

**Ermittlung und Bewertung von  
Brandkenngrößen und  
Erarbeitung einer Datenbank**

**T 3220**

T 3220

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8127-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

## **ABSCHLUSSBERICHT**

### Ermittlung und Bewertung von Brandkenngrößen und Erarbeitung einer Datenbank

Im Auftrag des  
Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt),  
Kolonnenstraße 30 L, 10829 Berlin  
(Aktenzeichen ZP 52-5-4.166-1277/07)

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hossler  
Dr.-Ing. Olaf Riese

November 2008

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
INHALTSVERZEICHNIS .....	2
WICHTIGE ABKÜRZUNGEN, INDIZES UND SYMBOLE .....	4
1 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE .....	5
2 LITERATURRECHERCHEN.....	7
2.1 Brandrelevante Kenngrößen.....	7
2.2 Nachweis des Schutzzieles „Standicherheit der Konstruktion“ .....	8
2.3 Nachweis des Schutzzieles „Personensicherheit“ .....	8
2.3.1 Die Höhe der raucharmen Schicht.....	9
2.3.2 Die Erkennungsweite von Objekten.....	9
2.3.3 Die toxische Wirkung von Brandgasen .....	10
2.3.4 Zuluftverhältnis .....	12
2.4 Energiefreisetzungsrate .....	13
2.5 Standardversuche zur Bestimmung von Brandkenngrößen .....	14
2.6 International durchgeführte Versuche und Datenbanken .....	16
2.7 Korrelation von Brandkenngrößen bei Labor- und Großbrandversuchen.....	18
3 AM IBMB DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE .....	20
3.1 Überblick.....	20
3.2 Chemikalienlager /HOS 00/ .....	20
3.2.1 Kleinmaßstäbliche Versuche in der Cone-Kammer .....	20
3.2.2 Großmaßstäbliche Versuche im Room-Corner-Test mit reinen Brandlasten	24
3.2.3 Raumbrandversuche in der Brandkammer „Oskar“ mit realen Lageranordnungen .....	26
3.2.4 Vergleich der Ergebnisse der Cone-Kammer und des Room-Corner-Test ..	37
4 ZEITVERLAUF BRANDRELEVANTER KENNGRÖSSEN .....	42
4.1 Charakteristische Brandphasen.....	42
4.2 Energiefreisetzungsrate: Design-Feuer .....	43
4.2.1 Berücksichtigung eines Flashovers .....	47
4.2.2 Einschränkung der Energiefreisetzungsrate am Beispiel von CFAST .....	47

4.3	Größen zur Beschreibung der Sichtverhältnisse in einer Rauchsicht .....	51
4.3.1	Extinktionskoeffizient .....	51
4.3.2	Erkennbarkeit.....	54
4.4	Wirkung toxischer Komponenten .....	54
5	VERSUCHSMATRIX FÜR DIE BESTIMMUNG VON BRANDKENNGRÖSSEN .....	57
6	NTWURF DER STRUKTUR EINER NATIONALEN DATENBANK .....	59
7	ZUSAMMENFASUNG UND AUSBLICK .....	59
8	LITERATUR .....	61

## WICHTIGE ABKÜRZUNGEN, INDIZES UND SYMBOLE

Abkürzungen	Englische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
CFAST	Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport	-
FDS	Fire Dynamics Simulator	-
GER	Global Equivalence Ratio	globales Äquivalenzverhältnis
HOC	Heat Of Combustion	Verbrennungswärme
HOG	Heat Of Gasification	Vergasungswärme
HRR	Heat Release Rate	Energiefreisetzungsrate
IEC	International Electronic Commission	-
LOL	Lower Oxygen Limit	
MLR	Mass Loss Rate	Abbrandrate
NIST	National Institute for Standards and Technology	-
RCT	Room Corner Test	-
SBI	Single Burning Item	-
SPR	Smoke Production Rate	Rauchentwicklungsrate
SEA	Specific Extinction Area	Spezifische Extinktionsfläche
Y	Yield	Ausbeute
ZLV		Zuluftverhältnis
Indizes	Englische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
eff	effective	effektiv
Ext	extinction	Extinktion
f	fuel	Brennstoff
m	mass specific	massenspezifisch
Rauch	smoke	Rauch
Ruß	soot	Ruß
Sy	symbol	Symbol

## 1 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

Nach dem Grundlagendokument „Brandschutz“ /HER 00/ Wesentliche Anforderungen Nr. 2 können Ingenieurmethoden angewendet werden, wenn sichergestellt ist, dass die Rechen- und Bemessungsverfahren auf abgestimmter Basis anerkannt sind. Im nationalen und internationalen Bereich wurden Papiere zum „Fire Safety Engineering“ FSE in Form eines Leitfadens oder code of practice vorgelegt. Bei der Anwendung der Rechenmodelle zur Ermittlung der Brandwirkungen müssen als Eingangsdaten der Verlauf der Energiefreisetzungsrates oder der Abbrandrate vorgegeben werden. Für die Praxis zeigt sich, dass in der Literatur Daten über den Abbrand unterschiedlicher Materialien vorhanden sind, diese aber teilweise stark streuen oder nur Zustände gut ventilierter Randbedingungen wiedergeben.

Ziel des Vorhabens ist die Sammlung bzw. Ermittlung brandbestimmender Parameter für Produkte und Materialien in variiertem Anordnungs- und bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen, um daraus Eingangsdaten hinsichtlich der Energiefreisetzung, der Rauchdichte sowie toxischer Potenziale für die Anwendung von Brandraummodellen im Bereich des FSE abzuleiten. Diese Untersuchungen sollen als Grundlage für eine nationale Datenbank und zugleich als deutscher Beitrag zur Erarbeitung einer europäischen Datenbank dienen.

Innerhalb des Forschungsvorhabens sollten ursprünglich in der ersten Phase Versuche an einem Produkt in unterschiedlicher Anordnung und bei variiertem Ventilation durchgeführt werden. Daraus sollte abgeleitet werden, welche Art von Daten unter welchen Randbedingungen geeignet und erforderlich sind, um in der Praxis des FSE verwendet zu werden. Die erforderlichen experimentellen Untersuchungen sollten in einem Brandraum im Realmaßstab bei guter, mittlerer und schlechter Ventilation des Brandraumes durchgeführt werden. Bei den Versuchen sollten die Brandlastfläche und -verteilung sowie die Stapelhöhe variiert werden und es sollten die lokalen Temperaturen, die Rauchdichte und toxische Kenngrößen im Abgas sowie die Energiefreisetzungsrates erfasst werden. Aus den Ergebnissen sollte ein Vorschlag erarbeitet werden, welcher Prüfumfang zukünftig erforderlich ist, um Daten eines Brandgutes in eine für die Praxis geeignete Datenbank einzubeziehen. Anschließend sollte die Struktur für eine Datenbank entworfen werden.

Bald nach Beginn der Bearbeitung kamen Zweifel auf, ob die ursprünglich angedachte Reihenfolge - zuerst einige großmaßstäbliche Versuche durchzuführen und daraus die Vorgehensweise zur Datenermittlung abzuleiten – tatsächlich sinnvoll ist und beibehalten werden kann. Es wurde die Gefahr gesehen, entweder bereits vorliegende Versuchsergebnisse zu reproduzieren oder bei andersartigen Randbedingungen auf zusätzliche Fragestellungen zu stoßen, die nur durch weitere Versuche zu klären sind. Generell war nicht davon

auszugehen, dass die Versuchsergebnisse für einen ausgewählten brennbaren Stoff geeignet sind, daraus verallgemeinerte Aussagen abzuleiten. Daher wurde entschieden, zunächst in einer eingehenden Literaturstudie die international verfügbaren bzw. diskutierten Angaben zu Brandkenngrößen zusammenzutragen und insbesondere die am iBMB durchgeführten und gut dokumentierten klein- und großmaßstäblichen Versuche zum Brandverhalten unterschiedlicher Stoffe nochmals gezielt auszuwerten. Auf dieser Grundlage sollte dann die Entscheidung über die benötigten Brandkenngrößen in einer nationalen Datenbank gefällt werden.

Zwischenzeitlich hat sich diese Vorgehensweise bereits als sehr nützlich erwiesen, denn es konnte eine große Anzahl von gut dokumentierten Versuchen mit erheblichem Potenzial für die weitere Verwendung im Vorhaben identifiziert werden. Leider waren die intensiven Recherchen mit erheblichem zeitlichem Aufwand verbunden. Dadurch war es im vorgegebenen engen Kostenrahmen nicht mehr möglich, teure großmaßstäbliche Versuche zu planen. Gleichzeitig ist klar geworden, dass bei den künftigen Ermittlungen von Brandkenngrößen aus Kostengründen und wegen der Reproduzierbarkeit primär auf Kleinversuche zurückzugreifen. Dazu eignet sich besonders die sog. Cone-Kammer (ein Cone-Kalorimeter in Anlehnung an ISO 5660-1 mit steuerbarer Zuluft), mit dem auch Daten für unterventilierte Verhältnisse gewonnen werden können, die sich auf reale Brände übertragen lassen. Hingegen ist die Untersuchung der Abhängigkeit des Brandverhaltens von der Anordnung und Stapelung von Brandgütern mit Kleinversuchen nicht zu klären. Es wird angeregt, in einem Folgeprojekt eine Serie von Versuchen in der Cone-Kammer durchzuführen und die Ergebnisse mit Hilfe von Großversuchen für ausgewählte Randbedingungen zu validieren. Auf diese Weise können die Ziele des Vorhabens im Hinblick auf die Ventilationsabhängigkeit auf einer breiteren experimentellen Datenbasis erreicht werden.

Aus eigenen Großversuchen am iBMB mit flüssigen (Glykol) und festen (Polyethylen, Holzkrippen) Brandgütern liegen bereits einige wichtige Ergebnisse vor. Bisher liegen aber keine Untersuchungen mit Holz-Brandlasten in der Cone-Kammer vor. Solche Versuche sollten in einem Folgevorhaben bei variiertem Ventilation durchgeführt und mit Großbrandversuchen aus der Literatur verglichen werden.

Auf Grundlage der Literaturstudie wurde eine Versuchsmatrix aufgestellt, in der die bisherigen Erkenntnisse zur Gewinnung von Brandkenngrößen berücksichtigt sind. Für die identifizierbaren Brandkenngrößen wurden Formeln angegeben, mit denen aus den Daten in einer entsprechenden Datenbank weitere brandrelevante Größen, z. B. notwendige Angaben für die Bewertung von Schutzzielen, abgeleitet werden können. Offen bleibt jedoch die Frage des Einflusses der unterschiedlichen Anordnung bzw. Stapelung von Brandgütern.

Die hier dargestellte Vorgehensweise kann nur als Einstieg in die Erstellung einer nationalen bzw. europäischen Datenbank der Brandkenngrößen angesehen werden. Im nächsten Schritt ist es notwendig, die Vorschläge zur Einrichtung der Datenbank weiter zu entwickeln und die Datenbank Zug um Zug zu füllen. Dazu sind im Rahmen von Folgeprojekten ergänzende Versuche an weiteren Materialien entsprechend der ermittelten Systematik durchzuführen. Zusätzlich sind bereits vorhandene Daten bzw. Datenbanken im nationalen und internationalen Bereich daraufhin zu überprüfen, ob sie für die Übernahme in die neue Datenbank geeignet sind oder ggf. mittels ergänzender Versuche tauglich gemacht werden können.

In den folgenden Jahren ist sicherzustellen, dass die Datenbank betreut und fortgeschrieben wird und neue Daten aus Experimenten in die Datenbank aufgenommen werden. Nur so kann der Praxis eine aktuelle Datenbank mit abgesicherten Eingangsdaten für das FSE auf Dauer zur Verfügung gestellt werden.

## **2 LITERATURRECHERCHEN**

### **2.1 Brandrelevante Kenngrößen**

Als brandrelevante Kenngrößen sollen im Weiteren alle Angaben verstanden werden, die für eine repräsentative Beschreibung des Brandverlaufs erforderlich sind. Zur Beschreibung des Brandes dienen insbesondere die verschiedenen „Quellterme“:

- Energiefreisetzungsrate,
- Freisetzung von Rauch und sichtrübenden Partikeln und
- Freisetzung toxischer Produkte

Die das Feuer charakterisierenden Brandkenngrößen sollen im Weiteren als Eingabe für ingenieurmäßige Verfahren dienen, mit denen Grenzzustände bzgl. der Einhaltung der Schutzziele berechnet werden können. Zu den ingenieurmäßigen Verfahren gehören:

- Zonenmodelle,
- Feldmodelle und
- analytische Gleichungen.

Eine Eigenschaft des Brandes ist seine starke Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen. Bei den hier festgelegten Brandkenngrößen muss daher insbesondere darauf geachtet werden, welchen Einfluss die Ventilationsbedingungen haben, bzw. welche Angaben nötig

sind oder in Zukunft erarbeitet werden müssen, um diese Randbedingung „auf der sicheren Seite liegend“ berücksichtigen zu können.

## 2.2 Nachweis des Schutzzieles „Standsicherheit der Konstruktion“

Als Nachweiskriterien für das Schutzziel „Standsicherheit der Konstruktion“ stehen zur Verfügung:

- thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und –konvektion
  - Angabe der kritischen Wärmestromdichte
- Einwirkungen über Temperaturen
  - im Plume,
  - in der Heißgasschicht,
  - in lokalen Bereichen des Raumes bzw.
  - an der Bauteiloberfläche und in Bauteilen.

## 2.3 Nachweis des Schutzzieles „Personensicherheit“

Als Nachweiskriterien für das Schutzziel „Personensicherheit“ stehen zur Verfügung:

- die Höhe der raucharmen Schicht,
- die Qualität der raucharmen Schicht wie
  - die Erkennungsweite von Objekten oder
  - die Auswirkungen toxischer Gase und
- thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und –konvektion.

Hierbei ist z. B. die Kenntnis von Druckunterschieden<sup>1</sup> bei den Nachweiskriterien der Personensicherheit (speziell der Entrauchung) von erheblicher Bedeutung. Bei der Funktion von Rauchabzugsanlagen (RWA) müssen die durch die Branddynamik erzeugten Druckunterschiede berücksichtigt werden, da die vorgegebenen Volumenströme nur mit einer von der RWA abhängigen Kennlinie gefahren werden können. Liegt der Druck über einem von der Kennlinie abhängigen Wert kann ein vorgegebener Volumenstrom nur reduziert bzw. nicht mehr gefahren werden. In einigen Brandsimulationsmodellen /JON 05/ können die Kennlinien von RWA tatsächlich berücksichtigt werden. Wichtig hierbei ist auch die realis-

---

<sup>1</sup> Die Berechnung von Druckunterschieden in mathematischen Modellen (Zonen- und Feldmodelle) erfolgt auf Grundlage numerischer Lösungsverfahren denen die Energie- und Massenerhaltung (Zonenmodelle) und zusätzlich die Impulserhaltung (Feldmodelle) zu Grunde liegt.

tische Beschreibung der Randbedingungen (im Sinne der Strömungsverhältnisse) am Rand eines Gebäudes.

### **2.3.1 Die Höhe der raucharmen Schicht**

Das am einfachsten berechenbare Kriterium ist die Höhe der raucharmen Schicht. Zur Bestimmung einer Höhe der raucharmen Schicht werden die HRR bzw. die MLR als wesentliche Eingangsgröße des Brandszenarios benötigt. Wird die Ableitung der rauchgasarmen Schicht aus der Angabe von Temperaturprofilen hergeleitet (z. B. bei Zonenmodellen), sind weitere Angaben z. B. zur Brandchemie nicht erforderlich. In diesem Fall ist es konsequenter, von einer thermischen Trennschicht zwischen der Heiß- und der Kaltgasschicht zu sprechen.

Bei dem Einsatz eines Feldmodells ist prinzipiell eine Bestimmung der rauchgasarmen Schicht über die Berechnung der Verteilung der Rußpartikel (bzw. der Rußpartikeldichte) sinnvoll. Die Rußpartikeldichte kann auch als Maßstab für die Erkennungsweite von Objekten herangezogen werden (siehe Kapitel 2.3.2). Für die Bestimmung von Größen auf Grundlage der Rußpartikeldichte sind Angaben zur Verbrennungschemie notwendig, in den meisten Fällen wird die Angabe der Rußausbeute benötigt.

### **2.3.2 Die Erkennungsweite von Objekten**

Mit Bezug auf die Qualität innerhalb der raucharmen Schicht ist die Erkennungsweite von Objekten und/oder die Auswirkungen toxischer Gase nachzuweisen.

Die vereinfachte Bestimmung der Erkennungsweite (häufig auch Sichtweite genannt) von einem Raumpunkt aus, bei dem von einer homogenen Rußkonzentration (Rußpartikeldichte) ausgegangen wird, ist im Leitfaden /HOS 06/ beschrieben und wird so z. B. im Feldmodell Fire Dynamics Simulator /MCG 08/ angewandt. Genauere Aussagen sind hier erzielbar, wenn an Stelle der Betrachtung eines Punktes die Rußkonzentration auf der Strecke zwischen zwei Punkten, d. h. des Betrachterauges und eines zu erkennenden Objekts (i. d. R. die Rettungswegbeschilderung) ausgewertet wird /HUS 04/. Zur Bestimmung der optischen Eigenschaften der Brandgase muss die Ausbeute an lichttrübenden Rauchgaskomponenten bekannt sein, die in der Regel als Rußausbeute  $Y_s$  /HOS 06/, /MCG 08/ angenommen wird. Die lokale Rußmassenkonzentration im Brandraum wird mittels Brandsimulationsmodell bestimmt. Das Bindeglied zwischen der lokalen Rußmassenkonzentration und optischen Eigenschaften des Brandrauchs stellt der massenspezifische Extinktionskoeffizient  $K_m$  dar. Für mehr Details siehe Kapitel 4.3.1.

### 2.3.3 Die toxische Wirkung von Brandgasen

Bezüglich der toxischen Wirkung von Brandgasen ist zwischen der akuten Toxizität (Giftwirkung nach einmaliger oder kurzzeitiger Aufnahme) und der chronischen Toxizität (Giftwirkung nach wiederholter Aufnahme während längerer Zeit) zu unterscheiden. Für während des Brandgeschehens exponierte Personen spielt die akute Toxizität die entscheidende Rolle, während z. B. bei der Brandschadenssanierung die Bedeutung der chronischen Toxizität überwiegt /VDS 07/. Auf letztere soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.

Die akute Toxizität lässt sich bzgl. ihrer Schadwirkungen auf den Menschen in die erstickende Wirkung, d. h. Störung des Sauerstoffaustausches im Blut, und die Reizwirkung auf den Atemtrakt und die Augen einteilen. Entsprechend wird bzgl. der Schadgase zwischen Stickgasen und Reizgasen unterschieden.

Die im Brandfall auftretenden Stickgase sind Kohlenmonoxid (CO), Cyanwasserstoff (HCN) und in höheren Konzentrationen ebenfalls Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Daneben fördert die Absenkung der Sauerstoffkonzentration den Vergiftungsvorgang /PUR 02/, /ISO 07/.

Zu den Reizgasen zählt eine große Anzahl von im Brandfall frei werdenden Verbindungen. Es lässt sich aber eine kleine Zahl von Leitkomponenten bestimmen, die auf Grund ihrer relativen Freisetzungsmenge und der jeweiligen Schadwirkungen die akute Toxizität des Gasgemisches dominiert.

Eine ausführliche Studie zu den akut toxischen Leitkomponenten im Brandfall im Hinblick auf den Feuerwehreinsatz wurde von Buff und Greim /BUF 97/ vorgelegt. Hiernach sind CO, HCN, Salzsäuregas (HCl) und Formaldehyd (HCHO) die bedeutendsten Leitkomponenten im Brandfall. In Abhängigkeit der Brandgutzusammensetzung kann diese Liste um die Stoffe Acrolein (CH<sub>2</sub>CHO) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) als nächst-relevante Gase erweitert werden.

Eine Untersuchung /ORT 95/ mit dem Schwerpunkt auf Kunststoffbränden führt zum gleichen Ergebnis – ebenfalls bezogen auf die nachrangige Bedeutung von Acrolein gegenüber Formaldehyd. Schwefeldioxid wird dabei nur als bedeutende Komponente erachtet, falls der Schwefelgehalt in der Brandlast fünf Massenprozent erreicht.

In einer Arbeit des amerikanischen NIST zur Quantifizierung von Schadwirkungen mit dem N-Gas Model /BAB 98/ wird davon ausgegangen, dass eine Anzahl von N-Gasen die akute Toxizität umfänglich beschreibt. Als N = 5 Leitkomponenten wurden hier CO, HCN, HCl, HBr, CO<sub>2</sub> und zusätzlich die Sauerstoffabnahme betrachtet. Aus den Konzentrations-Zeitverläufen der Gase wurde eine Fraktionelle Effektive Dosis (FED<sub>NIST</sub>) bestimmt. Die Rechenvorschrift

für die  $FED_{NIST}$  ist so aufgestellt, dass definitionsgemäß bei  $FED_{NIST} = 1$  die Hälfte der Versuchstiere (Nagetiere) an den Brandgasen verstirbt. Aus durchgeführten Tierversuchen wurde berichtet, dass wegen geringfügiger Nichtlinearitäten in der Dosiswirkung die erwartete 50 %-Letalität bei einem  $FED_{NIST}$  von 1,1 innerhalb eines 95 % Vertrauensbereichs von  $\pm 0,2$  aufgetreten ist.

Der Stand der Technik in der Quantifizierung von toxischen Schadwirkungen auf den Menschen sind Dosismodelle<sup>2</sup>, die auf den Arbeiten von Purser /PUR 02, ISO 13571/ beruhen. Abweichend von den Arbeiten des NIST ist die FED hier für Fluchtunfähigkeit (Verwirrtheit, Bewusstlosigkeit, bzw. Zustand der Handlungsunfähigkeit) an Stelle von Tod als Referenz für  $FED = 1$  definiert. Im FED für Stickwirkungen werden wiederum CO, HCN, O<sub>2</sub>-Mangel und CO<sub>2</sub> berücksichtigt, wobei hier CO<sub>2</sub> nicht nur als direktes Schadgas, sondern ebenfalls als das die Aufnahmerate (Hyperventilation) fördernde Gas berücksichtigt wird.

Daneben werden Modelle für die Berücksichtigung der Reizwirkungen aufgeführt, die sich prinzipiell auf beliebig viele Komponenten anwenden lassen, da eine additive Wirkung der einzelnen Reizgase angenommen wird. Die nach Purser relevantesten Reizgase und ihre letale Dosis (LED) werden in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Letale Dosen (50 % der Population) brandrelevanter Reizgase /PUR 02/.

Reizgas	chemische Struktur	LED [ppm * min]
Chlorwasserstoff	HCl	114.000
Bromwasserstoff	HBr	114.000
Flurwasserstoff	HF	87.000
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	12.000
Stickstoffdioxid	NO <sub>2</sub>	1.900
Acrolein	CH <sub>2</sub> CHO	4.500
Formaldehyd	HCHO	22.500

Zusammenfassend kann bezogen auf die Festlegung von Leitkomponenten für die akute Toxizität festgestellt werden, dass CO, HCN, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>-Mangel bzgl. Ihrer Stickwirkung betrachtet werden müssen, während sich die Reizgase in Gruppen einteilen lassen:

- Halogenwasserstoffe (fallende Relevanz): HCl, HBr, HF, HJ

<sup>2</sup> Obwohl die Dosismodelle dem Stand der Technik entsprechen muss festgehalten werden, dass sie im Bereich der Ingenieurmethoden bisher kaum zum Einsatz kommen /HOS 06/.

