Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 105 (1987)

Heft: 15

Artikel: Simulation von Modellbränden in Räumen: alternative Methode zur Beurteilung von Brandschutzmassnahmen

Autor: Bryl, Stanislaw / Frangi, Tullio / Schneider, Ulrich

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76562

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Simulation von Modellbränden in Räumen

Alternative Methode zur Beurteilung von Brandschutzmassnahmen

Von Stanislaw Bryl, Tullio Frangi, Winterthur, und Ulrich Schneider, Kassel

Nachrechnungen von Brandversuchen in Räumen belegen, dass mit Hilfe leistungsfähiger Computer Vorhersagen über den Temperaturverlauf im Falle eines Brandes in einem Raum möglich sind. Dies unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussgrössen wie Raumgrösse, Fenster-und Türöffnungen, Einsatz von Sprinklern usw.
Anwendung finden die dazu entwickelten Computerprogramme beispielsweise in der Normung (Erarbeitung von Grundlagen), in der Planung (Schaffung von Entscheidungshilfen für die Beurteilung und Optimierung von Brandschutzmassnahmen) und in der Konstruktion (realistische Bewertung des Brandwiderstandes und des Brandverhaltens von Bauteilen).

Einleitung

Die für die Bestimmung des Feuerwiderstandes von Bauteilen und Bauwerken benutzte Temperatur-Zeit-Kurve (auch Einheits-Temperatur-Kurve oder ISO-Normbrandkurve genannt) weicht im allgemeinen stark von den bei Gebäudebränden tatsächlich beobachteten Temperaturverläufen ab (Bild 1), weil wesentliche Grössen, die das Brandgeschehen beeinflussen, bei Anwendung der Normbrandkurve nicht berücksichtigt werden können.

Zu den wichtigsten Faktoren, die den Temperaturverlauf beeinflussen, gehören:

- Art, Menge und Lagerungsdichte des Brandgutes,
- Ventilationsverhältnisse des Brandabschnitts (Fenster, Türen usw.),
- Thermische Eigenschaften der Baumaterialien, der den Brandabschnitt abgrenzenden Flächen,
- Löschmassnahmen (Sprinkler, Feuerwehr).

Um eine bessere Annäherung an reale Verhältnisse zu erhalten, und um die Wirkung der verschiedenen baulichen Brandschutzmassnahmen richtig beurteilen zu können, wurden in Schweden, Deutschland und in den USA diverse Brand-Simulationsprogramme erarbeitet [1,2,3].

Auch in der Schweiz entstanden in den letzten drei Jahren in Zusammenarbeit mit schwedischen und deutschen Experten drei Rechenprogramme [4,5,6]. Die Nachrechnung von etlichen Brandversuchen zeigte, dass mit Hilfe dieser Programme auf der sicheren Seite liegende Temperatur-Zeit-Kurven berechnet werden können. Die Anwendung dieses Hilfsmittel auch zur rechnerischen Vorhersage der Temperaturverläufe in Gebäuden und deren Konstruktionsbauteilen liegt daher nahe. Das Ziel ist dabei, Brandschutzkonzepte nicht nur wirtschaftlicher, sondern auch effizienter zu gestalten.

Wissenschaftliche Grundlagen und Rechenmodelle

Energie- und Massenbilanz

Für die brandschutztechnische Beurteilung einer Konstruktion muss der zeitliche Verlauf der Raumtemperatur und der Temperaturen in den Konstruktionsteilen infolge eines Feuers bekannt sein. Die rechnerische Ermittlung dieser Temperatur-Zeit- Funktionen führt unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrössen auf ein komplexes Problem, das mit Hilfe der Methode der gekoppelten Energie- und Massenbilanz numerisch gelöst werden kann. Dieses Verfahren, durch *Kawagoe* (Japan) in den 50er Jahren erstmals vorgestellt, wurde in neuerer Zeit durch schwedische und deutsche Ingenieure [1,2] aufgegriffen, verbessert und in eine für die Berechnung mit Rechenanlagen geeignete Form umgesetzt.

Im betrachteten Brandabschnitt bzw. Brandraum müssen im Falle eines Brandes pro Zeiteinheit die Energieanteile folgende Energiebilanz erfüllen (Bild 2):

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_l + \dot{h}_w + \dot{h}_0 + \dot{h}_g + \dot{h}_v) = 0,$$

wobei:

- $\dot{h}_c$ durch Verbrennung im Brandraum freigesetzte Energie,
- $\dot{h}_l$ durch Gasströmungen (Konvektion durch Ventilationsöffnungen) dem Brandraum entzogene Energie,
- $\dot{h}_w$ durch Konvektion und Strahlung an die den Brandraum umschliessenden Flächen (Wände, Decke, Fussboden) abgegebene Energie,
- $\dot{h}_0$ durch Strahlung aus Ventilationsöffnungen entzogene Energie,
- $\dot{h}_g$ durch Erwärmung der Gase im Brandraum gespeicherte Energie,
- $\dot{h}_v$ durch Löschmassnahmen dem Brandraum entzogene Energie.

Werden für die Energieanteile die physikalischen Beziehungen eingesetzt, wobei die Bauteiltemperaturen mit Hilfe der Fouriergleichung ermittelt werden, so lassen sich aus der Energiebilanz zwei Gleichungen herleiten:

$$F = F(T_g, T_w, \dot{m}_l),$$

$$U = U(T_g, T_w),$$

in denen als unbekannte Grössen die Brandraumtemperatur T_g, die Bauteiloberflächentemperatur T_w und der Frischluftzustrom $\dot{m}_l$ auftreten.

Bild 1. Einheitstemperaturkurve (ETK) nach ISO 834 im Vergleich zu in Brandversuchen gemessenen Temperaturzeitkurven

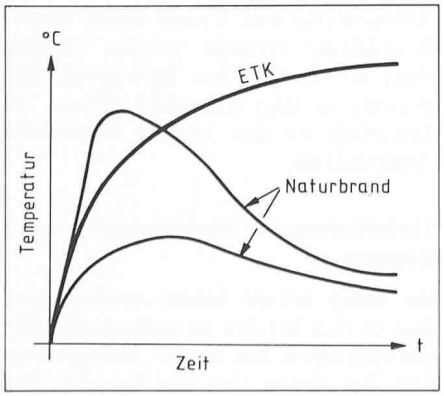
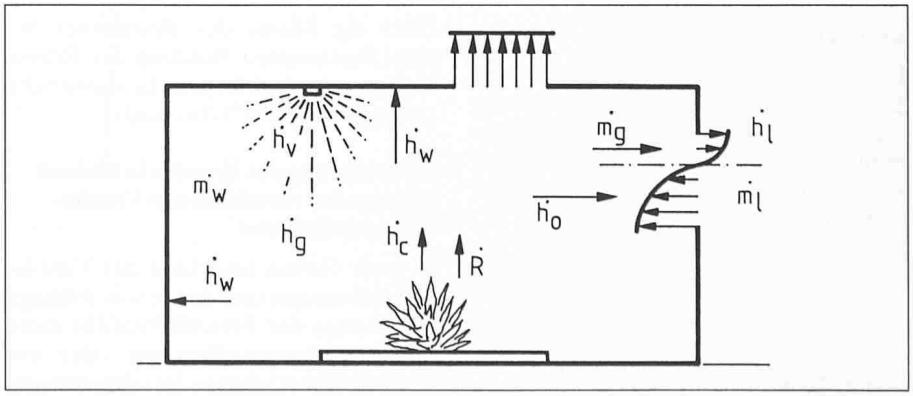


Bild 2. Wärme- und Massenströme in einem Brandraum mit vertikalen und horizontalen Ventilationsöffnungen



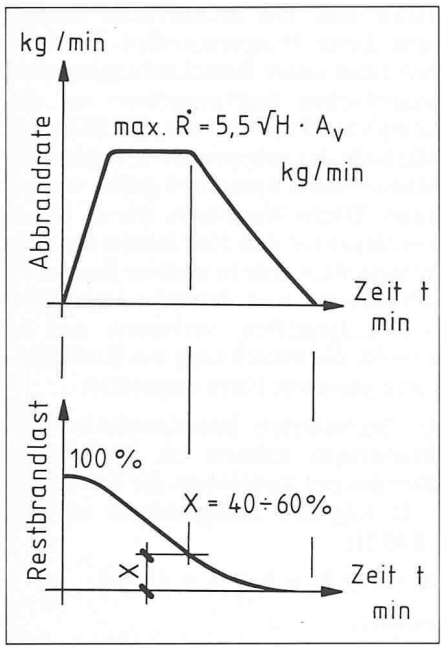


Bild 3. Abbrandrate bei ventilationsgesteuertem Brand (Sauerstoffdefizit)

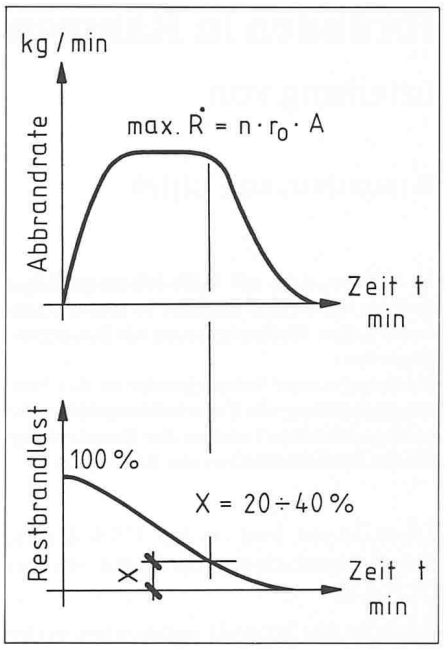


Bild 4. Abbrandrate bei brandlastgesteuertem Brand (Sauerstoffüberschuss)

Die Gleichung der Massenbilanz im Brandraum

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + \dot{R} + \dot{m}_w) = 0$$

wobei:

$\dot{m}_g$ Masse der aus dem Brandraum strömenden Gase,
$\dot{m}_l$ Masse der in den Brandraum einströmenden Luft,
$\dot{R}$ Masse des verbrennenden Brandgutes,
$\dot{m}_w$ Masse der verdampfenden Löschwassermenge (wird im folgenden als vernachlässigbar angesehen),

lässt sich umformen zu:

$$M = M(T_g, \dot{m}_l).$$

Die Gleichungen für F, U und M aus der Energie- und Massenbilanz sind für Zeitschritte zwischen etwa 1 bis 10 sec zu lösen. Die mehrfache Auflösung dieses Gleichungssystems lässt sich heute dank der Entwicklung immer leistungsfähigerer Rechenanlagen bereits schon mit Arbeitsplatz-Computern bewerkstelligen, ohne dass untragbare Rechenzeiten in Kauf genommen werden müssen.

Brandgut, Abbrandverhalten

Die hier beschriebene Methode der Energie- und Massenbilanzrechnung setzt voraus, dass realistische Annahmen über das zu erwartende Abbrandverhalten des Brandgutes getroffen werden.

Grundsätzlich steuern drei Faktoren den Abbrand:

- die Brandeigenschaften des Materials,
- die Menge des Brandgutes,
- die geometrischen Gegebenheiten des Brandraumes (Sauerstoffmangel oder Sauerstoffüberschuss je nach Grösse und Lage der Ventilationsöffnungen).

