

Herleitung des Gebäudeabstandes unter dem Aspekt der Brandausbreitung

C. Kunze

0. Einleitung

Zur Begrenzung einer Ausbreitung von Bränden sind in den Landesbauordnungen bzw. in der Musterbauordnung (MBO), auf die hier Bezug genommen wird, neben Baustoff- und Bauteilanforderungen auch Regelungen über Abstände zwischen Gebäuden wie auch zwischen Gebäuden und Grundstücksgrenzen enthalten. Diese Regelungen gelten im wesentlichen auch für bauliche Anlagen und andere Anlagen und Einrichtungen, von denen Wirkungen wie von Gebäuden ausgehen.

Das Baurecht kennt Abstände vor den Außenwänden von Gebäuden, die zwischen Null und einem von der Gebäudehöhe abhängigen Wert liegen. Dieser Abstand, der in Verbindung mit der Wandlänge eine Abstandfläche bildet, muß auf dem Grundstück selbst liegen. Die Abstandfläche kann auch auf öffentlichen Verkehrs- oder Grünflächen liegen, allerdings nur bis zu deren Mitte.

Ein Nullabstand ist dann gegeben, wenn an die Grundstücksgrenze gebaut wird. Für diesen Fall enthält das Bauordnungsrecht besondere Baustoff- und Bauteilanforderungen. Hier ist das Errichten einer Wand aus nichtbrennbaren Baustoffen ohne Öffnungen mit einer besonders nachgewiesenen Standsicherheit für den Schadensfall, ein besonderer oberer Wandabschluß und einiges mehr vorgesehen. Dieses Bauteil ist allgemein als Brandwand bekannt. Es ist im hier interessierenden Zusammenhang zum Abschluß von Gebäuden herzustellen, bei denen die Abschlußwand bis zu 2,5 m von der Nachbargrenze errichtet wird. Es kann auch ein Abstand von 5 m hingenommen werden, wenn dieser Abstand zu bestehenden oder nach den baurechtlichen Vorschriften zulässigen künftigen Gebäuden gesichert ist.

Sind Abstandflächen einzuhalten, so richten sie sich im wesentlichen nach der Höhe „H“ der Außenwand über der festgelegten Geländeoberfläche. Abgesehen von der höhenabhängigen Abstand-

regelung, die im wesentlichen auf soziale und gesundheitliche Gesichtspunkte zurückgeht, beträgt die Tiefe der Abstandfläche für alle planungsrechtlichen Gebietsausweisungen grundsätzlich „1 H“, mindestens jedoch 3 m.

Als Tiefe der Abstandfläche genügt in Kerngebieten 0,5 H und in Gewerbe- und Industriegebieten 0,25 H. In Sondergebieten – hier dürfte es sich im wesentlichen um Gebiete für Handel, Messen und Ausstellungen, Ladengebiete und Hochschulgebiete handeln – können geringere Tiefen der Abstandflächen zugelassen werden; in allen Gebieten darf sie aber 3 m nicht unterschreiten.

Für Gewerbe- und Industriegebiete enthält die MBO in § 6 Abs. 9 eine Regelung, die vom vorstehend geschilderten außenwandhöhenabhängigen System der Abstandfläche abweicht. Sie gestattet in besonderen Fällen auch ein Unterschreiten der Mindestdiefe von 3 m. Bei Wänden ohne Öffnungen genügt in den oben genannten Gebieten als Tiefe der Abstandfläche 1,50 m, wenn die Wände mindestens feuerhemmend sind und einschließlich ihrer Verkleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Es genügen auch 3 m, wenn die Wände mindestens feuerhemmend sind oder einschließlich ihrer Verkleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

Eine weitere Abweichung enthält § 6 Abs. 8 MBO, der eine Abstandfläche von mindestens 5 m vor Wänden fordert, die nicht mindestens feuerhemmend sind und die aus brennbaren Baustoffen bestehen.

Die Anforderungen aus der MBO an Außenwände ergeben sich nach der Brüstungshöhe über der festgelegten Geländeoberfläche – d. h. indirekt nach der Geschoßanzahl – und ihrer Funktion im Gebäude. Tragende und aussteifende Wände als Außenwände sind in Gebäuden mit Brüstungshöhen notwendiger Fenster oder sonstiger zum Anleitern bestimmter Stellen, die nicht mehr als 8 m über der festgelegten Geländeoberfläche liegen, müssen die Anforderung feuerhemmend erfüllen. In Gebäuden, die Brüstungsoberkanten darüber aufweisen, müssen diese Wände feuerbe-

ständig hergestellt werden. Für nichttragende Außenwände oder nichttragende Teile tragender Außenwände ergibt sich aus der MBO für Gebäude mit Brüstungsoberkanten oder der sonstigen zum Anleitern bestimmten Stellen, die nicht mehr als 8 m über der festgelegten Geländeoberfläche liegen, die Forderung nach Verwenden normalentflammbarer Stoffe. Bei Gebäuden mit darüberliegenden Brüstungshöhen oder Anleiterstellen sind die nichttragenden Außenwände oder die nichttragenden Teile tragender Außenwände aus nichtbrennbaren Baustoffen herzustellen. Sie sind auch in feuerhemmender Bauart zulässig, wenn sie die Anforderungen an Außenwandverkleidungen einhalten. Für die Außenwandverkleidungen einschließlich der Dämmstoffe der zuletzt genannten Gebäude gilt, daß sie mindestens aus schwerentflammbaren Baustoffen herzustellen sind. Für Gebäude mit geringeren Brüstungshöhen ergibt sich die Forderung nach Verwenden mindestens normalentflammbarer Baustoffe. In diesen Fällen ist jedoch die Regelung des § 6 Abs. 8 MBO nach einem auf 5 m vergrößerten Grenzabstand zu beachten. Anzumerken ist noch, daß diese Baustoff- und Bauteilanforderungen nicht für Gebäude gelten, bei denen der Fußboden mindestens eines Aufenthaltsraumes mehr als 22 m über der festgelegten Geländeoberfläche liegt.

In Einzelfällen, z. B. bei überdeckten Innenbereichen von Gebäuden, stellt sich immer wieder die Frage, ob auch hier bei sich gegenüberliegenden Öffnungen ein Abstand einzuhalten ist, der sich an den baurechtlichen Vorgaben orientiert.

Im folgenden soll daher ein Rechenverfahren hergeleitet werden, welches eine Belegung von Abstandsfestlegungen unter dem Gesichtspunkt des Brand-schutzes ermöglicht. Dieses Verfahren wurde auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen erarbeitet. Wesentlich ist dabei, den am Brandort freigesetzten radiativen Wärmestrom festzustellen, seine entfernungsabhängige Abnahme zu ermitteln und anschließend die Wirkung des abgeminderten Wärmestromes auf brennbare Materialien zu untersuchen.

1. Ermittlung des radiativen Wärmestromes am Brandort

1.1 Brände unter Freiraumbedingungen

Von jedem Brandort geht ein Wärmestrom aus, der sich in einen konvektiven und einen radiativen Anteil aufteilt. Auf die Behandlung der Wärmeleitung kann in diesem Zusammenhang verzichtet werden.

