

6.11.15
2786-89288

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN - MPA BRAUNSCHWEIG

iBMB

TU BRAUNSCHWEIG

Brandschutz in Chemikalienlagern

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur
Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten

von

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser

Dipl.-Ing. Gary Blume

Dipl.-Phys. Jürgen Will

Heft 151

BRAUNSCHWEIG

2000

ISBN 3-89288-130-8

ISSN 1439-3875

VORWORT UND DANKSAGUNG

Seit dem spektakulären Schaden durch einen Brand in einem Chemikalienlager der Firma Sandoz wurden die Regelungen zum vorbeugenden Brandschutz bei Anlagen mit gefährlichen Stoffen in Gesetzen, Verordnungen, Technischen Regeln und Richtlinien der Industrie fortgeschrieben. Trotzdem gab es noch eine Vielzahl offener Fragen, die angesichts des großen Risikos einer raschen Klärung bedurften. Daher wurde bereits 1989 vom iBMB der erste Antrag für ein Forschungsvorhaben gestellt. Aufgrund der umfangreichen Problematik wurde von Anfang an darauf geachtet, dass im Vorhaben alle Aspekte der Analyse von Brandstörfällen und der Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten durch Kooperation kompetenter Partner bearbeitet werden konnten. Mit experimentellen und theoretischen Untersuchungen waren nach der Bewilligung durch das damalige Bundesministerium für Forschung und Technologie im März 1996 neben dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) beteiligt:

das Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik der TU Braunschweig,
das Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge und
das Brandforschungszentrum der MINIMAX GmbH, Bad Oldesloe.

Spezielle Fragen zu bestehenden Lagern, zur Genehmigungspraxis und zum Feuerwehreinsatz wurden im Unterauftrag des iBMB bearbeitet durch

den TÜV Hannover / Sachsen-Anhalt und
die Feuerwehr Hannover.

Vervollständigend wurde die Projektgruppe durch Berater von

der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren, Arbeitskreis Technik,
der BASF AG, Ludwigshafen und
der Bayer AG, Dormagen.

Den Vertretern der beteiligten Institutionen und Unternehmen danken wir an dieser Stelle für die langjährige intensive Zusammenarbeit und die stete Diskussionsbereitschaft. Ein besonderer Dank gebührt der BASF AG und der Bayer AG für die kostenlose Bereitstellung von Materialproben, die für die Untersuchungen im Labor- und Großmaßstab eingesetzt wurden.

Der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V. DLR sei für die fachliche und organisatorische Betreuung des Projekts gedankt.

Der abschließende Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens.

Abschlussbericht

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutz- konzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlagern (I) FKZ: 01RG9503/1

Gefördert von:
Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft,
Forschung und Technologie (BMBF)
53170 Bonn

Vorgelegt von:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hossler
Dipl.-Ing. Gary Blume
Dipl.-Phys. Jürgen Will

Juli 2000

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

KURZFASSUNG

Das Forschungsprojekt untergliedert sich in drei Teilprojekte, von denen zwei vom iBMB bearbeitet wurden. Im Teilprojekt 1 wurden Versuche in unterschiedlichen Maßstäben durchgeführt (Mikroverbrennung, Cone-Calorimeter, Room-Corner-Test, Stützenbrandhaus). Das Cone-Calorimeter wurde insofern modifiziert, dass die eingesetzte Probe in einer abgeschirmten, zwangsventilierten Kammer verbrannt und beprobt wurde. Eine Kopplung der unterschiedlichen Versuchsapparaturen erfolgt über das Zuluftverhältnis 1/GER. Untersucht wurden Pflanzenschutzmittel (Mikroverbrennung), sowie die Chemikalien Glykol und Polyethylen in den drei anderen Versuchsapparaturen. Als Ergebnis wurden Ausbeuten einzelner Brandprodukte sowie effektive Verbrennungswärmen und Energiefreisetzungsraten in Abhängigkeit von der Ventilation erhalten. Aus den Messwerten werden Ansätze für die Brandausbreitung in Lageranordnungen bereitgestellt.

Im Teilprojekt 3 werden vorhandene Schutzkonzepte aus vorhandenen Gesetzen und Regeln auf bereits existierende Schutzmaßnahmen hin überprüft und dem heutigen Stand der Sicherheitstechnik gegenübergestellt. Die aus Teilprojekt 1 gewonnenen Ergebnisse bezüglich Ausbeuten und Brandausbreitung stellen Eingabedaten für Brandsimulationsprogramme (Zonen- und Feldmodelle) bereit, die hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Rahmen einer Störfallanalyse Brand untersucht wurden. Hier wird Zonenmodellen wegen einfacherer Handhabung der Vorzug erteilt.

ABSTRACT

The research project is subdivided into three parts where parts 1 and 3 are worked out by iBMB. Within part 1 fire tests in different scales were conducted (micro combustion, Cone-Calorimeter, Room-Corner-Test, column test furnace). The Cone was therefore modified that the tested material was combusted and analysed in a closed box which was mechanically ventilated. A coupling between the scales should be achieved by the ventilation conditions expressed by the parameter $1/GER$ ($GER = \text{Global Equivalence Ratio}$). By micro combustion different pesticides representing several groups of chemicals are investigated. In the larger scales only the two chemicals glycol and polythene which present no significant health hazards to the people working with them. As a result yields in form of combustion products as well as the effective heat of combustion and heat release rates depending on the ventilation conditions were achieved. Some estimations for the development of the heat release in warehouse fires were made.

In part 3 of the project present prevention measures by law or technical rules were confronted to the present practice of safety measures. Furthermore input data generated of the results of part 1 were taken for use in fire simulation models (zone and field models). Measurements are compared with calculated values. With help of examples of existing chemical warehouses the thermal effects of simulated fires from zone and field computation are compared. As a result zone models will be given preference for a quick overall view on the consequences of a compartment fire.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1-1
2	ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE	2-1
2.1	ZIELSETZUNG.....	2-1
2.2	VORGEHENSWEISE.....	2-4
3	DATENERHEBUNG BESTEHENDER LAGER	3-1
3.1	LAGERTECHNIK UND GEBINDE.....	3-1
3.2	GRÖSSE UND BESCHREIBUNG DES LAGERBAUS.....	3-5
3.3	ANLAGENTECHNISCHER BRANDSCHUTZ.....	3-6
3.4	ZUSAMMENFASSUNG FÜR DIE UNTERSUCHUNG TYPISCHER LAGER.....	3-6
3.5	ALLGEMEINE ANGABEN ZUR BRANDLAST.....	3-8
4	MIKROVERBRENNUNGSAPPARATUR	4-1
4.1	AUFBAU DES VERBRENNUNGSROHRES.....	4-1
4.2	MATERIALAUSWAHL.....	4-3
4.3	ERGEBNISSE.....	4-4
4.3.1	Parameterabhängigkeit.....	4-4
4.3.2	Schadstoffentstehung am Beispiel von HCN.....	4-7
4.4	LITERATURHINWEISE.....	4-11
5	UNTERSUCHUNGEN IN DER CONE-KAMMER	5-1
5.1	VERSUCHSAUFBAU.....	5-1
5.2	BRANDVERHALTEN IN DER CONE-KAMMER.....	5-11
5.2.1	Entzündung.....	5-12
5.2.2	Verlauf der Energiefreisetzungsrate.....	5-14
5.2.2.1	Einfluss der thermischen Beaufschlagung.....	5-15
5.2.2.2	Einfluss der Ventilation.....	5-18
5.2.3	Beschreibung des Abbrandverhaltens mit Hilfe des Zuluftverhältnisses.....	5-24