Brandeigenschaften und Menge des Brandgutes

Für die bei der Verbrennung ablaufenden thermodynamischen Vorgänge spielen unter anderem folgende Materialeigenschaften eine wichtige Rolle:

- Spezifische Abbrandrate [kg/m² · h],
- Verbrennungswärme [J/kg],
- Luftbedarf für stöchiometrische Verbrennung [kg Luft pro kg Brennstoff].

Von den meisten brennbaren Materialien liegen für die spezifische Abbrandrate Anhaltswerte vor. Genaue Angaben über die Grösse der theoretischen Verbrennungswärme und den Luftbedarf können aus Tabellenwerken entnommen werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, dass der Quotient aus theoretischer Verbrennungswärme/stöchiometrischer Luftbedarf nahezu unabhängig von der Art des betrachteten Brandgutes ist.

Über die Masse des Brandgutes bei einer bestimmten Nutzung des Brandraumes geben umfangreiche statistische Untersuchungen [7] Auskunft.

Modellierung des Brandes in kleinen Räumen bei verschiedenen Ventilationsverhältnissen

Je nach Grösse und Lage der Ventilationsöffnungen und der davon abhängigen Menge der Frischluftzufuhr kann sich ein Sauerstoffmangel oder ein Sauerstoffüberschuss im Brandraum einstellen. Im ersten Fall wird die durch die Verbrennung freigesetzte Energie durch die Menge des vorhandenen Sauerstoffs begrenzt (man spricht von einem ventilationsgesteuerten Brand), während im zweiten Fall von einer Energiefreisetzung entsprechend der spezifischen Abbrandrate ausgegangen wird (brandlastgesteuerter Brand).

Beim Vereinfachen des ausserordentlich schwierigen Problems der Vorhersage des Brandverlaufs für ingenieurmässige Berechnungen ist darauf zu achten, dass stets auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse resultieren.

Abbrandrate bei ventilationsgesteuertem Brand

Für z.B. zelluloseartige Stoffe (mit dem Luftbedarf 5) beträgt die maximale Abbrandrate:

$$\max \dot{R} = 5{,}5 \cdot \sqrt{H} \cdot A_v \text{[kg/min]},$$

wobei:

H Höhe der vertikalen Ventilationsöffnung [m],
A_v Fläche der vertikalen Ventilationsöffnung [m²].

Dieser Maximalwert $\max \dot{R}$ kann bereits schon innerhalb von 5 bis 10 min nach Brandausbruch erreicht werden (Bild 3). Die anschliessende Vollbrandphase, die gekennzeichnet ist durch den konstanten Maximalwert der Abbrandrate, ist von verhältnismässig kurzer Dauer. Sind 40 bis 60% des Brandgutes verbrannt, so reduziert sich die Abbrandrate und der Brand geht in die Abkühlphase über.

Abbrandrate bei brandlastgesteuertem Brand

Hier ist ein Überschuss an Sauerstoff vorhanden. Die Abbrandrate ist von der Lagerungsdichte des Brandgutes abhängig:

$$\max \dot{R} = n \cdot r_0 \cdot A \text{ [kg/min]},$$

wobei:

n Anzahl der abbrennbaren Flächen,
r_0 spezifische Abbrandrate [kg/m² · h],
A Brandfläche [m²].

Auch in diesem Fall kann die maximale Abbrandrate $\max \dot{R}$ nach relativ kurzer Branddauer erreicht werden (Bild 4). Sind 60 bis 80% des Brandgutes verbrannt, so folgt die Abkühlphase, erkenntlich an der kleiner werdenden Abbrandrate.

Modellierung des Brandes in grossen Räumen

Bis anhin wurde davon ausgegangen, dass es sich bei den zu untersuchenden Brandräumen um kleine Räume handelt, bei denen sich der Brand sofort

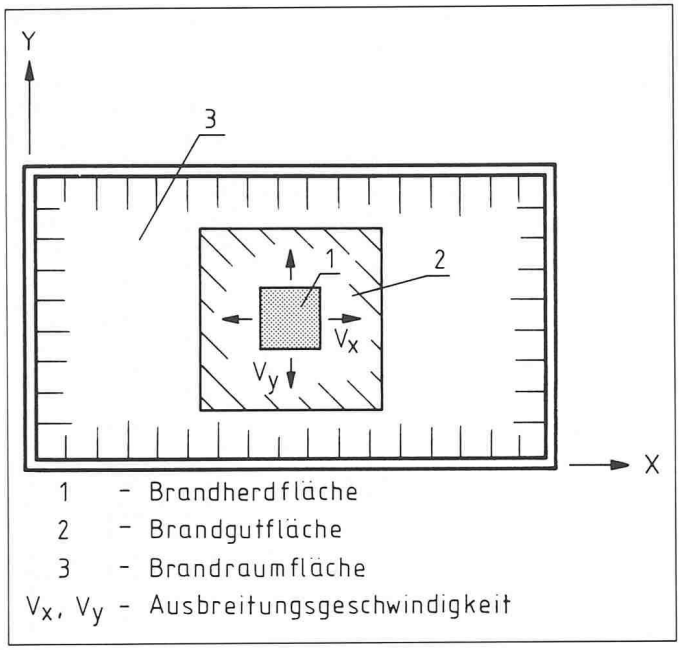


Bild 5. *Brandherdfläche (1) breitet sich aus bis Brandgutfläche (2) erreicht ist. Die Brandgutfläche muss nicht gleich der Brandraumfläche (3) sein*

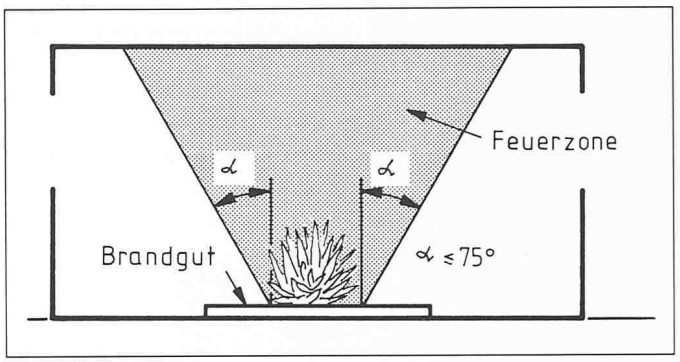


Bild 6. *Die Feuerzone, durch geneigte Seitenflächen abgegrenzter Raum über dem Brandherd*

über die ganze Brandraumfläche erstreckt.

Liegt ein grosser Raum vor, so wird im Normalfall das Feuer von einem kleinen Brandherd ausgehen und sich nach und nach ausweiten, bis eine maximal mögliche Brandfläche erreicht wird. Als neue Grössen kommen die Feuerausbreitung und der Feuersprung hinzu.

Zu unterscheiden ist (Bild 5) zwischen:

- Brandherdfläche,
- Brandgutfläche,
- Brandraumfläche.

Der Brand entsteht auf der Brandherdfläche und breitet sich mit je einer vorgegebenen Geschwindigkeit in *X*- und *Y*-Richtung aus, bis die maximal mögliche Fläche – die Brandgutfläche – unter Feuer steht. Die Brandgutfläche muss dabei nicht mit der Brandraumfläche identisch sein.

Der Feuersprung wird nachgebildet, indem bei einem bestimmten Temperatur- bzw. Strahlungszustand die Feuerausbreitungsgeschwindigkeit sprunghaft erhöht wird. Der Brand geht dann von der Brandentwicklungsphase rasch in die Vollbrandphase über.

Bei der Berechnung der Brandraumtemperatur wird angenommen, dass in der gesamten Feuerzone (Bild 6) die gleiche Temperatur herrscht. Das Feuerzonen-Volumen wird oben und unten durch die Brandraumdecke bzw. den Fussboden begrenzt. Seitlich ist die Feuerzone ausgehend von der Brandherdfläche zur Zeit *t* durch vier Ebenen umschlossen, die unter veränderlichem Winkel geneigt sind. Die Winkeländerung errechnet das Programm aus dem Verhältnis der aktuellen Brandherdfläche zur Brandgutfläche und aus der Branddauer. Der maximale Neigungswinkel beträgt 75 Winkelgrade. Für die Berechnung der Energieterme in der Energiebilanz werden alle beteiligten Flächen im Verhältnis des Feuerzonenvolumens zum Brandraumvolumen reduziert.

Damit ergeben sich im Mittel höhere, auf der sicheren Seite liegende Temperaturen in der Feuerzone bzw. im Brandraum.

Löschmassnahmen

Die Wirkung der Sprinkler wurde vereinfacht, aber konservativ erfasst, d.h. auch bei Einsatz einer Löschmassnahme liegen die errechneten Brandraumtemperaturen auf der sicheren Seite.

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- die eingesprühte Wassermenge verdampft oberhalb des Brandgutes, wobei im Falle von grossen Räumen nur die in der Feuerzone liegenden Sprinkler als wirksam angesehen werden,
- die Abbrandrate und die Feuerausbreitungsgeschwindigkeit werden durch die Sprinkler nicht beeinflusst.

Mit den getroffenen Annahmen lassen sich auf anschauliche Weise qualitative Vergleiche zwischen verschiedenen Sprinklerklassen ziehen.

In ähnlicher Weise kann auch der Einsatz der Feuerwehr näherungsweise erfasst werden.

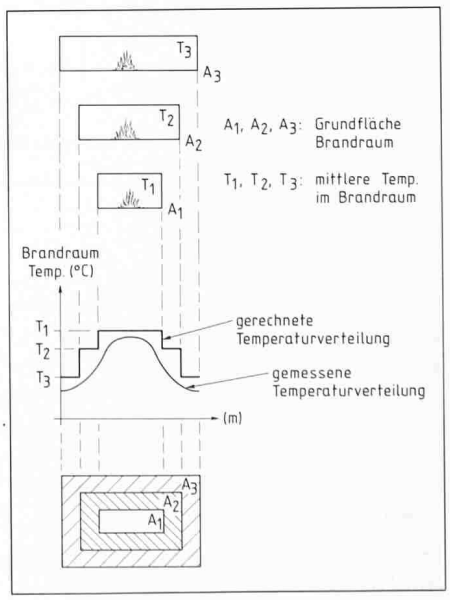
Methode der zugeordneten Brandräume

Die drei oben genannten Computerprogramme liefern u.a. die durchschnittlichen Gastemperaturen im Brandraum bzw. in der Feuerzone. Diese Temperaturhöchstwerte werden für den Nachweis der Brandsicherheit verwendet. Manchmal interessiert aber auch die Temperaturverteilung über die Grundrissfläche. In diesem Fall liefert die «Methode der zugeordneten Brandräume» auf der sicheren Seite liegende Resultate.

Dazu ist wie folgt vorzugehen: Die Grundfläche des gedachten Brandraumes wird vergrössert (oder verkleinert), und die Brandsimulations-Berechnung wird wiederholt. Bei Vergrösserung (Verkleinerung) der Grundfläche von A_1 auf A_2 wird die durchschnittliche Gastemperatur von T_1 auf T_2 fallen (steigen).

Innerhalb A_1 herrscht dann die Temperatur T_1, auf der Fläche A_2-A_1 die Temperatur T_2 (Bild 7).