Der radiative Anteil breitet sich in Form einer Wellenstrahlung vom Brandort nach allen Seiten gleichmäßig aus, der konvektive Anteil wird – entsprechende Abzugsmöglichkeiten vorausgesetzt – in vertikaler Richtung abgeführt. Eine Brandausbreitung in horizontaler Richtung erfolgt somit in diesen Fällen nur durch den radiativen Anteil. Dieser radiative Wärmestrom ist als Summe der Energie über alle Wellenlängen der Strahlung eines Körpers definiert. Er wächst mit der Temperatur sehr schnell, wie das Stefan-Boltzmannsche Gesetz ausdrückt:

$$\varphi_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

mit

φ_r = von einem Strahler ausgesandter radiativer Wärmestrom (W/cm²)

ε = Emissionszahl = 1 (/)

σ = Stefan-Boltzmann Konstante
5,67 · 10⁻¹² (W/cm² K⁴)

T_1 = absolute Temperatur des Strahlers (K)

T_2 = absolute Temperatur der bestrahlten Fläche (K)

Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz ist die Grundlage zur Berechnung der in der Technik auftretenden Strahlung der festen und flüssigen Körper. Er gilt streng nur für vollkommen schwarze Flächen, denn nur diese strahlen das Höchstmaß des Wärmestromes aus. Für andere Strahlungsquellen ist daher eine Abminderung durch die Emissionszahl ε einzuführen.

Die Ermittlung der Emissionszahl für Flammen ist besonders problematisch, da die Emission des von den Flammen ausgehenden Wärmestromes zum einen auf der Strahlung der Verbrennungsgase, zum anderen auf dem Leuchten der Flamme selbst beruht. Dazu ist festzustellen, daß die Strahlung leuchtender Flammen um ein Vielfaches stärker ist, als die von ihrem Kohlendioxid- oder Wasserdampfgehalt herrührende Gasstrahlung. Das kommt daher, daß in solchen Flammen kleinste Teilchen festen Kohlenstoffes glühend schweben und eine beträchtliche Wärmestrahlung aussenden. Die beim Verbrennungsvorgang abgeschiedenen, sehr feinen

Rußteilchen nehmen Wärme aus der sie umgebenden heißen Gasatmosphäre auf und strahlen sie über ein breites Spektrum aller Wellenlängen, d.h. auch im sichtbaren Bereich, an die Umgebung ab. Die Strahlung eines Rußteilchens beträgt nur 5% eines gleichgroßen vollkommen schwarzen Teilchens. Bei der Vielzahl von vorhandenen Teilchen wird sich jedoch die Strahlung der einzelnen hintereinander stehenden Rußteilchen summieren [2].

Die Vorhersage der Zahl der Rußteilchen ist sehr schwierig, da diese nicht nur von

der Art des brennbaren Materials, sondern auch vom Verlauf der Verbrennung abhängt. Im allgemeinen bleibt für eine exakte Bestimmung nur die Untersuchung im Einzelfall.

Messungen ergaben, daß man Flammen als schwarzen Körper ansehen kann, wenn man die Emissionszahl ε mit 0,6–1,0 einführt [3].

Im Hinblick auf die maximale Verbrennungstemperatur bei Bränden unter Freiraumbedingungen werden in der Tabelle 1 folgende Werte angegeben [4]:

Tabelle 1. Temperaturen beim Brennen verschiedener Materialien und sich daraus ergebende rechnerische radiative Wärmestromdichten.

Material	Lagerungsdichte (kg/m ²)	höchste Temperatur des Brandes T ₁ (K)	radiative Wärmestromdichte (W/cm ²)		
			$\varepsilon = 1,0$	$\varepsilon = 0,8$	$\varepsilon = 0,6$
lockere Baumwolle	50	580	0,6	0,5	0,4
lockeres Papier	25	640	1,0	0,8	0,6
Kiefernholz	100	1 270	14,8	11,8	8,9
Plexiglas	25	1 380	20,6	16,5	12,3
Steinkohle/Briketts	–	1 470	26,5	21,2	15,9
Polystyrol	25	1 370	20,0	16,0	12,0
Polystyrol	50	1 620	39,0	31,2	23,4

Wegen der großen Unsicherheiten der Annahmen im Hinblick auf die Emissionszahl ε wurde versucht, Werte für den von einem Brandort ausgehenden radiativen Anteil des Wärmestromes direkt aus experimentellen Untersuchungen zu entnehmen. Bei japanischen Versuchen [5] wurde an einem brennenden Holzgebäude zum Zeitpunkt der maximalen Brandentwicklung ein radiativer Wärmestrom

$$\varphi_r = 13 \text{ (W/cm}^2\text{)}$$

gemessen.

1.2 Brände in Räumen

1.2.1 Versuchsergebnisse

Bei Bränden in Räumen mit Öffnungen ins Freie kann diese Öffnung als Ausgangspunkt des radiativen Anteils des Wärmestromes angesehen werden. Da der Brandverlauf im wesentlichen von der Ventilationsöffnung bestimmt wird, lassen sich die im vorangegangenen

Abschnitt ermittelten Werte nicht auf Brände in Räumen übertragen. Für letzteren Fall kann jedoch auf Modellversuche zurückgegriffen werden [6], die zur Ermittlung von Temperaturverläufen und Abbrandraten in Räumen durchgeführt wurden, bei denen aber auch der radiativ freigesetzte Wärmestrom erfaßt wurde.

Die Brandräume hatten folgende Abmessungen:

Breite	Tiefe	Höhe
1 m	1 m	0,5 m
1 m	2 m	1 m
2 m	1 m	1 m
2 m	2 m	1 m
3 m	1,5 m	1,5 m
6 m	6 m	1,5 m

Die Modelle waren lediglich an einer ihrer Stirnseiten geöffnet und gestatteten daher nur dort den Zutritt von Umgebungsluft.

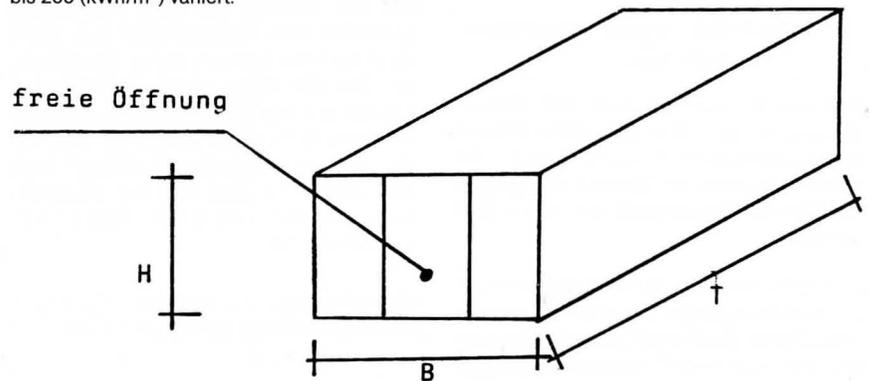
Neben den Modellraumabmessungen wurde auch die Fläche der Öffnung an der Frontseite variiert. Folgende Öffnungsflächenanteile wurden untersucht:

- 25%
- 50%
- 100%

(Siehe Abbildung 1)

Abb. 1. Modellabmessungen.

Die Brandlast selbst wurde von 20 (kg/m²) bis 40 (kg/m²) Holz, entsprechend H_u ~ 100 (kWh/m²) bis 200 (kWh/m²) variiert.



Die Meßwerte des radiativen Wärmestromes sind bei der Auswertung auf die Ebene der Öffnung umgerechnet worden, so daß die Werte für alle Versuche vergleichbar sind.

Maximalwerte für die radiative Wärmestromdichte ergaben sich während des Brandes in dem Zeitraum, in dem sich die Restbrandlast von 80 % auf 30 % verminderte. Daher sind für die Wärmestromdichte pro Flächeneinheit die Bezeichnungen $\varphi_{a, 80/30}$ bzw. für den gesamten von einer Öffnung ausgehenden Wärmestrom die Bezeichnung $\Phi_{a, 80/30}$ eingeführt worden. Über diesen Zeitraum wurde die Wärmestromdichte gemittelt, da kurzfristige Spitzenwerte für die hier zu untersuchenden Fälle nicht ausreichen, um eine Gefährdung zu verursachen. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 2 dargestellt, wobei die Relevanz der Meßwerte anhand der Emissionszahl ε festgestellt werden kann. Die Emissionszahl ergibt sich als Ergebnis eines Vergleiches zwischen der aus der Temperatur errechneten und der tatsächlich festgestellten Wärmestromdichte. Bei stimmigen Meßwerten muß ihr Wert zwischen 0,6 und 1 liegen [3].