- Aldehyde (fallende Relevanz): HCHO, CH<sub>2</sub>CHO

- andere anorganische Reizgase:

NO<sub>2</sub> (keine hohe Bedeutung, Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen), SO<sub>2</sub> (Bedeutung in Abhängigkeit des Schwefelanteils im Brandgut).

Fragestellungen im Zusammenhang mit den Reizgasen sollen hier nicht weiter vertieft werden, da sie den akut toxischen Leitkomponenten in ihrer Bedeutung als Brandkenngrößen und der von Ihnen ausgehenden Bewertung von Brandverläufen nachstehen und zudem messtechnisch nur mit zusätzlichem hohem Aufwand zu erfassen sind (siehe auch Kapitel 4.4).

### 2.3.4 Zuluftverhältnis

Für eine vergleichende Beschreibung ist der Zuluftvolumenstrom als Parameter nicht geeignet /HOS 00/. Die Ventilationsbedingungen werden besser durch das Verhältnis von angebotener Zuluftmenge zu der für eine stöchiometrische Verbrennung notwendigen Luftmenge – das Zuluftverhältnis ZLV bzw. das globale Äquivalenzverhältnis GER als Kehrwert – charakterisiert. Der Nenner des ZLV bzw. Zähler des GER berechnet sich aus dem Produkt von Abbrandrate und Zuluftbedarf  $r$ .

$$\text{ZLV}(t) = \frac{1}{\text{GER}(t)} = \frac{\dot{m}_{\text{Zuluft}}(t)}{\dot{m}_{\text{Zuluft,min}}(t)} = \frac{\dot{m}_{\text{Zuluft}}(t)}{\dot{m}_{\text{Brennstoff}}(t) \cdot r} \quad (1)$$

$\dot{m}_{\text{Zuluft,min}}(t)$  : notwendiger Zuluftmassenstrom [g s<sup>-1</sup>]

$\dot{m}_{\text{Brennstoff}}(t)$  : Abbrandrate Brennstoff [g s<sup>-1</sup>]

$r$  : stöchiometrischer Luftbedarf [g<sub>Luft</sub> g<sub>Brennstoff</sub><sup>-1</sup>]

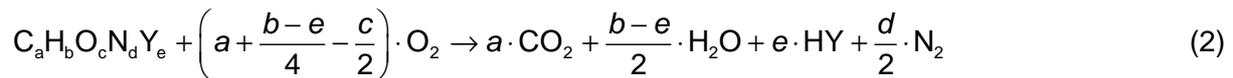
GER(t) : Äquivalenzverhältnis [1]

ZLV(t) : Zuluftverhältnis [1]

Theoretisch kann man drei Wertebereiche für das Zuluftverhältnis ZLV bzw. das globale Äquivalenzverhältnis GER unterscheiden:

- ZLV < 1 bzw. GER > 1 geringes Luftangebot, unterventiliert
- ZLV = 1 bzw. GER = 1 stöchiometrisches Luftangebot
- ZLV > 1 bzw. GER < 1 großes Luftangebot, überventiliert

Der stöchiometrische Luftbedarf kann bei bekannter chemischer Zusammensetzung der Brandlast berechnet werden. Dazu geht man von einer vollständigen Verbrennung, also Oxidation ohne Kohlenmonoxidbildung aus, die durch folgende chemische Reaktionsgleichung beschrieben werden kann:



C: Kohlenstoff	O <sub>2</sub> : molekularer Sauerstoff
H: Wasserstoff	CO <sub>2</sub> : Kohlendioxid
O: Sauerstoff	CO: Kohlenmonoxid
N: Stickstoff	N <sub>2</sub> : molekularer Stickstoff
Y: Halogen	HY: (z. B. Salzsäuregas HCl)
a: molarer Kohlenstoffanteil [mol <sup>-1</sup> ]	b: molarer Wasserstoffanteil [mol <sup>-1</sup> ]
c: molarer Sauerstoffanteil [mol <sup>-1</sup> ]	d: molarer Stickstoffanteil [mol <sup>-1</sup> ]
e: molarer Halogenanteil [mol <sup>-1</sup> ]	

Der stöchiometrische Luftbedarf für die Verbrennung berechnet sich aus der chemischen Zusammensetzung des Materials mit:

$$r = \frac{a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2}}{M_{\text{Brennstoff}}} \cdot V_{m0} \cdot \frac{1}{X_{O_2}^0} \cdot \rho_0 \quad (3)$$

a	: molarer Kohlenstoffanteil [mol <sup>-1</sup> ]
b	: molarer Wasserstoffanteil [mol <sup>-1</sup> ]
c	: molarer Sauerstoffanteil [mol <sup>-1</sup> ]
e	: molarer Halogenanteil [mol <sup>-1</sup> ]
M <sub>Brennstoff</sub>	: Molmasse Brennstoff [g mol <sup>-1</sup> ]
X <sub>O<sub>2</sub></sub> <sup>0</sup>	: Sauerstoffanteil in der Zuluft [1]
V <sub>m0</sub>	: molares Normvolumen [m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ], = 0,0224136 m <sup>3</sup> /mol
ρ <sub>0</sub>	: Dichte der Luft unter Normalbedingungen [g m <sup>-3</sup> ], = 1293 g/m <sup>3</sup>
r	: stöchiometrischer Luftbedarf [g <sub>Luft</sub> g <sub>Brennstoff</sub> <sup>-1</sup> ]

## 2.4 Energiefreisetzungsrate

Wesentliche Einflussgröße für die Nachweiskriterien zum Schutzziel „Standsicherheit der Konstruktion“ ist der Verlauf der Energiefreisetzungsrate. Diese bekommt auch bei dem Schutzziel „Personensicherheit“ Bedeutung, wenn die Höhe der Raumtemperatur als Nachweiskriterium hinzugezogen wird. In Kapitel 4.2 wird ein Verfahren zur Beschreibung sog. Design-Feuer aufgeführt. Mit einem Design-Feuer kann der mögliche Verlauf der Energiefreisetzungsrate eines Schadenfeuers auf Grundlage der jeweils notwendigen und in diesem Forschungsvorhaben benannten Brandkenngrößen hergeleitet werden. Grundsätzlich ist die

Angabe der Energiefreisetzungsrate  $\dot{Q}$  nicht eindeutig, da sie aus zwei Anteilen besteht, dem konvektiven  $\dot{Q}_{konv}$  und dem radiativen  $\dot{Q}_{rad}$  Anteil:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{rad} \quad (4)$$

Dieser Zusammenhang hat Bedeutung hinsichtlich der physikalischen Effekte, die bei einer Wärmequelle zum Tragen kommen und insbesondere bei einem Brandereignis eine Rolle spielen. In der Brandsimulation wird meistens eine Angabe des radiativen Anteils  $\chi_{Rad}$  bei der Wärmefreisetzung berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{rad} = \chi_{Rad} \cdot \dot{Q} \quad (5)$$

Da z. B. beim radiativen Strahlungsaustausch Temperaturen in der vierten Potenz eingehen, kann ein erhöhter Strahlungsanteil der freigesetzten Wärme gravierende Unterschiede für die Berechnung von Bauteiloberflächentemperaturen bedeuten.

## 2.5 Standardversuche zur Bestimmung von Brandkenngrößen

Zur Bestimmung von Brandkenngrößen werden international verschiedene Versuchseinrichtungen eingesetzt. Unabhängig von der Eignung verschiedener Meßsysteme deckt jede Versuchseinrichtung eine bestimmte Größenskala des realen Systems (Brennstoff/Brandlast) ab. Mit Versuchen in kleinen Skalen (Labormaßstab) können Parameterstudien wirtschaftlich durchgeführt werden, es werden aber mitunter nicht alle Randbedingungen des zu untersuchenden Brennstoffs erfasst. Durch Versuche in mittlerer und in großer Skala können Einflüsse sowohl auf der Seite des Brennstoffs (Anordnung, Befestigung, etc.) als auf der Seite der räumlichen Randbedingungen (Raumgeometrie, Zuluftverhältnisse, etc.) berücksichtigt werden.

Die zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist, ob und bis zu welchem Grad für bestimmte Brandkenngrößen die Ergebnisse der Versuche aus kleiner Skala in eine große Skala übertragen werden können. In Tabelle 2 ist eine Zusammenstellung national und international eingesetzter Versuchseinrichtungen zur Bestimmung von Brandkenngrößen aufgeführt. Eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung der Brand-Standardtests ist hierbei ihre Eignung für den Support von schutzziel- bzw. leistungsorientierten (performance-based) Ingenieurmethoden. An dieser Stelle kann es durchaus zielführend sein, neue Standards als Grundlage für die Bereitstellung von Daten für Ingenieurmethoden zu definieren bzw. vorhandene Standard-Testmethoden entsprechend zu ertüchtigen (/ISO TC 92/).

Tabelle 2 Zusammenstellung national und international eingesetzter Versuchseinrichtungen zur Bestimmung von Brandkenngrößen

Aufbau und Testbedingungen			ISO 5660 CONE <sup>1)</sup>	ASTM 2058 FPA	EN 13823 SBI <sup>1)</sup>	ISO 9705 RCT <sup>1)</sup>	Oskar <sup>1)</sup>
Versuchsskala			Klein	Mittel	Mittel	Groß	Groß
Typ Zuströmung			natürlich	Co-Strom / natürlich	natürlich	natürlich	natürlich
Sauerstoffkonzentration (%)			21 <sup>5)</sup>	0-60	21	21	21
Natürliche Öffnung			offen	offen	offen	maximal 0,8 * 2,1	maximal 0,7 * 3,6
Grundfläche (m)			-	-	-	2,4 * 3,6	3,6 * 3,6
Höhe (m)			-	-	-	2,4	3,6 - 5,6
externer Heizer			elektrisch	Quartz	kein Standard	kein Standard	kein Standard
externe Wärmestromdichte (kW/m <sup>2</sup> )			0-100	0-65	-	-	-
Abgasvolumenstrom (m <sup>3</sup> /s)			0,012 – 0,035	0,035 – 0,364	0,500 – 0,650	3,500	3,500
Maße horizontale Probe (mm*mm)			100 * 100	100 * 100	-	variabel <sup>2)</sup>	variabel
Maße vertikale Probe(n) (mm*mm)			100 * 100	100 * 600	495 * 1500 1000 * 1500	variabel <sup>2)</sup>	variabel
Zündquelle			Zündfunke	Pilotflamme	Gas-Brenner	Gas-Brenner	Gas-Brenner
Leistung Zündquelle			-	-	32	0 - 300	0 - 300
Maximale HRR (kW)			8	50	350 <sup>3)</sup>	1000	2500
Messgrößen	Kürzel	Einheit					
Entzündungszeit	IGT	s	✓	✓	✓	✓	✓
Eff. Verbrennungswärme	HOC <sub>eff</sub>	MJ/kg	✓	✓	-	KS <sup>4)</sup>	KS <sup>4)</sup>
Eff. Vergasungswärme	HOG <sub>eff</sub>	MJ/kg	✓ <sup>6)</sup>	✓ <sup>6)</sup>	-	-	-
Brand-Ausbreitungsrate	FPR	m/s	-	✓	-	KS	KS
Abbrandrate	MLR	kg/s	✓	✓	-	KS <sup>4)</sup>	KS <sup>4)</sup>
Energiefreisetzungsrate	HRR	kW	✓	✓	✓	✓	✓
Rauchproduktionsrate	SPR	l/m	✓	✓	✓	✓	✓
Brandentwicklungszeit	FDT	s	✓	✓	✓	✓	✓
O <sub>2</sub> -Konzentration	Y <sub>O2</sub>	%	✓	✓	✓	✓	✓
CO-Produktionsrate	Y <sub>CO</sub>	g <sub>co</sub> /g <sub>f</sub>	✓	✓	-	KS <sup>4)</sup>	KS <sup>4)</sup>
CO <sub>2</sub> -Produktionsrate	Y <sub>CO2</sub>	g <sub>co2</sub> /g <sub>f</sub>	✓	✓	-	KS <sup>4)</sup>	KS <sup>4)</sup>
Ruß-Produktionsrate	Y <sub>S</sub>	g <sub>s</sub> /g <sub>f</sub>	KS <sup>4)</sup>	✓	-	KS <sup>4)</sup>	KS <sup>4)</sup>
Tox. Komponenten	Y <sub>TKi</sub>	g <sub>TKi</sub> /g <sub>f</sub>	KS	KS	-	KS	KS

<sup>1)</sup> am iMBB vorhanden, <sup>2)</sup> standardgemäß Prüfung für Wand und Deckenbekleidung, <sup>3)</sup> Abgasrohr max. 400 °C, <sup>4)</sup> am iMBB möglich, <sup>5)</sup> Durch Erweiterung am iMBB (Cone-Kammer) regelbar, KS: Kein Standard, <sup>6)</sup> Bei den gängigen Pyrolysemodellen wird generell die absolute und nicht die effektive Vergasungswärme benötigt

## 2.6 International durchgeführte Versuche und Datenbanken

International wurden von Tewarson /TEW 02/ umfangreiche Grunddaten für die Erzeugung von Wärme und chemischen Bestandteilen in Bränden und von Babrauskas /BAB 02/ Daten zur Beschreibung der Energiefreisetzungsrate bereitgestellt. Bei den weltweit viel beachteten Untersuchungen von Tewarson wird der Fire Propagation Apparatus (FPA) von der Factory Mutual Research /ASTM E2058/ eingesetzt. Es werden für eine Vielzahl von verschiedenen Materialien Messgrößen angegeben. Der FPA entspricht einer Untersuchungsmethode im Labormaßstab, Details hierzu sind in Tabelle 2 aufgeführt. Hinzu kommen Ergebnisse von Untersuchungen im Cone-Kalorimeter /ISO 5660/. Ergänzend zu den in Tabelle 2 aufgeführten Messgrößen werden auch Angaben zum Critical Heat Flux (CHF) und zum Thermal Response Parameter (TRP) gemacht. Diese Größen charakterisieren zusätzlich das Entzündungsverhalten bzw. die Materialeigenschaften eines Stoffes. Über die Bestimmung der längenspezifischen Energiefreisetzungsrate  $\dot{Q}'$  [kW/m] kann auf einen sogenannten Fire Propagation Index (FPI) geschlossen werden, der definiert ist als:

$$\text{FPI} = \frac{1000 \cdot (0,42 \cdot \dot{Q}')^{1/3}}{\text{TRP}}. \quad (6)$$

Zur Charakterisierung des Brandverhaltens von Stoffen werden dem FPI 4 Kategorien zugeordnet /TEW 02/. Die chemische Energiefreisetzungsrate wird hierbei als die HRR verstanden, die z. B. mittels der Methode der Sauerstoffkalorimetrie (siehe z. B. /ISO 5660/) gemessen würde. Sie entspricht einer effektiven Energiefreisetzungsrate, bei der eine unvollständige Verbrennung berücksichtigt wird.

Babrauskas /BAB 02/ behandelt neben Versuchen im kleinen Maßstab insbesondere Versuche in großer Skala und macht Angaben zur Übertragbarkeit der Ergebnisse von Versuchen in kleiner Skala auf große Skala. Auf diese Thematik wird in Kapitel 2.7 Korrelation von Brandkenngrößen bei Labor- und Großbrandversuchen eingegangen. Ergebnisse zum Verlauf der HRR, maximale Energiefreisetzungsraten (peak HRR) und Abbrandraten von Versuchen mit verschiedenen realen Produkten werden präsentiert.

Ein anderer Weg wird im Leitfaden Ingenieurmethoden /HOS 06/ verfolgt, da hier nicht reale Produkte als Grundlage der Beurteilung eines Verlaufs der Energiefreisetzungsrate herangezogen werden, sondern nach realen Nutzungen unterschieden wird. Tabelle 3 gibt einen Überblick hierzu. In der Tabelle zu den Nutzungen sind keine Maximalwerte enthalten, sondern der Anwender muss unter Berücksichtigung der Raumgröße und der flächenspezifischen Energiefreisetzung den Wert für die maximale HRR bestimmen und unter Berücksichtigung der Öffnungsbedingungen kontrollieren. Diese Überprüfung kann auch bei der

Berechnung mittels Brandsimulationsprogramm in jedem Zeitschritt vorgenommen werden (mehr Details hierzu sind Kapitel 4.2.2 zu entnehmen). Neben der flächenbezogenen HRR, werden Angaben zur Brandbelastung, dem Heizwert und der Brandentwicklungszeit gemacht. In der ursprünglichen Tabelle aus /HOS 06/ sind auch Angaben zu den jeweiligen Quellen enthalten.

Tabelle 3 Kennwerte für Nutzungen zur Abschätzung und zur Erarbeitung der Quellterme

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandbelastung <sup>3</sup> MJ/m <sup>2</sup>	Heizwert MJ/kg <sup>4</sup>	Brandentwicklungszeit <sup>5</sup>	HRR = f(A) kW/m <sup>2</sup> <sup>6</sup>
Wohnraum		780 / 948	19,5	300	300
Büroraum	ohne Sprinkler	420 / 511	20,5	300	250
Krankenzimmer	2 Betten	230 / 280	22,5	300	250
Hotelzimmer	2 Betten, Möbel aus Holzspantafeln	310 / 377		300	250
Schule: Klassenraum	Möbel aus Holz, Sitze aus Formsperrholz	285 / 347	18,2	300	150
Zuschauersaal	Theater / Kino Gepolsterte Sitze	300 / 365		450	250
Hörsaal	Sitze aus Formsperrholz, Kleidung und Taschen	140	25	1.200	130
Eingangshalle	Empfangstresen, Möbel mit geringer Polsterung	400	19,2	450	240
Bücherei	mit Metallregalen	1.500 / 1.824	18,4	450 <sup>7</sup>	200 - 500
Einkaufszentrum	nicht spezifiziert	600 / 730	19 - 23	150 - 300	250 - 500
Drogeriemarkt	geringe Anteile brennbarer Flüssigkeiten	760	28 - 32	200	300
Gaststätte	leichte Polstersitze, Holztische	600 - 700	18 - 25	200 - 300	280
	Polsterstühle, Holztische, Sitzgruppen, Polstermöbel schwere Wohnraumtextilien	1.100	17 - 20	200	330
Garderobe	ca. 12 m <sup>2</sup>	720	21	180 - 250	430
Verkaufsstand	ca. 15 m <sup>2</sup>	650	22,5	200 - 300	285
kleiner Kiosk	2 x 2 m	--	19,5	300	400

<sup>3</sup> Brandlast: erste Zahl ≙ Mittelwert / zweite Zahl ≙ 80 %-Fraktile

<sup>4</sup> bezogen auf in den meisten Fällen vorliegende Mischbrandlasten; dieser Begriff ist ganz allgemein als eine Mischung von Brandstoffen entsprechend der jeweiligen Nutzung zu verstehen;

<sup>5</sup> Steuergröße  $t_{\alpha}$  nach DIN EN 1991-1-2, Anhang E.4, auch mit  $t_g$  bezeichnet

<sup>6</sup> alle Werte ohne Sprinklerschutz

<sup>7</sup> Werte wurden korrigiert bzw. ergänzt, da die Angabe in der DIN EN 1991-1-2 nicht den Messungen aus Brandversuchen entspricht

## 2.7 Korrelation von Brandkenngrößen bei Labor- und Großbrandversuchen

Aus wirtschaftlichen Gründen werden Brandversuche vorzugsweise in kleinen Versuchsaufbauten durchgeführt mit dem Ziel, die Ergebnisse auf reale Brände zu übertragen. Da das Brandverhalten keine Stoffeigenschaft ist, sondern wesentlich von den Umgebungsbedingungen eines Brandes mitbestimmt wird, ist diese Korrelation nicht ohne weiteres möglich. Das gilt nicht nur für die primären Brennbarkeitseigenschaften wie Entzündlichkeit, Flammenausbreitung und Wärmeentwicklung, sondern auch für die Begleiterscheinungen des Brandes wie Rauchentwicklung und Schadgasfreisetzung. Die je Masseneinheit eines Stoffes freigesetzte Menge an Rauch und toxischen Gasen hängt von den jeweiligen Randbedingungen hinsichtlich Temperaturverlauf, Sauerstoffangebot, Luftbewegung und Verweilzeit der Zersetzungsprodukte ab. Das Problem besteht also darin, im Modellversuch Bedingungen zu wählen, die dem realen Brand entsprechen /SAN 89/.

In der Arbeit von Will /WIL 05/ wird vorgeschlagen, die Randbedingungen eines realen Brandereignisses bei der Verbrennung im Labormaßstab in der sog. Cone-Kammer über die thermische Beaufschlagung (Strahlungsflussdichte) und die Ventilation (Zuluftverhältnis) zu simulieren.

Die Verbrennung und ihre Wirkung lassen sich durch die relative Abbrandrate, die relative Energiefreisetzungsrate und die Brandparameter (Brandkenngrößen) effektive Verbrennungswärme bzw. Verbrennungseffektivität, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute beschreiben. Hierbei werden folgende Punkte hervorgehoben:

1. Die relative Abbrandrate wird durch den konvektiven und radiativen Wärmestrom auf die Brennstoffoberfläche bestimmt. Im Realmaßstab hängt der Wärmestrom von den Abmessungen der Brandkammer, den Materialeigenschaften der Umfassungsbauteile, der Größe der Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen und der Zusammensetzung der Rauchgasschicht (Ruß, Wasserdampf, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidanteil) ab. Die relative Energiefreisetzungsrate ergibt sich als Produkt von relativer Abbrandrate und effektiver Verbrennungswärme und ist daher stark von den Ventilationsrandbedingungen abhängig. Aufgrund der genannten Wechselwirkungen ist der Einfluss des Parameters Strahlungsflussdichte auf die relative Abbrandrate und die relative Energiefreisetzungsrate signifikant. Bei den Raumbrandversuchen stellt sich die Wärmestromdichte in Abhängigkeit von den o. g. Randbedingungen im Raum und über die Zeit veränderlich ein. Somit kann die relative Abbrandrate oder die relative Energiefreisetzungsrate nicht unmittelbar aus den Laboruntersuchungen abgeleitet werden.

2. Die effektive Verbrennungswärme („Energieausbeute“) bzw. die Verbrennungseffektivität sowie die Ausbeute von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid hängen als materialabhängige Eigenschaften unmittelbar mit dem Sauerstoffangebot zusammen. Sie sind daher eng an das Zuluftverhältnis gekoppelt. Hingegen zeigen sie bei den Versuchen in der Cone-Kammer nur eine geringe Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte. Die relative Abbrandrate und die relative Energiefreisetzungsrate beim Raumbrandversuch oder einem realen Brand können daher nicht unmittelbar aus den Untersuchungen in der Cone-Kammer abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen in der Cone-Kammer für die effektive Verbrennungswärme, die Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute können unmittelbar in den Realmaßstab übertragen werden, da sie als massebezogene Größen angegeben werden. Für den brandlastgesteuerten Brand ist die Übertragbarkeit auf Grund der zufriedenstellenden Übereinstimmung nachgewiesen. Für den ventilationsgesteuerten Fall ( $ZLV < 1$ ) konnte noch kein Nachweis erbracht werden, da experimentelle Ergebnisse aus entsprechenden Raumbrandversuchen nicht vorliegen.