Bild 7. *«Methode der zugeordneten Brandräume». Ermittlung der Temperaturverteilung in der Ebene durch wiederholte Berechnung mit verschieden grossen Brandraum-Grundrissflächen*



```
*****************************************************************

SIMULATION EINES LOKALEN BRANDES IN EINEM GROSSEN RAUM
------------------------------------------------------
CTICM-Versuch Nr. 2/1983
Brandlast: 2050 kg Holz  -  Verbrennungsgrad: 100%

******************************************************* GEILINGER AG ***


A. Geometrie Brandraum
----------------------

Brandraum-Abmessungen              Laenge      39.000 m
                                   Breite      28.000 m
                                   Hoehe        9.500 m

Ventilationsoeffnung vertikal      Breite       6.000 m
                                   Hoehe        1.500 m
                                   Sturzhoehe   6.000 m

Ventilationsoeffnung horizontal    Flaeche     10.000 m2


B. Umschliessende Flaechen
--------------------------

            Material          Dicke  Anzahl    Emission  Konvektion
                              (cm)   Schichten  i/a       (kcal/m2*h*K)

Wand        Normalbeton        2.0      2        .60
            Normalbeton        4.0      4
            Normalbeton        4.0      4        .80          4.00

Decke       Leichtbeton        2.0      2        .60
            Leichtbeton        4.0      4
            Leichtbeton        4.0      4        .80          4.00

Fussboden   Normalbeton        2.0      2        .60
            Normalbeton        4.0      4
            Normalbeton        4.0      4        .80          4.00


Feuchtigkeit der Bauteile :     4.0 %

C. Brandgut, Abbrandverhalten
-----------------------------

Gesamtbrandlast                          2050.00 kg
Heizwert                                 4000.00 kcal/kg

Spezifische Abbrandrate                   120.00 kg/m2*h
Luftverbrauch (kg-Luft/kg-Brennstoff)       5.00
Energiedichte fuer Flash-over               2.00 W/cm2


Brandherdflaeche        Punkt 1     X =  22.650 m   Y =   7.000 m
                        Punkt 2     X =  22.650 m   Y =  12.800 m
                        Punkt 3     X =  29.350 m   Y =  12.800 m
                        Punkt 4     X =  29.350 m   Y =   7.000 m

Brandflaeche            Punkt 1     X =    .000 m   Y =    .000 m
                        Punkt 2     X =    .000 m   Y =  28.000 m
                        Punkt 3     X =  39.000 m   Y =  28.000 m
                        Punkt 4     X =  39.000 m   Y =    .000 m

Ausbreitungsgeschwindigkeit Feuer in        X-Richtung :    .000 m/min
                                            Y-Richtung :    .000 m/min
Erhoehung nach Flash-over um Faktor :                      10.000

D. Brandbekaempfung
-------------------

keine


E. Startwerte, Programmsteuerung
--------------------------------

Temperaturen      Luft aussen          20.000 Grad C.
                  Luft im Brandraum    20.000 Grad C.
                  der Bauteile         20.000 Grad C.

Berechnung des Brandgeschehens ab Brandausbruch fuer  60.0 Minuten,
Zeitschritt  10.0 Sekunden
```

Bild 8. Liste der Eingabedaten

```
F. Resultate
------------

Zeit  Brandraum-   Waermebilanz (kcal/sec)
(Min) Temperatur       HC       HL       HO       HW       HG       HV

  2    1043.7      5181.3   2251.8     35.0   3009.3     24.3       .0
  4    1083.3      5181.3   2382.8     41.0   2910.2     14.0       .0
  6    1108.3      5181.3   2474.6     44.7   2818.3     12.1       .0
  8    1128.3      5181.3   2548.8     47.8   2743.4     11.1       .0
 10    1146.5      5181.3   2624.2     52.7   2720.1     20.2       .0
 12    1162.5      5181.3   2678.3     53.4   2612.9      8.6       .0
 14    1177.7      5181.3   2739.7     56.1   2549.5      9.0       .0
 16    1189.9      5181.3   2784.0     58.3   2506.9      5.6       .0
 18    1204.7      5181.3   2837.2     62.8   2509.9     17.2       .0
 20    1215.1      5181.3   2890.4     65.4   2463.5      5.1       .0
 22    1183.2      4415.5   2533.8     53.8   1907.5    -79.6       .0
 24    1041.9      3007.9   2036.4     35.9   1023.4    -87.8       .0
 26     888.5      2049.0   1721.5     21.9    409.1   -103.5       .0
 28     744.9      1395.8   1437.2     12.9     57.2   -111.5       .0
 30     620.3       950.9   1179.8      7.7   -128.9   -107.6       .0
 32     516.9       647.8    958.2      4.7   -221.8    -93.2       .0
 34     432.8       441.3    782.3      3.0   -262.2    -81.8       .0
 36     366.2       300.6    645.7      2.0   -274.1    -73.0       .0
 38     313.4       204.8    539.3      1.4   -271.7    -64.2       .0
 40     272.5       139.5    453.4      1.0   -261.7    -53.2       .0
 42     240.5        95.0    387.9       .8   -248.4    -45.3       .0
 44     215.8        64.7    331.2       .6   -233.6    -33.5       .0
 46     195.4        44.1    292.5       .5   -220.0    -28.9       .0
 48     179.9        30.0    261.1       .4   -206.3    -25.2       .0
 50     166.6        20.5    234.9       .4   -194.4    -20.4       .0
 52     156.4        13.9    212.9       .3   -182.8    -16.5       .0
 54     147.6         9.5    196.5       .3   -172.6    -14.7       .0
 56     140.0         6.5    182.7       .3   -163.3    -13.2       .0
 58     133.7         4.4    169.7       .3   -154.8    -10.8       .0
 60     128.5         3.0    159.0       .2   -146.9     -9.4       .0

HC: durch Verbrennung freigesetzte Energie
HL: durch aus dem Brandraum ausstroemende Gase entzogene Energie
HO: durch Fensterstrahlung entzogene Energie
HW: an Umfassungsbauteile abgegebene Energie
HG: im Brandraum gespeicherte Energie
HV: durch Loeschwasser-Verdampfung entzogene Energie
```

Bild 9. Liste der Ausgabedaten (1. Teil)

Zeit (Min)	Brandraum-Temperatur	Abbrandrate (kg/min)	Restbrandlast (kg)	(%)	Brandherd-flaeche (m2)	Energiedichte (W/cm2)
2	1043.7	77.72	1894.6	92.4	38.9	4.800
4	1083.3	77.72	1739.1	84.8	38.9	4.362
6	1108.3	77.72	1583.7	77.3	38.9	4.125
8	1128.3	77.72	1428.2	69.7	38.9	3.899
10	1146.5	77.72	1272.8	62.1	38.9	3.724
12	1162.5	77.72	1117.4	54.5	38.9	3.581
14	1177.7	77.72	961.9	46.9	38.9	3.480
16	1189.9	77.72	806.5	39.3	38.9	3.334
18	1204.7	77.72	651.0	31.8	38.9	3.227
20	1215.1	77.72	495.6	24.2	38.9	3.150
22	1183.2	66.23	346.0	16.9	38.9	2.752
24	1041.9	45.12	237.8	11.6	38.9	1.569
26	888.5	30.74	164.0	8.0	38.9	.730
28	744.9	20.94	113.8	5.6	38.9	.194
30	620.3	14.26	79.6	3.9	38.9	-.120
32	516.9	9.72	56.3	2.7	38.9	-.295
34	432.8	6.62	40.4	2.0	38.9	-.388
36	366.2	4.51	29.6	1.4	38.9	-.427
38	313.4	3.07	22.2	1.1	38.9	-.439
40	272.5	2.09	17.2	.8	38.9	-.435
42	240.5	1.43	13.8	.7	38.9	-.422
44	215.8	.97	11.4	.6	38.9	-.406
46	195.4	.66	9.8	.5	38.9	-.389
48	179.9	.45	8.8	.4	38.9	-.370
50	166.6	.31	8.0	.4	38.9	-.352
52	156.4	.21	7.5	.4	38.9	-.335
54	147.6	.14	7.2	.3	38.9	-.319
56	140.0	.10	6.9	.3	38.9	-.304
58	133.7	.07	6.8	.3	38.9	-.290
60	128.5	.05	6.7	.3	38.9	-.277

Bild 10. Liste der Ausgabedaten (2. Teil)

Computer-Eingabedaten und Resultate

Alle Programme erstellen ein umfassendes Protokoll der eingegebenen Daten, anschliessend folgen die Resultatausgaben.

Die Eingabedaten sind gegliedert nach (Bild 8):

- Brandraumgeometrie (Abmessungen des Brandraumes und der Ventilationsöffnungen),
- Umschliessende Flächen (getrennt für Wände, Decke, Fussboden: Material, Dicke, Emissionswert usw.),
- Brandgut, Abbrandverhalten (brandtechnische Materialdaten, Angaben über Abbrand usw.),
- Brandbekämpfung (Angaben zu Sprinklern bzw. über Feuerwehreinsatz),
- Startwerte (Ausgangstemperaturen in den Konstruktionsteilen und im Brandraum, Temperatur der Aussenluft usw.).

Die Resultatausgaben erfolgen tabellenweise, wobei pro wählbarem Zeitintervall je eine Ausgabezeile entsteht. Ausgedruckt werden (Bilder 9 und 10):

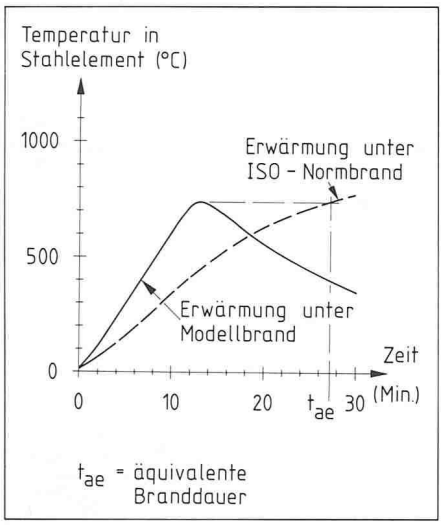


Bild 11. Ermittlung der äquivalenten Branddauer

- Zeit,
- Brandraumtemperatur,
- alle Terme der Energiebilanz,
- aktuelle Abbrandrate,
- Restbrandlast,
- aktuelle Brandherdfläche.

Ausserdem können weitere Informationen über die Erwärmung der Wände, Decke und Fussboden, über die Massenbilanz und über Wärmestromdichten ausgedruckt werden.

Mittels zusätzlich entwickelter Computerprogramme lassen sich aufgrund der berechneten Brandraumtemperaturen die Temperatur-Zeit-Verläufe in verkleideten und unverkleideten Stahlelementen bestimmen. Der Vergleich mit der Erwärmung unter ISO-Normbrand (Bild 11) liefert die äquivalente Branddauer t_{ae}. Die Temperatur-Zeit-Kurve kann auch graphisch auf dem Plotter dargestellt werden.

Verifikation der Rechenprogramme

Nachrechnungen von im Massstab 1:1 durchgeführten Versuchen haben ergeben, dass sich das tatsächliche Brandgeschehen mittels einer Computer-Brandsimulation mit guten Resultaten nachvollziehen lässt.

Die Berechnungen zeigen zudem deutlich, dass die Verbrennung praktisch nie hundertprozentig ist. Teile der beim Brand entstehenden Pyrolysegase verbrennen ausserhalb des Brandraumes, bzw. ein Teil des Brandgutes verbleibt unverbrannt.

Mit der in Brandsimulationen üblichen Annahme einer vollständigen Verbrennung liegen die berechneten Brandraumtemperaturen im allgemeinen sehr weit auf der sicheren Seite.