(Siehe Tabelle 2)

Tabelle 2. Zusammenstellung von in Brandräumen ermittelten Meßwerten [6] in Abhängigkeit von Brandraumabmessungen, Brandlast und Öffnungsflächenprozentanteilen.

Versuchsserie B x T x H (m x m x m)	Brandlast (kWh/m ²)	Fensterflächenanteil (%) (m ²)	maximal festgest. Strahlungsdichte vor der Öffnung $\varphi_{a, 80/30}$ (W/cm ²)	dazugehörige Decken-Temperatur $\theta_{80/30}$ (K)	Emissionszahl ε (/)
1 x 1 x 0,5	100	25 (0,125)	9,9	932	0,4
		50 (0,25)	9,5	1006	0,6
		100 (0,5)	7,6	1135	1,2
1 x 2 x 1	100	25 (0,25)	12,3	1140	0,8
		50 (0,5)	12,7	1214	0,9
		100 (1,0)	10,0	1220	1,3
	200	25 (0,25)	12,7	1115	0,7
		50 (0,5)	13,0	1244	1,0
		100 (1,0)	8,7	1242	1,6
2 x 1 x 1	100	25 (0,5)	30,9	1306	0,5
		50 (1,0)	12,3	1143	0,8
		100 (2,0)	12,1	1238	~ 1
	200	25 (0,5)	32,0	1120	0,3
		50 (1,0)	18,4	1318	0,9
		100 (2,0)	13,9	1075	0,6
2 x 2 x 1	100	25 (0,5)	15,9	1221	0,8
		50 (1,0)	16,2	1295	1,0
		100 (2,0)	12,1	1036	0,5
	200	25 (0,5)	15,3	1181	0,7
		50 (1,0)	14,5	1223	0,9
		100 (2,0)	10,2	1266	1,4
3 x 1,5 x 1,5	100	25 (1,1)	22,0	1350	0,9
		50	-	-	-
		100 (4,5)	12,4	1178	0,9
	200	25 (1,1)	24,2	1179	0,5
		50	-	-	-
		100 (4,5)	13,9	1227	0,9
6 x 6 x 1,5	100	25 (2,25)	15,4	1098	0,5
		50 (4,5)	15,4	1144	0,6
		100 (9,0)	12,9	1191	0,9
	200	25 (2,25)	22,0	1192	0,5
		50 (4,5)	17,6	1260	0,8
		100 (9,0)	17,2	1320	1,0

Tabelle 2. Zusammenstellung von in Brandräumen ermittelten Meßwerten [6] in Abhängigkeit von Brandraumabmessungen, Brandlast und Öffnungsflächenprozentanteilen.

In der Übertragbarkeit dieser Versuchsergebnisse auf reale Brände können insofern Zweifel entstehen, als die Einrichtung von Räumen meist einen Kunststoffanteil von 10 bis 20 Gewichtsprozenten enthält und sich damit das Abbrandverhalten gegenüber einer reinen Holzbrandlast verändert.

Dazu wird in [7] festgestellt, daß von der brennenden Oberfläche der Kunststoffe beachtliche Wärmeströme freigesetzt werden, durch die auch die Pyrolyse von zellulosehaltigen Brandlasten beschleunigt wird. Durch die hohe Abbrandrate der Kunststoffe verlieren sich diese jedoch sehr schnell im Brandraum, was zu dem

Schluß führt, daß ein geringer Anteil an Kunststoffen den Brandvorgang insgesamt nicht wesentlich beeinflusst.

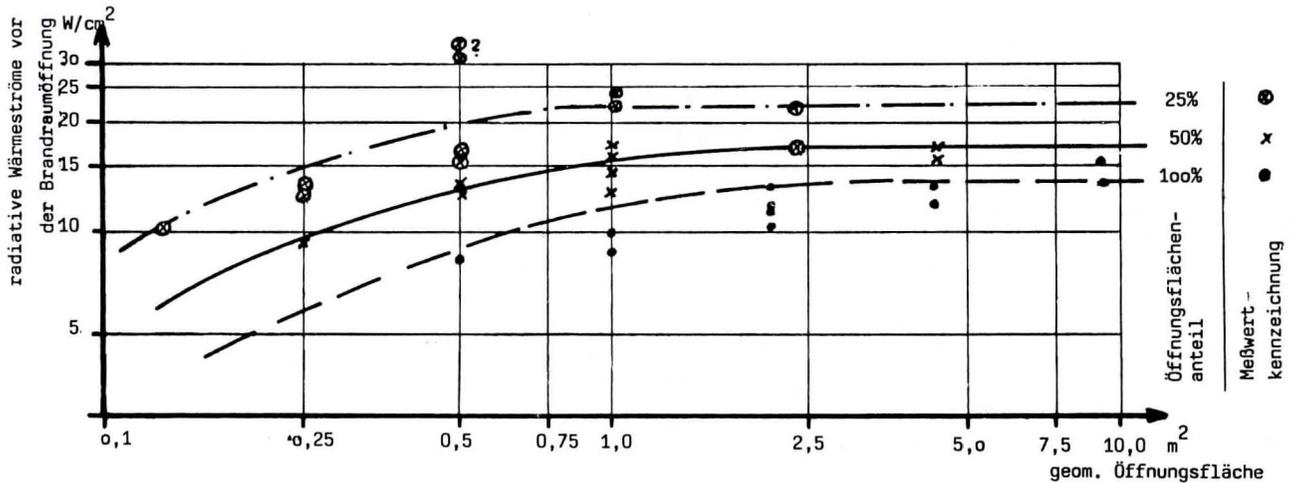
1.2.2 Auswertung der Versuche

Die Versuche ergaben, daß die Ventilationsöffnung von entscheidender Bedeutung für die Vorgänge im Brandraum ist. Eine kleinere Ventilationsöffnung beschleunigt die Brandausbreitung im Raum. Da ein Wärmeaustritt im wesentlichen nur durch die Ventilationsöffnung erfolgen kann, verbleibt bei kleineren Öffnungen eine größere Wärmemenge im Brandraum als im Fall der großen Öff-

nung. Damit ergeben sich bei kleineren Öffnungen höhere Temperaturen, was direkte Auswirkungen auf den von der Öffnung ausgehenden radiativen Anteil des Wärmestromes hat [8].

In Abb. 2 wird die Abhängigkeit des von einem Flächenelement ΔA der Öffnungsfläche ausgehenden radiativen Anteils des Wärmestromes dargestellt. Dabei wird deutlich, daß die Höhe der Brandlast geringen Einfluß auf die Wärmestromdichte hat, da durch sie nur die Dauer des Brandes bestimmt wird. So konnten die Werte für Brandlasten mit H_u = 100 kWh/m² bis 200 kWh/m² zusammengefaßt werden.

Abb. 2. Einfluß des Öffnungsflächenanteils und der geometrischen Öffnungsfläche auf die von einem Flächenelement der Fläche ΔA der Öffnung ausgehenden radiativen Wärmestromdichten.



Da auch der absolute Betrag der Öffnungsfläche von untergeordneter Bedeutung ist, muß lediglich der prozentuale Anteil dieser Fläche an der gesamten Frontseite des Brandraumes (Öffnungsflächenanteil) bei der Feststellung

der radiativen Wärmestromdichte pro Flächenelement betrachtet werden.

Aufgrund der sich bereits bei kleinen Öffnungen einstellenden Sättigungswerte der radiativen Wärmestromdichte lassen

sich die Ergebnisse der Modellversuche auch auf Flächenelemente von Öffnungen größerer Brandräume übertragen.