5.3	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	5-29
5.4	LITERATURHINWEISE.....	5-32
6	RAUMBRANDVERSUCHE MIT „REINEN“ BRANDLASTEN IM GEBINDEMAßSTAB	6-1
6.1	BRANDKAMMER UND RAUCHABZUGSYSTEM	6-1
6.2	BRANDLASTEN.....	6-8
6.3	VARIATION DER VENTILATIONSÖFFNUNG.....	6-9
6.4	PROGRAMM.....	6-10
6.5	AUFBEREITUNG DER MESSWERTE	6-11
6.6	VERSUCHSERGEBNISSE	6-13
6.6.1	Verbrennungseffektivität	6-13
6.6.2	Materialparameter zur Beschreibung des Brandverhaltens.....	6-15
6.7	LITERATURHINWEISE.....	6-18
7	RAUMBRANDVERSUCHE MIT REALEN LAGERANORDNUNGEN	7-1
7.1	BRANDKAMMER UND RAUCHABZUGSYSTEM	7-1
7.2	BESCHREIBUNG DER EINGESETZTEN MESSTECHNIK.....	7-1
7.3	BRANDLASTEN.....	7-5
7.4	VERSUCHSERGEBNISSE	7-8
7.4.1	Poolfeuer	7-8
7.4.2	Blocklagerung Mit der Flüssigkeit Glysantin G48	7-10
7.4.3	Regallagerung Mit der Flüssigkeit Glysantin G48.....	7-14
7.5	LITERATURHINWEISE.....	7-18
8	AUSWERTUNG UND ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	8-1
8.1	ANALYTISCHE BESCHREIBUNG DER BRANDENTWICKLUNG	8-1
8.2	VERGLEICHENDE BEWERTUNG DES BRANDVERHALTENS ZWISCHEN LABORMAßSTAB UND RAUMBRANDVERSUCH	8-7
8.3	LITERATURHINWEISE.....	8-12

9	SCHUTZKONZEPTE UND NACHWEISMETHODEN	9-1
9.1	SCHUTZKONZEPTE	9-1
9.1.1	Einleitung	9-1
9.1.2	Vorschriften und Richtlinien	9-2
9.1.3	Stand der Sicherheitstechnik	9-5
9.2	EINGANGSDATEN FÜR NACHWEISMETHODEN	9-9
9.2.1	Allgemein	9-9
9.2.2	Bauliche Gegebenheiten	9-10
9.2.3	Erfassung der Brandlasten	9-11
9.2.4	Eingangsrösse für die Berechnungen: Energiefreisetzungsraten	9-12
9.3	BRANDSZENARIEN UND BRANDAUSBREITUNG	9-12
9.3.1	Anforderungen	9-12
9.3.2	Beschreibung des Brandszenarios	9-15
9.3.2.1	Brandentstehung und Brandausbreitung	9-16
9.3.2.2	Fortentwickelter Brand	9-17
9.3.3	Ereignisse mit Einfluss auf das Bemessungsfeuer	9-18
9.3.3.1	Allgemein	9-18
9.3.3.2	Veränderungen durch einen Flashover	9-18
9.3.3.3	Einfluss von automatischen Löschanlagen auf den Brandverlauf	9-19
9.3.3.4	Einfluss eines Feuerwehrangeiffs auf den Brandverlauf	9-21
9.3.3.5	Abklingphase	9-22
9.3.4	Ansätze für die Brandentwicklung	9-22
9.3.4.1	Quadratischer Ansatz	9-22
9.3.4.2	Schwelbrände	9-26
9.3.4.3	Brandlasten	9-26
9.3.4.4	Temperaturbeanspruchung für die Bauteilauslegung	9-28
9.4	NACHWEIS GEMÄSS DIN 18230-1	9-29
9.5	NACHWEIS DER TEMPERATUREN IM PLUMEBEREICH	9-30
9.6	WÄRMEBILANZRECHNUNGEN MIT MEHRRaum-MEHRZONEN-MODELLEN	9-38
9.6.1	Allgemein	9-38
9.6.2	Berechnung von Versuchen mit Lageranordnung	9-41
9.6.3	Erprobung eines Zonenmodelles im Rahmen einer Brandstörfallanalyse an einem konkreten Lagerbeispiel	9-45
9.6.4	Entwicklung der Brandwirkungen im Fall eines geschlossenen Gebäudes	9-49

9.7	BRANDSIMULATION MIT CFD-MODELLEN	9-52
9.7.1	Allgemein	9-52
9.7.2	Lagerbeispiel im Rahmen der Brandstörfallanalyse mit der CFD-Methode	9-56
9.8	DARSTELLUNG UND VERGLEICH DER MIT CFD-METHODEN BERECHNETEN WERTE.....	9-56
9.9	GRUNDSÄTZLICHE AUSSAGEN ZUR BRANDENTWICKLUNG UND BRANDBEKÄMPFUNG IN LAGERN	9-62
9.9.1	Brandentwicklung und Brandausbreitung	9-62
9.9.2	Brandbekämpfung	9-63
9.9.2.1	Stationäre Brandbekämpfung	9-63
9.9.2.2	Mobile Brandbekämpfung	9-64
9.9.3	Schadstoffentwicklung	9-65
9.9.3.1	Schadstoff als Verbrennungsprodukte	9-65
9.9.4	Reaktionsprodukte der Flamme als Schadstoffe	9-66
9.10	BEWERTUNG DER NACHWEISMETHODEN	9-68
9.11	BEREITSTELLUNG DER AUSBEUTEN VON BRANDPRODUKTEN.....	9-70
9.12	LITERATURHINWEISE.....	9-72
10	ZUSAMMENFASSUNG	10-1

ANHANG

- A AUSWERTUNGSGRUNDLAGEN
- B VERSUCHE IM ROOM – CORNER - TEST
- C RAUMBRANDVERSUCHE MIT REALEN LAGERANORDNUNGEN

1 EINLEITUNG

Erhebliche Gefahren für Mensch und Umwelt gehen von Brandstörfällen in Anlagen aus, in denen große Mengen an brennbaren Stoffen und/oder Gefahrstoffen gelagert werden. Dabei können Schadstoffe freigesetzt werden und direkt oder indirekt über den Luft- oder Wasserpfad auf Menschen einwirken. Eine besondere Rolle spielen Zwischenlager für Pflanzenschutzmittel (PSM), Schädlingsbekämpfungsmittel und andere Chemikalien in klein- und mittelständischen Betrieben oder Speditionen. Probleme können auch bei der Brandbekämpfung auftreten, weil durch Löschmittel toxische Stoffe aus dem Brandgut gelöst werden oder durch Wechselwirkung mit dem Brandgut toxische Stoffe entstehen. Daher sind spezielle Löschrategien notwendig, die einen raschen Löscherfolg ermöglichen und die Entstehung zusätzlicher Schadstoffe minimieren.

Seit dem spektakulären Schaden durch einen Brand in einem Chemikalienlager der Firma Sandoz Ende 1986 sind die Regelungen zum vorbeugenden Brandschutz bei Anlagen mit gefährlichen Stoffen in Gesetzen, Verordnungen, Technischen Regeln sowie Richtlinien der Industrie fortgeschrieben worden (z. B. TRbF 100, TRGS 514, VdS-Richtlinie 2218, LÖRüRL). Trotzdem gibt es noch eine Vielzahl offener Fragen, die angesichts des großen Risikos einer Klärung bedürfen.

Diesen Fragen wurde im Rahmen dieses Verbundforschungsvorhabens in drei Teilprojekten nachgegangen:

- I. Experimentelle Untersuchungen zur Brandausbreitung in typischen Zwischenlagern für Chemikalien
- II. Experimentelle Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Löschrategien bei derartigen Lagern
- III. Entwicklung bzw. Erprobung von Modellansätzen für die Analyse von Brandverläufen und Brandwirkungen; Erarbeitung eines Leitfadens zur Durchführung von Nachweisen für Brandstörfälle und zur Optimierung von Schutzkonzepten für Chemikalienlager.

Die beiden ersten Teilprojekte umfassten im Wesentlichen Brandversuche in unterschiedlichem Maßstab zur Erfassung der Brandausbreitung in Lageranordnungen und der Wirksamkeit verschiedener Löschrmaßnahmen. Hierbei sollten die notwendigen experimentellen Daten und Beurteilungskriterien für spätere Analysen bereitgestellt werden. Im dritten Teilprojekt sollte geklärt werden, welche Methoden und Ansätze sich zur Beschreibung des

1 Einleitung

Brandverlaufs und der dabei entstehenden Wirkungen auf Gebäude und Umwelt eignen. Die Verfügbarkeit derartiger Methoden in praxisgerechter Aufbereitung ist notwendige Voraussetzung für die Erarbeitung oder Bewertung von Schutzkonzepten für Lagergebäude. Als Hilfsmittel für die Nachweisführung und Festlegung geeigneter Schutzmaßnahmen sollte ein Leitfaden erarbeitet werden, der das einschlägige Vorschriftenwerk (z. B. TRGS 514) um die neueren Erkenntnisse ergänzt.