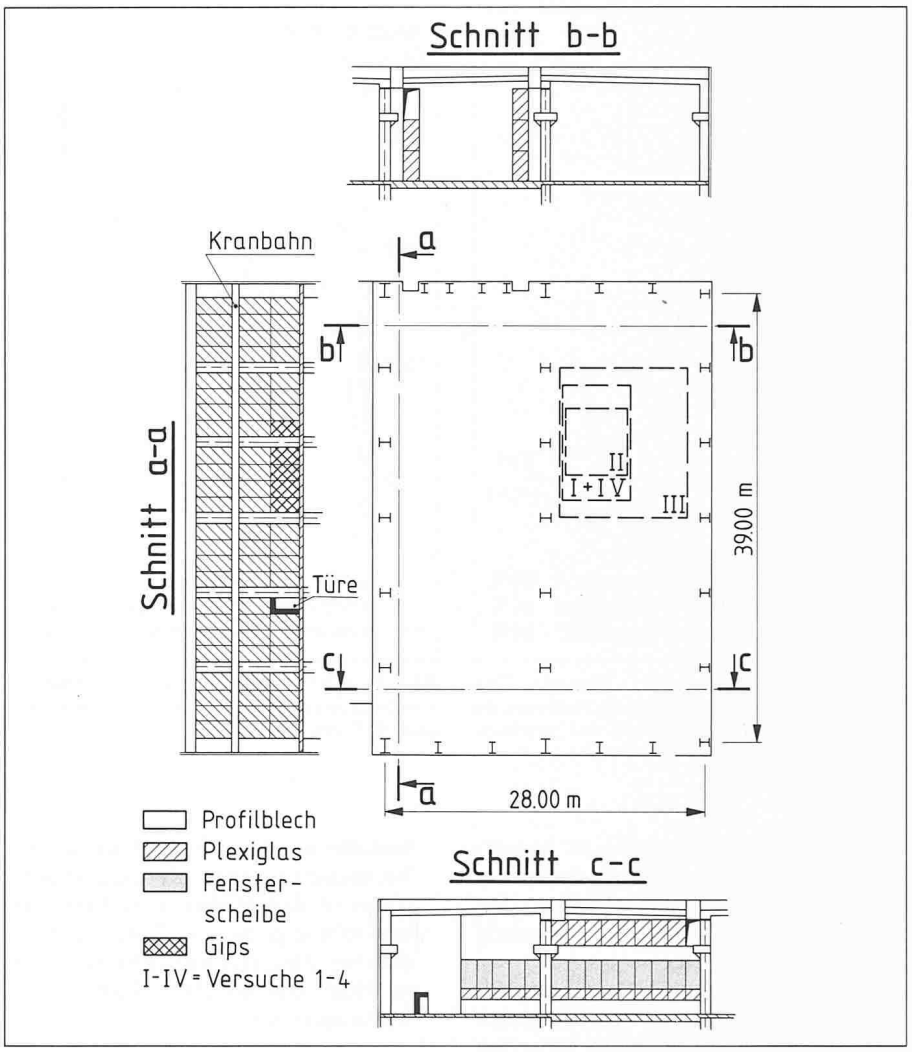


Bild 12. CTICM-Brandversuche. Brandraum mit den vier Brandherden

CTICM-Versuche

In einer Fabrikhalle (Bild 12) mit den Abmessungen 39,00×28,00×9,50 m wurden vier Brandversuche durchgeführt [8]. Nähere Angaben über das Brandgut und die Ventilation sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Die gemessenen und gerechneten Temperatur-Zeit-Kurven sind in den Bildern 13 bis 16 wiedergegeben; die Maximalwerte der Temperaturen in der Feuerzone können der Tabelle 2 entnommen werden.

Der Vergleich der gemessenen und der gerechneten Werte zeigt, dass:

Tabelle 1. Brandgut und Ventilation bei den CTICM-Versuchen

Versuch Nr.	Brandgut Holz [kg]*	Brandgut Polystyren [m³]	Verbrennungswärme total [Mcal]	Brandherdfläche [m²]	Ventilationsfläche horizontal [m²]	Ventilationsfläche vertikal [m²]
1	2016	-	8064	58.0	9.0	5.5
2	2050	-	8200	38.9	9.0	10.0
3	4120	-	16480	150.8	9.0	10.0
4	1620	23	6810	58.0	13.5	10.0

* Einschliesslich Benzin für das Anzünden des Feuers

Tabelle 2. Maximalwerte der Temperaturen in der Feuerzone

Versuch Nr.	Maximale Temperatur in der Feuerzone [°C] gemessen	gerechnet	gerechnet bei Verbrennungsgrad 100%
1	510	483	915
2	900	867	1224
3	580	598	988
4	1110	1078	1529

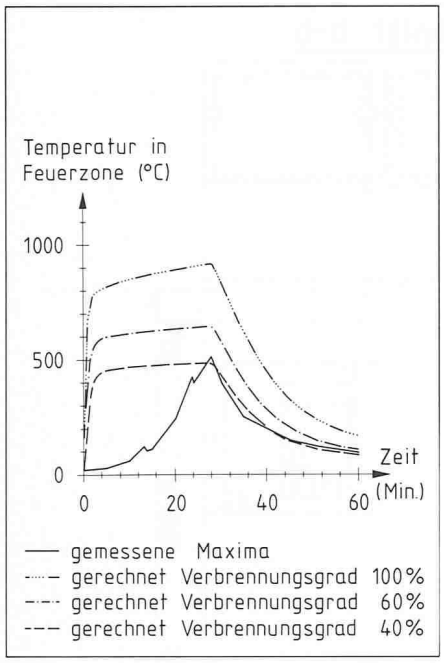


Bild 13. CTICM-Versuch Nr. 1: Temperatur-Zeit-Verläufe der Lufttemperaturen in der Feuerzone. Im Versuch gemessener Maximalwert und gerechnete Werte bei Annahme eines Verbrennungsgrades von 40%, 60% und 100%

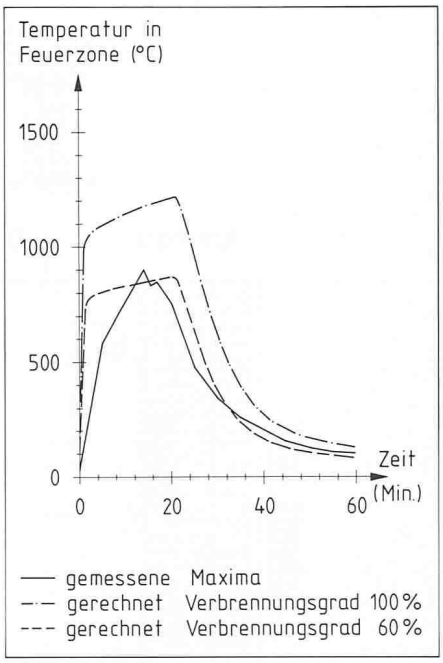


Bild 14. CTICM-Versuch Nr. 2: Gemessener Maximalwert und gerechnete Werte bei Verbrennungsgrade 60% bzw. 100%

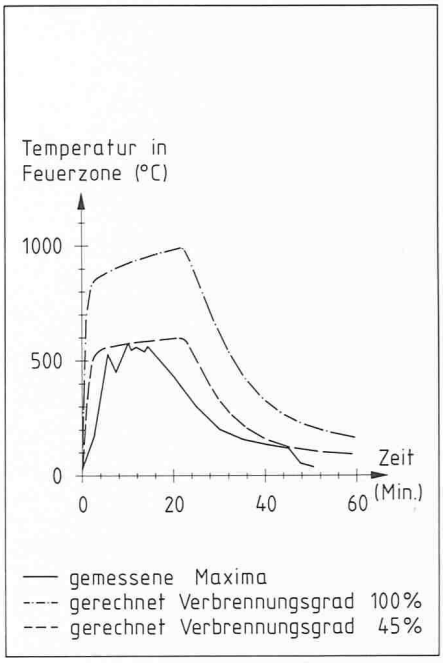


Bild 15. CTICM-Versuch Nr. 3: Gemessener Maximalwert und gerechnete Werte bei Verbrennungsgrade 45% bzw. 100%

- die Berechnungsmethode zu konservativen Ergebnissen führt, wenn wie bei Brandsicherheitsnachweisen üblich, eine vollständige Verbrennung angenommen wird.
- das Programm gute Näherungsresultate liefert, sofern die Verbrennungsgrade in diesem Beispiel zwischen 40% und 60% gewählt werden.
- die Annahme einer gleichmässigen Temperatur in der ganzen Feuerzone gute Werte ergibt, auch bei einer Hallenhöhe wie hier von 9,50 m. (In den Versuchen wurden die Gastemperaturen in den Höhen von 3,00, 6,00 und 9,00 m gemessen. Erstaunlich ist, dass bei allen vier Versuchen auf 3,00 m Höhe die höchsten Temperaturwerte auftraten.)

Versuche von Boreham Wood

Diese in England durchgeführten Versuche hatten zum Ziel, die Auswirkungen eines Motorfahrzeug-Brandes in einem oberirdischen Parkhaus zu ermitteln [9].

Im Gegensatz zu den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Versuchen sind hier die Seitenwände weitgehend geöffnet, d.h. bei der Verbrennung herrscht ein Luftüberschuss.

Der Berechnung wurde ein Brandraum von der Grösse eines Parkfeldes (5,00×2,50×2,40 m) mit auf drei Seiten offenen Wänden zugeordnet.

Bild 16. CTICM-Versuch Nr. 4: Gemessener Maximalwert und gerechnete Werte bei Verbrennungsgrade 50% für Polystyren und 12% für Holz bzw. je 100%

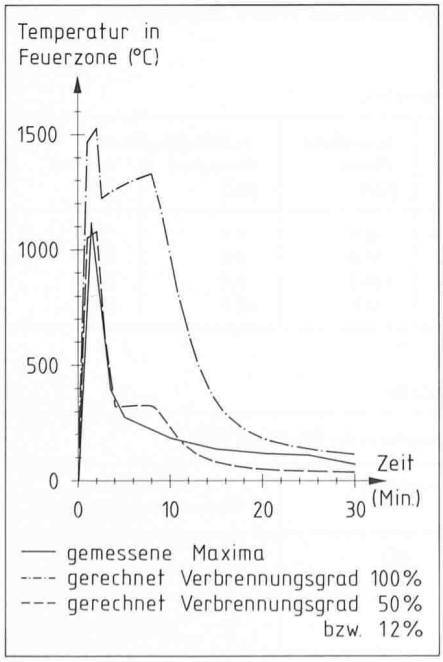


Bild 17. Boreham Wood-Versuch Nr. 1: Gemessener und gerechneter Temperatur-Zeit-Verlauf der Luft über dem brennenden Personenwagen

