst zündet.

Die Ausbreitung eines Brandes hat immer mit dem Transport von Wärme zu tun. Physikalisch lassen sich folgende Wärmetransportmechanismen unterscheiden:

- **Wärmeleitung**
Der Wärmetransport erfolgt durch Stöße unmittelbar angrenzende schwingende Moleküle eines Körpers. Maßgeblich für den Wärmetransport ist hierbei insbesondere die Rohdichte der jeweiligen Körper. Die Wärmeleitung tritt vor allem in Feststoffen, aber auch in ruhenden oder laminar strömenden Fluiden auf.
- **Konvektion (Wärmeströmung)**
Bei der Konvektion wird die Wärme durch die Fortbewegung der energietragenden Moleküle in der Umgebungsatmosphäre transportiert. Der Wärmeaustausch zwischen der umgebenden Atmosphäre und einem Körper ist dabei abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, der Temperatur der umgebenden Atmosphäre sowie der Oberfläche des Körpers. In strömenden Fluiden überlagert der konvektive Wärmetransport den Wärmetransport durch Leitung.
- **Wärmestrahlung**
Grundsätzlich emittiert und immitiert jeder Körper, unabhängig von der umgebenden Materie, elektromagnetische Strahlung. Hierbei ist insbesondere der Temperaturunterschied zwischen den beiden Körpern für die transportierte Wärme von Relevanz.

Der zentrale Mechanismus, der die sehr schnelle Brandausbreitung verursacht, ist also eine Kombination aus Wärmeströmung und -strahlung. Der aufströmende Rauch transportiert die bei der Verbrennung entstehende Wärme unter die Raumdecke und verteilt diese dort. Die Wärmestrahlung strahlt vom Deckenbereich aus zurück in den Raum und erreicht dadurch auch die weiter vom nur langsam anwachsenden Brandherd befindlichen Flächen. Alle Flächen im Raum werden thermisch aufbereitet, obwohl der Brand lange auf einen räumlich eher eng begrenzten Bereich beschränkt bleibt. Dies führt einerseits zu einer Beschleunigung des Abbrandes (erhöhte Abbrandrate) im Bereich des Brandherdes, da die thermisch aufbereiteten Flächen um den Brandherd so schneller vom Brand erfasst werden. Andererseits treten nun aus allen brennbaren Oberflächen Pyrolyse-gase, also ein Gemisch aus brennbaren thermischen Zersetzungsprodukten, aus. Der Raum wärmt sich weiter auf und füllt sich mit immer mehr brennbaren Gasen und Dämpfen. Bei einem gewissen Stoffumsatz im Raum (raumabhängig), einer Temperatur der Heißgasschicht $> 600\text{ °C}$ und einer Wärmestromdichte von $> 20\text{ kW/m}^2$ am Boden setzt üblicherweise der Flashover ein, der auch als Feuerübersprung bezeichnet wird.

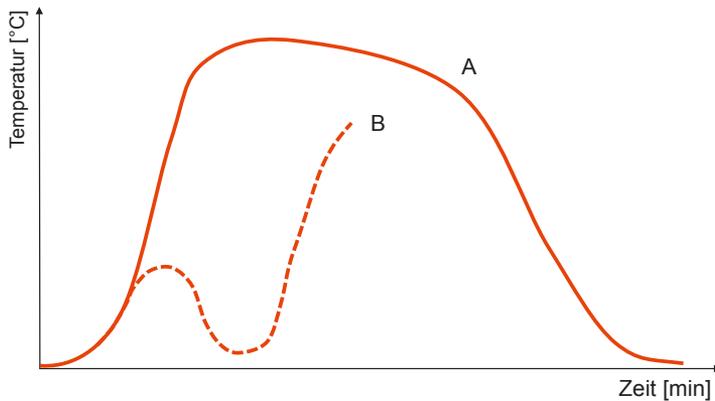


Abb. 5: Typischer Temperatur-Zeit-Verlauf eines Raumbrandes

Alle zuvor thermisch aufbereiteten Flächen zünden fast gleichzeitig und der Raum geht schlagartig in einen Vollbrand über.

Flash-Over:

Plötzlicher Übergang eines räumlich begrenzten Raumbrandes in einen Zustand in dem alle brennbaren Oberflächen in Brand geraten sind.