Wegen des sehr umfangreichen Spektrums möglicher Anwendungen der Daten und Methoden ist eine Beschränkung unumgänglich. Aufgrund von Vorüberlegungen mit den beteiligten Beratern wurde die Gruppe der Chemikalien-Zwischenlager ausgewählt, um exemplarisch die anstehenden Brandschutzprobleme zu analysieren, experimentelle Daten zu gewinnen und die Nachweismethoden zu erproben. Gründe für die Wahl dieser Lager waren unter anderem der hohe Durchsatz an unterschiedlichen Chemikalien, der eine konsequente Einhaltung von Zusammenlagerungsverboten erschwert, sowie das oftmals unzureichende Problembewusstsein und Spezialwissen der meist klein- und mittelständischen Betreiber bei gleichzeitig geringem finanziellen Spielraum für präventive Brandschutzmaßnahmen.

2 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

2.1 ZIELSETZUNG

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wird zunächst anhand ausgewählter Beispiele von Stoffkombinationen und Lageranordnungen die Brandausbreitung in typischen Chemikalien-Zwischenlagern untersucht. Voraussetzung dafür ist eine Erfassung der tatsächlich vorkommenden Lagerbedingungen und die Umsetzung der relevanten Charakteristika dieser Anordnungen einschließlich Stoff- und Verpackungsarten in geeignete Versuchsanordnungen. Aufgrund bestehender Erfahrungen können dann die wesentlichen Versuchsparameter ausgewählt werden.

Dabei werden insbesondere die Auswirkungen unterschiedlicher Ventilationsbedingungen betrachtet. Diese sind im Hinblick auf die Minimierung des Stoffumsatzes, der Schäden an der Konstruktion und damit auch der Freisetzungen in die Umgebung von besonderer Wichtigkeit. Bei Begrenzung der Sauerstoffzufuhr von außen kommt es nach einiger Zeit zu einem ventilationsgesteuerten Abbrand, bei dem die Abbrandrate zwar grundsätzlich abnimmt, der Anteil der dabei entstehenden Schadstoffe jedoch ggf. ansteigt. Ziel könnte hier sein, durch eine ausreichend dichte Hülle - d. h. Begrenzung der Leckraten für den Luftzutritt - den Sauerstoffgehalt soweit zu reduzieren, dass der Brand praktisch von selbst verlöscht.

Ein solches Konzept erscheint nach eigenen Erfahrungen von Großbrandversuchen in nicht allzu großen Lagerräumen durchaus realistisch und hätte gegenüber dem üblichen Vorgehen der Feuerwehren bei der Brandbekämpfung, den Brandraum für die Rauchabfuhr möglichst weit zu öffnen und den dadurch sehr heftigen Brand mit umso mehr Löschmittel zu bekämpfen, unbestreitbare Vorteile. Es müsste allerdings sichergestellt werden, dass es bei einer späteren Intervention der Feuerwehr nicht zu einem neuerlichen Aufflammen des Brandes - bis hin zum Durchzünden explosionsfähiger Gas-Luft-Gemische - kommt; am wirksamsten kann dies dadurch geschehen, dass die Brandbekämpfung im Wesentlichen mit Hilfe ortsfester, ggf. sog. halbstationärer Löscheinrichtungen, ohne Innenangriff der Löschkräfte, durchgeführt wird.

Neben diesen unmittelbar für die Brandbekämpfungspraxis wichtigen Erkenntnissen, liefern die Brandversuche vor allem Daten, die geeignet sind, sowohl die klassischen als auch die umweltrelevanten Auswirkungen von Bränden in derartigen Lagern zu beschreiben. Anhand dieser Daten werden vorhandene Brandsimulationsmodelle zur Berechnung eingesetzt und an den Versuchsergebnissen validiert.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Wesentliche Teilziele dieser Untersuchungen sind:

- Erfassung der für die Brandausbreitung relevanten Merkmale bei bestehenden Lagern,
- Erfassung der Schutzeinrichtungen bei den Lagern,
- Bereitstellung von Daten zur Quantifizierung von Abbrand- und Energiefreisetzungsraten bei den nachgestellten konkreten Brandsituationen,
- Bereitstellung von Daten zur Beschreibung der Brandwirkungen,
- Erprobung von Konzepten zur Begrenzung der Abbrandraten und Brandwirkungen durch gezielte Untervertilation.

Vordringlich sollen Antworten auf folgende ungeklärte Fragen gefunden werden, die in der Praxis Anlass zu heftigen Diskussionen der Fachleute geben:

- Welche Brandszenarien und Stoffdaten sind für die gemäß Störfallverordnung erforderlichen Sicherheitsanalysen von Chemikalien-Zwischenlagern zugrunde zu legen?
- Gibt es typische Brandverläufe für die untersuchten Lageranordnungen und lassen sich diese anhand bestimmter Randbedingung klassifizieren?
- Welche Parameter beeinflussen den Brandverlauf hauptsächlich?
- Gibt es Analogien im Abbrandverhalten im Vergleich mit anderen Stoffen bzw. Stoffanordnungen?

Im zweiten Arbeitsschwerpunkt (Teilprojekt II) des Forschungsvorhabens werden Löschrategien für Brände in Gefahrstofflagern entwickelt, die durch geeignete Löschrversuche in unterschiedlichen Maßstäben experimentell zu überprüfen sind. Durch diese Untersuchungen sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Feuerwehreinsatzes aufgezeigt und die Notwendigkeit ergänzender vorbeugender bautechnischer und anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen sichtbar gemacht werden. Weiterhin soll festgestellt werden, wie typische Kombinationen und Anordnungen von Stoffen bei unterschiedlichen Arten der Brandbekämpfung reagieren.

Folgende wesentliche Teilziele sind zu erreichen:

- Bereitstellung von Daten über die Löschrbarkeit von Gefahrstoffen und ihren Verpackungen mit unterschiedlichen Löschmitteln und Strategien,
- Untersuchung der Abhängigkeit der Löschrverfahren von der Lagerart und Lagergröße,

- Erstellung und Optimierung von Brandbekämpfungskonzepten aus löschtechnischer und löschtaktischer Sicht unter besonderer Beachtung der gezielten Unterventilation und Minimierung von Abbrand und Löschmittelverbrauch,
- Ableitung von Einsatz- und Ausstattungsgrundsätzen für die Feuerwehr.

Im letzten Arbeitsschwerpunkt (Teilprojekt III) werden vorhandene Ansätze zur Beschreibung von Brandverläufen und zur Ermittlung der Brandwirkungen, einschließlich der Schadstoffentstehung, ausgewertet, erprobt und hinsichtlich der Brandausbreitungsphase weiter detailliert. Durch Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen können geeignete Methoden im Rahmen eines Fire Safety Engineering-Konzepts bereitgestellt werden. Integraler Bestandteil eines solchen Konzepts ist der Einsatz von Brandsimulationsmodellen. Hierbei werden unterschiedliche Modelltypen (Zonen- und Feldmodelle) parallel angewendet und hinsichtlich Aussagefähigkeit, Bedarf an Eingangsdaten, Praktikabilität und Anwendungsgrenzen verglichen und die Simulationsmodelle anhand der Versuchsergebnisse soweit als möglich validiert.