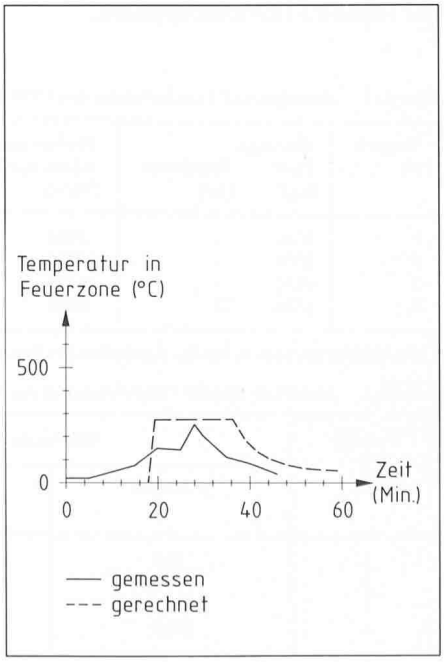
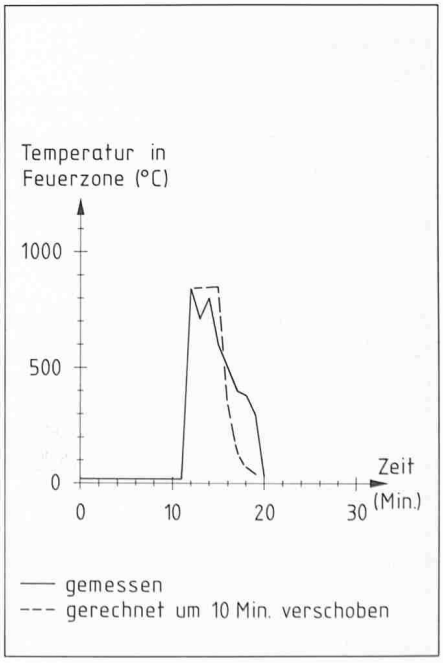


Bild 18. Boreham Wood-Versuch Nr. 2: Gemessener und gerechneter Temperatur-Zeit-Verlauf der Luft über dem brennenden Lieferwagen



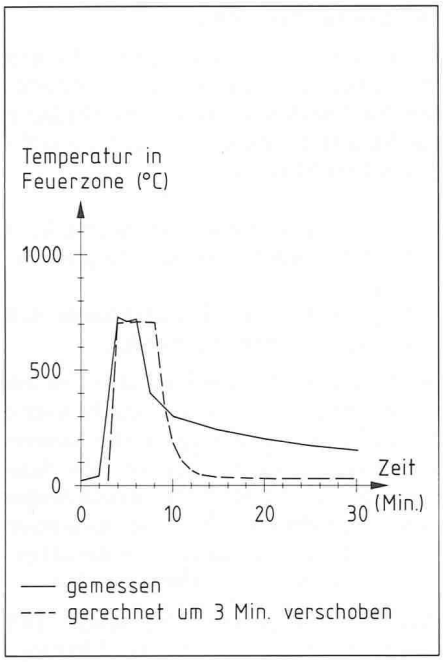


Bild 19. Boreham Wood-Versuch Nr. 3: Gemessener und gerechneter Temperatur-Zeit-Verlauf der Luft über dem brennenden Fahrzeug

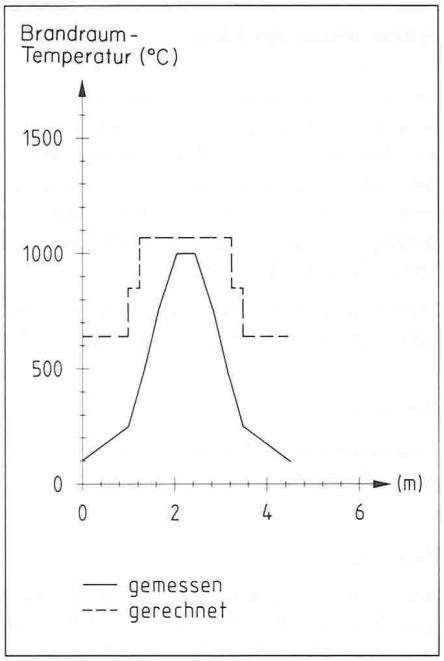


Bild 20. Boreham Wood-Versuch Nr. 2: Gemessene und gerechnete Temperatur-Verteilung im Parkhaus

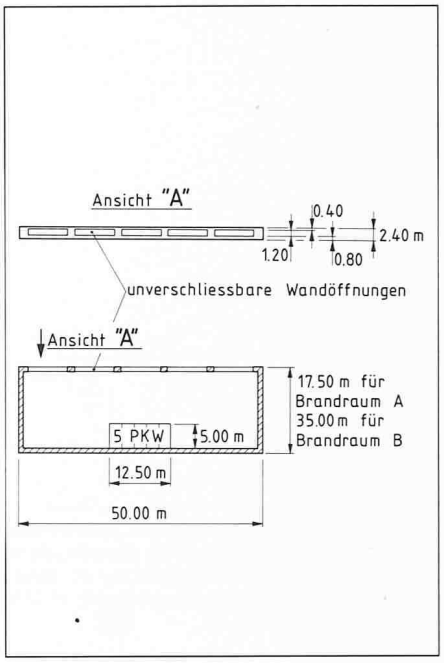


Bild 21. Grundriss und Seitenansicht der Einstellhalle mit unverschliessbaren Seitenöffnungen in einer Seitenwand

Als Brandherd dient in allen Versuchen ein in Brandraummitte stationierter Personen- bzw. Lieferwagen.

Die Versuche und auch die Nachrechnungen zeigen deutlich die Abhängigkeit der Abbrandrate von der Bauart des Fahrzeugs:

Versuch 1

Limousine schwerer Bauart, mit Stahlabschottungen zwischen Passagier-, Motor- und Kofferraum. Abbrandrate $\dot{R}$ = 40 kg Holzäquivalent pro m² und Stunde.

Versuch 2

Lieferwagen leichter Konstruktion, mit Dach aus brennbarem Stoff. Abbrandrate $\dot{R}$ = 350 kg/m² · h.

Versuch 3

Offener Wagen, mit Faltdach, leichte Konstruktion. $\dot{R}$ = 275 kg/m² · h.

Auch diese Versuche dokumentieren die gute Übereinstimmung zwischen den experimentell und rechnerisch bestimmten durchschnittlichen Brandraumtemperaturen (Bilder 17 bis 19).

Im Versuch 2 wurden zusätzliche Temperatur-Messungen in verschiedenen Abständen vom Brandherd durchgeführt, um so Aufschluss über die Temperaturverteilung im Brandraum zu erhalten. Die Nachrechnung dieser Verteilung nach der oben erläuterten «Methode der zugeordneten Brandräume»

Bild 22. Einfluss der unverschliessbaren Wandöffnungen auf die Feuerzonen- bzw. Brandraumtemperatur der Einstellhalle bei Bezug der Prozentwerte auf die Grundrissfläche

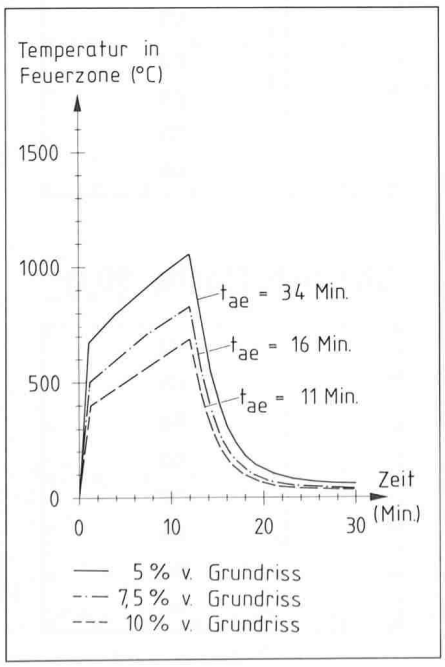


Bild 23. Einfluss von verschiedenen Seitenverhältnissen der Grundrissfläche auf die Brandraumtemperatur bei Bezug der Prozentwerte auf die Grundrissfläche (Beispiel: Wandöffnung = 5% der Grundrissfläche)

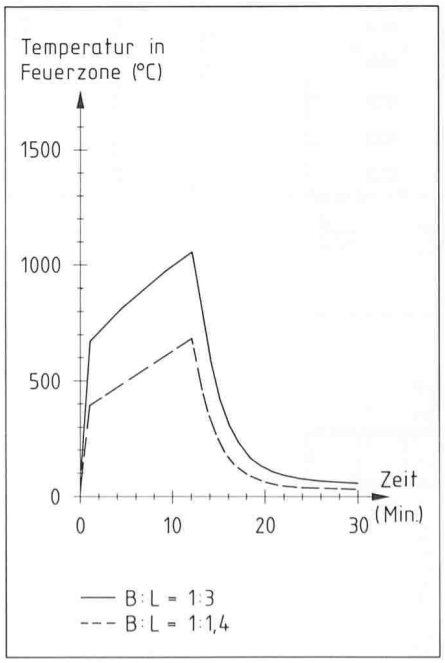
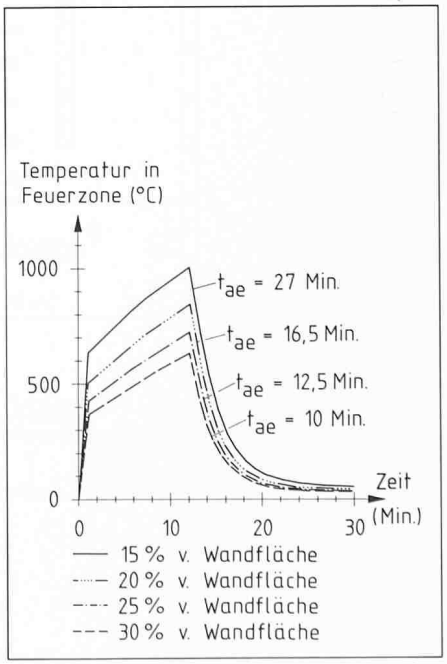


Bild 24. Einfluss der unverschliessbaren Wandöffnungen auf die Feuerzonen- bzw. Brandraumtemperatur der Einstellhalle bei Bezug der Prozentwerte auf die Fläche der Seitenwände



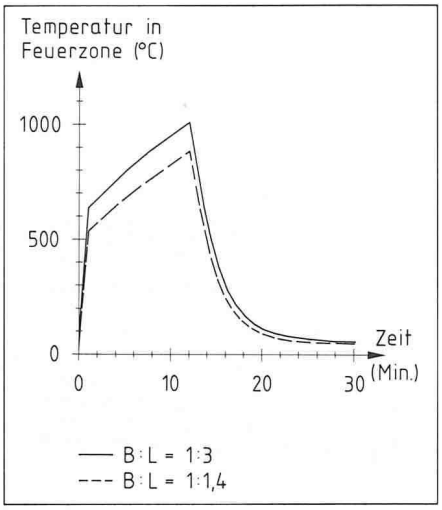


Bild 25. Einfluss von verschiedenen Seitenverhältnissen der Grundrissfläche auf die Brandraumtemperatur bei Bezug der Prozentwerte auf die Fläche der Seitenwände (Beispiel: Wandöffnung = 15% der Seitenwandflächen)

mit Grundflächen von 4,00×2,00 m, 5,00×2,50 m und 7,00×4,50 m liefert auf der sicheren Seite liegende Resultate. Im Bild 20 sind die gemessenen und gerechneten Werte wiedergegeben.

Anwendungsgebiete

Die Programme ermöglichen die Simulation von lokalen und voll entwickelten Bränden in quaderförmigen Räumen mit vertikalen und horizontalen Ventilationsöffnungen, unter Berücksichtigung von Löschmassnahmen wie Sprinkler oder Feuerwehr.

Damit lassen sie sich beispielsweise in den folgenden Gebieten anwenden:

Normung

Erarbeiten von Grundlagen für Normen, Richtlinien und Empfehlungen.

Planung

Schaffen von Entscheidungshilfen für das Beurteilen und Optimieren von baulichen Brandschutzmassnahmen.

Konstruktion

Ermöglichen einer genaueren und realistischeren Bewertung des Brandwiderstandes von Tragkonstruktionen und des Brandverhaltens von Bauteilen.