Bei Versuchen im mittleren Maßstab mit Gasflammen unter einer geschlossenen Haube wurden über eine Bandbreite des Zuluftverhältnisses von  $0,5 < ZLV < 5$  die Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute bestimmt /JIN 03/. Über den gesamten Bereich des Zuluftverhältnisses stimmen die Ergebnisse dieser Versuche tendenziell mit denen in der Cone-Kammer überein. Dieser Sachverhalt unterstützt die Vermutung, dass die Ergebnisse der Cone-Kammer-Versuche auf ventilationsgesteuerte Brände anwendbar sind /WIL 05/.

In /HAN 02/ werden Modelle zur Vorhersage der Zeit bis zum Flashover im Room Corner Testraum /ISO 9705/ basierend auf Daten von Versuchen im Cone-Kalorimeter beschrieben. Es wird festgestellt, dass ein modifiziertes Verfahren nach Wickström/Göransson und ein statistisches Modell die Zeit bis zum Flashover mit guter Genauigkeit vorhersagen können. Ein Problem ist, dass die Übertragbarkeit zunächst nur hinsichtlich der Vorhersagbarkeit eines Raumbrandszenarios nach ISO 9705 erwiesen ist. In /HES 02/ werden Screening-Verfahren für das SBI-Prüfverfahren /EN 13823/ und den Room Corner Test /ISO 9705/ beschrieben. Diese Verfahren sind teilweise geeignet, um das Brandverhalten von bestimmten Baustoffen vom Kleinversuch auf den genormten Großversuch zu übertragen. Die Ergebnisse machen eine sinnvolle Produkt/Baustoffentwicklung kostengünstig möglich, die Übertragbarkeit auf einen Großversuch mit anderer Anordnung der Baustoffe (hier überwiegend flächige Wandbekleidungen) ist dagegen noch nicht ausreichend untersucht.

### 3 AM IBMB DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE

#### 3.1 Überblick

Am iBMB wurden in den letzten Jahrzehnten mit unterschiedlichen Brandgütern Versuche in unterschiedlichen Maßstäben durchgeführt. Hierbei kamen die in Tabelle 2 aufgeführten, am iBMB vorhandenen Versuchseinrichtungen zum Einsatz. Einige Vorhaben, welche durch umfangreiche Versuchsserien gekennzeichnet waren, sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens ist es, eine Matrix von Versuchen aufzustellen, mit denen Brandkenngrößen, die für eine nationale Datenbank benötigt werden, möglichst wirtschaftlich abgeleitet werden können. Hierbei ist insbesondere die Skalierbarkeit von kostengünstigen Versuchen im Labor- oder Kleinmaßstab auf großen Skalen zu berücksichtigen. Im Folgenden sollen hauptsächlich die unter Nummer 1 (Brandschutz in Chemikalienlagern) aufgeführten Versuche herangezogen werden, um die wesentlichen Brandkenngrößen abzuleiten.

Tabelle 4 Am iBMB durchgeführte Versuchsserien zur Bestimmung von Brandkenngrößen

Nr.	Vorhaben und Versuche
1	Brandschutz in Chemikalienlagern /HOS 00/ <ul style="list-style-type: none"><li>• Cone-Kammer Versuche</li><li>• 17 Versuche im Room-Corner-Test mit reinen Brandlasten im Gebindemaßstab (Propan, Holzkrippen, Glykol, PE-Granulat, Mobil DTE medium)</li><li>• 34 Raumbrandversuche im Oskar mit realen Lageranordnungen (PE-Granulat, Glykol, Holz)</li></ul>
2	Durchführung von vergleichenden Brandversuchen mit unterschiedlichen Kabelmaterialien und Kabelschutzsystemen /HOS 03/ <ul style="list-style-type: none"><li>• 80 Cone-Kalorimeter-Versuche</li><li>• 23 IEC-Versuche</li><li>• 19 Raumbrandversuche</li></ul>

#### 3.2 Chemikalienlager /HOS 00/

##### 3.2.1 Kleinmaßstäbliche Versuche in der Cone-Kammer

Will man das Abbrandverhalten bei Variation der Ventilationsbedingungen - gegeben durch Menge und Zusammensetzung (Sauerstoffanteil) der Zuluft - untersuchen, so muss der Standard-Versuchsaufbau des Cone-Kalorimeters /ISO 5660/ grundsätzlich geändert werden.

Vom Hersteller des Cone-Kalorimeter (Fire Testing Technology) wird hierzu ein modifizierter Aufbau des Cone-Kalorimeters angeboten (/HOS 00), der nach Angaben des Herstellers von verschiedenen Forschungslabors außerhalb Deutschlands eingesetzt wird. Bei diesem Aufbau erfolgen die Erwärmung des Materials und die Entzündung der entstehenden Zersetzungsprodukte auf die gleiche Weise wie im genormten Cone-Kalorimeter. Allerdings geschieht dies in einem geschlossenen System bestehend aus einer Vormischkammer und einer Hauptkammer (Volumen ca. 43 l). In der Vormischkammer kann durch kontrollierte Zuführung von Luft und Stickstoff sowohl die Menge, als auch die Zusammensetzung der Zuluft gesteuert werden. Die Rauchgase strömen durch die Öffnung im Cone-Heizer aus und werden durch das Abzugssystem des Cone-Kalorimeters aufgenommen. Bei starker Energiefreisetzungsrates, die erfahrungsgemäß mit einer hohen Flamme verbunden ist, tritt die Flamme durch die Öffnung im Cone-Heizer aus der Kammer aus und kommt mit Umgebungsluft, also zusätzlichem Sauerstoff in Kontakt. Eine weitere Verbrennung, die nicht mit der kontrollierten Ventilation der Kammer zusammenhängt, kann erfolgen und wird über das Messsystem mit erfasst. Somit ist das System tatsächlich nicht abgeschlossen und die Beurteilung der Brandeigenschaften muss nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit den eingestellten Zuluftbedingungen stehen.

Deshalb wurde das Cone-Kalorimeter in einer Eigenentwicklung des iBMB mit gesteuerten Ventilationsbedingungen zur sog. Cone-Kammer (Bild 1) umgebaut, indem die gesamte Plattform des Cone-Kalorimeters aus dem offenen Raum in eine geschlossene Kammer umgesetzt wurde (/HOS 00/). Im Gegensatz zum genormten Cone-Kalorimeter und zu dem vom Hersteller angebotenen modifizierten Cone-Kalorimeter wird das Abzugssystem nicht mehr benutzt. Dafür ist auf der Oberseite der ansonsten geschlossenen Kammer ein Rohr mit zwei Blenden und den Entnahmesonden montiert. Über einen elektronischen Massenstromregler wird Pressluft von unten in die Kammer eingeblasen. Damit die einströmende Luft nicht die Wiegeeinrichtung bzw. Gewichtsmessung stört, ist unterhalb der Plattform ein Prallblech (in Bild 1 nicht dargestellt) angebracht, das den Gasstrom horizontal ablenkt. Die Rauchgase strömen durch das vertikale Rohr an den Entnahmesonden vorbei, treten aus und werden vom Absaugsystem übernommen.

Die Vorderseite der Kammer kann vollständig abgenommen werden, damit die komplette Plattform mit Wiegeeinrichtung, Probenaufnahme, Zündelektroden und Cone-Heizer eingesetzt oder herausgenommen werden kann. Durch eine zusätzliche Klappe an der Vorderseite kann der Probenträger (Pfanne) mit der entsprechenden Materialprobe eingebracht bzw. herausgenommen werden. Durch die beiden Fenster in der linken und rechten Seitenwand kann das Brandverhalten beobachtet werden.

Gasentnahmesonde und Blende mit Differenzdruckmessung,  
Temperaturmessung ca. 1 m oberhalb

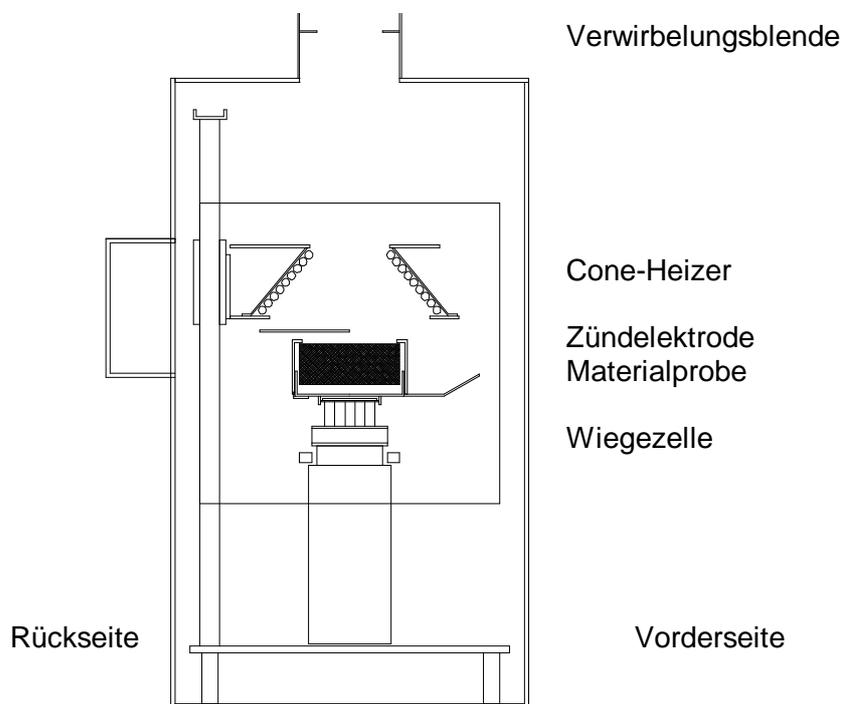


Bild 1 Aufbau der Cone-Kammer des iBMB, Seitenansicht

Da hier, im Gegensatz zum modifizierten Cone-Kalorimeter des Herstellers, die Gasentnahme vor dem Mischen mit Umgebungsluft erfolgt, wird die Rauchgaszusammensetzung in dem geschlossenen System real erfasst. Eine eventuelle weitere Verbrennung nach Zusammentreffen mit Umgebungsluft kann auch hier auftreten, wird aber nicht in die Bewertung einbezogen, da die Probenentnahme vor dem Zusammentreffen erfolgt. Durch diese Form der Rauchgasführung und Gasanalyse im geschlossenen System vereinfachen sich die Berechnungsverfahren der Sauerstoffkalorimetrie.

Für die Charakterisierung des von Baustoffen und Lagergütern ausgehenden Risikos der Entzündung, Brandausbreitung und Brandwirkung sind Angaben zur Energiefreisetzungsrate, Abbrandrate, effektiven Verbrennungswärme und Freisetzung von Brandprodukten (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid) von Bedeutung. Die Bestimmung dieser Größen ist unter praxisgerechten Bedingungen einerseits mit erheblichem technischem - und damit auch finanziellem - Aufwand verbunden. Andererseits können die Randbedingungen einer großmaßstäblichen Untersuchung nur im begrenzten Rahmen kontrolliert und gesteuert werden. Dagegen lassen sich Kleinversuche bei verbesserter Kontrolle der Randbedingungen in größerer Anzahl durchführen.

Insgesamt wurden 37 Versuche mit einem festen und einem flüssigen Stoff durchgeführt. Als Ersatzstoff für feste Chemikalien wurde ein Polyethylen-Granulat der Firma BASF mit der Bezeichnung Lupolen 5021 D eingesetzt. Als Flüssigkeit wurde Glysantin G48 der Firma BASF verwendet. Bei den Untersuchungen des Feststoffs Lupolen 5021 D Granulat und der Flüssigkeit Glysantin G48 wurde die thermische Beaufschlagung über die einstellbare Strahlungsflussdichte und die Ventilation über den einstellbaren Zuluftvolumenstrom variiert. Vom Hersteller / Lieferanten BASF wurden der untere Heizwert und die chemische Zusammensetzung der beiden Materialien bestimmt, so dass daraus gemäß der in /HOS 00/ beschriebenen Auswertungsgrundlagen die notwendigen Materialparameter berechnet werden konnten (Tabelle 5).

Tabelle 5 Zusammenstellung der Materialparameter

Material	Lupolen 5021 D Granulat	Glysantin G 48
Kurzbezeichnung	PE	Glykol
unterer Heizwert $H_u$ [ $\text{kJ g}^{-1}$ ]	43,19	16,6
Summenformel	$\text{CH}_2$	$\text{CH}_3\text{O}$
Expansionsfaktor $\alpha$	1,0698	1,2095
Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchtem Sauerstoff $E^V$ [ $\text{kJ m}^{-3}$ ] (Volumen bezogen auf 25 °C)	16509	16846
stöchiometrischer Luftbedarf $r$ [ $\text{g}_{\text{Luft}} \text{g}_{\text{Brennstoff}}^{-1}$ ]	14,835	5,572
Der Expansionsfaktor und das Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchtem Sauerstoff sind bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate nach der Methodik der Sauerstoffkalorimetrie notwendig. Bei bekannter Brennstoffzusammensetzung können beide Werte individuell bestimmt werden, generell wird mit Standardwerten gerechnet /ISO 9705/. Angaben zur Berechnung dieser Werte werden in /HOS 00/ gegeben.		

Für die Untersuchungen von Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 wurde grundsätzlich die Probenpfanne des Cone-Kalorimeter auf einer Fläche von  $110,25 \text{ cm}^2$  mit 100 g des Granulats bzw. 113 g (100 ml) der Flüssigkeit befüllt. Die Dicke der Füllung betrug somit ca. 17 mm bzw. 9 mm. Es wurden insgesamt 20 Versuche mit Lupolen 5021 D Granulat und 17 Versuche mit Glysantin G48 durchgeführt. Für die thermische Beaufschlagung wurden drei Niveaus der Strahlungsflussdichte gewählt: 15, 25 und  $40 \text{ kW/m}^2$ . Als obere Grenze für die Strahlungsflussdichte wurde  $40 \text{ kW/m}^2$  gewählt, weil mit Lupolen 5021 D Granulat bereits bei dieser Beaufschlagung eine Energiefreisetzungsrate von ca. 6 kW in der Kammer auftritt. Für den Zuluftvolumenstrom wurden 25 l/min bis 400 l/min gewählt, wobei die obere Grenze durch die Pressluftversorgung vorgegeben wurde. Tabelle 6 enthält eine Übersicht der Versuche.

Tabelle 6 Versuche in der Cone-Kammer

Lupolen 5021 D Granulat			
Strahlungsflussdichte [kW m <sup>-2</sup> ]	Zuluftvolumenstrom [l/min] (bezogen auf 20 °C)	Versuchsindex	
10 – 15	(100 – 200)	(7)	
15	25	12	
	50	10	
	100	8	
	200	9	
	25	11	
25	50	3	
	80	5	
		13	
		14	
	100	1	
	150	4	
	200	2	
	400	6	
	40	25	20
		50	18
100		16	
150		17	
200		15	
400		19	

Glystantin G48		
Strahlungsflussdichte [kW m <sup>-2</sup> ]	Zuluftvolumenstrom [l/min] (bezogen auf 20 °C)	Versuchsindex
15	25	33
	50	31
	100	32
	200	27
25	25	25
	50	22
		28
	100	21
		30
	200	23
		29
	300	26
		400
	40	50
100		35
200		34
400		37

### 3.2.2 Großmaßstäbliche Versuche im Room-Corner-Test mit reinen Brandlasten

Bei den Untersuchungen im realen Maßstab im Room Corner Test /ISO 9705/ stand neben dem Verhalten unterschiedlicher Brandlasten vor allem der Einfluss der Ventilationsparameter im Fokus. Dazu wurde die Tür (0,8 m breit, 2 m hoch) mit Mauersteinen zum Teil vom Boden des Brandraumes beginnend verschlossen. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche mit den zugehörigen Ventilationsöffnungen  $A_v$  ist in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7 Durchgeführte Versuche mit untersuchten Ventilationsöffnungen

Nr	Brandlast	Poolfläche	$A_V$ (m <sup>2</sup> )
1	200 kW Kiesbettbrenner		1,6
2	200 kW Kiesbettbrenner		1,2
3	200 kW Kiesbettbrenner		0,8
4	200 kW Kiesbettbrenner		0,4
5	200 kW Kiesbettbrenner		0,812
6	200 kW Kiesbettbrenner		0,34
7	50 kg Holzkrippe, ca. 6% Feuchte		1,6
8	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		1,6
9	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		0,4
10	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		0,2
11	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		0,05
12	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		0,08
13	200 kW Kiesbettbrenner		1,6
14	22,5 kg Glysantin G48	0,5 m <sup>2</sup>	0,8
15	25 kg Lupolen 5021 D Granulat	0,5 m <sup>2</sup>	0,8
16	25 kg Lupolen 5021 D Granulat	0,5 m <sup>2</sup>	0,4
17	25 kg Lupolen 5021 D Granulat	0,5 m <sup>2</sup>	1,6
18	22,5 kg Glysantin G48	1,0 m <sup>2</sup>	0,8
19	22,5 kg Glysantin G48	1,0 m <sup>2</sup>	0,4
20	22,5 kg Glysantin G48	1,0 m <sup>2</sup>	0,2
21	17 kg Mobil DTE Medium	0,5 m <sup>2</sup>	0,4
22	17 kg Mobil DTE Medium	0,5 m <sup>2</sup>	0,8
23	17 kg Mobil DTE Medium	0,5 m <sup>2</sup>	1,6
24	45 kg Glysantin G48 zusätzlich kleine Holzkrippe	1,0 m <sup>2</sup>	0,4
25	22,5 kg Glysantin G48	1,0 m <sup>2</sup>	0,08

Die für den späteren Vergleich mit den Versuchen in der Cone-Kammer notwendigen Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Ergebnisse für Holz sind der Vollständigkeit halber mit aufgeführt, für diese Materials wurden aber bisher keine Versuche in der Cone-Kammer durchgeführt.

Tabelle 8 Beschreibung des Abbrandverhaltens in Abhängigkeit von den Ventilationsrandbedingungen PE: Lupolen 5021 D Granulat , Glykol: Glysantin G48

Nr.	Brandlast	$A_V$	ZLV	$\bar{m}_{ein}$	$\dot{m}_f$	$H_{c,eff}$	$Y_{CO_2}$	$Y_{CO}$	SEA
		[m <sup>2</sup> ]	[l]	[kg s <sup>-1</sup> ]	[kg s <sup>-1</sup> ]	[kJ g <sup>-1</sup> ]	[g g <sup>-1</sup> ]	[g g <sup>-1</sup> ]	[m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ]
8	Holz	1,6	3,048	0,634	0,041	11,343	1,076	0,002	4,867
9	Holz	0,4	0,823	0,144	0,034	11,877	1,138	0,004	6,085
10	Holz	0,2	0,454	0,071	0,030	10,982	0,966	0,028	16,176
12	Holz	0,08	0,138	0,018	0,025	6,904	0,563	0,142	81,173
17	PE	1,6	4,217	0,724	0,012	33,602	2,240	0,017	398,997
15	PE	0,8	1,931	0,332	0,012	30,535	2,084	0,023	372,853
16	PE	0,4	1,042	0,164	0,011	30,980	2,094	0,050	358,513
18	Glykol	0,8	3,008	0,307	0,018	12,669	1,028	0,000	0
19	Glykol	0,4	1,204	0,151	0,023	12,415	1,031	0,001	0,364
20	Glykol	0,2	0,595	0,068	0,021	12,414	0,898	0,023	0,079
25	Glykol	0,08	0,330	0,027	0,015	11,160	0,845	0,073	1,164

### 3.2.3 Raumbrandversuche in der Brandkammer „Oskar“ mit realen Lageranordnungen

Die Durchführung von Raumbrandversuchen wird detailliert in /HOS 00/ beschrieben. Es wurde die Brandkammer „Oskar“ des iMBM verwendet, die eine quadratische Grundfläche von 3,6 m x 3,6 m und eine lichte Höhe von 5,6 m aufweist (Bild 2). Die Brandkammer besitzt mit 71 m<sup>3</sup> gut das dreifache Volumen des Room-Corner-Test (21 m<sup>3</sup>). Die Öffnung der Brandkammer ist 3,6 m hoch und 0,6 m breit. Im Gegensatz zum Room Corner Test /ISO 9705, der nicht für die Untersuchung der Vollbrandphase mit Energiefreisetzungsraten über 1 MW geeignet ist, können in der Brandkammer „Oskar“ auch höhere Energiefreisetzungsraten, wie sie bei vollentwickelten Raumbränden regelmäßig auftreten, simuliert werden.

Die Brandkammer (siehe auch Tabelle 2) wurde mit einer 3 m x 3 m großen Wiegebühne ausgestattet, welche auf drei Messzellen aufliegt und einen Messbereich von 0 - 6000 kg hat.

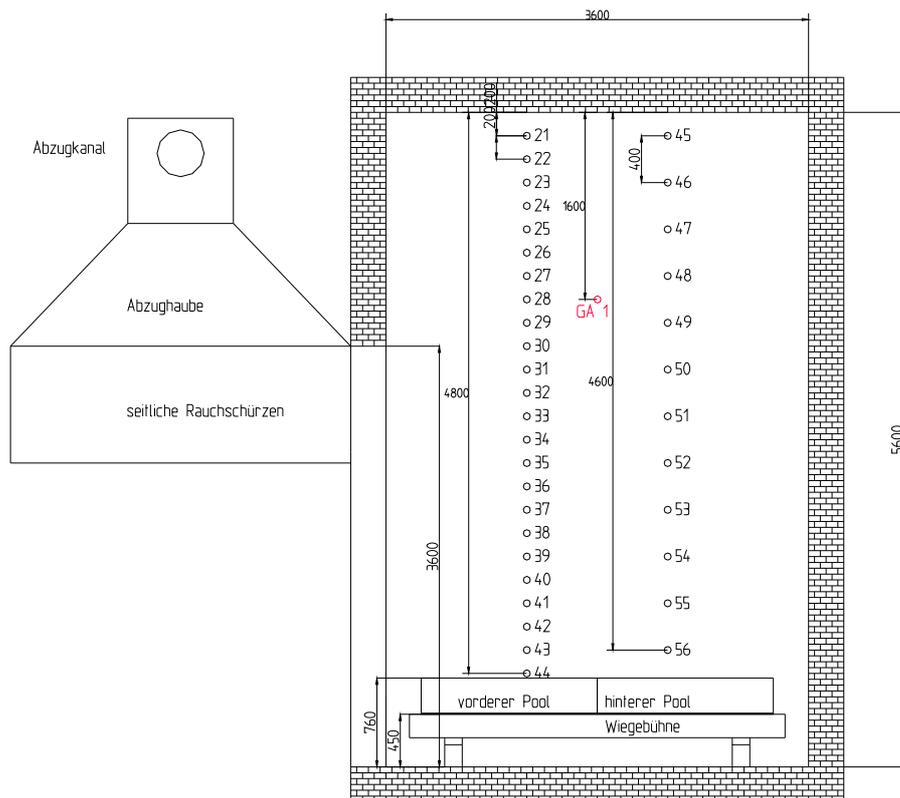


Bild 2 Aufbau der Brandkammer „Oskar“, Seitenansicht, Maße in mm

### 3.2.3.1 Brandlasten

Bei den Raumbrandversuchen wurden wiederum die Lagergut-Ersatzstoffe PE und Glykol in unterschiedlicher Verpackung und Lagerart untersucht. In Tabelle 9 sind die durchgeführten Brandversuche zusammengestellt. Bei der Lagerung wurde zwischen Block- und Regallagerung unterschieden. Bei der Regallagerung wurden zusätzlich die benutzten Regalböden variiert (geschlossener Boden, Gitterrost). Der „Pool“ ist zwar keine praxisgerechte Lagerart,, die Poolbrände mit Glysantin G48 (Glykol) oder Lupolen 5021 D Granulat (PE) mussten aber durchgeführt werden, um eine Anbindung an die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Versuche im Room Corner Test zu ermöglichen. Ansonsten wurden die Stoffe in übliche Verpackungen gefüllt: Lupolen 5021 D Granulat in die sog. Feststoffverpackung, Glysantin G48 in die Fluidverpackung.