Es können folgende Werte zur weiteren Berechnung angenommen werden:

Öffnungsflächenanteil (%)	radiative Wärmestromdichte ϕ_a (W/cm^2)
25	25
50	20
100	15

Betrachtet man die gesamte Öffnung als flächenförmigen Strahler, muß jedoch der von dieser Fläche ausgehende radiative Gesamt-Wärmestrom beim Übergang zur größeren Fläche zunehmen, da damit auch eine Vergrößerung der strahlenden

Fläche verbunden ist. Diese Vergrößerung erfolgt unter der Annahme, daß der Öffnungsflächenanteil erhalten bleibt. Der hier untersuchte, von einem Brandraum ausgehende radiative Anteil des Wärmestromes breitet sich im Luftraum

entsprechend einer noch zu untersuchenden Abstandsgesetzmäßigkeit aus und bildet damit eine wesentliche Gefahr für die Nutzungseinheiten gegenüberliegend angeordneter Gebäude.

2. Ausbreitung des radiativen Wärmestromes

Die Luft ist ebenso wie Edelgase praktisch vollkommen durchlässig für Wärmestrahlung (diatherm), so daß die Strahlung unabhängig von der Schichtdicke der Luft nicht reduziert wird. Für das Abstandsverhalten des Wärmestromes sind daher nur geometrische Beziehungen zu berücksichtigen.

Da bei den hier durchzuführenden Untersuchungen die Fensteröffnung als flächenhafter Strahler anzusehen ist, ist das bekannte quadratische Abstandsgesetz, welches nur punktförmigen Strahlungsquellen gilt, nicht anwendbar. Aus diesem Grund wird in den Literaturstellen [9, 10] eine andere Abstandsmäßigkeit abgeleitet. Die dabei gültigen geometrischen Beziehungen sind in Abbildung 3 dargestellt.

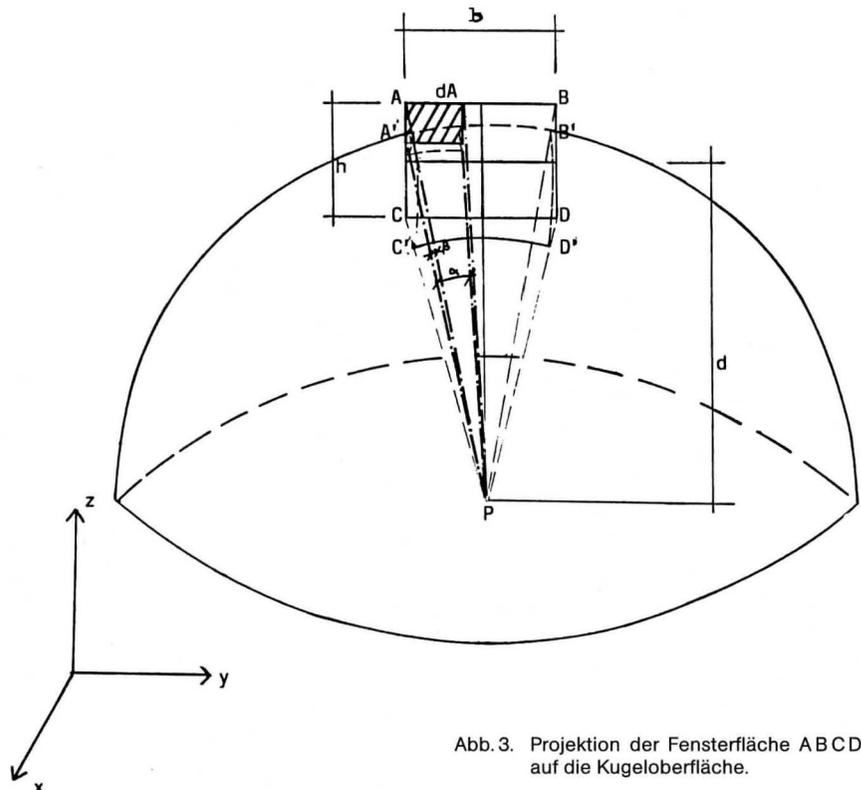


Abb. 3. Projektion der Fensterfläche $ABCD$ auf die Kugeloberfläche.

Ausgangspunkt dieser Überlegungen ist, daß die Strahlung von einer Halbkugel ausgeht und auf den Mittelpunkt der Grundfläche gerichtet ist, d. h. auf einen Punkt, von dem aus sämtliche Teile der Oberfläche gleich weit entfernt sind. So ist die Schichtdicke von jedem Punkt der Halbkugeloberfläche als konstant gegeben.

Von der Fensteröffnung mit ABCD geht die Strahlung aus. Diese Fläche hat jedoch nur einen gemeinsamen Punkt mit der Halbkugeloberfläche. Um die von der Fläche ausgehende Strahlung in das Halbkugelmodell einzuführen, wird sie auf die gekrümmte Oberfläche der Halbkugel projiziert. Es entsteht die neue Fläche mit A' B' C' D'.

Das Verhältnis dieser projizierten Fläche zur gesamten Oberfläche der Halbkugel gibt gleichzeitig an, wieviel von der ursprünglichen Strahlung φ_a am Ziel P eintrifft. Eine Vergrößerung der Fensterfläche führt zu einer Vergrößerung der projizierten Fläche, von der wiederum ein vergrößerter Kugelabschnitt abgedeckt wird. Von dort geht dann eine erhöhte zum Punkt P gerichtete Gesamtstrahlung φ_a aus.

Es kann ein Verhältnis ν' definiert werden, welches eine geometrische Beziehung zwischen der strahlenden Fläche und deren Abstand d zu einem bestrahlten Punkt P im Zentrum der Halbkugel darstellt. Entsprechend dieses Faktors ν' vermindert sich die von der Fläche ABCD den Punkt P erreichende Strahlung wie folgt:

$$\varphi_p = \nu' \varphi_a$$

mit

φ_p = Strahlungsdichte im Abstand d

φ_a = Strahlungsdichte in der Ebene der Öffnung

ν' = geometrische Beziehung aus Öffnungsfläche und Abstand

Der Faktor ν' ist dimensionslos und läßt sich aus den geometrischen Beziehungen wie folgt ableiten:

An einem differentiell kleinen Flächenabschnitt gilt [10]:

$$d\nu' = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{r^2} \cos \alpha \cos \beta dA$$

bei kleinerem d A gilt:

$$\cos \alpha \cong \cos \beta \cong \frac{d}{r}$$

daraus folgt:

$$d\nu' = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{r^2} \left(\frac{d^2}{r^2} \right) dA$$

mit

$$r^2 = x^2 + y^2 + d^2$$

$$d\nu' = 4 \frac{d^2}{\pi} \int_0^{\frac{b}{2}} \int_0^{\frac{h}{2}} \frac{dx dy}{(x^2 + y^2 + d^2)^2}$$

die Integration ergibt:

$$\nu' = \frac{2}{\pi} \left[\frac{h}{\sqrt{h^2 + 4d^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{h^2 + 4d^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4d^2}} \arctg \frac{h}{\sqrt{b^2 + 4d^2}} \right]$$

Die Auswertung des Lösungssatzes ergibt folgende, in der Tabelle 3 festgehaltenen Werte [9]:

Tabelle 3. Geometrische Verhältniswerte ν' zur Abminderung der Strahlungsdichte in Abhängigkeit von der Öffnungsweite b, der Öffnungshöhe h und des Abstandes d.