Experimentell ermittelte Voraussetzungen für einen Flashover [6; 7; 2]:

1. $\geq 600 \text{ °C}$ unter Zimmerdecke
2. $\geq 20 \text{ kW/m}^2$ radiative Wärmestromdichte am Boden
3. raumabhängige Mindestabbrandrate

Der sich unbeeinflusst ergebende Temperatur-Zeitverlauf ist in Abbildung 5 Kurve A dargestellt. Kurvenverlauf B zeigt ein Absinken der Wärmefreisetzungsrate und der Temperatur in der ventilationskontrollierten Brandphase durch einen geringen Volumenstrom nachgeführter Luft. Der darauffolgende steile Anstieg ist auf ein vermehrtes Nachströmen von Luft durch eine vergrößerte Nachströmöffnung, beispielsweise durch das Versagen eines Fensters oder das Öffnen einer Tür, zurückzuführen.

Natürlich kann sich der Brand in der ventilationskontrollierten Phase auch abschwächen und gegebenenfalls sogar verlöschen. Das hängt von vielen Faktoren, wie beispielsweise dem Zündinitial, dem zuerst entzündeten Brandgut, den Brandguteigenschaften, den Öffnungen in Wänden und Decken oder der Qualität von Fenstern und Türen, ab.

In diesem Kontext ist ein Verständnis für den Zusammenhang zwischen der Distanz der Heißgasschicht zum Boden und der am Boden auftretenden Wärmestromdichte unabdingbar.

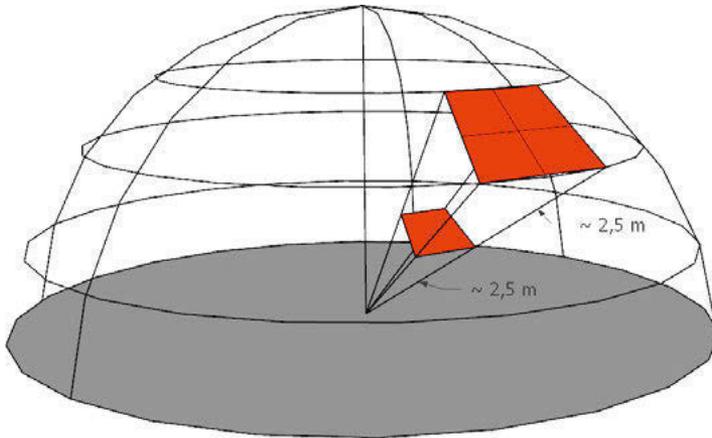


Abb. 6: Schematische Darstellung der Ausbreitung von Strahlung einer Punktquelle

Abb. 6 zeigt das quadratische Abstandsgesetz, das bei einer punktförmigen Strahlungsquelle, z. B. bei radioaktiven Strahlern, exakt gilt. Da sich die freigesetzte Energie der elektromagnetischen Strahlung in den gesamten Raumwinkel ausbreitet, verteilt sie sich in dem gezeigten Ausschnitt bei dem doppelten Abstand auf die vierfache Fläche. Daher gilt

$$\dot{q}(d) = \frac{1}{d^2} \dot{q}(0) \quad (1)$$

Bei einem Abstand d von 5,0 m tritt demnach nur noch $1/25$ der ursprünglichen Wärmestromdichte auf.

ACHTUNG: Streng mathematisch besteht dieser Zusammenhang bei der hier zu betrachtenden Wärmestrahlung *nicht*. Er dient nur als Vergleichsgröße um aufzuzeigen, welchen überproportionalen, also exponentiellen, Einfluss der Abstand zwischen Wärmestrahlungsquelle und bestrahlter Fläche hat. Hierfür ist dieses Gedankenmodell hinreichend genau, um eine etwaige Abschätzung vornehmen zu können.

Da bei einem Brand die Wärmestrahlung von Flächen ausgeht, also etwa von einer Fensteröffnung oder einer Heißgasschicht unter der Decke, handelt es sich hierbei um diffuse Strahlung. Gedanklich lässt sich diese in etwa mit einer Lampe vergleichen, bei der das Licht durch eine Milchglasplatte „matt“, also diffus gemacht wird. Die exakte mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Strahlungssender und -empfänger ist bei der diffusen Strahlung deutlich umfangreicher und soll hier nicht weiter betrachtet werden.

Anhand dieses einfachen quadratischen Modells lässt sich eine wesentliche Wirkung von Rauchableitungsmaßnahmen sehr gut verdeutlichen. Wenn kontinuierlich ein ausreichend großer Volumenstrom des Rauches nach außen abgeleitet wird, bleibt über einen längeren Zeitraum die Distanz zwischen Heißgasschicht und Boden größer, sofern auch ein entsprechender Zuluftstrom bodennah sichergestellt ist und die Schichtung erhalten bleibt. Der Einfluss dieser Distanz auf die am Boden auftreffende Wärmestromdichte ist in etwa exponentiell, weshalb auch schon geringfügig größere Abstände zwischen Heißgasschicht und Boden die radiative Wärmestromdichte am Boden erheblich verringern und verhindern (bestenfalls) oder verzögern (mindestens) den Eintritt des Flashover.