Im einzelnen sind folgende Teilprobleme zu untersuchen:

- Vergleichende Anwendung von Brandsimulationsmodellen zur Beschreibung des Verlaufes eines Brandes unter Berücksichtigung der Wirksamkeit der baulichen Brandschutzmaßnahmen und der Brandbekämpfung,
- Erprobung und ggf. Verbesserung von analytischen Beschreibungsmodellen für die Brandausbreitungsphase anhand der Versuchsergebnisse und begleitender theoretischer Untersuchungen,
- Zusammenstellung der für die Modelle benötigten Eingangsdaten unter Verwendung der selbst erzielten bzw. aus der Literatur bekannten Versuchsergebnisse,
- Entwicklung und Erprobung von Auslegungs- und Nachweisgrundsätzen für Brandstörfälle bei Chemikalien-Zwischenlagern,
- Erarbeitung eines Leitfadens für die praktische Vorgehensweise zur Erstellung von optimalen Schutzkonzepten und Brandstörfallanalysen.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

2.2 VORGEHENSWEISE

Die drei Teilprojekte des Forschungsvorhabens wurden vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (Koordination und Federführung), dem Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik der Technischen Universität Braunschweig, dem Institut der Feuerwehr, Heyrothsberge und der Minimax GmbH, Bad Oldesloe, durchgeführt. Die Berufsfeuerwehr Hannover und Essen, der TÜV Hannover/Sachsen-Anhalt und Vertreter der Industrie (BASF AG und BAYER AG) haben im Rahmen eines Beratergremiums mitgewirkt, um den engstmöglichen Praxisbezug zu gewährleisten.

Für den ersten Arbeitsschwerpunkt werden nochmals die verfügbaren Informationen zur Brandentstehung und Brandausbreitung bei gelagerten Stoffen in typischen Lagersituationen ausgewertet. Dabei wird geprüft, welche Erkenntnisse bzw. Daten direkt verwendbar sind und bei welchen Stoffen ggf. wegen ähnlicher Eigenschaften eine Übertragbarkeit gegeben ist.

Die experimentellen Untersuchungen umfassen Versuche in unterschiedlichem Maßstab. Mit Hilfe von Kleinversuchen mit einzelnen Lagergebinden wird insbesondere das Verhalten in der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase untersucht. Diese Vorinformationen werden genutzt, um die großmaßstäblichen Brandversuche an realen Lageranordnungen optimal zu planen und durchzuführen.

Nach Durchführung und Auswertung der Ergebnisse der ersten Raumbrandversuche mit verschiedenen Brandlasten in Blocklagerung, als Einzelgebinde und als Flüssigkeitspool hat sich herausgestellt, dass die experimentellen Möglichkeiten durch die zur Verfügung stehenden technischen Einrichtungen (Brandkammern, Rauchgasreinigungsanlage) begrenzt sind und eine Durchführung von Brandversuchen mit Chemikalien wie Pflanzenschutzmitteln im Maßstab eines Raumbrandversuches aus Gründen des Umwelt- und Arbeitsschutzes nicht zulassen.

Auch bei den Arbeiten im Kleinstmaßstab (Mikroverbrennungsapparatur) sind Probleme der Skalierung aufgetreten, die sich besonders deutlich im Substanzspektrum der Verbrennungsprodukte zeigen. Die Untersuchungen verschiedener Substanzen im Kleinstmaßstab mit der dann modifizierten Verschmelungsapparatur zeigen eine starke Abhängigkeit des CO/CO_2 -Verhältnisses von der zugeführten Sauerstoffmenge. Eine Variation der Substanzeinwaage ergibt ebenfalls eine Verschiebung des CO/CO_2 -Verhältnisses. Somit kann das CO/CO_2 -Verhältnis nicht – wie ursprünglich beabsichtigt – als alleiniger vermittelnder Parameter zwischen Kleinst- und Großmaßstab verwendet werden. Statt dessen wird das

globale Äquivalenzverhältnis (GER) benutzt, wobei allerdings in den kleinstmaßstäblichen Untersuchungen die Abbrandrate nur indirekt ermittelt werden kann.

Die vom Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik verwendete Mikroverbrennungsapparatur und die durchgeführten Modifikationen weisen geringe Unterschiede zur modifizierten Verschmelungsapparatur des iBMB auf, so dass sich ein paralleler Betrieb der beiden Apparaturen unter Einsatz des GER als beschreibenden Parameter rechtfertigt. Die Bestimmung der Abbrandrate wird seitens des Institutes für Ökologische Chemie und Abfallanalytik als unproblematisch angesehen (sie wird proportional zur CO_2 -Entstehung angenommen).

Als Nachteil der Untersuchung in der Verschmelungsapparatur erweist sich die Abhängigkeit der Verbrennungseigenschaften von der Form der Substanzeinbringung ("Haufenform") und Entzündung. Insgesamt unterstreichen die genannten Unsicherheiten bei der klassischen Ermittlung von Schadstoffentstehungsraten im Kleinstmaßstab die Notwendigkeit der Untersuchungen im modifizierten Cone-Calorimeter als Bindeglied zwischen kleinst- und großmaßstäblichen Untersuchungen mit den Vorteilen der Fremdzündung und Verbrennung mit einer Diffusionsflamme sowie der direkten Messung der Abbrandrate.

Diese Tatsache in Verbindung mit den Beobachtungen und Ergebnisse der ersten Untersuchungen erfordern eine Anpassung des ursprünglichen Versuchskonzeptes. Nunmehr werden Versuche in vier verschiedenen Prüfeinrichtungen durchgeführt, wobei nach Möglichkeit alle wesentlichen Randbedingungen für das Abbrandverhalten und die Schadstoffentstehung kontrolliert werden. Zu diesem Zweck müssen die Prüfeinrichtungen zum Teil ergänzt bzw. umgebaut werden. So wird das Cone-Calorimeter modifiziert, um auch Materialuntersuchungen mit reduzierter Ventilation zu ermöglichen.

Wegen des bereits erwähnten Aspektes Arbeits- und Umweltschutz werden die Großbrandversuche in Lageranordnung und auf Gebindeebene mit Stoffen (Chemikalien) durchgeführt, die bei der Verbrennung außer der Permanentgase CO_2 und CO nur in ganz geringem Maße weitere toxische Brandprodukte bilden. Dafür wird als Vertreter für Flüssigkeiten Glykol, und als Vertreter für Feststoffe Polyethylen-Granulat eingesetzt.

Im einzelnen werden folgende Arbeitsschritte von den Hauptbeteiligten des Teilprojektes I durchgeführt:

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

1. Untersuchung typischer Lager- und Brandsituationen
2. Beratung bei der Stoffauswahl, Durchführung chemischer Analysen und Bewertung von Stoffrisiken
3. Versuche im Kleinmaßstab (Mikroverbrennungsapparatur)
4. Versuche im Labormaßstab (modifiziertes Cone-Calorimeter)
5. Kleinversuche mit Lagergebinden (Room-Corner-Test)
6. Großversuche mit realen Lageranordnungen (Stützenbrandhaus)
7. Auswertungen der Versuchsergebnisse
8. Umsetzung der Ergebnisse in Brandausbreitungsmodelle

Der zweite Arbeitsschwerpunkt (Teilprojekt II) beginnt mit der nochmaligen Auswertung früherer Versuche und Erkenntnisse bezüglich der Löschmöglichkeiten bei gelagerten Chemikalien einschließlich der Beschreibung der Löschwirkung. Hinsichtlich der dabei offenkundig werdenden Kenntnislücken werden eigene Brand- und Löschversuche in kleinerem und realem Maßstab durchgeführt. Den Abschluss bilden theoretisch-konzeptionelle Arbeiten zur Entwicklung von Löschstrategien bis hin zu entsprechenden Empfehlungen für die Einsatzpraxis der Feuerwehr.

Dabei sind folgende Teilaufgaben für die Hauptbeteiligten (Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge, Minimax AG, Bad Oldesloe, und Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik) vorgesehen:

1. Literaturrecherche
2. Löschversuche bei speziellen Fragestellungen
3. Löschversuche mit unterschiedlichen Verfahren
4. Beratung bei der Stoffauswahl, Durchführung chemischer Analysen und Bewertung von Stoffrisiken
5. Auswertung der Versuchsergebnisse
6. Erarbeitung von Klassifizierungskriterien und Löschstrategien für die Feuerwehr-Einsatzpraxis

Im dritten Arbeitsschwerpunkt werden aufgrund der im ersten Arbeitsschwerpunkt ausgewählten repräsentativen Lagersituationen typische Brandverläufe untersucht. Die relevanten Brandwirkungen wie Temperatur, Abbrandrate und Massenströme werden mit Hilfe unterschiedlicher Brandsimulationsmodelle bestimmt, wobei die Messdaten aus den durchgeführten Versuchen als Eingangsdaten aufbereitet werden. Durch systematische Modellvergleiche wird die Umsetzung der verfügbaren Eingangsdaten in aussagefähige Rechenergebnisse überprüft und hieraus der Anwendungsbereich für die Modelle abgeleitet. Auf der Basis der experimentellen und rechnerischen Untersuchungen werden dann die in derzeitigen Sicherheitsvorschriften festgelegten Brandschutzmaßnahmen beurteilt und weiter optimiert. Die Ergebnisse werden in einem „Leitfaden“ für die Konzeption und Bewertung des Brandschutzes durch Betreiber, Gutachter, Feuerwehr und Aufsichtsbehörden zusammengefasst.