d/h \ b/h	1	2	4	8	16	∞
0.25	0.83	0.89				0.90
0.50	0.47	0.66				0.70
0.75	0.34	0.49				0.56
1.00	0.24	0.36	0.42			0.47
1.50	0.12	0.21	0.28			0.32
2.00	0.073	0.13	0.20	0.22		0.24
2.50	0.049	0.090	0.14	0.18		0.20
3.00	0.034	0.058	0.11	0.15		0.16
3.50	0.025	0.048	0.085	0.12		0.14
4.00	0.020	0.038	0.069	0.10		0.12
4.50	0.016	0.030	0.059	0.087	0.10	0.11
5.00	0.012	0.025	0.046	0.072	0.092	0.10
6.00	0.0088	0.017	0.032	0.055	0.074	0.083
7.00	0.0064	0.013	0.025	0.043	0.062	0.071
8.00	0.0050	0.0098	0.019	0.034	0.051	0.062
9.00	0.0039	0.0074	0.015	0.028	0.043	0.056
10.00	0.0032	0.0063	0.012	0.023	0.037	0.050
11.00	0.0027	0.0052	0.010	0.019	0.032	0.045
12.00		0.0044	0.0088	0.016	0.028	0.042
13.00	0.0023	0.0037	0.0075	0.014	0.024	0.038
14.00		0.0032	0.0064	0.012	0.022	0.036
15.00		0.0028	0.0056	0.011	0.019	0.033

Der obige Lösungsansatz ist nur dann streng gültig, wenn es sich um eine einzige strahlende Öffnung pro Brandraum handelt, da sich sonst Strahlungsanteile verschiedener Öffnungen überlagern. Diese Annahme trifft jedoch nicht immer zu, da Brandräume mehrere Öffnungen haben können. Aus Gründen der Vereinfachung werden alle Öffnungen zu einer gesamten imaginären Fläche zusammengefaßt und die durch Fassadenanteile zurückgehaltene Strahlung anteilig berücksichtigt.

Daraus ergibt sich folgende Beziehung am Ort der Strahlung:

$$\varphi_a = \varphi'_a \cdot \frac{P}{100}$$

mit

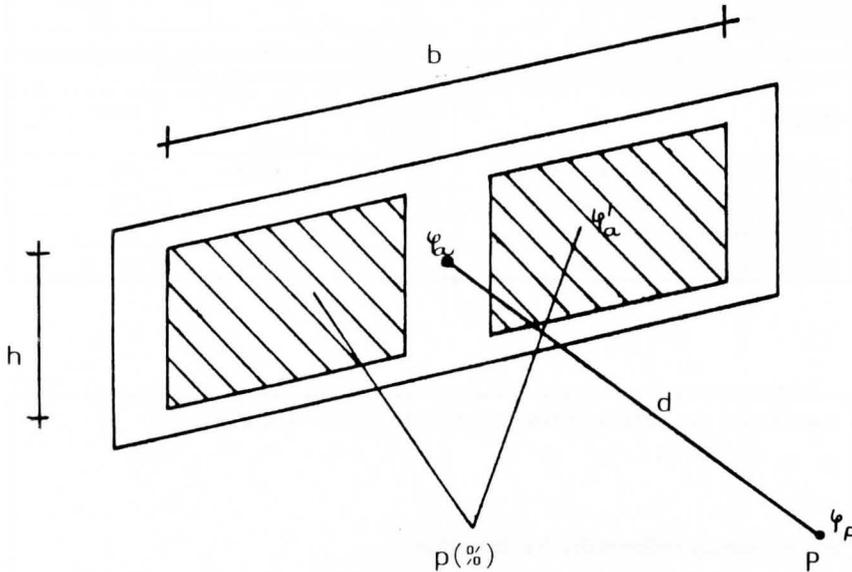
P = prozentualer Anteil der Fensterfläche an der Gesamtfläche $b \times h$

φ'_a = von den realen Öffnungen ausgehender Wärmestrom

φ_a = von der imaginären Öffnung ausgehender Wärmestrom (zur Berücksichtigung im Rechenverfahren)

Unter Berücksichtigung der geometrischen Beziehung ergibt sich für den Sonderfall der eng zusammenliegenden Öffnungen eines Brandraumes für die Strahlungsdichte im Punkt P folgende Beziehung (siehe Skizze):

$$\varphi_P = \nu' \cdot \frac{P}{100} \cdot \varphi'_a$$



3. Wirkung des radiativen Wärmestrahls auf brennbare Materialien

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten Aussagen über die von einem Brand ausgehende Wärmestromdichte gemacht und eine Abstandsgesetzmäßigkeit dargelegt wurde, gilt es nun, Grenzwerte für zulässige Wärmestromdichten festzulegen, bei denen eine Zündung brennbarer Stoffe (mobile bzw. immobile Brandlasten) nicht mehr möglich ist. So können die erforderlichen Abstände dieser Materialien zu einem möglichen Brandentstehungsort festgelegt werden.

Werden brennbare Materialien erhitzt, wird das Material thermisch aufbereitet, d. h., es beginnt zu pyrolysieren. Nach Ablauf einer hinreichenden Zeit ist das Material zündbereit, und es kann zum Beispiel durch Flugfeuer oder durch eine

untergeordnete Zündquelle gezündet werden. Man spricht in diesem Fall von Fremdzündung.

Dauert die thermische Aufbereitung an, ohne daß eine Fremdzündung stattfindet, bilden sich so viele brennbare Gase, daß es spontan zur Selbstzündung ohne Zündquelle kommt.

Der gesamte gerade beschriebene Vorgang ist zeitabhängig, d. h., eine langsame Erhitzung des Materials auf einer niedrigen Temperaturstufe kann nach entsprechend längerer Zeit ebenso zur Zündung führen wie eine schnellere Erhitzung auf einem höheren Temperaturniveau.

Beim Vergleich von Temperatur und Strahlungsdaten verschiedener Literaturstellen ist somit der Zeitfaktor von wesentlicher Bedeutung.

Die Auswahl der Daten für kritische Bestrahlungsstärken – zusammengefaßt in Tabelle 4 – erfolgt unter folgenden Gesichtspunkten:

- Eine Zündung brennbaren Materials durch Flugfeuer oder andere Zündquellen kann nicht ausgeschlossen werden, maßgebend ist somit die Wärmestromdichte für Fremdzündung. Zum Vergleich wird der Wert für Selbstzündung soweit möglich mitangegeben.
- Die Dauer der Bestrahlung der brennbaren Materialien wird mit 15 Minuten festgesetzt. Diese Zeit ergibt sich aus der Betrachtung der Gesamtzeit von der Entstehung des Brandes bis zu einem ersten Löscherfolg der Feuerwehr.

Sie wird in der folgenden Tabelle 4 aufgeschlüsselt:

Tabelle 4. Gegenüberstellung von Einsatzablauf und Brandverlauf.

Einsatzablauf [11]		Brandverlauf [12]	
Entdeckungszeit	15 Minuten	20 Minuten	Entstehungszeit bis zur Durchzündung
Meldezeit	2 Minuten		
Alarmierungszeit	1 Minute		
Ausrücke- und Anmarschzeit	6 Minuten	15 Minuten	Bestrahlungszeit während der Vollbrandphase
Erkundungszeit	1 Minute		
Entwicklungszeit	2 Minuten		
Eingrenzungszeit	10 Minuten		
	37 Minuten	35 Minuten	

Dem Einsatzablauf ist der Brandverlauf gegenübergestellt. Danach erfolgt nach rund 20 Minuten ab Brandbeginn die Durchzündung und in der anschließenden Vollbrandphase ist mit einer intensiven Bestrahlung der brennbaren Stoffe zu rechnen. Die Bestrahlung dauert rund 15 Minuten und wird durch den Lösch-erfolg der Feuerwehr abgebrochen.