Eine Übersicht zur Anordnung bei Blocklagerung mit vier Ebenen Kartons (Schema links) und Regalanordnung (Foto rechts) mit 5 Ebenen zeigt das Bild 3.

Tabelle 9 Übersicht der durchgeführten Versuche (Auswahl)

Versuch	Lagerung	Anordnung, Verpackung	Lagergut	Schichten	Kartons pro Schicht
26	Gitterregal	Feststoffverpackung	109 kg PE	3	2
07	Block	Feststoffverpackung	leer	2	4
08	Block	Feststoffverpackung	38 kg PE	2	4
09	Block	Feststoffverpackung	leer	4	4
11	Block	Feststoffverpackung	leer, 222 kg		
14	Block	Feststoffverpackung	leer	6	4
33	Block	Feststoffverpackung	422 kg PE	3	4
27	Gitterregal*	Fluidverpackung	209 kg (160 l Glykol)	4	2
31	Gitterregal*	Fluidverpackung	104 kg (80 l Glykol)	2	2
17	Gitterregal	Fluidverpackung	53 kg (40 l Glykol)	5	2
22	Gitterregal	Fluidverpackung	160 kg (120 l Glykol)	4	3
24	Gitterregal	Fluidverpackung	105 kg (80 l Glykol)	4	2
25	Gitterregal	Fluidverpackung	53 kg (40 l Glykol)	2	2
15	Bodenregal	Fluidverpackung	53 kg (40 l Glykol)	5	2
16	Bodenregal	Fluidverpackung	leer	2	3
19	Bodenregal	Fluidverpackung	53 kg (40 l Glykol)	2	2
20	Bodenregal	Fluidverpackung	127 kg (100 l Glykol)	5	2
21	Bodenregal	Fluidverpackung	105 kg (80 l Glykol)	4	2
12	Block	Fluidverpackung	157 kg (120 l Glykol)	2	3
13	Block	Fluidverpackung	leer	2	3
23	Block	Fluidverpackung	315 kg (240 l Glykol)	4	3
32	Block	Fluidverpackung	leer	4	3
01	Pool	Poolfläche 0.5 m <sup>2</sup>	25 kg PE		
02	Pool	Poolfläche 1.0 m <sup>2</sup>	50 kg PE		
03	Pool	Poolfläche 1.0 m <sup>2</sup>	45 kg Glykol		
04	Pool	Poolfläche 4.5 m <sup>2</sup>	90 kg Glykol		
05	Pool	Poolfläche 9.0 m <sup>2</sup>	157 kg Glykol		

\* Bei diesen Versuchen wurden 2 Gitterregale mit einem Abstand von 0,5 m zueinander eingesetzt.

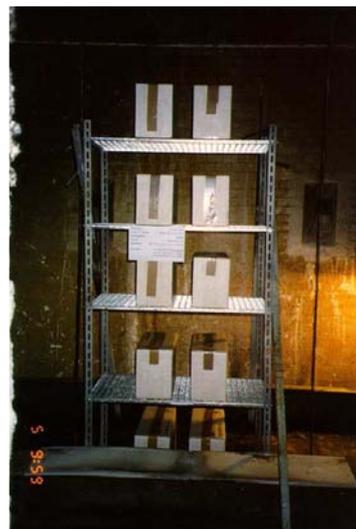
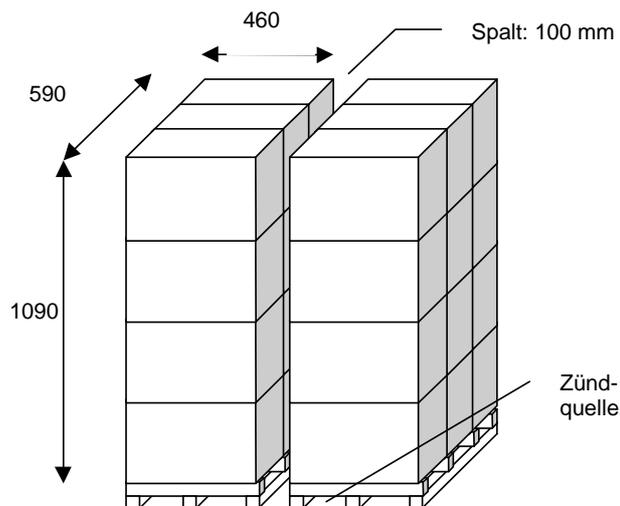


Bild 3 Versuchsanordnung für Blocklagerung (links) mit vier Ebenen Kartons; Regalanordnung mit 5 Ebenen (rechts), Maße in mm

### 3.2.3.2 Ergebnisse Poolfeuer

Im ersten Teil der Ergebnisdarstellung werden die gemessenen Energiefreisetzungsraten untereinander verglichen. In Bild 4 und Bild 5 werden die drei Poolbrände mit Glysantin G48 als Brandlast einander gegenübergestellt. Die in Bild 4 dargestellte Energiefreisetzungsrate zeigt für den Pool von 1 m<sup>2</sup> Grundfläche ein Maximum von annähernd 200 kW. Die Vergrößerung der Poolfläche führt allerdings zu einer unterproportionalen Steigerung der Energiefreisetzungsrate, was sich auch in der Abbrandrate (Bild 5) widerspiegelt. Während der Brandentwicklung zeigt sich kein nennenswerter Einfluss der Poolfläche auf die Energiefreisetzungsrate oder die Abbrandrate. Die Abbrandrate bei den drei Versuchen zeigt einen ähnlichen zeitlichen Verlauf wie die Energiefreisetzungsrate.

Die Poolflächen von 1 m<sup>2</sup> und 4,5 m<sup>2</sup> konnten mit einer einzelnen Wanne realisiert werden, die sich in der hinteren Position auf der Wiegeeinrichtung befand (vgl. Bild 2). Beim Versuch mit dem 9 m<sup>2</sup> großen Glysantin G48-Pool musste eine zweite 4,5 m<sup>2</sup> große Wanne vor die erste auf die Wiegeeinrichtung gestellt werden. Die Flüssigkeit in der vorderen Wanne konnte erst entzündet werden, nachdem der hintere Pool bereits 30 s brannte. Außerdem dauerte es länger, bis sich das Feuer über die gesamte Flüssigkeitsoberfläche der vorderen Wanne ausgebreitet hatte. Die verspätete Entzündung und die Trennung der Poolfläche könnten eventuell die geringere Steigerung in der Brandentwicklung gegenüber den beiden anderen Versuchen mit Glysantin G48-Pools verursacht haben.

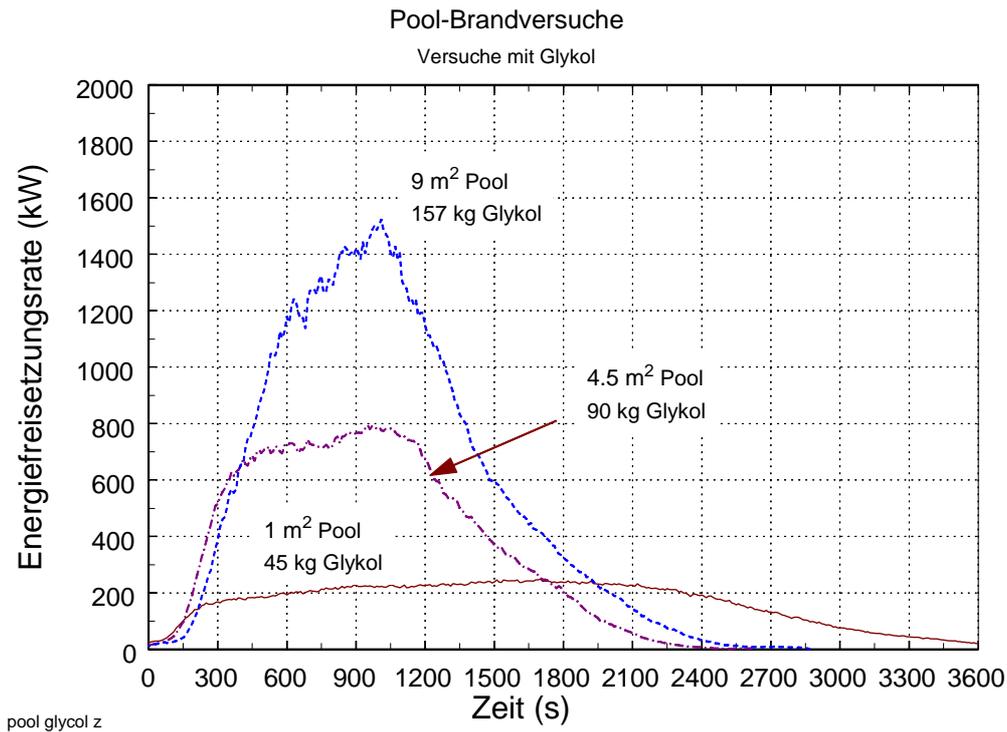


Bild 4 Energiefreisetzungsrate bei Poolbränden mit Glysantin G48

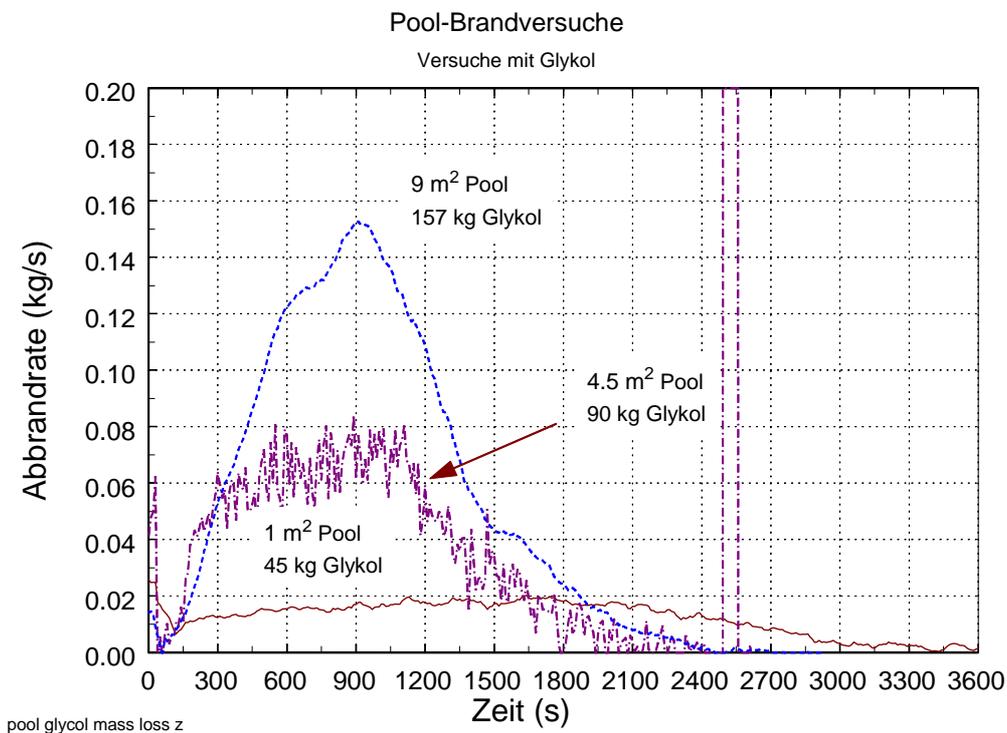


Bild 5 Abbrandrate bei Poolbränden mit Glysantin G48

Für den späteren Vergleich wurden die drei Poolbrände mit Glysantin G48 und die beiden Versuche mit der Schüttung von Lupolen 5021 D Granulat in den beiden kleinen Wannen (0,5 m<sup>2</sup> und 1 m<sup>2</sup>) hinsichtlich der Materialparameter zur skalenübergreifenden Beschreibung des Brandverhaltens ausgewertet (Tabelle 10). Die Poolbrände verlaufen in dieser Brand-

kammer stets unter brandlastgesteuerten Bedingungen ab, d. h. es strömt ausreichend Luft in die Brandkammer und das Zuluftverhältnis ZLV ist deutlich größer als 1.

Die beiden Pool-Brände mit Lupolen 5021 D Granulat ergeben die gleiche relative Abbrandrate. Das Zuluftverhältnis verringert sich unwesentlich von 7,5 auf 5,7. Es ist demnach genügend Luft zur vollständigen Verbrennung vorhanden. Da kein Sauerstoffmangel vorherrscht, verändert sich die Kohlenmonoxidausbeute nicht wesentlich. Trotzdem verringern sich die Kohlendioxidausbeute und die effektive Verbrennungswärme geringfügig.

Tabelle 10 Beschreibung des Abbrandverhaltens in Abhängigkeit von den Ventilationsrandbedingungen

Versuch	$\dot{m}_f$ <sup>1</sup> [kg/s]	$\dot{m}_f^r$ <sup>2</sup> [kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$Y_{CO_2}$ <sup>3</sup> [g g <sup>-1</sup> ]	$Y_{CO}$ <sup>4</sup> [g g <sup>-1</sup> ]	$H_{c,eff}$ <sup>5</sup> [kJ g <sup>-1</sup> ]	ZLV <sup>6</sup> [1]
Lupolen 5021 D Granulat, 0,5 m <sup>2</sup>	0,011	0,011	2,051	0,0121	31,80	≈ 7,5
Lupolen 5021 D Granulat, 1,0 m <sup>2</sup>	0,022	0,011	1,920	0,0125	28,80	≈ 5,7
Glystantin G48, 1,0 m <sup>2</sup>	0,017	0,017	1,057	0,0007	13,37	≈ 12
Glystantin G48, 4,5 m <sup>2</sup>	0,064	0,014	0,944	0,0008	11,16	≈ 4
Glystantin G48, 9,0 m <sup>2</sup>	0,130	0,014	0,789	0,0008	11,03	≈ 2
<sup>1</sup> Abbrandrate <sup>2</sup> relative Abbrandrate <sup>3</sup> Kohlendioxidausbeute <sup>4</sup> Kohlenmonoxidausbeute <sup>5</sup> effektive Verbrennungswärme <sup>6</sup> stöchiometrisches Zuluftverhältnis						

Bei der Verbrennung von Glystantin G48 besteht ein erheblicher Unterschied in der relativen Abbrandrate zwischen dem kleinen 1 m<sup>2</sup> Pool und den größeren 4,5 m<sup>2</sup> bzw. 9 m<sup>2</sup> Pool. Eine ähnliche Tendenz gibt es beim Zuluftverhältnis. Die effektive Verbrennungswärme und die Entstehungsrate für Kohlendioxid sinken mit abnehmendem Zuluftverhältnis. Wie auch bei den Versuchen im Room Corner Test ist bei der effektiven Verbrennungswärme eine deutliche Verringerung von ZLV = 12 auf ZLV = 4 zu erkennen. Die Kohlenmonoxidausbeute verändert sich nicht nennenswert.

### 3.2.3.3 Ergebnisse Blocklagerung mit der Flüssigkeit Glystantin G48

Zur Untersuchung des Brandverhaltens bei Blocklagerung von Flüssigkeiten wurden drei Versuche durchgeführt. Der Einfluss der reinen Verpackung wurde für einen Aufbau von einem einzelnen Block mit 2 Ebenen von jeweils 3 Kartons (10 PE-Flaschen pro Karton) untersucht (Versuch 13). Entsprechend wurde ein Versuch aufgebaut, bei dem die Flaschen mit insgesamt 120 l Glystantin G48 gefüllt waren (Versuch 12). Die Steigerung der Energie-

freisetzungsrates durch Vergrößerung der Brandlastmenge wurde im Versuch 23 beobachtet; hier waren 4 Ebenen mit jeweils 3 Kartons à 10 Flaschen mit einer Gesamtfüllmenge von 240 l Glysantin G48 in einem Block zusammengestellt. Der Einfluss der brennenden Verpackung auf die Energiefreisetzungsrates kann durch Vergleich mit dem Versuch des 4,5 m<sup>2</sup> großen Glysantin G48-Pools deutlich gemacht werden.

In Bild 6 sind die zeitlichen Verläufe der Energiefreisetzungsrates für die genannten Versuche mit Blocklagerung von Flüssigkeiten bzw. Flüssigkeitsverpackung dem 4,5 m<sup>2</sup> großen Pool-Brand gegenübergestellt.

Für die Blocklagerung zeigt sich in der Anfangsphase ein Anstieg der Energiefreisetzungsrates, der nahezu unabhängig von der Höhe des errichteten Blockes und von der Füllung der Kartons ist. Nach den ersten 600 Sekunden beginnt das Glysantin G48 aus den Flaschen zu laufen und entzündet sich, so dass die Energiefreisetzungsrates stark ansteigt. Ein großer Einfluss der gefüllten Flaschen (Wärmesenke) ist bei den entsprechenden beiden Versuchen im Verlauf der Energiefreisetzungsrates nicht zu erkennen. Der maximale Wert der Energiefreisetzungsrates aus dem Versuch mit den 120 l Glysantin G48 unterscheidet sich nur geringfügig von dem des 4,5 m<sup>2</sup> Pools. Das Anwachsen der Energiefreisetzungsrates bei dem Versuch mit 4 Ebenen (240 Liter Glysantin G48) beginnt gegenüber den anderen Versuchen etwas verzögert, dies könnte aber durch eine andere Handhabung der Zündquelle verursacht worden sein. Entscheidend ist, dass nach der Entzündung die Energiefreisetzung ähnlich ansteigt wie im Versuch mit 2 Ebenen und 120 l Glysantin G48. Nach ca. 900 Sekunden stürzte ein Karton vom Stapel, fiel über den Rand der Wanne und die Reste brannten unter der Wiegeeinrichtung weiter. Dieses Feuer wurde mit einem CO<sub>2</sub>-Handfeuerlöscher bekämpft. Daher sinkt kurzzeitig die Energiefreisetzungsrates ab, bevor die Wirkung des Eingriffs nachlässt und die Energiefreisetzungsrates wieder ansteigt. Der Maximalwert liegt dann aber deutlich über dem des 4,5 m<sup>2</sup> Pools. Hier macht sich wegen der insgesamt 4 Ebenen die Höhe des Aufbaus mit einer stark vergrößerten brennenden Oberfläche bemerkbar.

Der direkte Vergleich (Bild 7) zeigt, dass die Höhe eines Blocks (Anzahl der Kartonschichten übereinander) bei der Entzündung und während der Brandausbreitung keinen nennenswerten Einfluss auf die Energiefreisetzungsrates hat. Die Brandleistung stagniert bei einem niedrigen Blockaufbau vorzeitig, nachdem die Brandausbreitung über die gesamte Oberfläche fortgeschritten ist, die maximale Energiefreisetzungsrates ist erwartungsgemäß kleiner. Bei dem höheren Aufbau (4 Schichten) steigt die Energiefreisetzungsrates nicht um den Faktor 2 gegenüber dem halb so hohen Aufbau (2 Schichten). Durch die Verpackung allein kann keine mit der Oberfläche proportional oder sogar überproportional ansteigende Energiefreisetzungsrates verursacht werden. Vielmehr erhöht sich die maximale Energiefreiset-

zungsrates im vorliegenden Beispiel bei einer Verdoppelung der Blockhöhe lediglich um einen Faktor von ca. 1,5.