Beispiel für Normung

Gemäss der in Entstehung befindlichen Norm bezüglich Feuerpolizeivorschriften für Parkhäuser und Einstellräume für Motorfahrzeuge wird bei mehrstökkigen Parkhäusern:

- für offengebaute Einstellräume kein Nachweis des Feuerwiderstandes verlangt,
- für geschlossene Einstellräume ein solcher von 30 min gefordert.

Als Kriterium für die Einstufung in die offengebaute bzw. in die geschlossene Bauweise gilt die Grösse der unverschliessbaren Öffnungen in den Aussenwänden. Mit Hilfe der Brand-Simulationsberechnung soll die minimale Grösse dieser Öffnungen für die offengebaute Bauweise festgelegt werden.

Aufgrund einer früheren Studie [10] wurde die Brandlast und das Abbrandverhalten wie folgt angenommen:

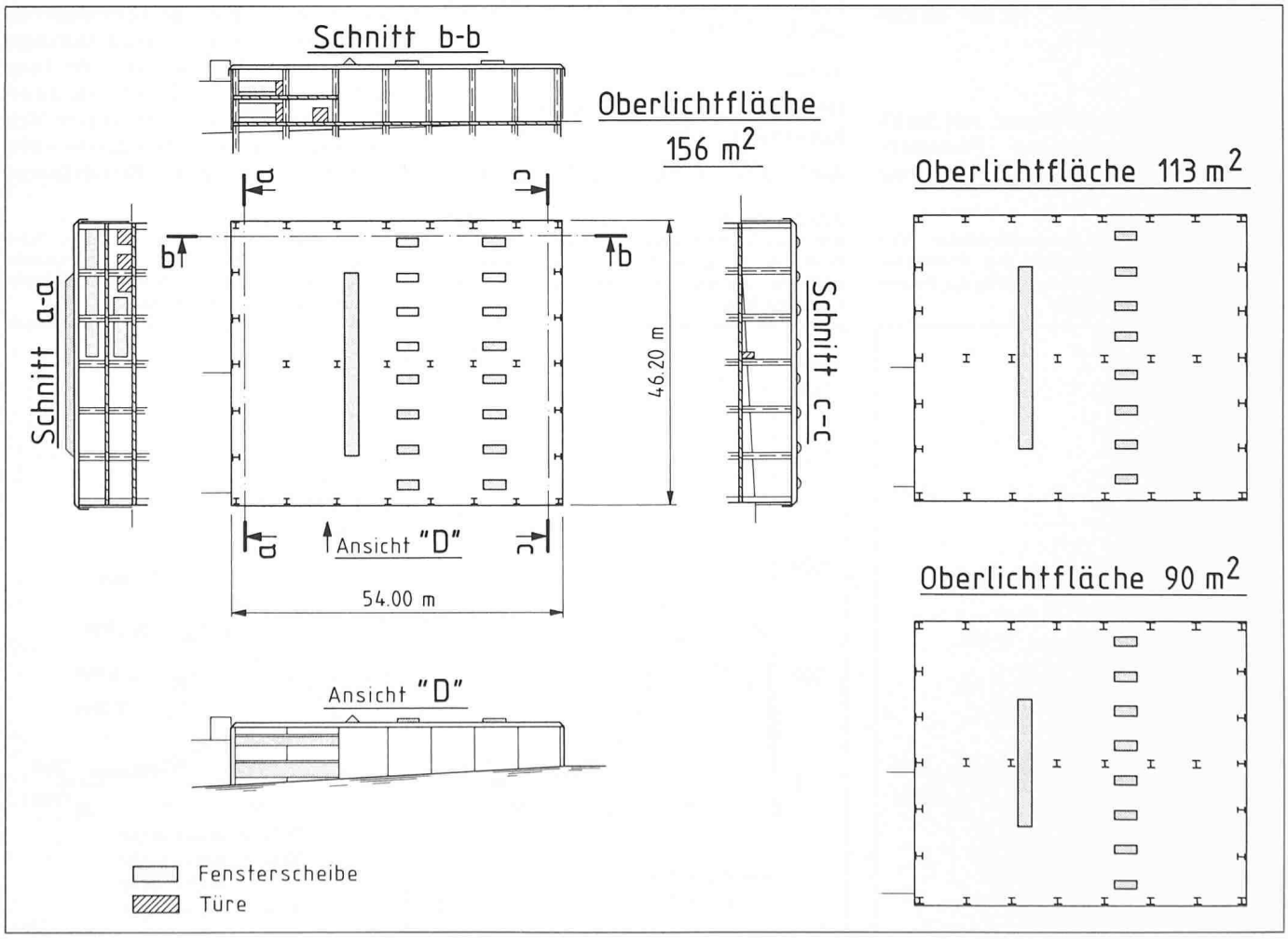
Brandlast

5 PKW zu je 350 kg Holzäquivalent.

Abbrandrate

max $\dot{R}$ = 175 kg/m² · h.

Bild 26. Grundriss und Schnitt des untersuchten Warenlagers



Brandmodell

Der Brand beginnt auf zwei Parkplätzen (5×5 m) und breitet sich mit einer Geschwindigkeit von 0,25 m/min auf die benachbarten Parkplätze aus, bis die Brandgutfläche von 12,50×5,00 m erreicht ist.

Mit der angenommenen Brandlast und Abbrandrate entsteht eine Vollbrandphase von rund 14 min Dauer, während welcher 92% der Brandlast verbrennt. Anschliessend folgt die Abkühlphase.

Für die Untersuchung wurden zwei Brandräume gewählt (Bild 21):

Brandraum A

Einstellhalle mit ausgeprägt länglicher Grundfläche: Länge 50,00 m, Breite 17,50 m und Höhe 2,40 m. Wände, Dekke und Boden bestehen aus Beton.

Brandraum B

Einstellhalle mit Grundfläche von ähnlicher Länge wie Breite: Länge 50,00 m, Breite 35,00 m und Höhe 2,40 m. Wände, Decke und Boden bestehen aus Beton.

In den ersten Berechnungen wurde die Fläche der unverschliessbaren Wandöffnungen auf die *Grundrissfläche* der Einstellhalle bezogen (5%, 7,5% bzw. 10% der Grundrissfläche), d.h. als Kriterium wurde derjenige Prozentwert gesucht, der mit der Grundrissfläche multipliziert die minimale Fläche der Wandöffnungen ergibt.

Die gerechneten Temperaturen in den Brandräumen A und B zeigten aber für den gleichen Öffnungsanteil stark abweichende Temperatur-Zeit-Verläufe, so dass sich dieses Vorgehen als unbrauchbar erwies (Bilder 22 und 23).

Wird aber die Fläche der Wandöffnungen auf die totale Fläche der *Seitenwände* bezogen, so ist der Einfluss der Raumgestaltung viel kleiner. Die Temperaturdifferenz in der Vollbrandphase beträgt zwischen Brandraum A und B für verschiedene Wandöffnungsflächen (15%, 20%, 25% und 30% der Wandfläche) nur noch rund 100 Grad Celsius (Bilder 24 und 25).

Mit Hilfe der Simulationsberechnung konnte somit gezeigt werden, dass als Kriterium zur Abgrenzung zwischen offengebauten und geschlossenen Einstellhallen die Grösse der unverschliessbaren Wandöffnungen dienen kann. Jedoch soll der Grenzwert auf die totale Wandfläche und nicht auf die Grundrissfläche bezogen werden. Für den untersuchten Modellfall beträgt der Grenzwert 25%, d.h. ein Einstellraum kann als offengebaut gelten (der Nachweis des Feuerwiderstandes entfällt hiermit), wenn die unverschliessbaren Wandflächen mindestens 25% der totalen Wandfläche betragen.

Beispiel für Planung

Für eine Firma in Winterthur ist die Erstellung eines oberirdischen Warenlagers geplant. Die Fläche der Seitenfenster ist fest vorgegeben. Je nach Ausbildung der Dachkonstruktion entstehen aber Oberlichtflächen von 90, 113 bzw. 156 m² . Als Sonder-Brandschutzmassnahme ist eine Sprinkleranlage vorgesehen.

Mit Hilfe von Simulationsberechnungen sollen die Brandauswirkungen für die möglichen Kombinationen der Ventilationsöffnungen (Seitenfenster, Oberlichter) mit den verschiedenen Sprinklerklassen abgeklärt werden.

Aufgrund der vorhandenen Pläne und der beabsichtigten Nutzung ergeben sich die folgenden Daten für den Brandraum und das Brandgut (Bild 26):

Brandraum

Länge 54,00 m, Breite 46,20 m, Höhe 8,00 m. Die Wände bestehen aus Leichtbetonplatten, die Decken und Bodenplatte aus Normalbeton. Die Ventilation erfolgt durch Fenster mit einer Gesamtfläche von 156,4 m² und durch Oberlichtöffnungen mit Gesamtflächen von 90, 113 bzw. 156 m².

Brandlast

Für die vorgesehene Lagerung von Elektroapparaten ist gemäss SIA-Dokumentation 81 [7] eine Lagerungsdichte

Bild 27. Temperatur-Zeit-Verläufe bei verschiedenen Kombinationen von Oberlichtöffnungen und Sprinklerklassen

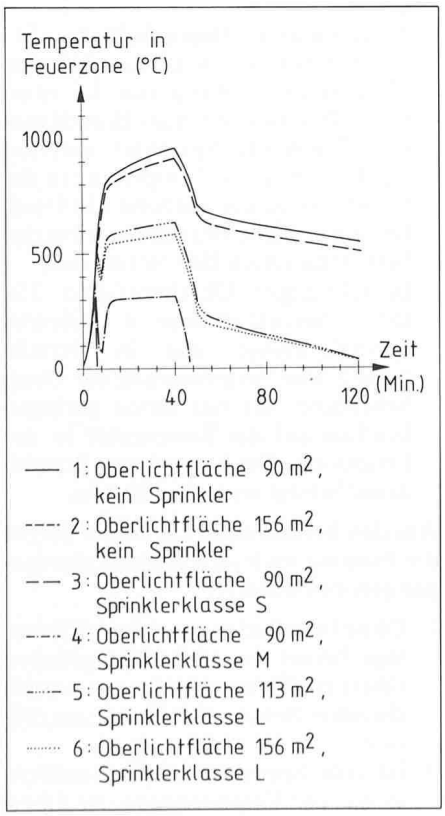
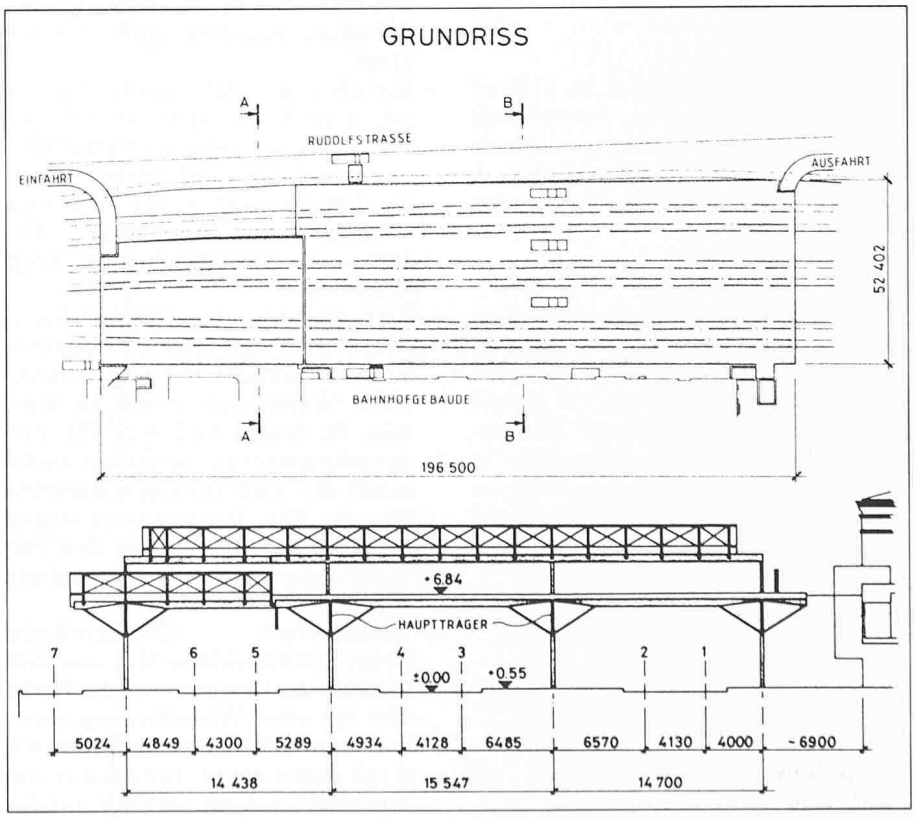