2.4 Energie und Wärmefreisetzung

Anstelle des Temperatur-Zeit-Verlaufs, wie er bei der Prüfung der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen verwendet wird, lässt sich der Verlauf eines Raumbrandes auch über den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates (eng. Heat Release Rate, HRR) charakterisieren. Die Form des Kurvenverlaufs in Abbildung 7 entspricht dem Temperatur-Zeit-Verlauf der Kurve A in Abbildung 5. Lediglich die Y-Achse zeigt nicht die Temperatur in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$), sondern die Wärmefreisetzungsrates in Megawatt (MW).

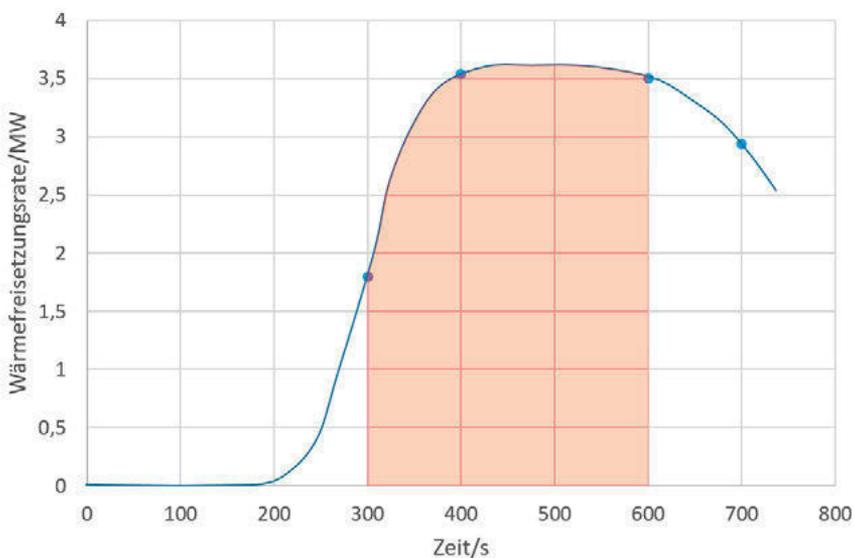


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrates bei einem (fiktiven) Brand

Bei 250 Sekunden setzt der Brand 0,5 MW (entspricht 500 kW) an Energie frei, während das Maximum der Wärmefreisetzungsrates (\dot{Q}) etwas mehr als 3,5 MW beträgt. Die Wärmefreisetzungsrates ist also der Momentanwert der freigesetzten Energie pro Zeit, also die Leistung. Die in einem bestimmten Zeitintervall insgesamt freigesetzte Energie, beispielsweise zwischen 300 und 600 Sekunden in Abbildung 7, ergibt sich durch die Integration in diesem Bereich als Fläche unter der Kurve.

Für die Angabe der Wärmefreisetzungsrates wird üblicherweise die Einheit Kilowatt (kW) oder Megawatt (MW) verwendet. Grundsätzlich entspricht ein Kilowatt einem Kilojoule pro Sekunde (kJ/s) und ein Megawatt entsprechend einem Megajoule pro Sekunde (MJ/s).

Als Einheit für die freigesetzte Energie oder die Brandlast lassen sich ebenso Kilojoule oder Megajoule verwenden. Gebräuchlicher ist jedoch die Verwendung der Einheit Kilowattstunde (kWh), welche die Energie eines über eine Stunde konstant brennenden Brandes mit einer Wärmefreisetzungsrates von einem Kilowatt ist. Demnach lässt sich eine Kilowattstunde in 3,6 Megajoule umrechnen.