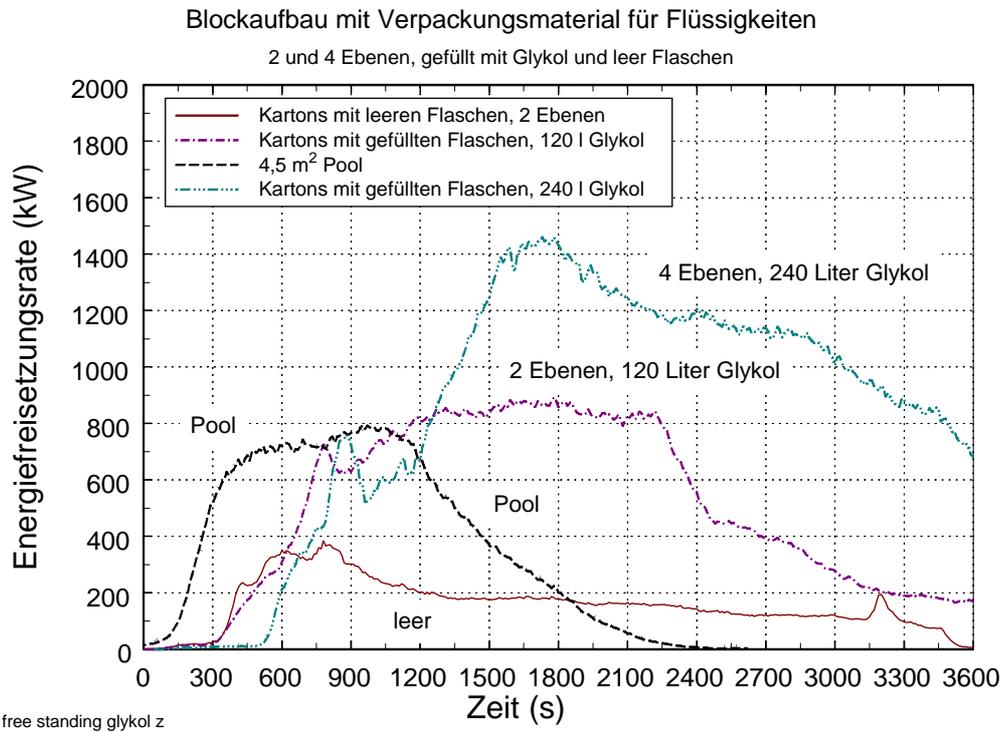


Bild 6 Energiefreisetzungsrates von Glysantin G48 beim Poolbrand und bei Blocklagerung

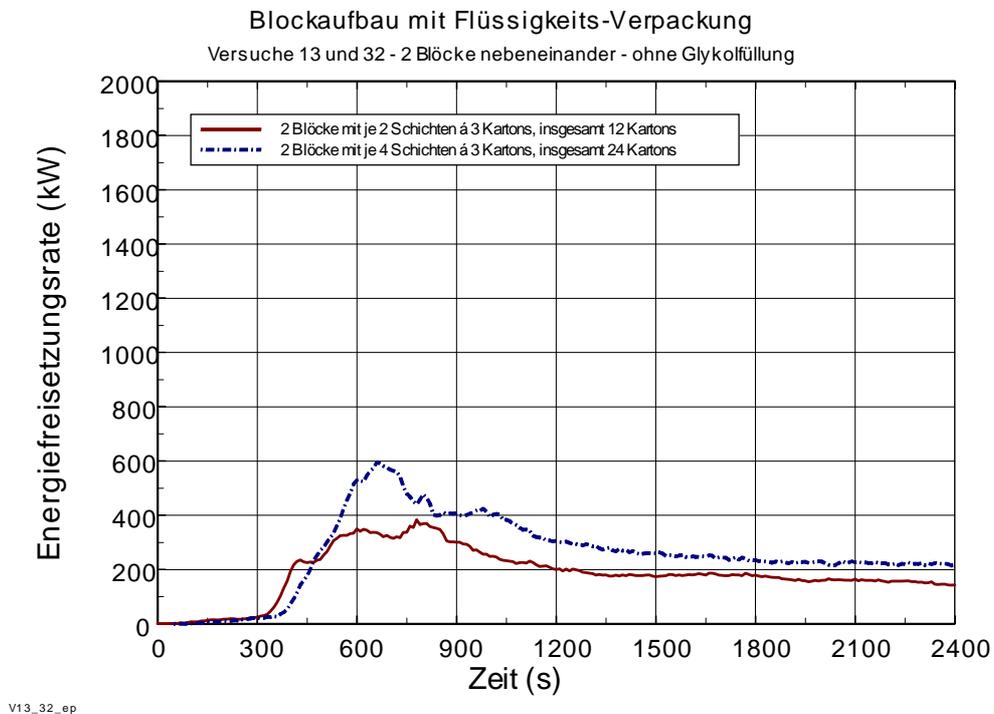
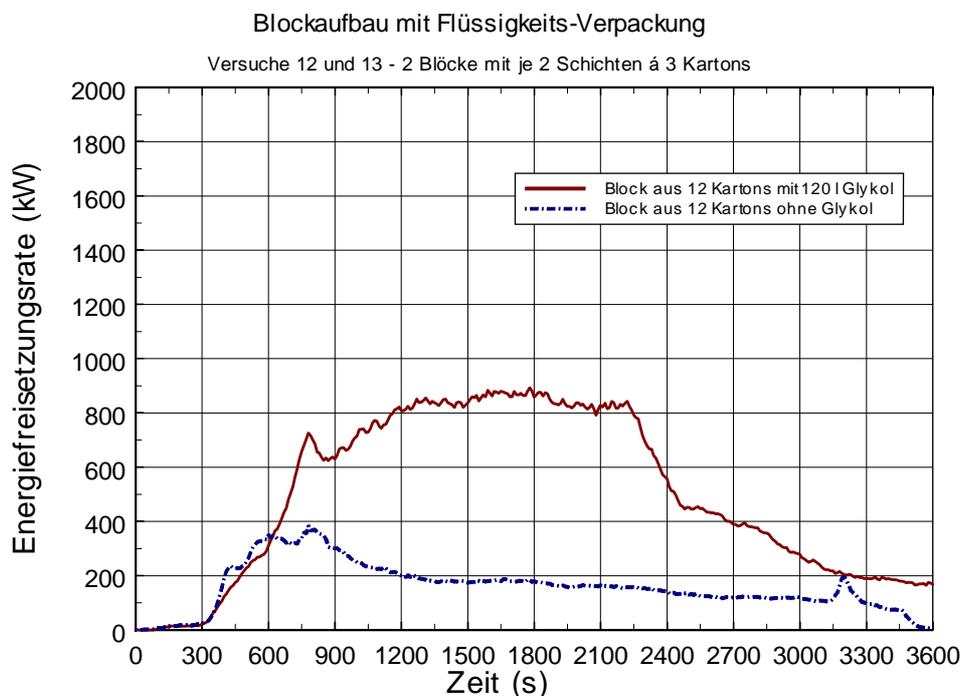


Bild 7 Einfluss der Höhe des Stapels bei Blocklagerung

Der Einfluss des Materials (z. B. Glysantin G48) kann sowohl am Beispiel des niedrigen Aufbaus mit 2 Kartonschichten (Bild 8) als auch am Beispiel des doppelt so hohen Aufbaus mit 4 Schichten (Bild 9) demonstriert werden. Demnach scheinen die Entzündung der Kartons und die Brandausbreitung über die vertikalen Flächen durch die zusätzliche Wärmekapazität der Glysantin G48-Füllung nicht nennenswert verlangsamt zu werden. Der langsamere Anstieg der Energiefreisetzungsrate beim Versuch mit den insgesamt 24 gefüllten Kartons scheint eher eine Folge des zufälligen Abrutschens eines Kartons zu sein und sollte deshalb nicht als charakteristisch angesehen werden. In beiden Fällen ergibt sich eine Steigerung der maximalen Energiefreisetzungsrate bei gefüllten Flaschen gegenüber reiner Verpackung um einen Faktor von ca. 2,3. Die Größe der Stahlwanne, in der jeweils der Lagerblock aufgestellt wurde und die die Fläche der auslaufenden Flüssigkeit begrenzt, hat keinen erkennbaren Einfluss auf den zeitlichen Verlauf oder die Größe der Energiefreisetzungsrate.



V12\_13\_ep

Bild 8 Einfluss von Verpackung und Füllung bei Blocklagerung (flacher Stapel)

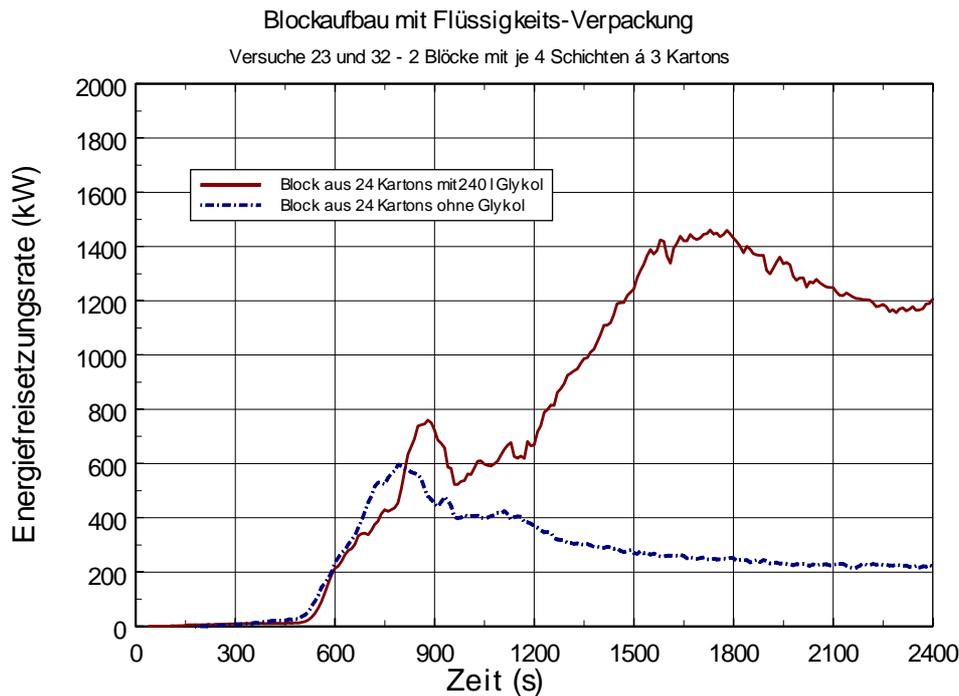


Bild 9 Einfluss von Verpackung und Füllung bei Blocklagerung (hoher Stapel)

### 3.2.3.4 Ergebnisse Regallagerung mit der Flüssigkeit Glysantin G48

Bei Regallagerung kommt dem Aufbau des Regals selbst eine gewisse Bedeutung für den Brandverlauf zu. Während bei Verwendung von Gitterrosten auslaufendes bzw. herausrieselndes Material durch die Löcher im Boden herabtropfen kann, bilden sich bei geschlossenen Regalböden vor dem Abtropfen auf jeder Ebene Lachen. Bei den in Bild 10 dargestellten Versuchen wurden geschlossene Regalböden verwendet, während bei den in Bild 11 dargestellten Versuchen Gitterroste als Regalböden eingesetzt wurden. Ansonsten waren die Regale gleichartig aufgebaut und es wurden jeweils 2 Kartons pro Regalboden aufgestellt.

Die drei in Bild 10 dargestellten Versuche zeigen in den ersten 1200 Sekunden eine ähnliche Brandentwicklung. Die Energiefreisetzungsrate steigt bis zu diesem Zeitpunkt verhältnismäßig langsam an. Danach stellt sich ein großer Unterschied beim Übergang von 4 auf 5 Regalebenen ein. Eventuell wird der weitere starke Anstieg der Energiefreisetzungsrate durch das Fehlen eines weiteren Bodens über den Kartons der obersten Regalebene begünstigt. Im Versuch mit 4 bestückten Regalebenen ist bei ca. 1750 Sekunden ebenfalls ein auffälliger Anstieg der Energiefreisetzungsrate zu beobachten.

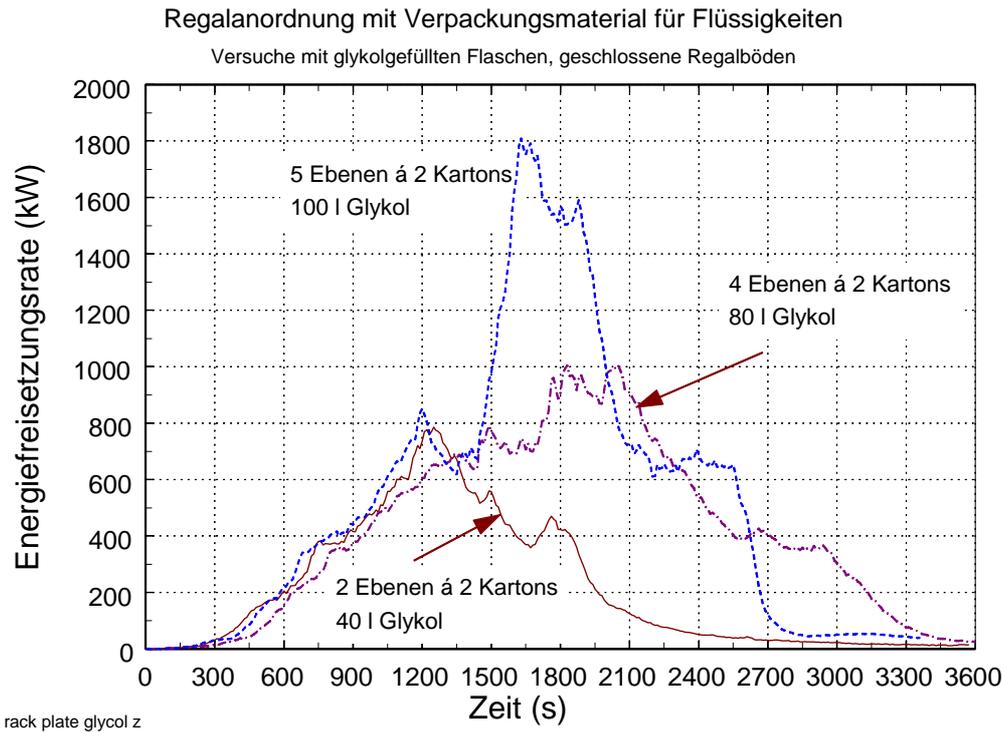


Bild 10 Energiefreisetzungsrate von Glysantin G48 in Regalanordnungen (geschlossene Regalböden)

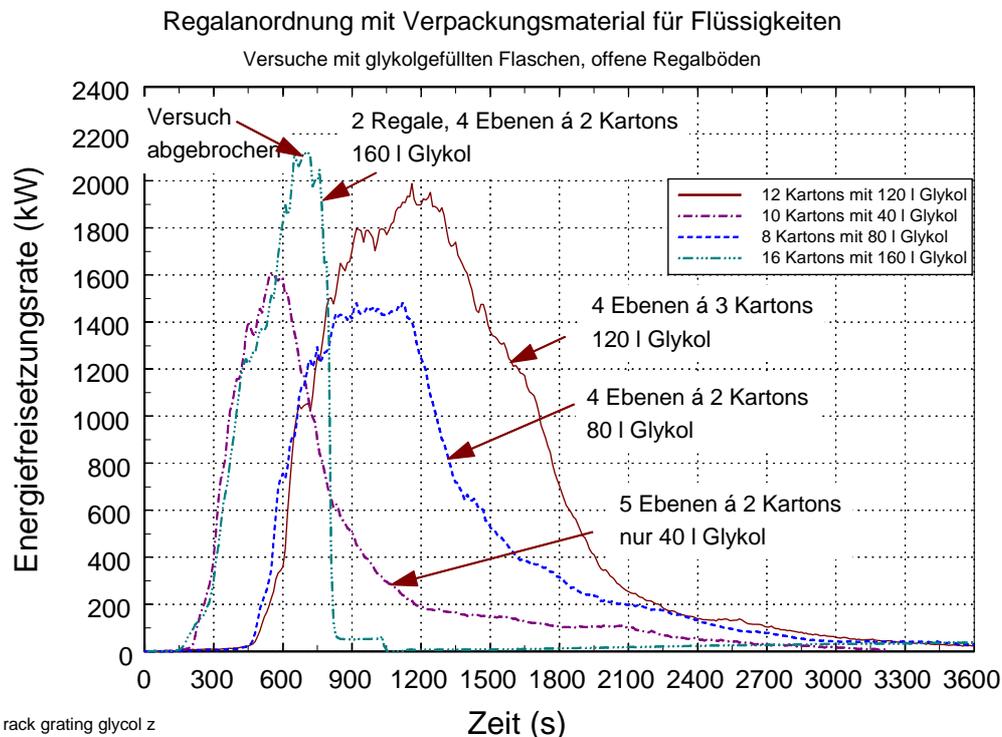


Bild 11 Energiefreisetzungsrate von Glysantin G48 in Regalanordnungen (offene Regalböden, Gitterroste)

In Bild 11 werden die Ergebnisse von vier Versuchen mit „Gitter-Regalen“ dargestellt. In zwei Versuchen wurden vier Regalböden bestückt, wobei 2 bzw. 3 Kartons mit jeweils 10 gefüllten Flaschen pro Regalboden besetzt waren. In einem Versuch waren auf 5 Ebenen jeweils 2 Kartons aufgestellt, wobei nur in den Kartons der obersten Ebene die Flaschen mit Glysantin G48 gefüllt waren. Bei einem der Versuche wurden zwei Regale eingesetzt, die in einem Abstand von 0,5 m zueinander parallel aufgestellt waren.

Wenn man vom zeitlichen Versatz der beiden Versuche mit 4 bestückten Regalböden absieht, so steigt in allen Versuchen die Energiefreisetzungsrate bis zum Erreichen eines Wertes von ca. 1200 kW gleichartig an. Daraus lässt sich schließen, dass die Brandentwicklung in der Anfangsphase vornehmlich durch die Verpackung und weniger durch die Füllung gesteuert wird. Der Abbrand der Füllung gewinnt erst mit fortschreitender Branddauer an Bedeutung.

Für den Verlauf des Versuchs mit den zwei Regalen sind weitere Einzelheiten von Bedeutung: Gezündet wurde an der unteren rechten Kante des Regals in der hinteren Abbrandwanne. Nach einer raschen Brandausbreitung über dieses Regal erfolgte der Feuerübersprung auf das zweite Regal (in der vorderen) Abbrandwanne bereits nach ca. 400 Sekunden. Der Versuch musste nach ca. 650 Sekunden mit Überschreiten einer Brandleistung von 2 MW abgebrochen werden, da mit dem Rauchabzugsystem über den Strang der Abzugshaube langanhaltende Brände mit derartig hoher Leistung nicht bewältigt werden können.

### **3.2.4 Vergleich der Ergebnisse der Cone-Kammer und des Room-Corner-Test**

Das Zuluftverhältnis ZLV bzw. das globale Äquivalenzverhältnis GER dient zur maßstabsunabhängigen Quantifizierung der Ventilationsbedingungen. Das Zuluftverhältnis ZLV ist das Verhältnis von angebotener Zuluftmenge zu der für eine stöchiometrische Verbrennung notwendigen Luftmenge. Der Nenner des ZLV berechnet sich aus dem Produkt von Abbrandrate und Zuluftbedarf  $r$ . Das globale Äquivalenzverhältnis GER ist der Kehrwert des Zuluftverhältnisses ZLV. Bei den Laborverfahren wird die Zuluftmenge als Randbedingung des einzelnen Versuchs direkt gesteuert, bei den Raumbrandversuchen kann sie mit Hilfe der Ergebnisse aus Differenzdruck- und Temperaturmessung in der Ventilationsöffnung berechnet werden, ist aber nur im Fall der Brandversuche im Room Corner Test indirekt durch die Fläche der Öffnung beeinflussbar. Prinzipiell kann das Zuluftverhältnis ZLV bzw. das globale Äquivalenzverhältnis GER dann angegeben werden, wenn neben der Zuluftmenge auch die chemische Zusammensetzung der Brandlast und deren Heizwert, somit der stöchiometrische Luftbedarf bekannt sind und die Abbrandrate gemessen wird. Sind diese Informationen nicht zugänglich, z. B. beim Experimentieren mit Mischbrandlasten, dann könnte die für eine stöchiometrische Verbrennung notwendige Luftmenge auch mit den

Grundlagen der Sauerstoffkalorimetrie über die Energiefreisetzungsrate (Sauerstoffverbrauch) bestimmt werden.

In der Cone-Kammer wurden der Feststoff Lupolen 5021 D Granulat (PE-Granulat) und die Flüssigkeit Glysantin G48 (Glykol) eingehend untersucht. Der Vergleich der Verbrennungseffektivität, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidausbeute aus den Raumbrandversuchen mit denjenigen aus den Versuchen in der Cone-Kammer führt zu dem Schluss, dass die in den Raumbrandversuchen ermittelten Zuluftverhältnisse im Allgemeinen größer sind als die Zuluftverhältnisse in der Cone-Kammer, bei denen eine vergleichbare Verbrennungseffektivität oder vergleichbare Ausbeuten ermittelt wurden. Umgekehrt führt dies zur Annahme, dass unter praxismgerechten Bedingungen die Verbrennung nicht unmittelbar durch in den Brandraum einströmende Zuluftmenge gesteuert wird. Vergleicht man die in den Raumbrandversuchen bestimmte Verbrennungseffektivität bzw. Kohlendioxid- oder Kohlenmonoxidausbeute mit den Untersuchungen der Cone-Kammer, so lässt sich ein Zuluftverhältnis im Labormaßstab bestimmen, bei dem sich für den jeweiligen Parameter ein vergleichbarer Wert wie bei den Raumbrandversuchen ergibt.

Anhand der in Tabelle 11 benannten Werte für die Verbrennungseffektivität und die Kohlendioxidausbeute wird die bereits bei der Diskussion der Ergebnisse der Cone-Kammer-Untersuchungen (siehe /HOS 00/) festgestellte Korrelation dieser beiden Parameter deutlich. Da die Kohlendioxidausbeute und die Verbrennungseffektivität bzw. effektive Verbrennungswärme mit sinkendem Zuluftverhältnis unterhalb von ZLV = 1,5 stark abfallen, liegt man bei einer Risikobetrachtung bezüglich der Energiefreisetzungsrate und der Kohlendioxidstehungsrate auf der sicheren Seite, wenn man die Abbrandrate mit dem jeweils bei höherem Zuluftverhältnis ermittelten und damit größeren Werten multipliziert. Andererseits ergibt sich unter Raumbrandbedingungen im brandlastgesteuerten Fall eine vergleichsweise geringe Kohlenmonoxidausbeute, vergleichbar zur Ausbeute in der Cone-Kammer bei einem Zuluftverhältnis von ca. 2.

Tabelle 11 Zuluftverhältnis in der Cone-Kammer

Brennstoff	Lupolen 5021 D Granulat	Glysantin G48
	äquivalentes Zuluftverhältnis in der Cone-Kammer	
$Y_{CO_2}$	< 1	≈ 1
$Y_{CO}$	≈ 2	1,8 - 2,3
$HOC_{eff}$	< 1	≈ 1

Liegen ventilationsgesteuerte Abbrandbedingungen vor, so kann man Ausbeuten annehmen, die bei einem Zuluftverhältnis  $ZLV < 1$  (globales Äquivalenzverhältnis  $GER > 1$ ) ermittelt wurden. Im brandlastgesteuerten Fall führt die Verwendung von derartigen Ausbeuten bei der Berechnung der Schadgasfreisetzung zu einer konservativen Einschätzung der Gefährdung.

In den folgenden Bildern werden Ergebnisse für die in der Cone-Kammer ausführlich untersuchten Materialien Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse aus den Großbrandversuchen im Room Corner Test (Tabelle 8) und in der Brandkammer „Oskar“ (Tabelle 10) aufgenommen.

Für die effektive Verbrennungswärme können die in Bild 12 eingezeichneten Funktionen für Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 angegeben werden.

Es wäre denkbar, dass das Kenngrößen des Abbrandverhaltens – Energiefreisetzung und Freisetzung von Verbrennungsprodukten – für einzelne Materialien oder für eine Materialgruppe als Funktion des Zuluftverhältnisses dargestellt werden. Für die in der Cone-Kammer untersuchten Materialien Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 kann die Verbrennungseffektivität als Verhältnis von effektiver Verbrennungswärme im Naturbrand zum unteren Heizwert mit einer in Bild 13 eingezeichneten Funktion angegeben werden.