Bild 28. Grundriss und Schnitt des Parkhauses über den Geleisen des Bahnhofes Winterthur



Berechnung Nr.	*Bereich*	*Brandlast*	*Brandherd*	*Brandraum*	*Temperatur* [°C]
1	Perron	10 000 kg	5× 6 m	5× 6 m	556
2	(Bild 31)	Holz		7× 8 m	431
3				11×12 m	305
4	Geleise	30 000 kg	2× 9 m	3×18 m	439
5	(Bild 32)	Benzin	3×18 m	5×20 m	380
6				7×22 m	337
7				11×26 m	278
8	Perron 1	10 000 kg	5× 6 m	5× 6 m	692
9	(Bild 33)	Holz		6× 8 m	595
10				7×10 m	518
11				9,5×15 m	391
12	Stützenachse			9,5× 6 m	493

Tabelle 3. Simulationsrechnungen: Parameter und errechnete Temperaturen in der Feuerzone

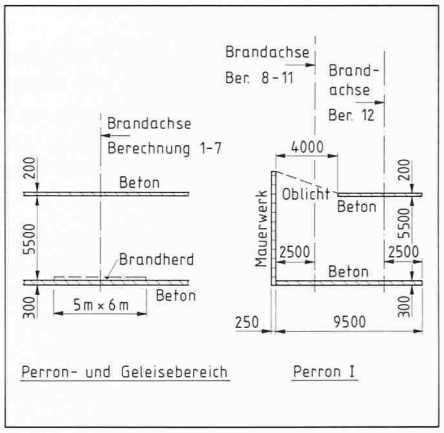
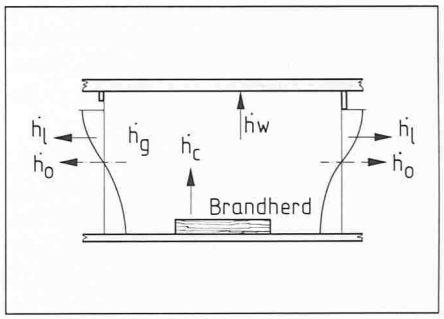


Bild 29. Zugeordneter Brandraum im Perron und Geleisebereich für die Brandsimulationsberechnung

Tabelle 4. Ausnutzungsgrad, kritische Temperatur für die Tragelemente und maximale Gas-Temperatur

Tragelement		*Profil*	*Spannung* [N/mm²]	*Fliess-grenze* [N/mm²]	*Ausnut-zungsgrad*	*Temperatur* [°C] *kritische*	*Gas*
Hauptstützen	(1)	RND 300	55	295	0.186	646	556
Hauptträger							
Obergurt	(2a)	HD 210*118	101	355	0.285	593	556
Untergurt	(2b)	HD 210*118	101	355	0.285	593	556
Streben	(2c)	HD 210* 87	110	355	0.310	582	556
Sekundärträger	(3)	IPE 450	73	235	0.311	582	439
Streben							
Sekundär-		ROR 121*4	30	235	0.128	696	556
träger	(4)	ROR 139*4	97	335	0.273	600	556
Oberlichtabstützung Perron 1							
Träger	(5)	IPE 450	23	235	0.100	700	692
Streben	(6)	ROR 121*4	23	235	0.100	700	692

Bild 30. Energieflüsse bei grossräumigen Verhältnissen mit grossen vertikalen Ventilationsöffnungen



von 400 MJ/m³ anzunehmen. Damit lässt sich die Gesamtbrandlast von 3 016 000 MJ (oder 180 000 kg Holzäquivalent) errechnen.

Abbrandrate

Mit vier Lagerungsebenen zu 1720 m² und einer spezifischen Abbrandrate von 15 kg/m² · h entsteht die maximale Abbrandrate von 4×15 kg/m² · h ×1720 m² / 60 = 1720 kg Holzäquivalent pro min.

Brandmodell

Der Brand beginnt in Brandraummitte auf einer Fläche von 4,00×4,00 m und breitet sich in allen Richtungen mit einer Geschwindigkeit von 3,00 m/min aus. Übersteigt die mittlere Energiedichte 2 W/cm² bzw. die Temperatur in der Feuerzone 570 Grad, so erfolgt der Feuersprung, der durch Erhöhung der Feuerausbreitungsgeschwindigkeit auf 30,00 m/min simuliert wird.

Brandbekämpfung

Durch Sprinkleranlage.

Die Brandsimulationsberechnungen ergaben folgende Resultate (Bild 27):

- Berechnung 1: Oberlichtfläche 90 m², kein Sprinklerschutz. Die Temperaturen in der Feuerzone erreichen bereits nach 10 min 800 Grad und steigen dann auf den Maximalwert von 960 Grad an. Selbst in der Abkühlphase liegen sie noch über 600 Grad.
- Berechnung 2: Oberlichtfläche 156 m², kein Sprinklerschutz. Obwohl die maximal mögliche Oberlichtöffnung eingesetzt wird, verhalten sich die Temperaturen in der Feuerzone ähnlich wie in Berechnung 1. Die Temperaturdifferenz beträgt lediglich 40 Grad.
- Berechnung 3: Oberlichtfläche 90 m², Sprinklerklasse S. Eingesetzt werden Sprinkler mit einer spezifischen Wasserleistung von 10 mm/min. In diesem Fall wird die Verdampfungsenergie viel grösser als die durch die Verbrennung freigesetzte Energie. Die Temperaturen sinken nach 6 min unter den für den Verbrennungsprozess notwendigen Wert; der Brand erlischt.
- Berechnung 4: Oberlichtfläche 90 m², Sprinklerklasse M. Unter dem Einfluss des Löschwassers der Sprinkler mit einer Wasserleistung von 5 mm/min fällt die kurzzeitig auf 400 Grad angestiegene Temperatur auf rund 300 Grad und verbleibt auf diesem Wert, bis in der Abkühlphase die Temperaturen unter den für die Verbrennung erforderlichen Wert absinken.
- Berechnung 5: Oberlichtfläche 113 m², Sprinklerklasse L. Sprinkler mit einer Wasserleistung von 2,5 mm/min. Obwohl nach einer Branddauer von 7 min die Sprinkler aktiviert werden, steigt die Temperatur in der Feuerzone weiter auf rund 630 Grad. Die äquivalente Brandddauer beträgt hier 20 min nach ISO-Normbrand.
- Berechnung 6: Oberlichtfläche 156 m², Sprinklerklasse L. Gleiche Sprinkleranlage wie in Berechnung 5. Die Vergrösserung der Oberlichtfläche hat nur einen geringen Einfluss auf die Temperatur in der Feuerzone. Die äquivalente Branddauer beträgt weiterhin 20 min.

Aus den Berechnungen konnten die für die Planung wichtigen Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Ohne Installation einer Sprinkleranlage bringt die Wahl der grössten Oberlichtfläche noch keinen ausreichenden Schutz der Tragkonstruktion.
2. Ist eine Sprinkleranlage installiert, so hat die Vergrösserung der Ober-

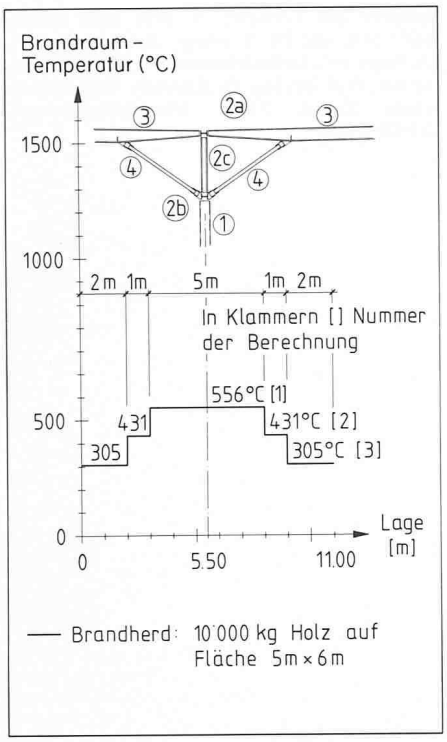


Bild 31. Temperaturverteilung im Perronbereich (Berechnungen 1 bis 3)

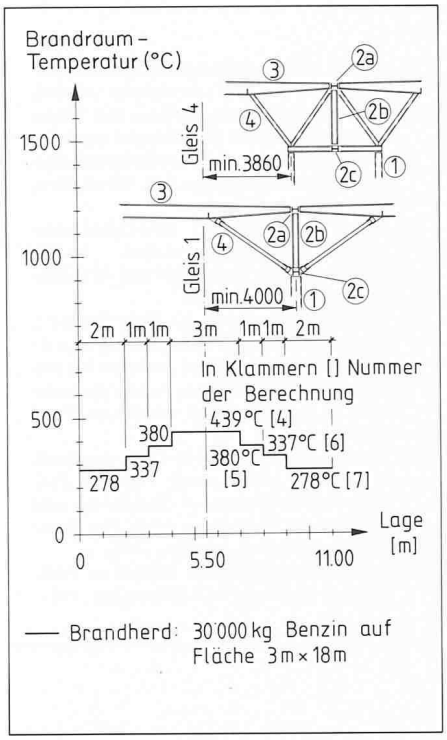


Bild 32. Temperaturverteilung im Geleisebereich (Berechnungen 4 bis 7)

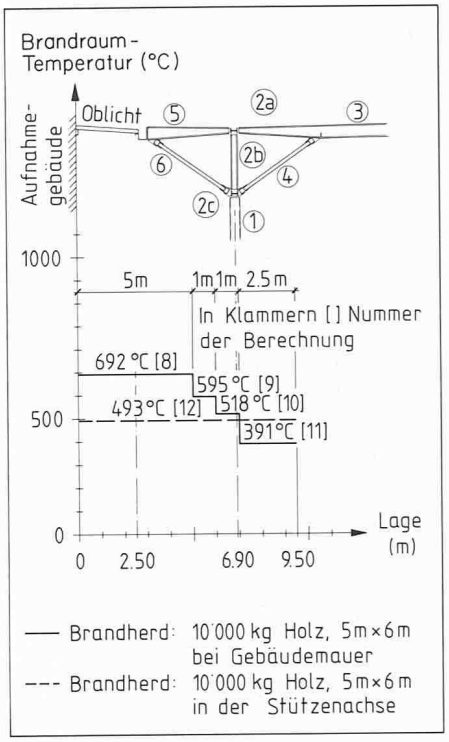


Bild 33. Temperaturverteilung im Bereich Perron 1 (Berechnungen 8 bis 12)

lichtfläche vom Minimalwert auf den Maximalwert nur einen geringen Einfluss auf die Temperatur im Brandraum.