Der dritte Arbeitsschwerpunkt (Teilprojekt III) umfasst daher folgende Arbeitsschritte:

1. Anwendung der Brandsimulationsmodelle und Bereitstellung der Eingangsdaten
2. Modellvalidierung anhand von Brandversuchen
3. Vergleich unterschiedlicher Modelle hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit
4. Erprobung der entwickelten Methoden zur Brandstörfallanalyse anhand ausgewählter Beispiele von Chemikalien-Zwischenlagern
5. Erarbeitung eines Leitfadens „Brandschutzkonzepte und Brandstörfallanalysen für Chemikalienlager“

In diesem Abschnitt wird die Erarbeitung der Eingangsdaten anhand eines Großhandelslagers dargestellt. Dazu gehören die baulichen Gegebenheiten, die Erfassung der Brandlasten für einzelne Brandabschnitte sowie die Erstellung eines Brandszenarios.

Bezüglich der Auslegung der brandschutztechnischen Maßnahmen wird gezeigt, dass ein Lager mit Hilfe der Industriebaurichtlinie bzw. der anerkannten Ingenieurmethode im Brandschutzwesen, der Industriebaunorm DIN 18 230, ausgelegt werden kann. Für besondere Nachweise von lokalen thermischen Brandwirkungen ist eine Berechnung auch über eine Berechnung der Temperaturen im Brandnahbereich möglich. Werden besondere Nachweise verlangt, so können Berechnungen mit Methoden durchgeführt werden, die integrale Bestandteile im Rahmen eines Fire Safety Engineering-Konzepts darstellen. Dabei handelt es

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

sich um Zonen- und Feldmodelle, die parallel angewendet und hinsichtlich Aussagefähigkeit, Bedarf an Eingangsdaten, Praktikabilität und Anwendungsfreundlichkeit bewertet werden.

Aus den Berechnungen ergeben sich Massenströme durch die am Bauwerk vorhandenen Ventilationsöffnungen, die bei bekannten Ventilationsverhältnissen und bekannter Abbrandrate mit den Ausbeuten aus den Teilprojekten I und II multipliziert werden können. Sind die Stoffe, von denen die Ausbeuten benötigt werden nicht untersucht worden, so können diese gemäß der im Teilprojekt I erarbeiteten Vorgehensweise bestimmt werden.

Abschließend wird in diesem Teilprojekt im Rahmen der Schutzkonzepte die Wirkung der Löschkonzepte und Löschrategien, die im Teilprojekt II erarbeitet wurden, zusammengefasst und zusammen mit einer Überprüfung der Brandschutzkonzepte aus vorhandenen Brandschutz-Leitlinien dargestellt.

3 DATENERHEBUNG BESTEHENDER LAGER

Die Datenerhebung bei genehmigungspflichtigen Chemikalienlagern wurde einerseits durch die Berufsfeuerwehr der Stadt Hannover, zum anderen durch den Technischen Überwachungsverein Hannover / Sachsen-Anhalt durchgeführt. Zur Ermittlung des aktuellen Standes konnte dabei vornehmlich auf die Daten für Pflanzenschutzmittellager (PSM-Lager) in Niedersachsen zurückgegriffen werden. Es wäre durchaus möglich, dass sich bei der allgemeinen Betrachtung von Chemikalienlagern oder bei der Erhebung in anderen Regionen ein etwas anderes Bild ergeben könnte.

3.1 LAGERTECHNIK UND GEBINDE

Die bevorzugte Lagertechnik ist die Regallagerung, meistens 4-fach, jedoch nicht mehr als 7-fach. Die Fachhöhe beträgt ca. 1.60 m, maximal 2 m. Die unterste Lage steht auf dem Fußboden. Dies ist meistens die Kommissionierebene. Darüber steht ggf. die Nachschubpalette für die Kommissionierung, ansonsten wird in den oberen Regalebenen unter Beachtung der bestehenden Zusammenlagerungsverbote chaotisch gelagert (= freie Lagerplatzzuordnung, i.d.R. innerhalb fester Bereiche). Die Lagerbedienung erfolgt in Fußbodenebene mit Handgabelhubwagen oder Gabelstapler, darüber nur mit E-Gabelstaplern. In Hochregallagern werden induktiv geführte halbautomatische Stapler eingesetzt. Die Abstände zwischen den Paletten innerhalb der Regalfächer betragen bei Benutzung von Europaletten (Schmalseite zum Gang, 3 Paletten nebeneinander) 10 cm. Wegen der schlechten Raumausnutzung werden in ein solches Regal i.d.R. keine Industriepaletten (Abmessungen 100 x 120 cm) eingestellt, sondern nur Paletten mit den Abmessungen 80 x 120 cm (ungenormte und Euro-Poolpaletten), sowie die „Chemie“-Paletten (120 x 120 cm).

Bei Blocklagerung werden alle Arten von Paletten genutzt. Die Blöcke sind unterschiedlich groß und richten sich in Abhängigkeit von der Jahreszeit nach den einzulagernden Mengen und dem dafür zur Verfügung stehenden Platz. Die Brandgassen zwischen den Blöcken haben eine Breite von ca. 0.5 m, bei Platzmangel auch weniger. Meistens stehen nicht mehr als zwei Paletten übereinander, jedoch häufig auch noch zuzüglich einer dritten Palette in Form der Verbundstapelung (2 ½-fach).

Abbildung 3.1, Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zeigen Beispiele der untersuchten Lager für Regal- und Blocklagerung.

3 Datenerhebung bestehender Lager



Abbildung 3.1 Lagerbeispiel 1: Regallagerung im Lagerabschnitt VbF

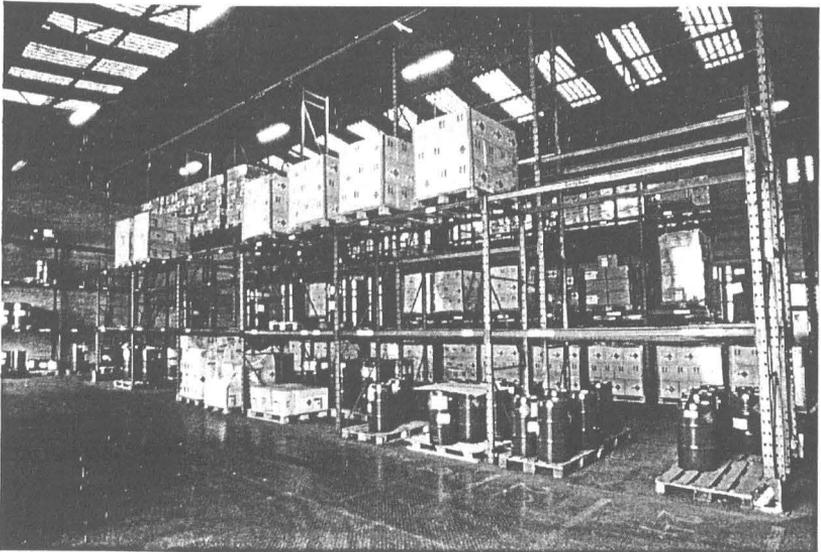


Abbildung 3.2 Lagerbeispiel 2: Regallagerung im Lagerabschnitt A



Abbildung 3.3 Lagerbeispiel 5: Blocklagerung im Lager 2

Die gängigen Gebinde für Chemikalien oder Pflanzenschutzmittel sind Flaschen, Kanister und Beutel, ggf. eingepackt in Wellpappschachteln, in jedem Fall aber auf der Palette gestreckt bzw. gewickelt. Die verwendeten Materialien sind Polyethylen (LDPE, HDPE und COEX) und Polypropylen (PP). Die Umverpackungen sind überwiegend aus 2-lagiger Wellpappe. Gängige Gebindegrößen sind für Flaschen und Kanister 1L, 5L, 10L, 20L, und 50L. Fässer gibt es in den Größen 50L, 120L und 210L. Die Fässer sind aus PE, PP bzw. aus Stahl. Nach Aussage der Lagerbetreiber nimmt der Anteil der Fässer, insbesondere der größeren Stahlfässer, an der Lagermenge stetig ab und fällt kaum ins Gewicht.