Aufbauend auf der Arbeit von Thornton („Thornton’s rule“) aus dem Jahr 1917 [8] veröffentlichte Huggett 1980 [9] ebenfalls Messungen üblicher brennbarer Stoffe sowie den Zusammenhang zwischen der bei der Verbrennung freigesetzten Energie und dem verbrauchten Sauerstoff. Es zeigte sich, wie schon bei Thornton, eine sehr gute Korrelation zwischen der Masse an verbrauchtem Sauerstoff und der freigesetzten Wärme. Huggett gibt auf Basis seiner Messungen an, dass mit einer Abweichung von $\pm 5\%$ pro verbrauchtem Kilogramm Sauerstoff (O_2) 13,1 MJ Energie freigesetzt werden. Dies ist nicht nur für den Einfluss des einströmenden Luftvolumenstroms in den Brandraum während der ventilationskontrollierten Phase von Bedeutung, sondern auch für das Cone-Kalorimeter, welches eines der wichtigsten Instrumente der Brandtechnologie ist. Bei diesem wird auf Basis des Huggett-Wertes die Wärmefreisetzungsrates mittels der sogenannten Sauerstoff-Verbrauchskalorimetrie ermittelt. Hierbei wird die Differenz zwischen der Sauerstoffkonzentration in der Umgebungsluft und der Sauerstoffkonzentration in der Abluft sowie der Rauchgasvolumenstrom messtechnisch erfasst. Anhand dieser Werte lässt sich anschließend, wie nachfolgend exemplarisch dargestellt, die Wärmefreisetzungsrates mit hinreichender Richtigkeit für übliche Brandgüter abschätzen.

$$\dot{Q} = 13,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{O_2}} \cdot (x_{O_2, zu} - x_{O_2, ab}) \cdot \dot{m}_{\text{Rauchgas}} \quad (2)$$

Diese allgemeine Formel lässt sich auf eine exemplarische Verbrennung von PMMA wie folgt anwenden:

- Rauchgasmassenstrom : $0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- O_2 – Massenanteil Rauchgas : 15 %
- Volumenanteil 20,8 % → Massenanteil von O_2 in der Luft : 23 %

$$\dot{Q} = 13100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot (0,23 - 0,15) \cdot 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 52,4 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 52,4 \text{ kW}$$

Dieser Ansatz ist besonders in Verbindung mit dem Ventilationsfaktor von Interesse, mit dem sich der Luftmassenstrom durch eine Öffnung, z. B. ein Fenster oder eine Tür, berechnen lässt. Es zeigt sich, dass der Massenstrom neben der Fläche A auch vom Faktor \sqrt{H} , also der Wurzel aus der Höhe der Öffnung, bestimmt wird. So führen hohe Öffnungen bei gleicher Öffnungsfläche zu einem höheren Einstrom von Luft als breite Öffnungen mit einer geringeren Höhe. Unter Annahme einer bestimmten Verbrennungseffektivität (typischerweise 0,7), also der Effektivität, mit der der Sauerstoff zur Verbrennung genutzt wird, lässt sich aus der einströmenden Luft die maximal zu erwartende Wärmefreisetzungsrate ermitteln.

Massenstrom durch eine Öffnung [10]:

$$\dot{m} = 0,5 \cdot A \cdot \sqrt{H} \quad (3)$$

- A : Fläche der Öffnung in m^2
- H : Höhe der Öffnung in m
- $A \cdot \sqrt{H}$: Ventilationsfaktor

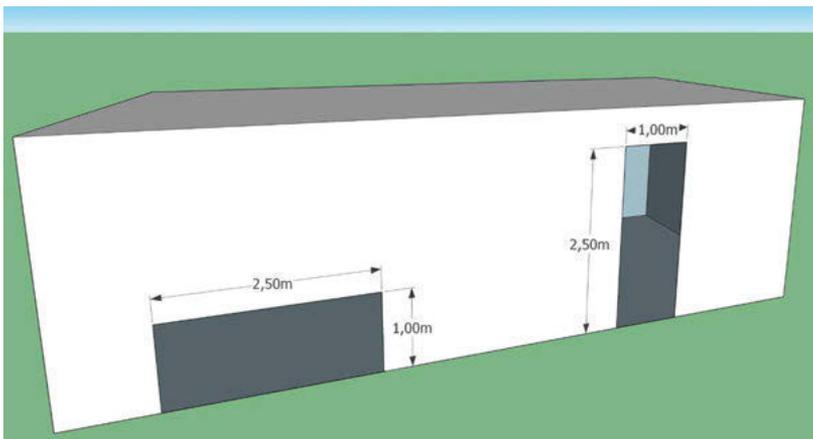


Abb. 8: Gegenüberstellung verschieden angeordneter Öffnungen bei gleicher Öffnungsfläche

2.5 Brandverläufe

Auch für konzeptionelle Zwecke ist die Möglichkeit, die Wärmefreisetzungsrate zu einem bestimmten Zeitpunkt des Brandverlaufes abschätzen zu können, mitunter sehr hilfreich. Wenn über den möglichen Brand wenig bekannt ist, bietet sich für Abschätzung der Wärmefreisetzungsrate in der Brandentwicklungsphase das αt^2 -Modell an.