3. Für den Schutz der Tragkonstruktion ist die Kombination von 90 m² Oberlichtfläche mit einer Sprinkleranlage der Klasse M ausreichend.
4. Für den Schutz des Lagergutes ist die Kombination von 90 m² Oberlichtfläche mit einer Sprinkleranlage der Klasse S erforderlich.
5. Die Anordnung einer zweiten Sprinklerebene ist nicht notwendig.

Beispiel für Konstruktion

Über den Geleisen und den Perrons des Bahnhofs Winterthur wird zurzeit ein zweistöckiges offengebautes Parkhaus errichtet. Insgesamt werden etwa 9000 m² des Bahnhofareals überbaut (Bild 28).

Die Simulationsberechnungen sollen für diesen Bau den Nachweis der Brandsicherheit für die tragenden Stahlelemente erbringen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Brandmodelle durchgerechnet und aufgrund der erhaltenen Brandraumtemperaturen die Stahlelemente überprüft.

Folgende Annahmen wurden mit den zuständigen Behörden vereinbart und den Berechnungen zugrunde gelegt:

Brandlast

Im Perronbereich: 10 000 kg Holz, fünf brennbare Oberflächen pro Meter Stapelhöhe, was z.B. übereinanderliegenden Holzpaletten entspricht. Hier und auch im Geleisebereich ist die Luftzufuhr praktisch unbegrenzt; die Abbrandrate wird daher durch die Brandbelastung (Anordnung, Menge, Heizwert) bestimmt. Mit einer Stapelhöhe von 4,00 m wird die spezifische Abbrandrate 600 kg/m² · h, womit bei einem Brandherd von 30 m² Grösse eine Abbrandrate von 18 000 kg Holz pro Stunde entsteht. Die gesamte Brandlast wird in etwa 33 min abgebrannt, d.h. die Branddauer ist extrem kurz und der Brand entsprechend heftig.

Im Geleisebereich: 30 000 kg Benzin in einer offenen Wanne mit einer spezifischen Abbrandrate von 190 kg/m² h. Bei einer Brandherdfläche von 54 m² entsteht eine Abbrandrate von 10 260 kg Benzin pro Stunde. In diesem Fall beträgt die Branddauer etwa 3 Stunden und ist somit extrem lang. Der Fall des Siedens von Benzin wurde nicht betrachtet.

Brandmodell

Das Brandmodell entspricht einem Naturbrand. Es wurde angenommen, dass die Verbrennung vollständig sei, und dass gleich von Brandbeginn an die volle Abbrandgeschwindigkeit herrsche.

Brandraum

Sowohl für den Perron- wie auch für den Geleisebereich wurde eine Raumhöhe von 5,50 m angenommen. Oben wird der Brandraum von einer 20 cm dicken, unten von einer 30 cm dicken Betonplatte begrenzt (Bild 29).

Zur Erfassung der Verteilung der Lufttemperaturen in der Ebene wurden nach der Methode der zugeordneten Brandräume im Perronbereich die Grundrissflächen variiert zwischen 5,00×6,00 m und 11,00×12,00 m, im Geleisebereich zwischen 3,00×18,00 m und 11,00×26,00 m.

Der Perron- und auch der Geleisebereich ist durch die Grossräumigkeit und durch die Möglichkeit der sehr grossen Luftzufuhr bzw. -abfuhr und Wärmeabstrahlung charakterisiert (Bild 30). Zudem tritt die Brandbelastung nur örtlich begrenzt auf. Dadurch ensteht ein ganz anderer Brandverlauf als er in weitgehend geschlossenen Räumen bekannt ist.

Insgesamt wurden 12 Berechnungen durchgeführt. Die wichtigsten Parameter und die in der Vollbrandphase errechneten Temperaturen in der Feuerzone sind in der Tabelle 3 ersichtlich.

Die Zusammenstellung in der Tabelle 4 zeigt für die betrachteten Tragelemente den Ausnutzungsgrad, die kritische Temperatur und die maximale Gas-Temperatur.

Der Vergleich der kritischen Temperatur mit der Brandraumtemperatur zeigt, dass die Tragkonstruktion im Brandfall ungefährdet bleibt und das Bauwerk brandsicher ist.

Literatur

[1] *Magnusson, S. E.; Thelandersson, S.* Temperature-Time Curves of Complete Process of Fire Developement. Acta Polytechnica Scandinavica Nr. 65, Stockholm 1970.

[2] *Schneider, U; Haksever, A.* Probleme der Wärmebilanzrechnung von natürlichen Bränden in Gebäuden. Bauphysik 1981, H. 1.

[3] *Babrauskas, V.* COMPF2 - A Program for Calculating Post-Flashover Fire Temperatures. National Bureau of Standards. Technical Note 991. Washington 1979.

[4] *Bryl, S.* BSBG-Anleitung zum Simulationsprogramm für die Berechnung von lokalen Bränden in grossen prismatischen Räumen mit horizontalen und vertikalen Ventilationsöffnungen unter Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmassnahmen. Geilinger AG, Winterthur, 1986.

[5] *Bryl, S.* BSBK-Anleitung zum Simulationsprogramm für die Berechnung von voll entwickelten Naturbränden in prismatischen Räumen mit Türen und Seitenfenstern unter Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmassnahmen. Geilinger AG. Winterthur, 1986.

[6] *Bryl, S.* BSBS-Anleitung zum Simulationsprogramm für voll entwickelte Modellbrände in beliebigen Räumen mit Türen, Seitenfenstern und Oberlichtern unter Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmassnahmen. Geilinger AG. Winterthur, 1985.

[7] Brandrisikobewertung, Berechnungsverfahren. SIA-Dokumentation Nr. 81. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1984.

[8] *Kruppa, J.; Lamboley, G.* Contribution à l'étude des incendies dans les bâtiments de grand volume réalises en construction métallique. CTICM Centre technique industriel de la construction métallique. Puteau 1983.

[9] *Butcher, E. G.; Langdon, G. J.; Bredford, G. K.* Fire and car-park building. Fire Note No 10. Ministry of Technology and Fire Offices' Committee Joint Fire Research Organization. London, 1968.

[10] *Bryl, S.* Simulation der Brände in Parkhäusern. Geilinger AG. Winterthur, 1985.

Adressen der Verfasser: *S. Bryl*, dipl. Bauing. AGH/SIA, und Dr. *T. Frangi*, dipl.Bauing. ETH, Geilinger AG, Grüzefeldstrasse 47, CH-8401 Winterthur; Prof. Dr.-Ing. *U. Schneider*, Gesamthochschule Kassel, FB 14, Mönchebergstrasse 7, D-3500 Kassel.

Last-Verschiebeverhalten von Befestigungen auf Beton mit Schwerlastankern

Von Hansjörg Candrian, Schaan

Bei fast jedem Bauwerk müssen Anschlüsse vom konstruktiven Beton zu irgendwelchen Metallstrukturen ausgeführt werden. Dies können z.B. bei der Mischbauweise Elemente des Stahlbaus sein: Stützen und Träger oder Einbauteile, Maschinen, Rohrleitungen oder Verkleidungen. Nebst der traditionellen Einlegemontage in Form von Armierungseisen, Kopfbolzen, Ankerplatten und Ankerschienen, hat die Bohrmontage, bei der Dübel in Bohrlöcher des fertigen Bauwerks gesetzt werden, eine weite Verbreitung gefunden.

Eine grosse Auswahl von Dübeln, welche für den jeweiligen Untergrund und die Einsatzbedingungen optimiert sind, steht im Installationsbereich für kleinere Lasten zur Verfügung. Der ingenieurmässige Einsatz von Dübeln konzentriert sich jedoch auf die Befestigungen im schweren Lastbereich, d.h. überall dort, wo Befestigungen nach einer statischen Berechnung ausgelegt werden und die Dimensionierung einem Sicherheitskonzept unterliegt. Nebst der Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit werden von einer Schwerlastbefestigung auch hohe Anforderungen an das Verhalten bei der Montage und im Gebrauchszustand gestellt.

Bild 1 zeigt einen Schwerlastanker, welcher den modernen Kriterien der Bautechnik entspricht. Die empfohlenen Gebrauchslasten werden üblicherweise mit dem Sicherheitsfaktor 3 gegen Bruch versehen. Sie reichen z. B. für eine M24 Ankerdimension, je nach Betonfestigkeit, in Zugrichtung bis etwa 40 kN.

Der Dübel verankert sich im Bohrloch mittels des Spreizmechanismus, bestehend aus Konus und Spreizhülse. Während dem Anziehen des Dübels verschiebt sich der Konus innerhalb der Spreizhülse und presst diese gegen die Bohrlochwandung. Dabei behält die Spreizhülse ihre Lage gegenüber dem Bohrloch bei. In einer Kombination von Reib- und Formschluss können sodann Zugkräfte in den Beton eingeleitet werden. Bei Beanspruchung durch Querkräfte unterliegt der Dübel einer zusammengesetzten Beanspruchung bestehend aus Scherung, Biegung und Zug.

Einige Eigenschaften, durch die sich eine Schwerlastbefestigung auszeichnet, sind zuverlässige Funktion, definiertes Last- und Verschiebeverhalten sowie Handhabungsfreundlichkeit. Handhabungsfreundlichkeit bedeutet u. a., dass der Dübel während dem Anziehen nicht durchdreht, was beim HSL

Bild 1. Schwerlastanker Hilti® HSL

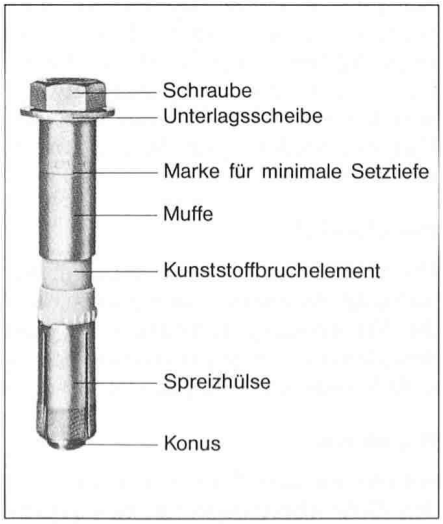
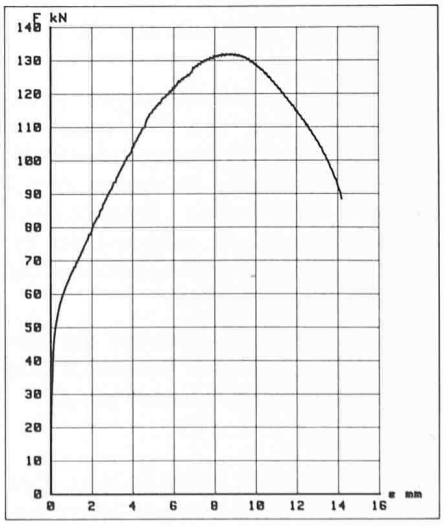



Bild 2. Last-Verschiebungskurve Schwerlastanker HSL M16