Ebenso nimmt der Anteil der Pflanzenschutzmittel (PSM), die in PE-kaschierten Papiersäcken gelagert werden, ab, so dass ihr Anteil an der Gesamtmenge gering ist. Für „Xi“- , „T“- und „T+“-Produkte werden auch Eimer (5 kg) aus PE und PP verwendet. Des weiteren sind die Aerosolpackungen zu erwähnen, die aus Metall hergestellt sind und in Größen zwischen 250 und 1000 mL vorkommen. Sie werden entweder separat oder im VbF-Bereich gelagert. Die Zuordnung der einzelnen PSM zu den Gebinden kann den Vorschlägen des „IVA“ entnommen werden (PSM und Chemikalien der Firmen Bayer und BASF).

Generell geht der Trend zu kleinen Gebinden, deren Inhalte nach der Gefahrstoffverordnung entweder gar nicht oder lediglich mit „Xi“ oder „Xn“ zu kennzeichnen sind und zur GGVS/GGVE-Klasse 9 gehören. Kleinste Mengen reichen für immer größere Flächen aus –

3 Datenerhebung bestehender Lager

es werden immer mehr Konzentrate produziert. Die Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 zeigen Beispiele von Paletten zur Lagerung von Feststoffen und Flüssigkeiten. Im einzelnen ergeben sich beispielhaft nachfolgende Massenaufteilungen:

Faltschachteln aus 2-lagiger Wellpappe für:	4 x 5 l PE-Flaschen:	1 kg
	4 x 1 l PE-Flaschen:	0,6 kg
	10 x 1 l PE-Flaschen:	0,8 kg
	2 x 10 l PE-Flaschen:	1 kg
	6 x 1 kg PE-Kanister:	0,7 kg
- PE-Behälter (gemittelt):		0,4 kg
- PE-Wickelfolie pro Palette:		0,7 kg
- PE-Schrumpffolie pro Palette:		1,0 kg
- Papiersäcke:		0,26 kg
- Säcke aus PE:		0,128 kg
- Europaletten:		25 kg
- Einweg-Industriepaletten:		19 kg

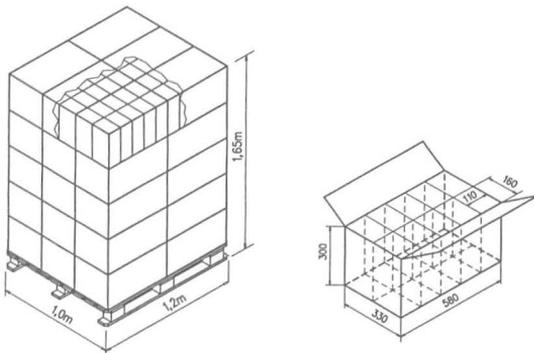


Abbildung 3.4 Beispiel einer Palette für Lagerung von Feststoffen

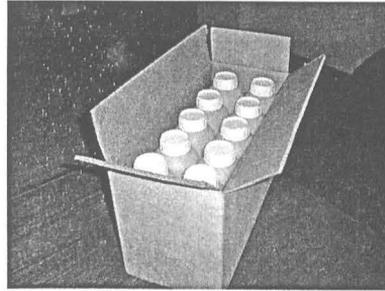
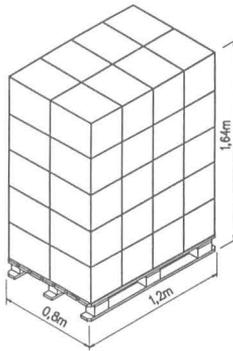


Abbildung 3.5 Beispiel einer Palette für Lagerung von Flüssigkeiten

3.2 GRÖSSE UND BESCHREIBUNG DES LAGERBAUS

Die Hallenflächen der betrachteten Lager schwanken beträchtlich. Sie betragen zwischen 800 m² und 3300 m². Die durchschnittliche Hallenhöhe liegt bei ca. 8 – 9 m, höchstens jedoch 14 m.

Die Hallenaussenwände sind i.d.R. in Skelettbauweise ausgeführt, mit Ausfachungen aus Gasbeton oder Mauerwerk. Das Skelett besteht aus Stahl oder Stahlbeton / Stahlbetonstützen. Die Dächer, in Form von Flach- und Satteldächern, besitzen Abdeckungen aus Trapezblechen (nicht immer mit F30-Anstrichen) oder Eternit und sind ggf. isoliert mit Hartschaum, Mineralwolle oder Styropor (Polystyrol) und mit Dachpappe versehen. Die Trägerkonstruktionen bestehen aus Holzleimbindern, Stahlbetonträgern und reinen Stahlkonstruktionen (mit und ohne F30-Anstrich). Die Fußböden dienen auch der Löschwasserrückhaltung und sind daher als Betonfußböden mit Aufkantungen oder als Stahlwanne ausgeführt. Einzelne Lagerabschnitte sind voneinander durch Brandwände (→ Brandabschnitte) oder feuerbeständige Wände (→ Brandbekämpfungsabschnitte) getrennt. Die Anzahl und Größe der Abschnitte sind sehr unterschiedlich. Rolltore bzw. Sektionaltore sind überwiegend stirnseitig vor den Regalgassen angeordnet, allerdings auch quer. Rauchschürzen kommen selten bis gar nicht vor.

3.3 ANLAGENTECHNISCHER BRANDSCHUTZ

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen befinden sich in den meisten Lagerbereichen und sind i.d.R. sowohl automatisch über die Brandmeldeanlage, als auch manuell zu öffnen. In den VbF-Lagern befinden sich meistens Gaswarnanlagen, die meistens auch eine Lüftungsanlage ansteuern. Die Brandmelder sind als Rauchmelder (Durchlich-, Streulicht oder Ionisationsmelder und Flammenmelder ausgeführt und lösen die ggf. vorhandenen CO₂- oder Pulverlöschanlagen aus. Eine Aufschaltung der Feuerwehr ist in jedem Fall vorhanden. Die installierte Löschtechnik besteht in den meisten Lagern überwiegend aus einer stationären Decken- und Regalsprinklerung („nass“), teilweise mit AFFF-Zusatz (in VbF- und Aerosol-Bereichen auch CO₂- oder selten Pulverlöschanlagen).

3.4 ZUSAMMENFASSUNG FÜR DIE UNTERSUCHUNG TYPISCHER LAGER

Um die typischen Merkmale bestehender Lager möglichst einheitlich zu erfassen, wurde ein Fragenkatalog ausgearbeitet auf dessen Grundlage Daten bezüglich folgender Randbedingungen gesammelt wurden. Mit Unterstützung der Berater des FE-Vorhabens wurden die Untersuchungen bestehender Chemiekalienlager nach den Kriterien

- Lageranordnung,
- Verpackungsmaterialien,
- Bauweise,
- brandschutztechnische Ausstattung

inzwischen erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurde die Vermutung bestätigt, dass zumindest die neueren großen Lager über eine gute brandschutztechnische Ausrüstung verfügen. Bei den hier betrachteten kleineren Lagern ist dies dagegen nicht der Fall. Zudem ist ein West/Ost - Gefälle zu verzeichnen. Da praktisch alle größeren Lager automatische Löschanlagen haben, stehen hier Brandverläufe im Vordergrund, die durch die Sprinkleranlage zumindest kontrolliert werden. Die Datenerhebung hat weiterhin gezeigt, dass bei der Nachrüstung von Löschanlagen oftmals CO₂ - Anlagen Verwendung finden. Dies wird bei der Versuchsplanung für die Löschanlagen berücksichtigt. Generell wird der Einfluss der Auslösung von Löschanlagen auf die Energiefreisetzungsrate untersucht.