Für die kritischen Bestrahlungsstärken werden folgende Angaben gemacht:

TABELLE 5

Baustoff Bauteil	Fremdentzündung, max. zul. Wärmestromdichte φ_r (W/cm ²)	Selbstentzündung, max. zul. Wärmestromdichte φ_r (W/cm ²)	Zeit t (min)	Quelle
ungestrichene Holzfaserverplatte	1,1	2,4	~ 15 Min.	[9]
ofentrockenes ungestrichenes dunkles Holz	1,3	3,2	~ 15 Min.	[9]
mit dunkler Lackfarbe gestrichenes Holz	0,2–2,0	–	~ 15 Min.	[9]
Papier	0,85	–	–	[13]
Kunstfaser oder Baumwollvorhänge	0,8	2,0	~ 15 Min.	[9]
Schaumstoffe z. B. flammwidrig ausgerüst. Styropor	0,34	–	?	[14]

Für die kritische Bestrahlungsstärke, bei der eine Zerstörung von Glas erfolgt, können bei einer Rahmenabdeckung des Glases ≤ 10 mm folgende Angaben gemacht werden:

Baustoff Bauteil	Wärmestromdichte φ_r (W/cm ²)	Zeit t (min)	Quelle
Einfach-Verglasung (Float- und Drahtglas)	0,5	> 10 Min.	[15]
Einfach-Verglasung (Sicherheitsglas)	2,1	> 10 Min.	[15]
Doppel-Verglasung (Float- oder Drahtglas)	0,3	> 10 Min.	[15]
Doppel-Verglasung (Sicherheitsglas)	1,4	> 10 Min.	[15]

Anmerkung:

Erläuterung zur Berechnung der maximal zulässigen Strahlungsdichte für Verglasungen

In [15] werden die Vorgänge erläutert, welche zur Zerstörung von Verglasungen unter Temperaturbeanspruchung führen. In der Aufheizphase wird zunächst die Mitte der Glasscheibe schneller erhitzt als der abgedeckte Scheibenrand. Wird die zulässige Temperaturdifferenz – bei Float- und Drahtglas 60 K, bei Sicherheitsglas 180 K – erreicht, werden die zulässigen Spannungen überschritten und es kommt zum Bruch. Aus dort angeführten Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, daß sich während der Aufheizphase bei einer Temperatur in der Mitte der Scheibe von ca. 440 K eine Temperaturdifferenz von 60 K zum abgedeckten Rahmenbereich einstellt. Bei einer Scheibentemperatur von 640 K wird eine Temperaturdifferenz von 180 K ausgewiesen. Diese Differenz tritt bei einer Rahmenabdeckung von < 10 mm auf.

Die zulässige Wärmestromdichte für eine Verglasung wird (siehe rechts) wie folgt bestimmt:

Berechnung der zulässigen Strahlungsdichte für eine Verglasung:

$$\varphi_r = \frac{1}{\alpha} \cdot \sigma \cdot T^4$$

mit

φ_r = zulässige Wärmestromdichte (W/cm²)

α = anteilige Strahlungsaufnahme der Verglasung an der Gesamtstrahlungsdichte [9]
 0,45 für Einfach-Verglasung
 0,70 für Doppelverglasung

σ = Stefan-Boltzmannsche Konstante
 $5,67 \cdot 10^{-12}$ (W/cm² K⁴)

T = max. zul. Temperatur in Scheibenmitte vor dem Bruch (K)

Damit ergeben sich folgende Werte:

		T (K)	α (/)	φ_r (W/cm ²)
Float- und Drahtglas	einfach	440	0,45	0,5
	doppelt	440	0,70	0,3
Sicherheitsglas	einfach	640	0,45	2,1
	doppelt	640	0,70	1,4

4. Ergebnis von Abstandsbetrachtungen

Die Angaben der Tabelle 5 Teil 1 über kritische Bestrahlungsstärken gehen davon aus, daß im Brandfall die von der brennenden Nutzungseinheit ausgehende Strahlung sich entsprechend der festgelegten Abstandsgesetzmäßigkeit ausbreitet und die Verglasung der gegenüberliegenden Nutzungseinheiten zerstört. Sie trifft dann in voller Intensität auf die brennbaren Materialien. Besonders gefährdet sind dabei die direkt an der Öffnung befindlichen Kunst-

faser- oder Baumwollvorhänge. Somit muß die für Fremdentzündung maximal zulässige Wärmestromdichte von 0,8 (W/cm²) als Grenzwert angesehen werden.

Besondere Bedeutung kommt jedoch auch den zulässigen Wärmestromdichten für Verglasungen zu. Wenn der Abstand zwischen brennender Nutzungseinheit und der benachbarten Einheit so gewählt wird, daß die Verglasung nicht zerstört wird, ergeben sich zwei Vorteile:

- der Brandrauch dringt nicht in die gegenüberliegende Nutzungseinheit ein
- die Verglasung absorbiert 45% (bei Einfachverglasung) bzw. 70% (bei Doppelverglasung) [9] der Wärmestromdichte und reduziert damit die Einstrahlung auf das brennbare Material in der Nutzungseinheit in beachtlichem Umfang. Als Grenzwert wird hier eine Wärmestromdichte von 0,5 (W/cm²) angenommen, da dann mit der Zerstörung von Einfach-Verglasung aus Draht- oder Floatglas gerechnet werden muß.

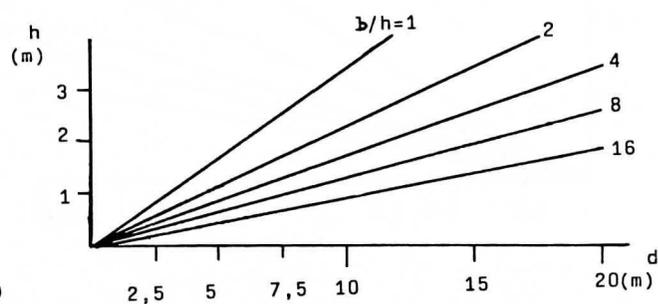
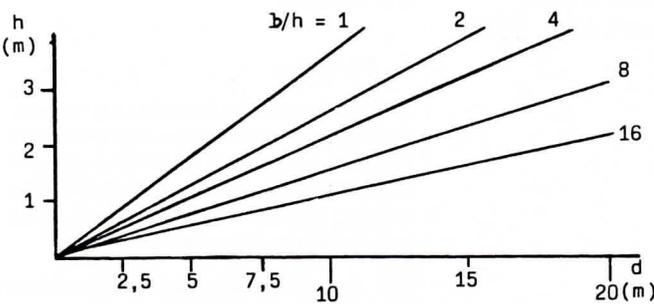
In eine Auswertung ist neben der zulässigen radiativen Strahlungsdichte weiterhin der Öffnungsflächenanteil an der gesamten Fassadenfläche des Brandraumes mit einzubeziehen, da dadurch die von der Öffnungsfläche ausgehende Wärmestromdichte bestimmt wird. Weiterhin sind die geo-

metrischen Randbedingungen, Breite der Öffnung b sowie Höhe der Öffnung h zu berücksichtigen. Aus diesen Überlegungen ergeben sich die Abb. 4, 5, 6, aus denen der Mindestfassadenabstand in Abhängigkeit von den eben erläuterten Randbedingungen abgelesen werden kann.

Für alle anderen Fälle, insbesondere auch für Brände unter Freiraumbedingungen, bei denen zusätzlich die Fläche der maximalen Brandausbreitung festzulegen ist [vgl. 4], wird eine gesonderte Berechnung mit dem unter Punkt 2 dargestellten rechnerischen Verfahren erforderlich.