2.5.1 Quadratisches Brandausbreitungsmodell

- Anwendung
 - Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung in der Brandentwicklungsphase
 - geringe Bestimmtheit der Brandbedingungen mit normativen Ansätzen
- Charakteristika
 - konstante flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate
 - Brandflächen sind annähernd kreisförmig
 - Kreisradius wächst linear mit der Zeit
 - ausreichende Luftzufuhr wird vorausgesetzt
- Wärmefreisetzungsrate ohne Berücksichtigung der Zündphase/Schwelbrandphase:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (4)$$

- \dot{Q} : Wärmefreisetzungsrate in kW
 - α : Brandentwicklungsfaktor in kW / s^2
 - t : Branddauer ohne Berücksichtigung der Zündphase/Schwelbrandphase in s.
- Wärmefreisetzungsrate mit Berücksichtigung der Zündphase/Schwelbrandphase:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_S + \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g} \right) \quad (5)$$

- \dot{Q} : Wärmefreisetzungsrate in kW
- \dot{Q}_S : Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt t_1 in kW; üblicherweise 25 kW
- \dot{Q}_0 : Wärmefreisetzungsrate von 1000 kW
- t_1 : Zeitpunkt, an dem der Entstehungsbrand vom Objektbrand in einen sich über das Objekt ausbreitenden Brand übergeht in s.
- t : Branddauer ohne Berücksichtigung der Zündphase/Schwelbrandphase in s
- t_g : charakteristische Brandentwicklungszeit; Zeitdauer bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW

Tab. 6: Richtwerte für die Anwendung des quadratischen Ausbreitungsmodells [11, S. 54f.]

Brandentwicklung	Nutzungsart	Stoffgruppen	α [kW / s ²]	t _g [s]	v _{aus} [m / min]
langsam	Gemäldegalerien	dicht gepackte Holzwaren	0,002931	600	0,06–0,12 0,2–0,3
mittel	Wohnung, Büro, Hotel (Rezeption, Zimmer), jegliche Nutzung ohne leichtbrennbare Stoffe	Baumwolle/Polyester Federkernmatratzen, massive Holzmöbel, einzelne Möbelstücke mit geringer Menge an Kunststoffen	0,011720	300	0,2–0,3
schnell	Laden	(hoch) gestapelte Holzpaletten, gefüllte Postsäcke, Kartone auf Paletten, einige Polstermöbel, Kunststoffschaum	0,046890	150	0,35–0,5
sehr schnell	Industrielager, Fertigungshalle	(schnellbrennende) Polstermöbel, hoch gestapelte Kunststoffe, dünne Holzmöbel, leichte Gardinen, Pool-Feuer	0,187600	75	0,7–1,2

2.5.2 Geometrisches Ausbreitungsmodell

Gelegentlich kann es aber auch zielführend sein, die zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erwartende Brandfläche abzuschätzen, um den zum Löschen notwendigen Wasservolumenstrom ermitteln zu können. Hinter dem zuvor beschriebenen quadratischen Modell steht im Grunde ein solches geometrisches Brandausbreitungsmodell. Die Kreisfläche ergibt sich zu

$$A_{\text{Kreis}} = r^2 \cdot \pi \quad (6)$$

Der Kreisradius ergibt sich bei konstanter Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu

$$r = v_{\text{aus}} \cdot t_{\text{Brd}} \quad (7)$$

also als Produkt der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Zeit der Brandausbreitung. Daraus folgt, dass sich die zum Zeitpunkt t_{Brd} zu erwartende Brandfläche bei kreisförmiger Brandausbreitung aus

$$A_{\text{Brd}} = \pi \cdot v_{\text{aus}}^2 \cdot t_{\text{Brd}}^2 \quad (8)$$

mit

- A_{Brd} : Brandfläche in m^2
- v_{aus} : mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min
- t_{Brd} : Zeitdauer der ungehinderten Brandausbreitung in min

ergibt.

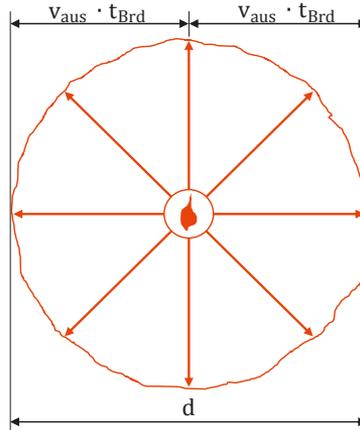


Abb. 9: Brandfläche bei einer kreisförmigen Brandausbreitung [3, S. 92]

Anwendung des geometrischen Brandausbreitungsmodells:

- Bestimmung der Entwicklung der Brandfläche in Abhängigkeit der Zeit
- Bestimmung der Brandverlaufskurve
- horizontal angeordnete Flächen
- Höhe brennbarer Stoffe maximal 1,5 m (Möbel in Räumen bis etwa 1,8 m)

Charakteristika:

- Bei Annahme eines Ausbreitungswinkels von 360° entspricht die ermittelte Brandverlaufskurve annähernd derer des quadratischen Brandausbreitungsmodells.