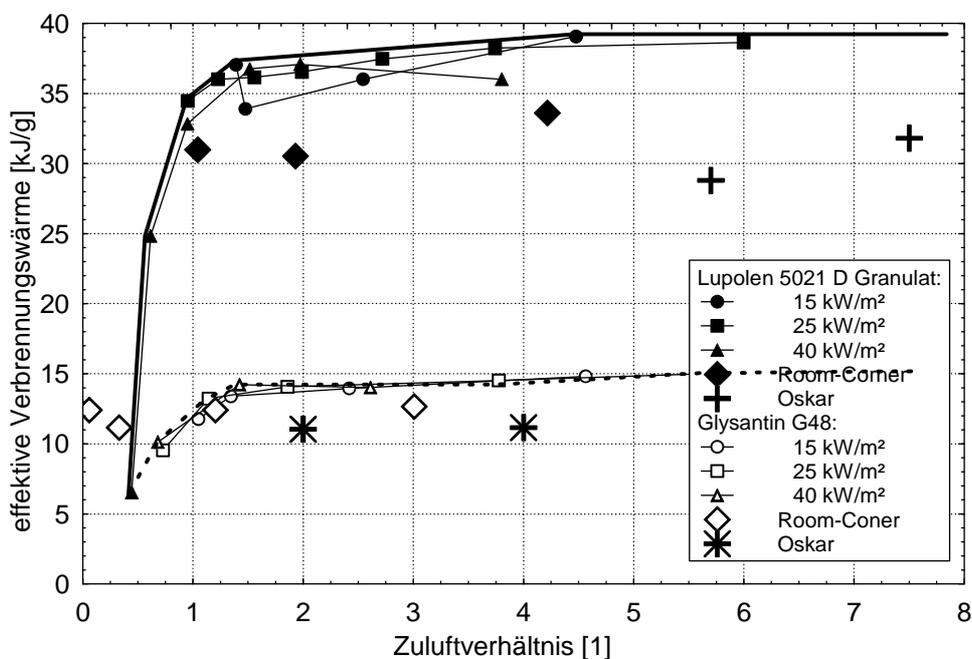


Bild 12 Effektive Verbrennungswärme in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

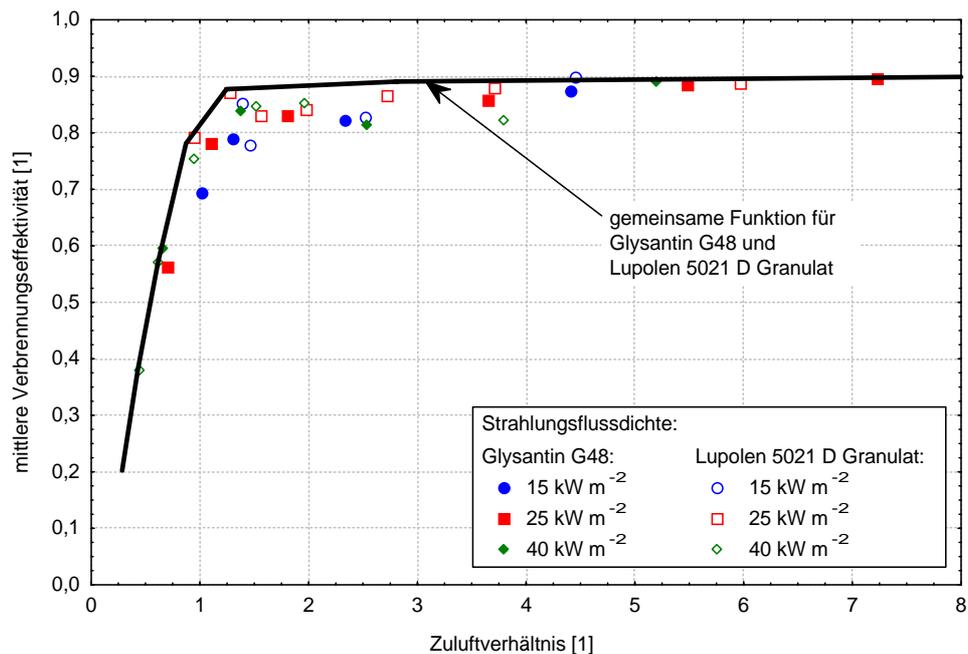


Bild 13 Effektive Verbrennungseffektivität in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

Bei Betrachtung der stöchiometrischen Kohlendioxidausbeute ergibt sich für beide Materialien ebenfalls eine gemeinsame Funktion. Allerdings ist es allgemein üblich, die Kohlendioxidausbeute als Verhältnis der freigesetzten Kohlendioxidmasse zur umgesetzten Brennstoffmasse darzustellen. Da hierbei die chemische Zusammensetzung mit eingeht, erhält man für verschiedene Stoffe auch unterschiedliche abdeckende Darstellungen der Kohlendioxidausbeute (Bild 14).

Im Gegensatz zur Verbrennungseffektivität oder zur stöchiometrischen Kohlendioxidausbeute lässt sich bei Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 die Kohlenmonoxidausbeute auch durch Normierung (Einbeziehung der chemischen Zusammensetzung) nicht zusammenführen. In diesem Parameter des Brandverhaltens unterscheiden sich beide Materialien zu stark voneinander. Trotzdem kann dieser Parameter getrennt für beide Materialien in der Form der (massenbezogenen) Kohlenmonoxidausbeute als Funktion des Zuluftverhältnisses dargestellt werden (Bild 15).

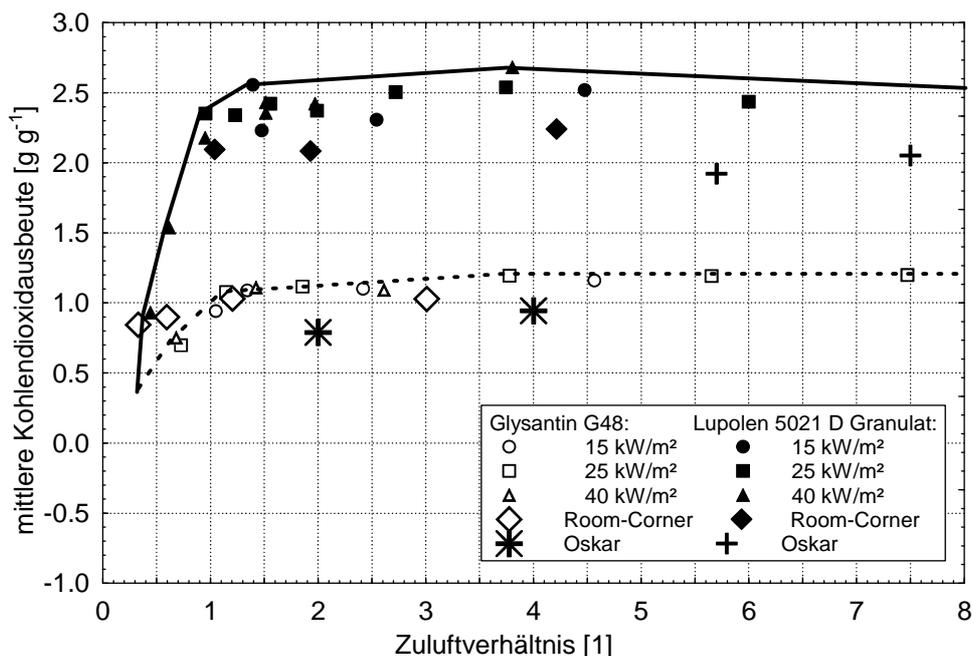


Bild 14 Kohlendioxidausbeute für Glysantin G48 und Lupolen 5021 D Granulat in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

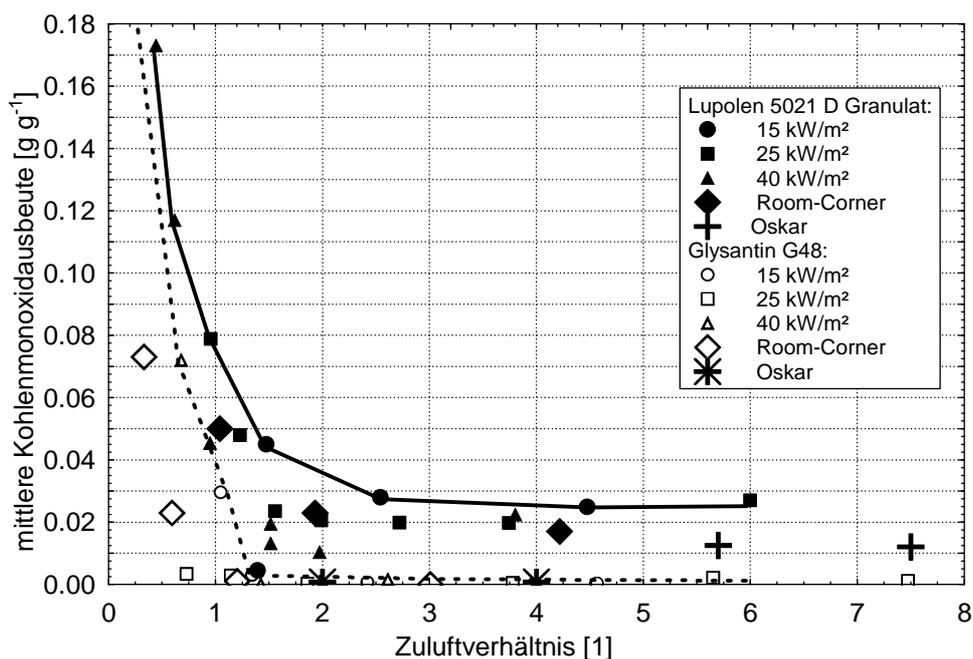


Bild 15 Kohlenmonoxidausbeute für Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

Anhand der Verbrennungseffektivität, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidausbeute wurde gezeigt, dass die Abhängigkeit dieser Parameter von den Ventilationsrandbedingungen vereinfacht dargestellt werden kann. Auf entsprechende Weise lässt sich auch die Ausbeute anderer Verbrennungsprodukte beschreiben. Der funktionale Zusammenhang dieser Materialparameter mit dem Zuluftverhältnis kann mit der Mikroverbrennungsapparatur



Liegen bestimmte Randbedingungen vor, z. B. ausreichend hohe Raumtemperaturen, kann es zum Flashover kommen. Der Brand geht dann in den Vollbrand über, d. h. der gesamte Raum wird in den Brand einbezogen. Wenn eine bestimmte Menge der Brandlast verbraucht ist, schließt eine abklingende Phase des Brandes an.

## 4.2 Energiefreisetzungsrate: Design-Feuer

In der Phase der Brandausbreitung steigen die Energiefreisetzung und die Temperaturentwicklung stark an. International hat sich für die Beschreibung der Energiefreisetzungsrate in der Brandausbreitungsphase der sogenannte  $t^2$ -Ansatz durchgesetzt /DRY 99/, nach dem die Energiefreisetzungsrate  $\dot{Q}(t)$  (bzw. HRR von engl. Heat Release Rate) in Abhängigkeit von der Zeit und einem Faktor zur Beschreibung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit quadratisch ansteigt:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \cdot \left( \frac{t}{t_g} \right)^2, \quad (7)$$

mit:

$$\dot{Q}_0 = 1,0 \text{ MW},$$

t Zeitdauer (von der Entzündung an gerechnet Inkubationszeit ist abgezogen) [s],

$t_g$  Brandentwicklungszeit [s] bis zum Erreichen von  $\dot{Q}_0$ .

Die Brandentwicklungszeit  $t_g$  als Zeitdauer, bis der Brand auf eine Energiefreisetzungsrate von 1,0 MW angewachsen ist, hängt im Wesentlichen von den thermophysikalischen und geometrischen Eigenschaften der Brandlast ab. Soll der quadratische Ansatz nach Gleichung (7) zur Beschreibung der ersten Phase der Brandentwicklung herangezogen werden, sind für einige Nutzungsarten Werte in Tabelle 12 aufgeführt /BLU 03/. Der fortentwickelte Brand wird auch als Vollbrand bezeichnet, bei dem alle vorhandenen brennbaren Stoffe im Brandraum vom Brand erfasst sind. In der Vollbrandphase verläuft die auf ihr Maximum angewachsene Energiefreisetzungsrate nahezu konstant. Die maximale Energiefreisetzungsrate kann als der kleinere der beiden Maximalwerte des ventilationsgesteuerten bzw. brandlastgesteuerten Falls bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{\max} = \text{MIN} \{ \dot{Q}_{\max,v} ; \dot{Q}_{\max,f} \}.$$

Für den ventilationsgesteuerten Brand gilt:

$$\dot{Q}_{\max,v} = \frac{0,52 \cdot A_w \sqrt{h_w}}{r} \cdot H_{c,eff} \text{ [MW]} \quad (8)$$

Tabelle 12 Brandentwicklungszeit  $t_g$  für typische Nutzungsarten und Produkte /BLU 03/

Wachstumsrate	Brandentwicklungszeit [s]	Nutzungsart	Produkte
langsam	600	Galerie	dicht gepackte Holzwaren
mittel	300	Wohnung, Büro, Hotel, Nutzungen ohne leichtbrennbare Stoffe	normale Baumwoll-Matratzen, Möbel
schnell	150	Laden	Kunststoffschaum, gefüllte Postsäcke, Polyethylen-Paletten, Polyurethan-Matratzen, Holzpaletten
sehr schnell	75	Industrielager, Fertigungshalle	Benzinbrände, schnell-entzündliche Polstermöbel

mit:

$A_w$  Öffnungsfläche [m<sup>2</sup>],

$h_w$  Höhe der Öffnung [m],

$r$  stöchiometrischer Luftbedarf (=13,1kg<sub>Luft</sub> / kg<sub>Öl</sub> für Hydrauliköl / SCH 02/),

$H_{c,eff}$  effektive Verbrennungswärme [MJ/kg].

und für den brandlastgesteuerten Brand:

$$\dot{Q}_{max,f} = \dot{m}'' \cdot H_u \cdot \chi \cdot A_f \quad \text{[MW]} \quad (9)$$

mit:

$\dot{m}''$  flächenspezifische Abbrandrate [kg/(sm<sup>2</sup>)],

$H_u$  unterer Heizwert [MJ/kg],

$\chi$  Verbrennungseffektivität [-],

$A_f$  Grundfläche des Brandraumes [m<sup>2</sup>].

Die durch Gleichung (9) definierten Größen sind entweder durch die Geometrie des Raumes bestimmt oder müssen durch eine Datenbank vorgegeben sein. Angaben zu verschiedenen Brandlasten findet man in der Literatur z. B. bei /GOT 3/, in der /KTA 00/, bei /HOS 06/ und /HOS 00/. Beispiele zu Eingabewerten zur Bestimmung des Verlaufs der Energiefreisetzungsrates mit Angaben zu unterschiedlichen Brandlasten gibt Tabelle 13.

Tabelle 13 Eingabewerte zur Bestimmung des Verlaufs der Energiefreisetzungsrate am Beispiel unterschiedlicher Brandlasten aus verschiedenen Literaturquellen

Brandlast	Maximale flächenspezifische Abbrandrate $\dot{m}''$	Unterer Heizwert $H_u$	Verbrennungseffektivität $\chi$	maximale relative Energiefreisetzungsrate nach Gleichung (9)
	kg/(sm <sup>2</sup> )	MJ/kg	-	kW/m <sup>2</sup>
Öl	0,015 <sup>1)</sup>	42 <sup>3)</sup>	1 <sup>3)</sup>	630
Holz	0,03 <sup>2)</sup>	21 <sup>2)</sup>	0,5 <sup>2)</sup>	315
PE	0,0275 <sup>4)</sup>	43,2 <sup>4)</sup>	0,73 <sup>4)</sup>	867
Glykol	0,1875 <sup>4)</sup>	16,6 <sup>4)</sup>	0,73 <sup>4)</sup>	227

<sup>1)</sup> /GOT 03 /; <sup>2)</sup> /HOS 95/; <sup>3)</sup> /KTA 00/; <sup>4)</sup> /HOS 00/

Wenn die Brandlast im Brandraum durch den Brand weitgehend aufgezehrt ist und keine weitere Brandausbreitung auf benachbarte Räume stattfindet, setzt die Abklingphase des Brandes ein. Die Energiefreisetzungsrate verringert sich, wenn ca. 70 % der anfänglich vorhandenen Brandlast umgesetzt /ZEH 04/ sind. Die Abklingphase kann auch durch äußere Eingriffe wie Löschmaßnahmen der Feuerwehr oder eine automatische Löschanlage eingeleitet werden. Für die Energiefreisetzungsrate wird in der Abklingphase ein linear fallender Verlauf angesetzt, bis die gesamte Brandlast aufgezehrt ist.

Bild 17 zeigt den Verlauf der Energiefreisetzungsrate in den drei Phasen des Brandes, der für die Ermittlung des Temperaturzeitverlaufs realer Brände in Ansatz gebracht wird.

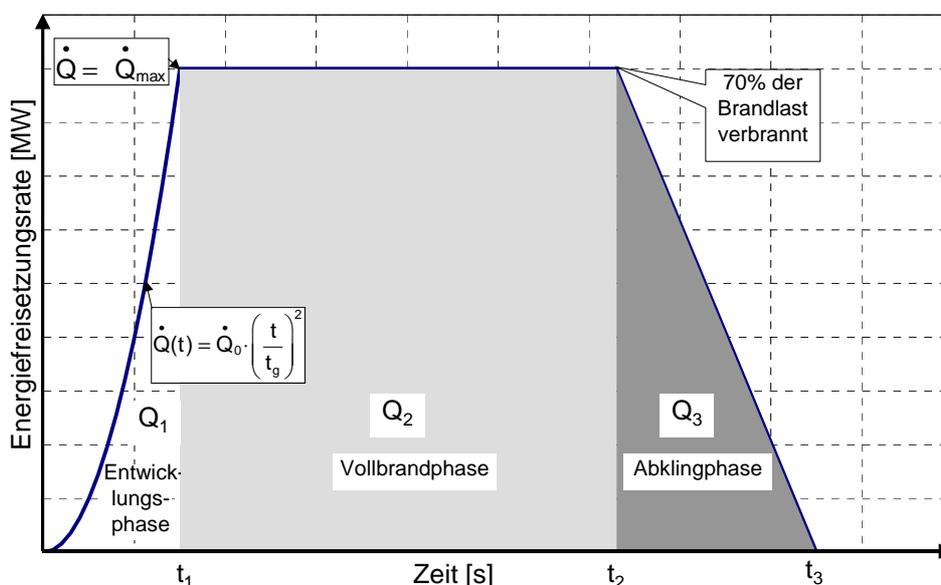


Bild 17 Ansatz für den Verlauf der Energiefreisetzungsrate (Prinzip)

Die gesamte verbrennende Brandlast  $Q$  ergibt sich aus dem Integral (Fläche unter der Kurve) der Energiefreisetzungsrate und setzt sich aus den in den drei Phasen des Brandes verbrauchten Anteile  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $Q_3$  zusammen:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 .$$

Die Entwicklungsphase des Brandes geht zum Zeitpunkt  $t_1$  in die Vollbrandphase über, wenn

die maximale Energiefreisetzungsrate  $\dot{Q}_{\max}$  erreicht ist. Aus der Gleichung  $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g}\right)^2$

mit:

$$\dot{Q}_0 = 1,0 \text{ MW}$$

$t$  = Zeitdauer (von der Entzündung an gerechnet) [s],

$t_g$  = Brandentwicklungszeit [s]

folgt mit  $t = t_1$ :

$$t_1 = \sqrt{t_g^2 \cdot \dot{Q}_{\max}} .$$

Die in der Brandentwicklungsphase aufgezehrte Brandlast  $Q_1$  ergibt sich durch Integration

von der Gleichung  $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g}\right)^2$  zu:

$$Q_1 = \int_0^{t_1} \dot{Q}(t) dt = \int_0^{t_1} \left(\frac{t}{t_g}\right)^2 dt = \frac{t_1^3}{3 \cdot t_g^2} .$$

In der Vollbrandphase herrscht die maximale Energiefreisetzung. Die Energiefreisetzungsrate verläuft konstant. Die Vollbrandphase endet, wenn 70 % der gesamten Brandlast  $Q$  verbrannt sind. Die in der Vollbrandphase aufgebrauchte Brandlast ermittelt sich demnach zu:

$$Q_2 = 0,7 \cdot Q - Q_1 .$$

Der Zeitpunkt  $t_2$ , zu dem der Brand in die Abklingphase übergeht, errechnet sich zu:

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{\dot{Q}_{\max}} .$$

Die Abklingphase des Brandes setzt ein, wenn noch 30 % der gesamten Brandlast  $Q$  unverbrannt sind:

$$Q_3 = 0,3 \cdot Q .$$

Die Energiefreisetzungsrate fällt linear ab, bis zum Zeitpunkt  $t_3$  die gesamte Brandlast  $Q$  aufgebraucht ist:

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot Q_3}{\dot{Q}_{\max}} .$$

#### 4.2.1 Berücksichtigung eines Flashovers

Obwohl in der Literatur Möglichkeiten beschrieben werden, wie ein Flashover bei der Herleitung des Verlaufs der HRR berücksichtigt werden kann, ist bei dieser Größe Vorsicht angesagt. Ein Flashover beschreibt eine Brandsituation, bei der schlagartig der gesamte Raum in den Brand einbezogen wird. An das Auftreten eines Flashovers werden dann Bedingungen z. B. an die Temperatur der Heißgasschicht oder an die Höhe der Energiefreisetzungsrate  $\dot{Q}_{fo}$  geknüpft.  $\dot{Q}_{fo}$  kann z. B. nach der Methode von Walton und Thomas /WAI 02/ bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{fo} = 0,0078 \cdot A_T + 0,378 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad [\text{MW}] \quad (10)$$

mit

$A_T$ : Gesamtfläche der umfassenden Bauteile ohne Öffnungsflächen

$A_w$ : Fläche der Ventilationsöffnungen [ $\text{m}^2$ ]

$h_w$ : gemittelte Höhe der Ventilationsöffnungen [m]

Die Zeit des Flashover  $t_{fo}$  berechnet sich dann über den quadratischen Ansatz mit:

$$t_{fo} = \sqrt{t_g^2 \cdot \dot{Q}_{fo}}, \quad (11)$$

Wenn ein Brandsimulationsmodell eingesetzt wird, in dem der Verlauf der HRR durch die Überprüfung der Randbedingungen wie Sauerstoffkonzentration und Temperatur der Gasphase beeinflusst bzw. für jeden Zeitschritt überprüft wird, führt eine quasi statische Vorgabe einer Flashover-Zeit zu Problemen bei der Ableitung eines realistischen Verlaufs der HRR. Aus diesem Grunde wäre es sinnvoll, in Zukunft die Auswirkung eines Flashovers auf den Verlauf der HRR im Brandsimulationsprogramm selber berechnen zu lassen, auch wenn hier mit Vereinfachungen gerechnet werden muss. Für einfache Brandszenarien mit festen Randbedingungen für die Ventilation ist die hier beschriebene Vorgehensweise aber durchaus sinnvoll.

#### 4.2.2 Einschränkung der Energiefreisetzungsrate am Beispiel von CFAST

Die Beschreibung eines komplexen Brandes, wie er sich in einem Raum bei Vorhandensein mehrerer Brandlasten ereignen kann, ist durch standardisierte Zeitverläufe, wie sie in Kapitel 4.1 angegeben werden, nur eingeschränkt möglich. Eine grundsätzliche Problematik liegt in den schwer erfassbaren Rückkopplungseffekten der Brandwirkung auf die Brandlast und damit auf die Abbrandrate beim Übergang von brandlastgesteuerten Bränden im Freien auf

Raumbrände in kleinen Räumen. Diese Effekte sind nur sehr schwer quantifizierbar sind, es spielen sowohl die Umfassungsflächen als auch die Art der Brandlast eine entscheidende Rolle. Eine Berücksichtigung der Rückkopplung auf die Pyrolyse ist derzeit noch Stand der Forschung und Entwicklung und ist aktuell in keinem Brandsimulationsprogramm enthalten.