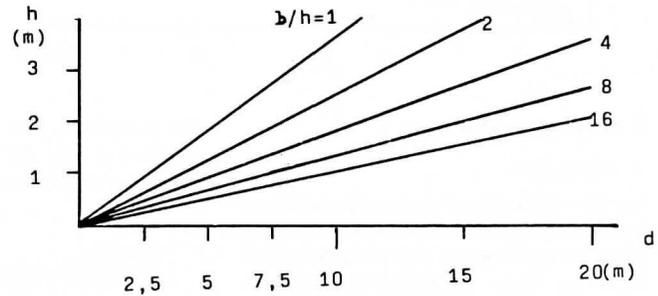
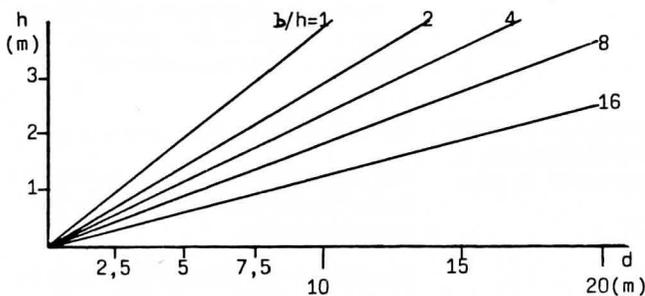
Abb. 4. Erforderlicher Abstand d zwischen strahlender und bestrahlter Fläche, Kriterium: Fremdzündung von Holz $\varphi_r = 1,0$ (W/cm²).

Abb. 5. Erforderlicher Abstand d zwischen strahlender und bestrahlter Fläche, Kriterium: Fremdzündung von Kunstfaser oder Baumwollvorhängen $\varphi_r = 0,8$ (W/cm²).



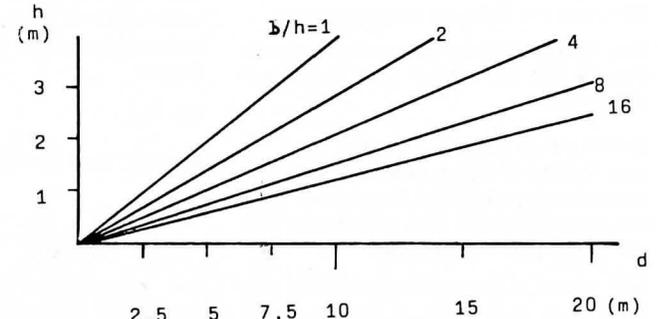
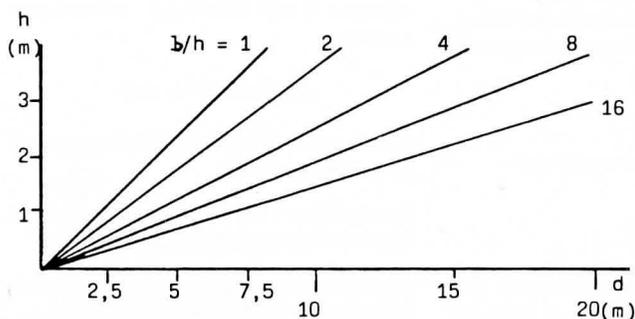
Öffnungsflächenanteil 25 %

Öffnungsflächenanteil 25 %



Öffnungsflächenanteil 50 %

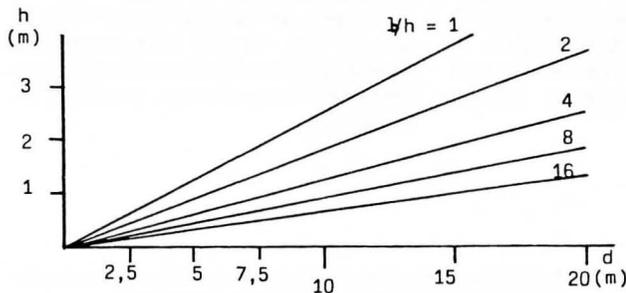
Öffnungsflächenanteil 50 %



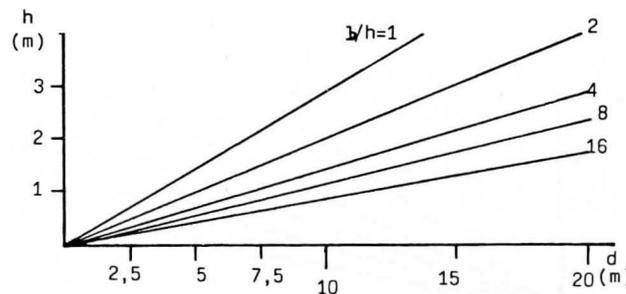
Öffnungsflächenanteil 100 %

Öffnungsflächenanteil 100 %

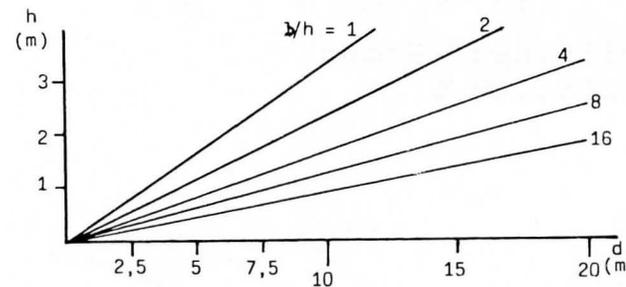
Abb. 6. Erforderlicher Abstand d zwischen strahlender und bestrahlter Fläche, Kriterium: Zerstörung von Einfachverglasung $\varphi_r = 0,5 \text{ (W/cm}^2\text{)}$.



Öffnungsflächenanteil 25%



Öffnungsflächenanteil 50%



Öffnungsflächenanteil 100%

5. Berechnungsbeispiel

1. Aufgabe

Der Mindestabstand zweier sich an einem Innenhof gegenüberliegender Öffnungen ist so zu bestimmen, daß es im Brandfall nicht zu einer Brandübertragung zwischen den Öffnungen durch den radiativen Wärmestrom kommt.

Die Fensteröffnung des Brandraumes hat die Abmessungen: Breite $b = 3,0 \text{ m}$, Höhe $h = 1,5 \text{ m}$. Von der zum Innenhof gerichteten Fläche des Brandraumes werden 50% von der Öffnung eingenommen.

Das dem Brandraum gegenüberliegende Fenster hat Kunstfaser- oder Baumwollvorhänge.

Expliziter Rechengang:

Aus Tabelle 5 ergibt sich eine kritische Bestrahlungsstärke für Kunstfaser oder Baumwollvorhänge $\varphi_r = 0,8 \text{ (W/cm}^2\text{)}$ für die Dauer von ~ 15 Minuten.

Bei einem Öffnungsflächenanteil von 50% muß nach Abb. 2 eine radiative Wärmestromdichte $\varphi_a = 20 \text{ (W/cm}^2\text{)}$ vor der Brandraumöffnung angesetzt werden.

Zur Ermittlung der Strahlungsdichte im Abstand d wird die Strahlungsdichte φ_a mit dem Faktor v' abgemindert. Es gilt:

$$\begin{aligned} \varphi_r &= v' \cdot \varphi_a \\ v' &= \varphi_r / \varphi_a \\ &= 0,8 / 20 = 0,04 \text{ (/)} \end{aligned}$$

Das geometrische Verhältnis der Brandraumöffnung wird bestimmt

$$b/h = 3,0 / 1,5 = 2$$

Aus Tabelle 3 wird mit dem Verhältnis $b/h = 2$ die Beziehung zwischen dem erforderlichen Abstand d und der Höhe h bei vorgegebenem Faktor v' entnommen. Es gilt:

$$d/h \approx 4$$

Mit dem Wert $h = 1,5 \text{ m}$ ergibt sich

$$\begin{aligned} d &= 4 h \\ &= 4 \cdot 1,5 = 6 \text{ m} \end{aligned}$$

Der erforderliche Mindestabstand der Öffnungen ist somit mit $6,0 \text{ m}$ festzulegen, damit eine Zündung durch den radiativen Wärmestrom ausgeschlossen werden kann.

Vereinfachter Rechengang

Aus Tabelle 5 kann wiederum die kritische Bestrahlungsstärke $\varphi_r = 0,8 \text{ (W/cm}^2\text{)}$ entnommen werden.