Das Datenmaterial ermöglicht die Erfassung der aktuellen Trends bei der Verpackung und Lagerung und dient als Grundlage zur Ableitung geeigneter Versuchskonfigurationen. Um die Brandausbreitung unter Beachtung gängiger Verpackungstechniken mit Einzelgebinden oder Paletteneinheiten realistisch zu ermitteln, werden in den Großbrandversuchen folgende Gebinde verwendet:

- Kunststoffgebinde (z.B. Flaschen, freitragende Gebinde),
- Säcke (Papier, Kunststoff, Jute),
- Kombiverpackungen (Karton, Kunststoffflaschen).

Der Anteil an größeren Stahlfässern und PE-kaschierten Papiersäcken nimmt stetig ab. Dagegen nimmt der Anteil der Kunststoffe wie PE und PP als Behälter oder Beutel zu. Der Trend geht dabei zu kleineren Gebinden mit einer Kombination der Verpackung aus Kunststoff und Wellpappe, die auf Holzpaletten angeordnet werden. Diese kleinste Einheit tritt in der einen oder anderen Form sowohl bei der Block- als auch bei der Regallagerung auf und wird daher schwerpunktmäßig experimentell untersucht.

Beispielhaft ist unten aufgeführt, welche unterschiedlichen Verpackungen zur Lagerung flüssiger und fester Chemikalien (hier Pflanzenschutzmittel) eingesetzt werden:

- (a) Zur Aufbewahrung von CORBEL und PERFEKTHION WV 40 dienen 1 l oder 5 l CoEx-Flaschen aus PE und Polyamid. Von den 1 l Flaschen befinden sich jeweils 10 Stck. in einem Umkarton. Die Gesamtmasse (mit Inhalt) beträgt 13,5 kg. Das Tara beträgt ca. 4 kg. Von diesen Umkartons befinden sich 72 Stck. auf einer Palette. Somit hätte eine „leere“ Palette eine Masse von ca. 288 kg, eine volle Palette hätte eine Masse von 972 kg. Die Abmaße einer Palette betragen 1,0 m x 1,2 m, die Höhe einer Palette beträgt ca. 2 m.
- (b) KUMULUS WG wird in 25 kg Papierventilsäcken gelagert. BASAMID Granulat, ebenfalls ein Feststoff, wird in 20 kg Papierventilsäcken gelagert. Jeweils 30 davon liegen in einem großen Karton, der innen mit PE kaschiert ist. Daraus ergibt sich eine Masse von 750 kg bei KUMULUS WG Paletten und von 600 kg bei BASAMID Paletten.
- (c) Das PYRAMIN WG (Granulat) wird in 1 kg Faltschachteln aus Pappe/Papier gelagert. Zehn 1 kg Faltschachteln befinden sich in einem Umkarton, 54 Umkartons auf einer Palette. Pro Palette ergibt sich somit eine Masse von ca. 540 kg Pflanzenschutzmittel.

3 Datenerhebung bestehender Lager

(d) GLYSANTIN G 48-24 (Glykol), eine Flüssigkeit, befindet sich in 1,5 l Gebinden aus HDPE Flaschen. 10 von diesen Flaschen befinden sich in einem Umkarton.

Die großmaßstäblichen Versuche zur Untersuchung typischer Block- und Regalanordnungen werden in Anlehnung an diese Liste bei Flüssigkeiten mit Verpackungen vom Typ (a) und bei Feststoffen mit Verpackungen vom Typ (b) durchgeführt.

Wegen des begrenzten Umfangs von experimentellen Untersuchungen erfolgt die Auswahl der Chemikalien nach den folgenden Kriterien:

- Brennbarkeit,
- Vorkommen/Auftretenshäufigkeit,
- Eigenschaften (Art und Anzahl von Hetero - Atomen).

Weiterhin ergibt die Untersuchung, dass Art und Menge der eingelagerten Chemikalien zum einen saisonal sehr unterschiedlich ist, zum anderen sich danach richtet, für welche Stoffe ein Lagerplatz gesucht wird. Deswegen wird aus der großen Palette möglicher Chemikalien aus dem Bereich der Pflanzenschutzmittel eine begrenzte Anzahl repräsentativer Chemikalien für die Untersuchungen im Kleinmaßstab (Mikroverbrennungsapparatur) ausgewählt. Wie bereits beschrieben werden die großmaßstäblichen Brandversuche mit den Vertreterstoffen PE-Granulat und Glykol durchgeführt.

3.5 ALLGEMEINE ANGABEN ZUR BRANDLAST

Die Datenerhebung hat sich aufgrund der nachfolgenden Erläuterungen erheblich schwieriger gestaltet, als anfangs abgeschätzt. Im Ergebnis konnten wesentliche Daten nur geschätzt oder mussten angenommen werden.

Heizwerte für die Pflanzenschutzmittel oder für andere in den Lagern befindliche Güter stellen keine Bestimmungsgröße für die Hersteller dar und waren deshalb nicht für die gesamte Produktpalette zu erheben.

Selbst die großen Hersteller Bayer und BASF konnten keine exakten Angaben zum Heizwert ihrer Produkte machen.

Geht man von einem gemischten (brennbare und nichtbrennbare Produkte) Lagerbestand aus, kann ein **durchschnittlicher Heizwert von ca. 20 MJ/kg** für die Stoffe in einem

Pflanzenschutzmittellager realistisch angenommen werden (Angaben der Firmen Bayer und BASF).

Problematisch war es, die Dichten der flüssigen Produkte zu erhalten, da nicht für jeden Stoff entsprechende Angaben, z. B. in Form eines Sicherheitsdatenblattes, vorliegen. Aus diesem Grund können auch nur sehr eingeschränkt Aussagen zur Masse dieser Pflanzenschutzmittel gemacht werden.

Hinsichtlich der Brennbarkeit ist festzustellen, dass die meisten PSM zumindest nicht unter die VbF fallen und schätzungsweise bestenfalls ein Drittel bis die Hälfte der Produkte als brennbar zu bezeichnen sind. Auch dieses Ergebnis konnte in Ermangelung von Sicherheitsdatenblättern nur abgeschätzt werden.

Die eigentliche Brandlast stellen die Verpackungen und Umverpackungen (PE, Wellpappe) sowie die Paletten dar.

Die Masse der einzelnen Verpackungen (Anm.: Häufig werden 4 x 5L-Kanister aus PE verwendet) konnte nicht exakt ermittelt werden, da es gegenüber dem Lagerbetreiber nicht zumutbar gewesen wäre, Verpackungen zu öffnen. Nach Aussage eines Vertreters aus der Beratergruppe kann ein Verpackungsanteil von durchschnittlich 5-10 %, bezogen auf eine Palette, angenommen werden.

Zur Ermittlung der Produktmengen wurde davon ausgegangen, dass eine volle Palette durchschnittlich eine Masse von 1000 kg hat. Hiervon wurden 10% als Verpackungs- und Transporthilfsmittelmasse abgezogen.

3 Datenerhebung bestehender Lager

4 MIKROVERBRENNUNGSAPPARATUR

Bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Kleinbrandversuchen stellt sich die Frage der Übertragbarkeit der mit diesen Experimenten gewonnenen Resultate auf reale Anordnungen. Mit der Verkleinerung des Maßstabes wächst die Komplexität der Parametereinflüsse. Bei der qualitativen und quantitativen Betrachtung der jeweiligen Brandfolgeprodukte muss daher besonders der Untersuchung der Parameterabhängigkeiten mehr Raum eingeräumt werden. Nur unter Berücksichtigung des Einflusses der jeweiligen Versuchsapparatur ist eine abschließende Bewertung der Übertragbarkeit von Ergebnissen möglich.

4.1 AUFBAU DES VERBRENNUNGSROHRES

Die Erfahrungen mit den in der Vergangenheit durchgeführten Verbrennungsexperimenten in einer Apparatur nach DIN 53436 [4-1] (DIN-Rohr) haben gezeigt, dass bei Verwendung des Originalaufbaus mit erheblichen Artefakten zu rechnen ist. Dazu gehören nicht kontrollierbare Kondensationsverluste, schlechte Quantifizierbarkeit aufgrund hoher Abdampfraten schon vor Erreichen der maximalen Temperaturen (besonders bei flüssigen Proben) und das Fehlen von Informationen zum im Verbrennungsraum zur Verfügung stehenden Sauerstoff wegen der undefinierten Druckverhältnisse im Verbrennungssofen. Insgesamt ist die Apparatur schwierig zu handhaben, insbesondere lässt sie sich nur schlecht reinigen. Vordringlich war daher die Entwicklung einer verbesserten Verbrennungsapparatur auf Basis eines klappbaren Rohrofens.