Da sich die Ventilationsverhältnisse während eines Brandgeschehens stark ändern können, besteht in verschiedenen Brandsimulationsprogrammen die Möglichkeit, den Einfluss der Zuluft auf den Brandverlauf zeitabhängig zu kontrollieren (constrained fire). Dann ist es sinnvoll, für die Ermittlung einer maximalen Energiefreisetzungsrate zunächst den brandlastgesteuerten Fall nach Gleichung (9) anzusetzen, um den Verlauf nach Kapitel 4.1 zu bestimmen. In CFAST wird dann für den Fall „constrained fire“ die Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit des vorhandenen Sauerstoffs begrenzt. Der Grundansatz ist hierbei wiederum die Beziehung:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot H_u \quad (12)$$

in der die Abbrandrate des Brennstoffs  $\dot{m}_f$  über den unteren Heizwert  $H_u$  mit der Energiefreisetzungsrate  $\dot{Q}(t)$  in Verbindung gebracht wird. Die Erfahrung, dass bei realen Bränden in der Regel keine vollständige Verbrennung stattfindet und Rückstände unverbrannten Brennstoffs übrig bleiben, kann durch eine Verbrennungseffektivität  $\chi < 1,0$  berücksichtigt werden. Der Zusammenhang zwischen der bereits oben eingeführten effektiven Verbrennungswärme  $H_{c,eff}$  und dem unterem Heizwert  $H_u$  ist gegeben durch:

$$H_{c,eff} = \chi \cdot H_u$$

Der Sauerstoffverbrauch  $\dot{m}_O$  zur Erreichung dieser Energiefreisetzungsrate entspricht

$$\dot{m}_O = \frac{\dot{Q}(t)}{E} = \dot{m}_f \cdot \frac{H_u}{E}$$

wobei E der Energiefreisetzung je umgesetzter Masse Sauerstoff entspricht und typischerweise für die meisten organischen Brennstoffe mit  $1,31 \cdot 10^7$  J/kg angesetzt werden kann. Der verfügbare Massenanteil des Sauerstoffs wird in CFAST für jeden Zeitschritt kontrolliert. Durch Vorgabe eines Koeffizienten  $C_{LOL}$  (Lower Oxygen Limit Koeffizient), der dem Anteil des Brennstoffs entspricht, der in Abhängigkeit vom verfügbaren Sauerstoff brennbar ist, kann die verfügbare Massenabnahmerate Sauerstoff  $\dot{m}_{O, verfügbar}$  bestimmt werden:

$$\dot{m}_{O, verfügbar} = \dot{m}_e Y_{O_2} C_{LOL}$$

mit

$\dot{m}_e$  Masseneinmischungsrate

$Y_{O_2}$  Massenanteil Sauerstoff

für  $C_{LOL}$  gilt  $0 \leq C_{LOL} \leq 1$ .

Für  $C_{LOL}$  wird in /JON 05/ folgender funktionaler Zusammenhang:

$$C_{LOL} = \frac{\tanh(800 \cdot (Y_{O_2} - Y_{LOL}) - 4) + 1}{2} \quad (13)$$

gegeben, so dass die Bestimmung von  $C_{LOL}$  nach Gleichung (13) durch die Vorgabe eines unteren Sauerstoffmassenanteils  $Y_{LOL}$  gegeben ist. Zusätzlich kann eine untere Grenze für die Temperatur gesetzt werden bei der eine Verbrennung stattfindet. Weitere Details zu den verwendeten Gleichungen sind der technischen Referenz von CFAST /JON 05/ zu entnehmen.

Den Einfluss auf die tatsächlich in CFAST umgesetzte Energiefreisetzungsrate (HRR) zeigt Bild 18 für ein einfaches Raumbrandszenarios mit einer Türöffnung mit vorgegebener maximaler HRR für verschiedene Kombinationen der Parameter Lower Oxygen Limit (LOL) und Öffnungshöhe (ÖH). Es wurde ein Raum mit den Maßen Länge x Breite x Höhe = 5 x 5 x 6 m<sup>3</sup> und einer Öffnungsbreite von 1,2 m angenommen. Für das Feuer wurde eine Brandentwicklungszeit von  $t_g = 75$  s und eine Brandlastdichte von 300 MJ/m<sup>2</sup> angenommen. Als maximale Energiefreisetzungsrate berechnet sich über Gleichung (9) 6,25 MW für den brandlastgesteuerten Fall, wenn man davon ausgeht, dass die gesamte Grundfläche des Raumes von 25 m<sup>2</sup> in den Brand einbezogen werden kann und holzartige Brandlasten vorhanden sind. Im Fall einer 2 m hohen Öffnung (gestrichelte, rote Linie) kann ein Teil der brennbaren Gase außerhalb der Öffnung verbrennen, so dass die resultierende HRR im betrachteten Raum niedriger ausfällt, als bei einer Öffnungshöhe von 1 m (durchgezogene, blau Linie).

Für die Kombination ( $Y_{LOL} = 15$  %;  $\text{ÖH} = 1$  m) wird die vorgegebene HRR in CFAST direkt umgesetzt, für alle anderen Kombinationen ergeben sich im Vergleich ab einem bestimmten Zeitpunkt geringere kalkulierte Energiefreisetzungsraten. Bild 19 zeigt den Verlauf der berechneten Temperatur der Heißgasschicht für die entsprechenden Kombinationen. Im Fall einer 2 m hohen Öffnung (gestrichelte, rote Linie) fällt die Temperatur der Heißgasschicht zunächst höher aus als bei einer Öffnungshöhe von 1 m (durchgezogene, blaue Linie); dieses ist aber im Ergebnis gekoppelt mit einer geringeren Höhe der Heißgasschicht.

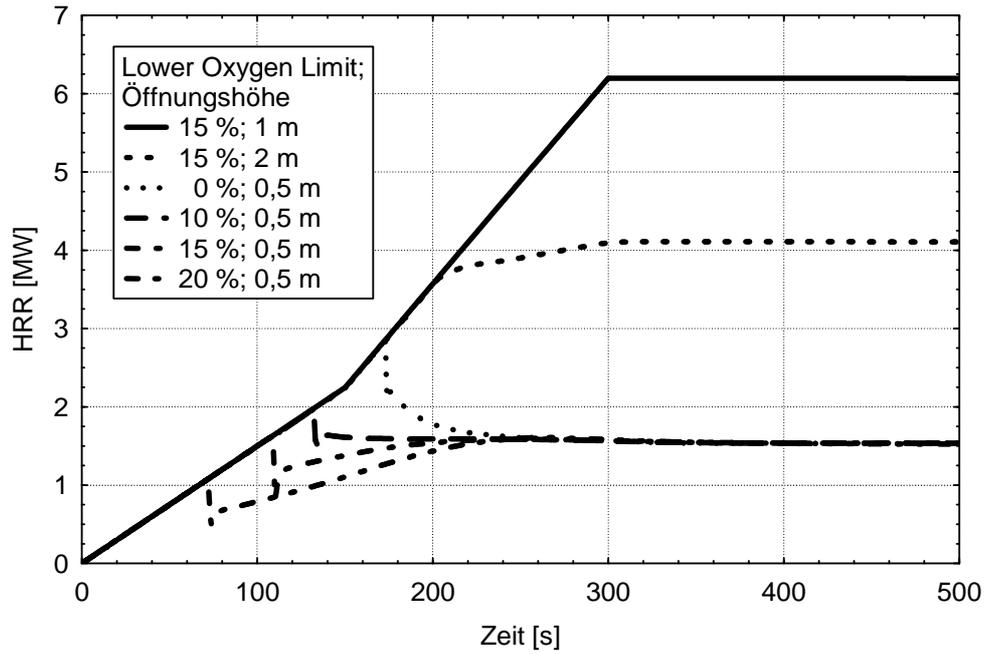


Bild 18 Verlauf der Energiefreisetzungsrate für Berechnungen in einem einfachen Raumbrandszenario mit unterschiedlichen Öffnungsflächen für die Zuluft und verschiedenen Angaben zum Lower Oxygen Limit

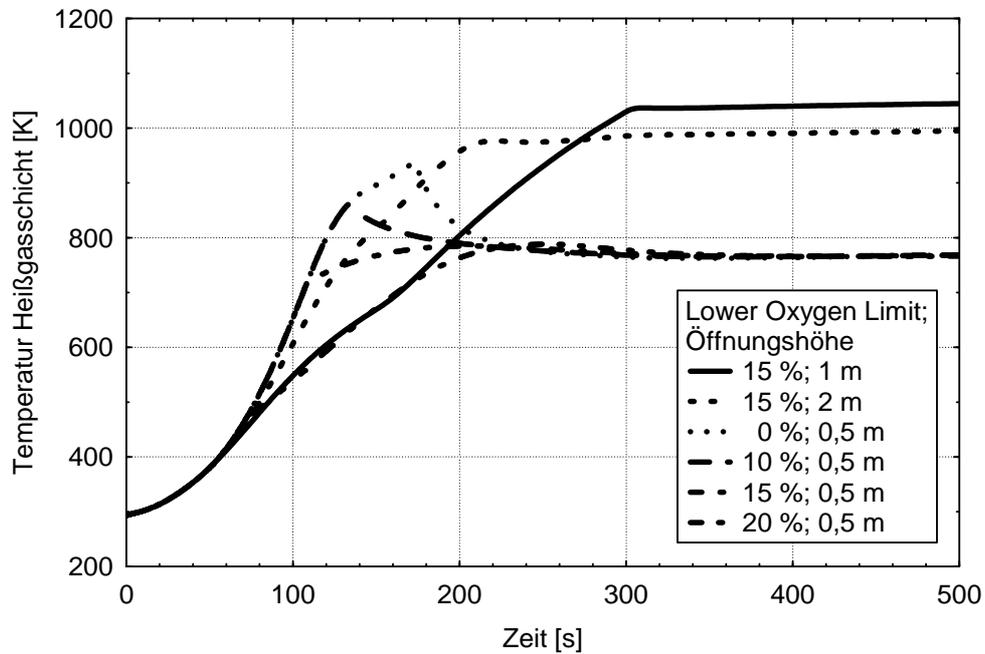


Bild 19 Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht für Berechnungen mit CFAST in einem einfachen Raumbrandszenario mit unterschiedlichen Öffnungsflächen für die Zuluft und verschiedenen Angaben zum Lower Oxygen Limit entsprechend Bild 18

## 4.3 Größen zur Beschreibung der Sichtverhältnisse in einer Rauchschrift

### 4.3.1 Extinktionskoeffizient

Bei der Bewertung der von einem Brand ausgehenden Gefahren spielen das Ausmaß der Verrauchung und die damit einhergehende Reduktion der Sichtverhältnisse eine wesentliche Rolle. Die Verbrennungsbedingungen (Pyrolyse, Schwelen und flammende Verbrennung), bei denen Rauch entsteht, beeinflussen die Menge und die Zusammensetzung des Rauchs. Es ist bekannt, dass ein aromatisches Polymer (z. B. Polystyrol) mehr Rauch erzeugt als Kohlenwasserstoffe mit einfachen Kohlenstoff-Kohlenstoff Ketten (z. B. Polypropylen). Bei einer flammenden Verbrennung liegen in vielen Fällen im Rauch große Anteile von elementaren Kohlenstoffen in Form von Primärpartikeln, dem Ruß, vor. Ruß tritt bei Verbrennungsvorgängen als unerwünschtes Produkt auf und enthält dann an seiner Oberfläche adsorbierte Pyrolyseprodukte, auch ölige Bestandteile aus unvollständiger Verbrennung, je nach den Ausgangsstoffen.

Die lichttrübende Wirkung des Rauches wird durch die optische Rauchsichte pro Weglänge  $D_L$  beschrieben. Mit Kenntnis dieser Größe können praxisnahe Aussagen zum Fluchtverhalten von Personen, aber auch für die Rettungsmöglichkeiten über Einsatzkräfte getroffen werden, da sie bzw. der sogenannte Extinktionskoeffizient  $K_{Ext}$  für die Erkennbarkeit von Symbolen herangezogen werden kann. Die optische Dichte pro Weglänge kann experimentell über die Beziehung:

$$D_L = \frac{1}{L} \left( -\lg \left( \frac{I_0}{I(t)} \right) \right) \quad [1/m] \quad (14)$$

mit

$I_0$  = relative Intensität des Lichts ohne Extinktion [-]

$I(t)$  = relative Intensität des Lichts mit Extinktion [-]

$L$  = Länge der optischen Meßstrecke [m]

bestimmt werden. Alternativ kann die Transmission  $T$  von Licht durch Rauch mit Hilfe des Extinktionskoeffizienten  $K_{Ext}$  ausgedrückt werden:

$$\frac{I_0}{I(t)} = T = \exp(-K_{Ext} \cdot L).$$

Zwischen der optische Dichte pro Weglänge und dem Extinktionskoeffizienten besteht folgender Zusammenhang

$$D_L = \frac{K_{Ext}}{\ln(10)} \approx 0,43 \cdot K_{Ext} . \quad (15)$$

Für die Anwendung im Nachweisverfahren besonders wichtig ist der Zusammenhang zwischen optischer Dichte pro Weglänge und der Massenkonzentration sichtrübender Rauchgasbestandteile wie Ruß:

$$D_L = \frac{D_m}{Y_{Ru\beta}} \cdot c_{Ru\beta} \quad (16)$$

mit

$$\begin{aligned} D_m &= \text{massenspezifisches Rauchpotential [m}^2/\text{g]} \\ Y_{Ru\beta} &= \text{Rußpartikel-Entstehungsanteil [g/g]} \\ c_{Ru\beta} &= \text{Massenkonzentration Ruß [g/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Die Größe  $D_m$  wird meist als massenspezifisches Rauchpotential (bezogen auf die optische Weglänge) bezeichnet (engl. mass optical density).  $Y_{Ru\beta}$  ist der Rußpartikel-Entstehungsanteil am Brennstoff (bzw. die Rußausbeute: engl. soot yield). Als Anteil an der gesamten durch Verbrennung freigesetzten Masse ist die Ausbeute  $Y_{Ru\beta}$  eine dimensionslose Größe, wird aber meistens in [g/g] angegeben. Auch für das massenspezifische Rauchpotential gilt:

$$D_m = \frac{K_m}{\ln(10)} \approx 0,43 \cdot K_m \quad [\text{m}^2/\text{g}]. \quad (17)$$

Zwischen dem mit Gleichung (17) eingeführten massenspezifischen Extinktionskoeffizienten  $K_m$  [m<sup>2</sup>/g] und dem Extinktionskoeffizienten  $K_{Ext}$  [1/m] besteht mit der Massenkonzentration Ruß  $c_{Ru\beta}$  [g/m<sup>3</sup>] der Zusammenhang

$$K_{Ext} = K_m \cdot c_{Ru\beta} . \quad (18)$$

Wenn die Rußdichte sich mit dem Pfad (entlang dem optischen Weg  $L$ ) ändert, muss der Extinktionskoeffizient genau genommen folgendermaßen bestimmt werden:

$$K_{Ext} = \frac{K_m(\lambda) \int_0^L c_{Ru\beta}(l) dl}{L} . \quad (19)$$

Die Schreibweise  $K_m(\lambda)$  drückt den Sachverhalt aus, dass der massenspezifische Extinktionskoeffizient von der Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts abhängt. In der Literatur werden für den massenspezifischen Extinktionskoeffizienten  $K_m$  für die flammende Verbrennung von Mischbrandlasten (Holz, Kunststoff) Werte von 7,6 m<sup>2</sup>/g bis 8,7 m<sup>2</sup>/g /HOS 06/, /MUL 00/

angegeben. Da die Rußausbeute nur gravimetrisch zu bestimmen ist, wird bei bekannter Abbrandrate und Rauchverdünnung im Abgasstrom häufig das Rauchpotential  $D_m$  brandlastspezifisch bestimmt. Angaben für  $D_m$  zu einigen Brandlasten findet man z. B. bei /TEW 95/.

In mathematischen Modellen wie dem Fire Dynamics Simulator (FDS) /MCG 08/ kann nun die Rußkonzentration entlang eines Pfades direkt berechnet werden und infolgedessen der entsprechende Extinktionskoeffizient  $K_{Ext}$  über Gleichung (19) abgeleitet werden. Hierbei wird in FDS der massenspezifische Extinktionskoeffizient  $K_m$  standardgemäß mit  $7,6 \text{ m}^2/\text{g}$  angenommen.

Für die Berechnung der Rußkonzentration in einem Brandraum muss allerdings die Verbrennungsschemie durch ein Modell beschrieben werden, welches z. B. für einen Brennstoff mit den folgenden Elementen:



dargestellt werden kann. Dieses ist ein idealer Prozess, welcher nur für einige Produkte reale Brandbedingungen beschreibt. Unter realen Brandbedingungen werden die Brandprodukte durch folgende Bestandteile charakterisiert sein:



Unter gut-ventilierten Verbrennungsbedingungen werden die Produkte  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{N}_2$  annähernd ihren idealen „vollständigen“ Werten entsprechen, bei unterventilierten, schwelenden bzw. thermischen Zersetzungsprozessen werden stark ansteigende Anteile an Verbrennungsprodukten von  $\text{CO}$ , Ruß und Kohlenwasserstoffen (HC) entstehen /KAR 99/.

Die Berücksichtigung der Verbrennungsschemie wird in den verschiedenen mathematischen Modellen sehr unterschiedlich berücksichtigt, so dass die jeweiligen Handbücher genau studiert werden müssen.

Mit dem Extinktionskoeffizienten  $k_{Ext}$  und dem absoluten Rauchgasvolumenstrom  $\dot{V}_{298}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] ergibt sich die Rauchentwicklungsgeschwindigkeit bzw. die Smoke Production Rate SPR aus

$$\text{SPR} = K_{Ext} \cdot \dot{V}_{298} \cdot \frac{T}{298,16 \text{ K}} \text{ in [1/s]}$$

für die Temperatur  $T$  im Abgasstrom..

### 4.3.2 Erkennbarkeit

Ein einfaches praktikables Modell zur Beschreibung der Erkennbarkeit  $E$  eines im Rauch gelegenen Symbols unter Berücksichtigung des Extinktionskoeffizienten wird in /JIN 03/ gegeben:

$$E \approx \frac{1}{K_{Ext}} \ln \left( \frac{B_{Sy}}{\delta_{c,Sy} \cdot c \cdot Lk} \right) \quad (22)$$

mit

$K_{Ext}$  = Extinktionskoeffizient [1/m]

$B_{Sy}$  = Brillanz eines Symbols [cd/m<sup>2</sup>]

$\delta_{c,Sy}$  = Grenzwert Kontrast eines im Rauch befindlichen Symbols im Bereich des Grenzwertes der Verdunklung (0,01 ~ 0,05)

$c$  =  $\sigma_{st} / K_{Ext}$  (0,4 ~ 1,0) und  $K_{Ext} = \sigma_{st} + \sigma_{ab}$  (Koeffizient  $\sigma_{st}$  : Streuung,  $\sigma_{ab}$  : Absorption)

$Lk$  =  $1/\pi$  der mittleren Leuchtkraft der Beleuchtung aus allen Richtungen im Rauch [1 m/m<sup>2</sup>]

Untersuchungen von /JIN 03/ ergaben für die Erkennbarkeit von Symbolen im Bereich der Grenze zur Verdunklung:

$$E \approx \frac{(5 \sim 10)}{K_{Ext}} \text{ für ein Symbol mit Beleuchtung} \quad (23)$$

und

$$E \approx \frac{(2 \sim 4)}{K_{Ext}} \text{ für ein reflektierendes Symbol.} \quad (24)$$

Die Erkennbarkeit von anderen Objekten, wie Wänden, Böden, Türen, Treppen usw. in einer Einkaufs-Mall im Untergrund oder einem langen Korridor kann stark variieren und hängt von den individuellen räumlichen Bedingungen und dem sich daraus ergebenden Kontrast ab. Für diesen Fall mag der Minimalwert für reflektierende Symbole als Ansatz für einen Wert für die Erkennbarkeit geeignet sein.

### 4.4 Wirkung toxischer Komponenten

Um quantitative Aussagen zur Freisetzung von Schadstoffen während des Verbrennungsprozesses machen zu können, müssen die Produktionsraten der entsprechenden Komponente vorgegeben werden. Üblicherweise wird diese Reaktionsrate ausgedrückt als Anteil der erzeugten Masse  $m_i$  einer Komponente  $i$  (z. B. CO) pro Massenverlust  $m_f$  des Brennstoffs

$$Y_i(t) = \frac{m_i(t)}{m_f(t)} \quad [\text{g/g}] \quad (25)$$

mit

$Y_i$	=	Ausbeute der Komponente $i$
$m_i$	=	erzeugte Masse einer Komponente $i$ in [g]
$m_f$	=	umgesetzte Masse des Brennstoffs $f$ in [g]
$t$	=	Zeit

Es ist zu beachten, dass  $m_f$  den gesamten Massenverlust des Brennstoffs umfasst, nicht nur den direkt durch die chemische Verbrennungsreaktion umgesetzten Anteil. Entsprechend bezieht sich  $m_f$  auf die effektive Verbrennungswärme (Heizwert)  $H_{\text{eff}}$  des Brennstoffs.

Mit Hilfe der zeitabhängigen Ausbeuten  $Y_i$  einzelner Komponenten  $i$  kann über ein geeignetes Brandsimulationsprogramm die lokale Konzentration  $c_i$  der jeweiligen Komponente berechnet werden.

Für das Dosismodell nach Purser (Kapitel 2.3.3) werden folgende quantitative Angaben gemacht /HOS 06/: Der Quotient  $F$  aus der in einem Zeitintervall  $\Delta t$  aufgenommenen Teildosis und der zur Handlungsunfähigkeit führenden Gesamtdosis für eine Folge von Zeitintervallen aufsummiert. Handlungsunfähigkeit liegt vor, sobald diese Summe den Wert Eins erreicht hat. Die Zeit bis zum Eintreten der Handlungsunfähigkeit ergibt sich dann aus der Summe dieser Zeitintervalle.  $F$  hängt von den entsprechenden Quotienten  $F_j$  der einzelnen Komponenten  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CO}_2$  sowie  $\text{O}_2$  (Sauerstoffmangel) ab:

$$F_{\text{CO}} = \frac{3,317 \cdot 10^{-5} \cdot \text{RMV} \cdot c_{\text{CO}}^{1,036} \cdot \Delta t}{D} \quad (26)$$

$$F_{\text{HCN}} = \frac{\Delta t}{\exp(5,396 - 0,023 \cdot c_{\text{HCN}})} \quad (27)$$

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta t}{\exp(6,1623 - 0,5189 \cdot c_{\text{CO}_2})} \quad (28)$$

$$F_{\text{O}_2} = \frac{\Delta t}{\exp(8,13 - 0,54 \cdot (20,9 - c_{\text{O}_2}))} \quad (29)$$

Die Konzentrationen  $c_{\text{CO}}$  und  $c_{\text{HCN}}$  sind in den Einheiten ppm, die Konzentrationen  $c_{\text{CO}_2}$  und  $c_{\text{O}_2}$  in den Einheiten Volumenprozent anzugeben. RMV ist die Atemrate in l/min.  $D$  bezeichnet die kritische Menge Carboxyhämoglobin (COHb) im Blut, ausgedrückt in Volumenprozent, die zur Bewusstlosigkeit führt. RMV und  $D$  sind abhängig von den individuellen körperlichen Merkmalen und dem Aktivitätsgrad. Typische Werte, bezogen auf

einen 70 kg schweren Erwachsenen unter leichter körperlicher Beanspruchung sind  $D = 30 \%$  und  $RMV = 25 \text{ l/min}$ . Für einen Erwachsenen in Ruhe erhält man  $D = 40 \%$  und  $RMV = 8,5 \text{ l/min}$ . Tod tritt bei  $D \approx 50 \%$  ein. Für kleinere Kinder ergeben sich Zeiten bis zum Eintreten der Bewegungsunfähigkeit, die etwa um einen Faktor 2 kürzer sind als diejenigen für Erwachsene.