Die Höhe h der Brandraumöffnung beträgt $1,5 \text{ m}$, die Breite $b = 3,0 \text{ m}$ und der Öffnungsflächenanteil 50%.

Das geometrische Verhältnis der Öffnung $b/h = 3,0 / 1,5 = 2$ wird bestimmt.

Damit kann aus Abb. 5 der erforderliche Abstand d der Öffnungen entnommen werden.

ABBILDUNG 7 zeigt,

der Mindestabstand der Öffnungen muß 6 m betragen.

2. Aufgabe

Der Mindestabstand zweier sich an einer Passage gegenüberliegender Schaufensteröffnungen ist so zu bestimmen, daß es im Brandfall nicht zu einer Brandübertragung zwischen den Öffnungen durch den radiativen Wärmestrom kommt.

Die Fensteröffnung des Brandraumes hat die Abmessungen: Breite $b = 8,0 \text{ m}$, Höhe $h = 2,0 \text{ m}$.

Das Schaufenster nimmt die gesamte Fläche des Brandraumes zur Passage hin ein, d. h., der Öffnungsflächenanteil beträgt 100%.

In dem dem Brandraum gegenüberliegenden Schaufenster befinden sich Kunstfaser- und Baumwollstoffe.

Vereinfachter Rechengang

Aus Tabelle 5 kann wiederum die kritische Bestrahlungsstärke $\varphi_r = 0,8 \text{ (W/cm}^2\text{)}$ entnommen werden.

Die Höhe h der Brandraumöffnung beträgt $2,0 \text{ m}$, die Breite $b = 8,0 \text{ m}$ und der Öffnungsflächenanteil 100%.

Das geometrische Verhältnis der Öffnung $b/h = 8,0 / 2,0 = 4$ wird bestimmt.

Damit kann aus Abb. 5 der erforderliche Abstand d der Öffnungen entnommen werden.

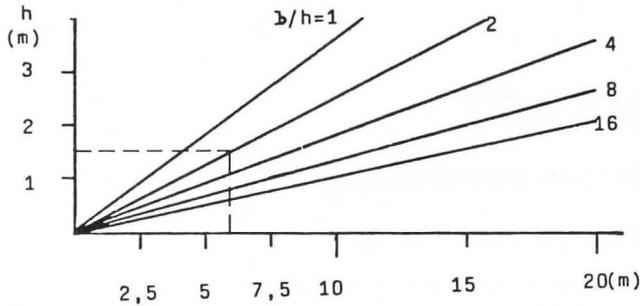
ABBILDUNG 8 zeigt,

der Mindestabstand der Öffnungen muß $9,5 \text{ m}$ betragen.

Damit werden die baurechtlich erforderlichen Mindestabstände überschritten.

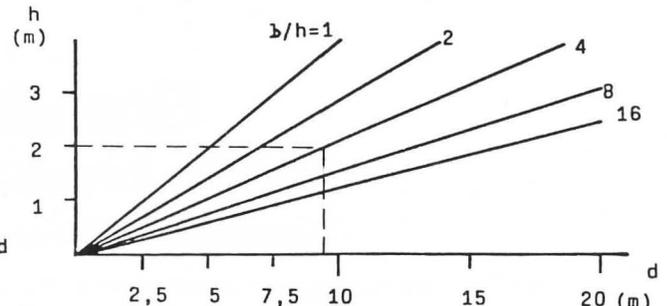
Auf ähnliche Art läßt sich selbstverständlich auch der Nachweis führen, ob ein vorhandener Gebäudeabstand ausreicht, um die Brandübertragung auszuschließen.

Abb. 7. Ablesebeispiel



Öffnungsflächen-
anteil 50%

Abb. 8. Ablesebeispiel



Öffnungsflächen-
anteil 100%

6. Zusammenfassung

Auf der Grundlage von Versuchen und eines mathematischen Modells wird der Zusammenhang zwischen dem zulässigen bzw. tatsächlichen Gebäudeabstand und der von dem Brand ausgehenden Wärmestrahlung entwickelt. Die dabei zugrunde gelegten Kriterien wie Öffnungsflächenanteil, geometrische Randbedingungen und Mindestzündenergie ermöglichen eine differenzierte Betrachtung.

Es wird deutlich, daß der baurechtlich vorgegebene Mindestabstand bei den im Wohnungsbau vorhandenen Öffnungen ausreicht, jedoch bei den oft in Bauten besonderer Art oder Nutzung (z. B. Passagen, überdeckten Innenbereichen) anzutreffenden großen Öffnungen mit einer horizontalen Brandausbreitung durch Wärmestrahlung zu rechnen ist. Hier könnte z. B. der Abstand nach den beschriebenen Verfahren vergrößert werden, wenn die Brandausbreitung ausgeschlossen werden soll.

Bild: Brandausbreitung über eine Passage



Literaturverzeichnis:

- [1] ARGE Bau: Musterbauordnung – MBO – vom 11. Dezember 1981
- [2] Schack, A.: Der industrielle Wärmeübergang, 6. Auflage, Düsseldorf 1962, S. 250
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, Hrsg.: VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 3. Auflage, Düsseldorf 1977, S. A 22
- [4] Iwannikow, W. P., Kljus, P. P., Masur, L. K.: Berechnung der Kräfte und Mittel der Feuerwehr für die Brandbekämpfung, in: Unser Brandschutz, Berlin 1972, wissenschaftlich technische Beilage, Heft 8, S. 114
- [5] Kin-ichiro-Fujita: Transactions Architectural Institute of Japan 4 (1941), zitiert nach: Yokoi, S.: Study on the prevention of fire-spread caused by hot upward currents, Japanese Ministry of Construction Building Research Institute Report No. 34, Tokyo 1960, S. 59
- [6] Thomas, P.H., Heselden, A. J.M.: Fully-developed fires in single compartments, a co-operative research programme of the conseil international du bâtiment, Fire Research Note 923, Borehamwood 1972
- [7] Harmathy, T.Z.: Effect of the Nature of Fuel on the Characteristics of Fully Developed Compartment Fires, in: Fire and Materials Vol. 3, No. 1, 1979, S. 58
- [8] Meyer-Ottens, C.: Baulicher Brandschutz-Brandrisiken im Bereich von Baustoffen und Bauteilen, in: vfdb Zeitschrift, Stuttgart 34 (1985), Nr. 3, S. 113
- [9] Nelson, H.E.: Radiant Energy Transfer in Fire Protection Engineering Problem Solving in: Fire Technology No. 3, Boston, Mass. 1968, S. 196
- [10] Virtala, V., Toivonen, U.: Baudichte und Brandsicherheit, in: vfdb-Zeitschrift, Stuttgart 3 (1954), Nr. 3, S. 127
- [11] vgl. Seidel, K.W.: Die Struktur einer Feuerwehr und ihre Abhängigkeit vom Baurecht, in: vfdb-Zeitschrift, Stuttgart 31 (1982) Nr. 3, S. 118
- [12] vgl. Ehlert, K.-P.: Bericht über Brandversuche in einem viergeschossigen Wohngebäude, Teil II, in: 5. Internationales Brandschutzseminar der VFDB in Karlsruhe 1976, Karlsruhe (1976), S. 92 ff
- [13] Schwarz, E.: Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr, 5. Auflage 1958, S. 52
- [14] Neufert, E.: Styropor Handbuch, Wiesbaden 1971, S. 101
- [15] vgl. Seidel, H., Kiefer, W.: Das Verhalten von Verglasungen im Normband (ETK) nach DIN 4102 und Verbesserungen des baulichen Brandschutzes durch Einsatz von Brandschutzverglasungen, in: vfdb-Zeitschrift, Stuttgart 26 (1977), Nr. 4, S. 107