Brandfläche bei einer winkelförmigen Brandausbreitung:

$$A_{\text{Brd}} = \frac{\pi \cdot v_{\text{aus}}^2 \cdot t_{\text{Brd}}^2 \cdot \varphi}{360^\circ} \quad (9)$$

- A_{Brd} : Brandfläche in m^2
- v_{aus} : mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min
- t_{Brd} : Zeitdauer der ungehinderten Brandausbreitung in min
- φ : Winkel zwischen den beiden Richtungen der Brandausbreitung in $^\circ$

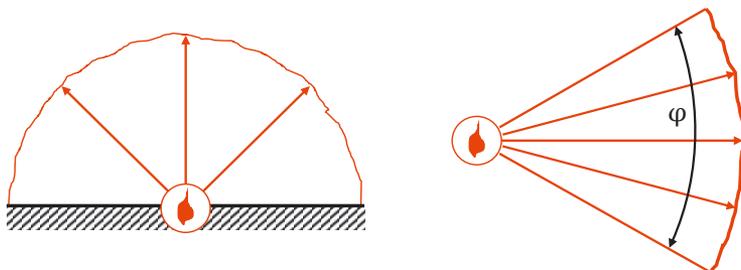


Abb. 10: Brandfläche bei einer halbseitigen und einer winkelabhängigen Brandausbreitung [3, S. 93 f.]

Brandfläche bei einer zweiseitig frontalen Brandausbreitung:

$$A_{\text{Brd}} = 2 \cdot v_{\text{aus}} \cdot t_{\text{Brd}} \cdot b \quad (10)$$

- A_{Brd} : Brandfläche in m^2
- v_{aus} : mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min
- t_{Brd} : Zeitdauer der ungehinderten Brandausbreitung in min
- b : Raumbreite in m

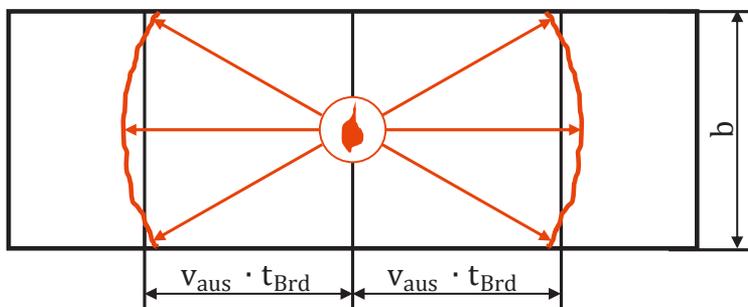


Abb. 11: Brandfläche bei einer zweiseitig frontalen Brandausbreitung [3, S. 94]

Auswahl der Brandausbreitungsgeometrie:

Je nach Raumgeometrie beziehungsweise den räumlichen Verhältnissen im Brandausbruchsbereich sowie bei der weiteren Ausbreitung, beispielsweise in andere Räume oder Bereiche, kann zwischen verschiedenen Geometrien der Brandausbreitung, (z. B. kreisförmig, ein-/zweiseitig frontal, winkelförmiger Brandausbreitung) gewählt und die Berechnung den örtlichen Verhältnissen angepasst werden.

- Auswahl der Brandausbreitungsgeometrie:
 - Übergang von der kreisförmigen zur zweiseitig frontalen Brandausbreitung in langen, schmalen Räumen mit einer Brandausbruchsstelle in der Raummitte.
 - Übergang von der kreisförmigen zu einer halbkreisförmigen Brandausbreitung bei Übertritt des Brandes von einem Raum in den anderen durch eine Öffnung.
 - Nutzung einer winkelförmigen Brandausbreitung bei einer Brandausbruchsstelle an einer Wand.

- Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate:

$$\dot{Q} = A_{\text{Brd}} \cdot v_{\text{ab}} \cdot X \cdot H_i \quad (11)$$

- \dot{Q} : Wärmefreisetzungsrate in kW
- v_{ab} : Massenabbrandgeschwindigkeit in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$
- A_{Brd} : Brandfläche in m^2
- X : Verbrennungseffektivität
- H_i : Heizwert der brennbaren Stoffe in kJ/kg

- Richtwerte:

Tab. 7: Beispielhafte Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für die Brandentwicklungs- und die Brandausbreitungsphase [11, S. 57]

Versuche zur Brandausbreitungsgeschwindigkeit	Brandentwicklungsphase v_{aus} [m / min]	Brandausbreitungsphase v_{aus} [m / min]
Wohnraum	0,33	0,51
Büroraum ohne Polstermöbel und/oder Büro großgeräte	0,20	0,37
Büroraum ohne Polstermöbel und/oder Büro großgeräte	0,29	0,48
Krankenzimmer	0,22	0,38
kleine Verkaufsstelle für Textilien und Schuhe	0,31	0,46

Tab. 8: Beispielhafte Werte für die Massenabbrandgeschwindigkeit und den Heizwert [11, S. 85]

Beispiele zur Massenabbrandgeschwindigkeit	v_{ab} [kg / (m ² · min)]	Heizwert H_i [kJ / kg]
Büroraum mit Polstermöbeln oder Großgeräten sowie Wohn- und Schlafräume		
Brandausbreitungsphase	0,32 bis 0,53	19020 Raumgrößen bis zu 40 m ²
Vollbrandphase	0,87	
Krankenzimmer		
Brandausbreitungsphase	0,21 bis 0,38	18860
Vollbrand	0,52	
Verkaufsraum		
Brandausbreitungsphase	0,31 bis 0,84	22000
Vollbrand	1,02	
weitere		
Reifenstapel im Vollbrand	3,4	31300
Schaumstoffmatratzen	0,62	19100

2.5.3 Umrechnung der Brandausbreitungsmodelle

Da die Brandfläche bei gleichmäßiger Brandlastdichte auch proportional zur Wärmefreisetzungsrate ($\dot{Q} \sim A_{Brd}$) ist, lassen sich die beiden Modelle jeweils ineinander umrechnen.

Im quadratischen Modell entsprechen die verschiedenen α -Werte unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten, wobei der Wert α auch die anderen Konstanten, also π und eine entsprechende Wärmefreisetzungsrate pro Fläche enthält.

Für die Umrechnung des quadratischen Modells in das geometrische Modell müssen die nachfolgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- für eine gegebene Fläche ist der Abbrand bezüglich der Grundfläche in etwa konstant,
- die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate ist in etwa konstant,
- der Heizwert bzw. der Bedarf an Verbrennungsluft ist in etwa konstant,
- die das Brandgut charakterisierende Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist über die Zeit in etwa konstant

- Umrechnung:

$$\alpha = \dot{q}'' \cdot \pi \cdot v_{\text{aus}}^2 \quad (12)$$

$$v_{\text{aus}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{q}'' \cdot \pi}} \quad (13)$$

- α : Brandentwicklungsfaktor in kW / s^2
- \dot{q}'' : flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate in kW / m^2
- v_{aus} : mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m / s

2.6 Rauchausbreitung

Während eines Raumbrandes steigt der Rauch solange auf, wie er eine positive Temperaturdifferenz zur Umgebung aufweist. Demnach stagniert er in isothermen Bereichen (Äquilibriumshöhe), also in Bereichen, in denen zwischen Rauch und Umgebungsluft keine Temperaturdifferenz mehr besteht. In der Heißgasschicht nimmt der Druck mit steigender Höhe zu.

Der Bereich der aufsteigenden Heißgase wird Plume genannt. Der Begriff lässt sich englisch [plu:m] oder französisch [plüm] aussprechen. In beiden Sprachen bedeutet er „Federn“ bzw. im Englischen auch „Federbusch“, wie der Schmuck eines alten Offiziershelms, und erinnert an die wellige, kegelförmige Geometrie des aufsteigenden Rauchs. Er ist ein Freistrahler, also das Einströmen eines Gases höherer Temperatur (geringerer Dichte) in ein Gas geringerer Temperatur (höherer Dichte). Unbeeinflusst nimmt der Rauch immer diese kegelförmige Geometrie an.

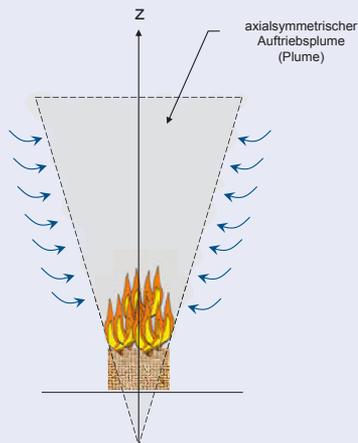


Abb. 12: Idealer Plume

- Durch die Vermischung der aufsteigenden Heißgase mit kalter Umgebungsluft auf der Kegelmantelfläche des Plumes erfolgt eine schnelle Abkühlung des Rauches und eine deutliche Erhöhung des ursprünglichen Massen- und Volumenstroms.