Es ist zu beachten, dass diese Relationen für kurzzeitige starke Belastungen (Dauer bis zu maximal etwa einer Stunde und CO-Konzentrationen ab etwa 2000 ppm) entwickelt wurden. Bei niedrigeren Konzentrationen flüchtiger Substanzen spielen Sättigungseffekte sowie der Anteil der wieder ausgeatmeten Schadstoffe eine immer größere Rolle, was zu einer Reduktion der wirksamen Dosis führt. Genauere Verfahren zur Ermittlung der Wirkung von Kohlenmonoxid auch bei geringeren Konzentrationen und längeren Einwirkungszeiten sind in [8.10] beschrieben.

Die  $F_j$  der Relationen (26) bis (29) müssen nun noch durch einen Ansatz miteinander verknüpft werden, der die Wechselwirkung der einzelnen Komponenten in geeigneter Näherung berücksichtigt, insbesondere die Auswirkung der durch die Gegenwart von  $\text{CO}_2$  verursachten erhöhten Atmungsrate (Hyperventilation). Diese steigert die Aufnahme der deutlich stärker toxisch wirksamen Gase CO oder HCN, sofern diese vorhanden sind. Daher wird ein Verstärkungsfaktor  $V_{Hyp}$  eingeführt, der es erlaubt, den Effekt der Hyperventilation abzuschätzen. Damit ergibt sich folgender Ansatz zur Berechnung des Quotienten  $F$ :

$$F = \max \left( (F_{CO} + F_{HCN} + FLD_{irr}) \cdot V_{Hyp} + F_{O_2}, F_{CO_2} \right), \quad (30)$$

mit

$$V_{Hyp} = \exp(0,2 \cdot c_{CO_2}). \quad (31)$$

und der Fractional Lethal Dose FLD der Reizkomponenten (irritants)

$$FLD_{irr} = \sum_{i=1}^n \frac{c_{irr,i}(t)}{LED_i / \Delta t} \quad (32)$$

mit

$c_{irr,i}$  Konzentration des Reizgases  $i$  in [ppm].

In /ISO 13571/ wird die Anwendung von (30) auf CO und HCN beschränkt, da davon ausgegangen wird, dass dies die dominanten Wirksubstanzen im Brandrauch sind. Es wird in einer Anmerkung jedoch darauf hingewiesen, dass Sauerstoffmangel ab einer  $\text{O}_2$ -Konzentration unterhalb von 13 % zu berücksichtigen sei. Hyperventilation gemäß (31) ist laut /ISO 13571/ ab einer  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 2 Volumenprozent in die Berechnung mit einzubeziehen.

Toxische Auswirkungen, hier insbesondere die des Sauerstoffmangels und des Kohlendioxids, sind oft nicht nur dosis-, sondern auch konzentrationsabhängig /PUR 02/. Für die Festlegung von Akzeptanzwerten sind außerdem u. U. auch Langzeitwirkungen zu berücksichtigen /CHR 99/. Benutzt man in Gleichung (31) Bezugsgrößen für einen typischen Erwachsenen bei leichter körperlicher Beanspruchung, sollte für die Bestimmung der verfügbaren Räumungszeit ein maximales  $F$  von 0,1 bis 0,3 zugrunde gelegt werden, wobei der untere Wert für besonders sensible Personengruppen gilt /PUR 02, PUR 05/.

Liegen keine zeitabhängigen Angaben zu den Reizkomponenten (siehe Kapitel 2.3.3) müssen entsprechende Annahmen getroffen werden oder der Term  $FLD_{rr}$  in Gleichung (30) muss zu Null gesetzt werden.

## **5 VERSUCHSMATRIX FÜR DIE BESTIMMUNG VON BRANDKENNGRÖSSEN**

Die Aufstellung einer Versuchsmatrix zur Bestimmung von Brandkenngrößen soll auf Basis der in Kapitel 2 gemachten Überlegungen abgeleitet werden. Zunächst war geplant, vorab Versuche zu definieren und durchzuführen und auf dieser Grundlage die erforderlichen Brandkenngrößen für eine Datenbank abzuleiten. Wie bereits erläutert, hat sich im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens eine intensive Literaturrecherche und neuerliche Auswertung bereits durchgeführter Versuche als vorteilhafter erwiesen. Hieraus soll im Folgenden eine Versuchsmatrix abgeleitet werden.

In Tabelle 14 sind neben dem international genormten Aufbau nach ISO 9705 (Room Corner Test) auch der Aufbau in der Brandkammer „Oskar“ und die in Kapitel 3.2.1 genauer beschriebene Cone-Kammer aufgeführt, die sich auch zur Ermittlung der Brandkenngrößen bei unterventilierten Bedingungen eignen.

Obwohl die Brandkammer „Oskar“ für die Durchführung von Großversuchen am flexibelsten einsetzbar ist (Höhe bis 5,6 m und größere maximale Energiefreisetzungsrate), wird für die Erarbeitung einer nationalen Datenbank der Brandkenngrößen dem Aufbau nach ISO 9705 der Vorzug gegeben.

Tabelle 14 Versuchsmatrix zur Bestimmung von Brandkenngrößen

Aufbau und Testbedingungen			Cone-Kammer	ISO 9705 RCT	Oskar
Versuchsskala			Klein	Groß	Groß
Typ Zuströmung			regelbar	natürlich	natürlich
Sauerstoffkonzentration (%)			Regelbar 0 - 21	21	21
Natürliche Öffnung			-	maximal 0,8 * 2,1	maximal 0,7 * 3,6
Grundfläche (m)			-	2,4 * 3,6	3,6 * 3,6
Höhe (m)			-	<b>2,4</b>	<b>5,6</b>
externer Heizer			elektrisch	kein Standard	kein Standard, Rückstrahlung über Raumflächen
externe Wärmestromdichte (kW/m <sup>2</sup> )			0-100	-	-
Abgasvolumenstrom (m <sup>3</sup> /s)			0,012 – 0,035	3,500	3,500
Maße horizontale Probe (mm*mm)			100 * 100	variabel <sup>2)</sup>	variabel
Maße vertikale Probe(n) (mm*mm)			100 * 100	variabel <sup>2)</sup>	variabel
Zündquelle			Zünd-funke	Gas-Brenner	Gas-Brenner, variabel
Leistung Zündquelle			-	0 - 300	0 - 300
Maximale HRR (kW)			8	1000	2500
Messungen	Kürzel	Einheit			
Entzündungszeit	IGT	s	✓	✓	✓
Eff. Verbrennungswärme	HOC <sub>eff</sub>	MJ/kg	✓	KS <sup>1)</sup>	KS <sup>1)</sup>
Eff. Vergasungswärme	HOG <sub>eff</sub>	MJ/kg	KS <sup>1)</sup>	-	-
Brand-Ausbreitungsrate	FPR	m/s	-	KS <sup>2)</sup>	KS <sup>2)</sup>
Abbrandrate	MLR	kg/s	✓	KS <sup>1)</sup>	KS <sup>1)</sup>
Energiefreisetzungsrate	HRR	kW	✓	✓	✓
Rauchproduktionsrate	SPR	l/m	✓	✓	✓
Brandentwicklungszeit	FDT	s	✓	✓	✓
O <sub>2</sub> -Konzentration	Y_O <sub>2</sub>	%	✓	✓	✓
CO-Produktionsrate	Y_CO	g <sub>CO</sub> /g <sub>f</sub>	✓	✓	✓
CO <sub>2</sub> -Produktionsrate	Y_CO <sub>2</sub>	g <sub>CO<sub>2</sub></sub> /g <sub>f</sub>	✓	✓	✓
Ruß-Produktionsrate	Y_S	g <sub>S</sub> /g <sub>f</sub>	KS <sup>1)</sup>	KS <sup>1)</sup>	KS <sup>1)</sup>
Tox. Komponenten	Y_HCN	g <sub>TK</sub> /g <sub>f</sub>	KS	KS	KS
			KS: kein Standard <sup>1)</sup> am iBMB möglich, teilweise schwierig zu bestimmen, <sup>2)</sup> eventuell über Temperaturfühler		

Da der Aufbau international verwendet wird, liegen dafür schon umfangreiche Versuchsergebnisse vor. Außerdem können die Brandkenngrößen auch untereinander verglichen oder künftig vergleichend ermittelt werden. Eine Einschränkung besteht allerdings bei der Messung des Masseverlustes, der in der ISO 9705 nicht vorgesehen ist. Hier müsste entweder mit einer zusätzlichen Abbrandwaage gearbeitet werden, sofern nicht eine fest eingebaute Abbrandwaage zum Einsatz kommt. Im Room Corner Test des iBMB ist ein fest eingebautes Wägesystem vorhanden.

Für den normal ventilierten bzw. brandlastgesteuerten Fall kann auch die gegenüber ISO 5660 modifizierte Cone-Kammer eingesetzt werden, wenn mit einem entsprechend hohen Zuluftverhältnis ZLV bzw. einem GER < 1 gearbeitet wird. Für die Bestimmung der toxischen Komponenten müssen die Gasanalysegeräte entsprechend ausgestattet werden.

## **6 ENTWURF DER STRUKTUR EINER NATIONALEN DATENBANK**

In Tabelle 15 sind die Brandkenngrößen zusammengestellt, die in einer nationalen Datenbank zusammengetragen werden sollten. Hierbei sind die unter der Kategorie Bestimmung aufgeführten Untersuchungsmethoden einzusetzen um die Kenngrößen zu messen bzw. zu bestimmen. Details zu den Untersuchungsmethoden sind in Kapitel 2.4 aufgeführt, das Bombenkalorimeter wird in /DIN 1716/ beschrieben.

## **7 ZUSAMMENFASUNG UND AUSBLICK**

Die Zusammenstellung relevanter Brandkenngrößen kann auf Grundlage von Literaturrecherchen und aus Überlegungen zur Nachweisführung und zur Einhaltung von Schutzzielen erfolgen. Als erster Schritt wurde eine Matrix der wichtigsten Kenngrößen aufgestellt und es wurde eine Übersicht der Versuche gegeben, mit denen die entsprechenden Größen abgeleitet bzw. bereitgestellt werden können. Hinzu kommen Standarduntersuchungen z. B. zur Bestimmung des unteren Heizwertes. Grundlegend und weiterführend sind hierbei die Ergebnisse und die Erkenntnisse aus eigenen klein- und großmaßstäblichen Brandversuchen /HOS 00/, die in dieser Arbeit neu ausgewertet und zusammenfassend dargestellt wurden. Darüber hinaus sollten neuere Erkenntnissen im Zusammenhang mit den Arbeiten in ISO/TC 92/SC 4 (Fire safety engineering – Guidance for data needed for FSE /ISO TC 92/) berücksichtigt und ggf. verwendet werden.

Tabelle 15 Zusammenstellung der notwendigen Brandkenngrößen zur Beschreibung des Verlaufs der Energiefreisetzungsrates, der Rauchdichte und zur Bestimmung toxischer Produkte für eine nationale Datenbank

Brand-Kenngröße	Abkürzung	Formelzeichen	Einheit	Bestimmung	Bemerkung / Skalierbarkeit
<i>Energiefreisetzungsrates</i>					
Entzündungszeit	IGT	$t_{ign}$	s	Cone-Kammer	-
Brandentwicklungszeit	FDT	$t_g$	s	Cone-Kammer und Oskar/RCT	Einfluss Stapelung
Brand-Ausbreitungsrate	FPR	$v_{aus}$	m/s	Oskar/RCT	vertikal und horizontal
maximale relative Abbrandrate	MLR	$\dot{m}''$	kg/(sm <sup>2</sup> )	Cone-Kammer und Oskar/RCT	Einfluss Stapelung
unterer Heizwert	HOC	$H_u$	MJ/kg	Bombenkalorimeter	-
Eff. Verbrennungswärme	HOC <sub>eff</sub>	$H_{c,eff}$	MJ/kg	Cone-Kammer	bzw. Verbrennungseffektivität
Eff. Vergasungswärme	HOG <sub>eff</sub>	$H_{g,eff}$	MJ/kg	Cone-Kammer	Angabe für Pyrolysemodelle notwendig, Ableitung aus Standard-Versuchen unklar
Radiativer Anteil *)	C_rad	$\chi_{rad}$	-	GTR	siehe Kapitel 2.4
<i>Rauchdichte</i>					
Extinktionskoeffizient	K_EXT	$K_{Ext}$	1/m	Cone-Kammer	Ableitung der Rauchproduktionsrate SPR
<i>toxische Produkte und relevante Gaskonzentrationen</i>					
O <sub>2</sub> -Konzentration	Y_O <sub>2</sub>	$Y_{O_2}$	%	Cone-Kammer	-
CO-Produktionsrate	Y_CO	$Y_{CO}$	g <sub>CO</sub> /g <sub>f</sub>	Cone-Kammer	Einfluss Stapelung
CO <sub>2</sub> -Produktionsrate	Y_CO <sub>2</sub>	$Y_{CO_2}$	g <sub>CO<sub>2</sub></sub> /g <sub>f</sub>	Cone-Kammer	Einfluss Stapelung
Ruß-Produktionsrate	Y_S	$Y_S$	g <sub>S</sub> /g <sub>f</sub>	Cone-Kammer	Relativ schwierig zu bestimmen, aufwändig
Tox. Komponenten	Y_HCN	$Y_{HCN}$	g <sub>HCN</sub> /g <sub>f</sub>	Cone-Kammer	Ertüchtigung der iBMB Ausstattung notwendig
Untersuchungen bei verschiedenen Zuluftverhältnissen (Cone-Kammer) und verschiedenen Lagerungsanordnungen bzw. Stapellagen (Oskar/RCT) *) siehe z. B. Arbeiten von Tewarson /TEW 02/. Bestimmung über den konvektiven Anteil mittels gas temperature rise calorimetry: (GTR)					

Weitere Überlegungen sind erforderlich, um eine möglichst umfassende Anleitung zur Durchführung von Großversuchen mit bestimmter Anordnung der Güter / Brandlasten zu erstellen. Insofern bedürfen die Aussagen in diesem Abschlussbericht noch einer weiteren Präzisierung, um eine nationale Datenbank für Brandkenngrößen etablieren zu können. Die Pflege der dann vorhandenen Datenbank, die Ergänzung um die Grunddaten für verschiedene Stoffe und die Erstellung eines nationalen Leitfadens zur Fortschreibung und Nutzung der Datenbank für Brandkenngrößen bleiben weiterführenden Forschungsvorhaben vorbehalten.

In Zukunft wäre es denkbar, die Daten für unterventilierte Brände nicht durch Versuche bereitzustellen, sondern die Verbrennung in der Gasphase durch entsprechend validierte Brandsimulationsprogramme ausreichend genau zu beschreiben. Dazu würde anhand der lokalen Sauerstoffkonzentration im Programm in jedem Zeitschritt überprüft werden, ob die Energiefreisetzungsraten, die sich theoretisch für den brandlastgesteuerten Fall (z. B. aus den Angaben zur Brandlastdichte) ergibt, in dem simulierten Szenario auch umgesetzt werden kann. Auf diese Art und Weise könnten auch Veränderungen der Zuluftverhältnisse (z. B. durch temperaturbedingtes Versagen eines Fensters) während der Brandsimulation (im selben Lauf) berücksichtigt werden.

## 8 LITERATUR

- /BAB 98/ Babrauskas, V.; Gann, R. G.; Levin, B. C.; Paabo, M.; Harris, R. H.; Peacock, R. D.; Yusa, S.: A methodology for obtaining and using toxic potency data for fire hazard analysis. FSJ 31, pp. 345-358. 1998
- /BAB 02/ Babrauskas, V.: Heat Release Rates, In: DiNenno, P. J. et al. (Hrsg.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3<sup>rd</sup> Edition, Quincy, Massachusetts, S. 3-1 - 3-61. 2002
- /BLU 03/ Blume, G.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten, Dissertation TU Braunschweig, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2003
- /BUF 97/ Buff, K.; Greim, H.: Abschätzung der gesundheitlichen Folgen bei Großbränden, Zivilschutz-Forschung, Neue Folgen 25, Bonn, 1997
- /CHR 99/ Christian, S. D.: Safe tolerability limits for carbon monoxide? A review of the clinical and fire engineering implications of a single, acute sub-lethal exposure. Proceedings Interflam '99, Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, 1999
- /DRY 99/ Drysdale, D. D.: An Introduction to Fire Dynamics, Second Edition, University of Edinburgh, John Wiley and Sons, UK, 1999
- /GOT 03/ Gottuk, D. T., White, D.A.: Liquid Fuel Fires, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, Section Two, Chapter 15, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, Maryland, 2003

- /HAN 02/ Hansen, A. S.; Hovde, P. J.: Prediction of Time to Flashover in the ISO 9705 Room Corner test based on Cone Calorimeter Test Results, Fire and Materials, 26: 77-86, 2002
- /HER 00/ Hertel, H.: Grundlegendokument Brandschutz und die zukünftigen Auswirkungen, Promat-Fachbeitrag, S-76, Stand März 2000
- /HES 02/ Van Hees, P., Hertzberg, T., Hansen, A.S.: Development of a screening method for the SBI and Room Corner using the Cone Calorimeter, Nordtest project 1479-00, SP Rapport 2002:11, Fire Technology, Boras, 2002
- /HIE 97/ Hietaniemi, J., Kallonen, R. and Mikkola, E.: Fires at chemical warehouses. A cone calorimeter study on the burning characteristics and fire effluent composition of chemical compounds, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1810, Espoo, 1997
- /HOS 95/ Hosser, D., Blume, G., Siegfried, W., Will, J.:  
Ergänzende Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweise im Rahmen von KTA 2101.2, Abschlussbericht im Auftrag der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Institut für Baustoffe Massivbau und Brandschutz (iBMB), Juni 1995
- /HOS 00/ Hosser, D.; Blume, G.; Will, J.: Brandschutz in Chemikalienlagern, iBMB, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 151, ISBN 3-89288-130-8, Braunschweig, 2000
- /HOS 03/ Hosser, D.; Riese, O.: Durchführung von vergleichenden Brandversuchen mit unterschiedlichen Kabelmaterialien und Kabelschutzsystemen, VGB Kraftwerkstechnik GmbH, VGB-Kennziffer SA „AT“ 11/00, Abschlussbericht iBMB, Juni 2003
- /HOS 06/ Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, vfdb Technischer Bericht TB 04/01, Mai 2006, <http://www.vfdb.de>
- /HUS 04/ Husted, B.P; Carlsson, J.; Göransson, U.: Visibility through inhomogeneous smoke using CFD, Interflam 2004
- /KAR 99/ Karlsson, B; Quintiere, J. G.: Enclosure fire dynamics, CRC Press LLC, FL, 315pp., ISBN 0-893-1300-7, Washington, 1999
- /KTA 00/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)  
Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 2101, Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 2: Brandschutz an baulichen Anlagen, Fassung 12/00; Dezember 2000

- /MCG 08/ McGrattan, K.; Baum, H.; Rehm, R.; Hostikka, S.; Floyd, J.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. Januar 2008
- /MUL 00/ Mulholland, G.W.; Croarkin, C.: Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke. Fire and Materials, 24:227–230, 2000
- /JIN 03/ Jin, T.: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, Section Two, Chapter 4, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, Maryland, 2003
- /JON 05/ Jones, W. W., Peacock, R. D., Forney, G. P., Reneke, P. A.: CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6), Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1026, National Institute of Standards and Technology, USA, Maryland, December 2005
- /ORT 95/ Ortner, J.; Hensler, G.: Beurteilung von Kunststoffbränden. Bei einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs entstehende Stoffe nach den Anhängen II-IV der 12. BImSchV. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, LFU. Az: 1/7-1515-21294. 1995.
- /PEA 05/ Peacock, R. D., Jones, W. W., Reneke, P. A., Forney, G. P.: CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6), User's Guide, NIST Special Publication 1041, National Institute of Standards and Technology, USA, Maryland, December 2005
- /PUR 02/ Purser, D. A.: Toxicity Assessment of Combustion Products. In: DiNenno, P. J. et al. (Hrsg.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3<sup>rd</sup> Edition, Quincy, Massachusetts, S. 2-83 - 2-171. 2002
- /PUR 05/ Purser, D. A.: Toxicity assessment of combustion products and human behaviour in fires. 10. Int. Brandschutzseminar, vfdb, 2005
- /SAN 89/. Sand, H.: Korrelation von Brandatmosphären bei Labor- und Großversuchen, vfdb 3/89, Vortrag 4.3, 1989
- /SCH 02/ Schneider, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz, ISBN 3-8041-4189-7, Werner Verlag, 2002
- /TEW 02/ Tewarson, A.: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, In: DiNenno, P. J. et al. (Hrsg.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3<sup>rd</sup> Edition, Quincy, Massachusetts, S. 3-82 - 3-161. 2002

- /VDS 07/ Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) (Hrsg.):  
Richtlinien zur Brandschadensanierung, VDS 2357, VDS-Verlang, Köln, 2007
- /WAL 02/ Walton, W.; Thomas, P. H.: Estimating Temperatures in Compartment Fires, In:  
SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition, S. 3-171 ff , 2002
- /WIL 05/ Will, J.: Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur  
Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden,  
Dissertation, Fachberiech Bauingenieurwesen der Technischen Universität Ca-  
rolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2005
- /ZEH 04/ Zehfuß, J.: Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in  
Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung. Heft 175 des Institutes für  
Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig, 2004

### **Leitlinien und Normenwerke**

- /ASTM E2058/ ASTM E2058-06: Standard Methods of Test Measurement of Synthetic  
Polymer Material Flammability Using a Fire Propagation Apparatus (FPA),  
American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2006
- /DIN 1716/ DIN EN ISO 1716: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten –  
Bestimmung der Verbrennungswäre (ISO1716:2001), Europäisches Komitee  
für Normung, Februar 2002
- /EN 13823/ Reaction to fire tests for building products - building products excluding  
floorings – exposed to the thermal attack by a single burning item, CEN,  
February 2002
- /ISO 5660/ Fire tests - Reaction to fire; part 1: Rate of heat release from building  
products (Cone Calorimeter Method), 1999
- /ISO 9705/ ISO 9705 Fire Tests - Full-scale Room Test for Surface Products, 1993
- /ISO 13571/ ISO 13571: Life-threatening components of fire - Guidelines for the  
estimation of time available for escape using fire data, Juni 2007
- /ISO TC 92/ ISO TC 92/SC/WG 8, ISO/WD 16731, Fire safety engineering – Guidance  
for data needed for FSE, 28. September 2005