Viele Experimente sind zur mathematischen Beschreibung des axialsymmetrischen Auftriebsplumes durchgeführt worden, aus denen eine Reihe von Plumeformeln resultieren. Diese mathematischen Beschreibungen drücken die Abhängigkeit des auf Höhe z der Plumeachse (siehe hierzu Abbildung 12) messbaren Rauchgasmassen- oder Rauchgasvolumenstroms in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} aus. Die folgenden Ausdrücke zeigen die Möglichkeiten, unter anderem den Rauchgasmassenstrom, seine Temperatur und seine Geschwindigkeit auf Basis einer angenommenen konvektiven Wärmefreisetzungsrate mathematisch zu beschreiben und im Bedarfsfall für ein angenommenes Szenario zu ermitteln. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei Anwendung der Formeln nur die konvektive Wärmefreisetzungsrate zu berücksichtigen ist, da nur diese zum Auftrieb beiträgt. Der radiative Anteil der Wärmefreisetzungsrate, also die Wärmestrahlung, trägt nicht zum Auftrieb bei und bleibt daher unberücksichtigt. Zur Abschätzung der jeweiligen Anteile wird oftmals davon ausgegangen, dass 70 % der Wärmefreisetzungsrate auf die konvektive und 30 % auf die radiative Wärmefreisetzungsrate entfallen.

Für die Abschätzung einiger wichtiger Parameter im axialsymmetrischen Auftriebsplume gibt es folgende Beziehungen.

- Geschwindigkeit:
$$v = 1,94 \cdot \left(\frac{g}{c_p \cdot T_\infty \cdot \rho_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \cdot z^{-\frac{1}{3}} \quad (14)$$

- Massenstrom:
$$\dot{m} = 0,20 \cdot \left(\frac{\rho_\infty^2 \cdot g}{c_p \cdot T_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}} \quad (15)$$

- Temperaturzuwachs:
$$\Delta T_0 = 5,0 \cdot \left(\frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{3}} \cdot z^{-\frac{5}{3}} \quad (16)$$

- verwendete Größen:
 - c_p : spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 - T_∞ : Umgebungstemperatur in K
 - ρ_∞ : Dichte des umgebenden Mediums in kg/m^3
 - \dot{Q} : Wärmefreisetzungsrate in kW
 - z : Höhe in m

2.7 Brandrauchzusammensetzung

2.7.1 Allgemeines

Der beim Brennen entstehende Brandrauch ist ein heterogenes Gemenge aus anorganischen und organischen Feststoffen, Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen. Er ist zweifellos die größte Gefahr bei einem Brand, da er sich schnell ausbreitet und in kürzester Zeit den größten Schaden an Leben und Gesundheit von Menschen und Sachschäden anrichtet.

2.7.2 Anorganische Brandgase

Bei den anorganischen Brandgasen gilt das chemische Gesetz von der Erhaltung der Masse. Es können im Brandrauch nur diejenigen chemischen Elemente vorkommen, die auch in den Ausgangsstoffen, also im Brandgut oder in der Luft, vorkommen.

Tab. 9: Übersicht über ausgewählte Brandgase, deren Entstehungsvoraussetzungen und zugehörige Beispielstoffe

Brandgas		Voraussetzung	Beispiel
Kohlenstoffmonoxid	CO	kohlenstoffhaltiges Brandgut	Holz, Papier, Polyvinylchlorid, PU, Wolle etc.
Kohlenstoffdioxid	CO ₂		
Chlorwasserstoff	HCl	chlorhaltiges Brandgut	Polyvinylchlorid (PVC), Vinylchlorid, polychlorierte Biphenyle (PCB) etc.
Chlor	Cl ₂		
Phosgen	COCl ₂		
Fluorwasserstoff	HF	fluorhaltiges Brandgut	Kältemittel Tetrafluorpropen (HFO-1234yf), Lithium-Ionen-Akkumulatoren
Nitrose Gase	NO _x	stickstoffhaltiges Brandgut	Hydrazin, Polyurethan, Polyamid, Wolle, Düngemittel
Cyanwasserstoff	HCN		
Ammoniak	NH ₃		
Schwefeldioxid	SO ₂	schwefelhaltiges Brandgut	Schwefel, Gummi, Schwefelkohlenstoff
Schwefelwasserstoff	H ₂ S		
Phosphorwasserstoff	PH ₃	phosphorhaltiges Brandgut	Phosphide, div. Pflanzenschutzmittel

Anorganische Brandzersetzungsprodukte:

- Allgemeines:
 - hauptverantwortlich für Brandtote
 - sind in Innenräumen in hoher Konzentration vorhanden