Die verwendete Verbrennungsapparatur besteht aus einem speziellen Infrarot-Rohrofen, der Temperaturen über 1000 °C bei Aufheizraten von $> 10 \text{ K s}^{-1}$ zulässt. Realisiert wird dieses günstige Verhalten über einen in einer Brennlinie des elliptisch geformten, goldverspiegelten Innenraums des Ofens angeordneten Hochleistungsquarzstrahler. In der anderen Brennlinie des Ofenraums befindet sich das Verbrennungsrohr aus Quarzglas mit einer homogen beheizbaren Länge von 150 mm und einem Durchmesser von 15 mm. Durch dieses Rohr wurde im Fall unserer Experimente ein konstanter Volumenstrom von $0,5 \text{ l min}^{-1}$ geleitet, wobei der Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft durch das Zusammenführen zweier Gasströme aus synthetischer Luft und reinem N_2 eingestellt werden konnte. Zur Gewährleistung

¹ In: Normliter, Volumen bezogen auf 0 °C und Normaldruck

4 Mikroverbrennungsapparatur

einer konstanten Gasströmung während des Verbrennungsvorganges wurde der Fluss i_n Abhängigkeit vom Druck im Verbrennungsraum geregelt. Der Aufbau ist in Abbildung 4.1 skizziert.

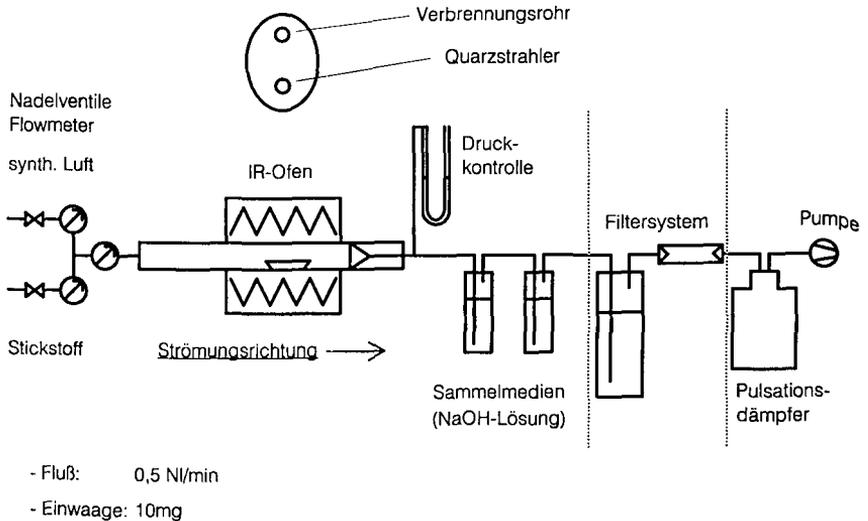


Abbildung 4.1 Schema des Mikroverbrennungsapparatur mit Gasaufbereitung

Mit diesem Aufbau werden viele der beim DIN-Rohr vorhandenen Mängel vermieden. Zu nennen ist hier besonders die drucklose Einstellung der Verbrennungsatmosphäre bzw. Zuluftversorgung unabhängig vom durch die Sammelmedien aufgebauten Gegendruck. Eine Regelung sowohl des Zuluft- als auch des Abluftvolumenstroms des Trägergases über den Druck im Verbrennungsraum ermöglicht die exakte Einhaltung des Reaflusses bei der Verbrennung.

Im ersten Schritt wurden Versuche zum Studium der Parameterabhängigkeit mit der neu aufgebauten Apparatur durchgeführt. Dabei wurde die Verbrennungstemperatur, die Proben einwaage, der Trägergasfluss und der Sauerstoffgehalt im Trägergas variiert. Schwerpunktmäßig wurde die Permanentgasentwicklung (Kohlendioxid und Kohlenmonoxid) beobachtet. Der Anteil von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid wurde mit einem Kombigerät Ultramat 22 P (0 – 20 Vol.-% CO₂, 0 – 3 Vol.-% CO) der Firma Siemens ermittelt.

Bei den Experimenten zur Bestimmung der HCN-Ausbeute wurden jeweils 10 mg Substanz ohne Verwendung einer weiteren äußere Zündquelle thermisch zersetzt. Als Sammelmedium für das freigesetzte HCN diente 0,2 M NaOH-Lösung. Das HCN wurde nach Hydrolyse zu Formiat mittels HPLC quantifiziert [4-2]. Die Verifizierung der Ergebnisse erfolgte photometrisch durch Bestimmung des Cyanids als $[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$ [4-3]. Die HCN-Ausbeute wird in mg HCN pro g eingesetzte Substanz angegeben.

4.2 MATERIALAUSWAHL

Bei den in den Brandversuchen eingesetzten Substanzen handelte es sich um technische Produkte, also verkaufsfertige Zubereitungen sowie um in der Struktur dem Wirkstoff ähnliche Modellverbindungen. Ergänzt wurden diese Materialien um einige typische, in Lageranordnungen und Umverpackungen verwendete Polymerwerkstoffe. Diese Erweiterung erschien insofern notwendig, als die Ergebnisse von Emissionsmessungen bei Großexperimenten wegen der heterogenen Zusammensetzung der Brandlasten häufig keine Zuordnung zu einzelnen Emittenten zulassen: Die ermittelten Ausbeuten setzen sich aus den Emissionsanteilen der verschiedenen brandbeteiligten Spezies zusammen. Gerade im Kleinexperiment ergibt sich aber die Gelegenheit, mit vertretbarem Aufwand auch Einzeldaten relevanter Produktgruppen, wie zum Beispiel Verpackungen, zu gewinnen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass gegebenenfalls im Großversuch auftretende Synergien, wie etwa katalytische Effekte durch Metallverpackungen, bei Versuchen mit isolierten Einzelverbindungen unberücksichtigt bleiben. Hierzu müssten im Bedarfsfall gesonderte Experimente durchgeführt werden.

Wegen der besonderen Aufgabenstellung kamen nur strukturell ähnliche, möglichst einfache Verbindungen mit unterschiedlicher chemischer Einbindung des Stickstoffs im Molekül in Frage. Ausgewählt wurden jeweils eine Zubereitung und eine Modellverbindung aus der Gruppe der Harnstoff- und (Diuron WP 80), Morpholinderivate (N-Ethylmorpholin), 1,2,4-Triazinone (Goltix™ WG 70) und cyclische Carbamate (2-Oxazolidinon), da über die Mechanismen der HCN-Freisetzung bei der Zersetzung dieser Verbindungen in der Literatur recht wenig bekannt ist. Berichtet wird im Folgenden exemplarisch über jeweils einen Vertreter aus den genannten Gruppen (Tabelle 4.1).

Da bei Bränden in Chemikalienlagern zusätzlich zu den Lagergütern auch weitere stickstofftragende Materialien beteiligt sein können, wurden die Untersuchungen auch auf die als Baustoffe anzutreffende Polymerwerkstofftypen wie Acrylnitril-Butadien-StyrolCopoly-

4 Mikroverbrennungsapparatur

merisate (ABS), Polyurethane (PUR) und Melamin-Formaldehyd-Harze (MF) ausgeweitet. In den Experimenten wurden im vorliegenden Fall technische Produkte verwendet, deren Stickstoffgehalt ebenso wie bei den technischen Pflanzenschutzmitteln mittels Elementaranalyse bestimmt wurde (ABS: 6,7 M.-% N; PU: 8 M.-% N; MF: 30 M.-% N)

Tabelle 4.1 Verwendete Substanzen

Substanz (Stoff oder Zubereitung)	Gruppe	Stoffgehalt [M.-%]	Stickstoff- gehalt [M.-%]	theor. maximal mögliche HCN- Ausbeute [mg g ⁻¹]
N-Ethylmorpholin	Morpholinderivat	100	11,7	234
Diuron WP 80	Harnstoffderivat	83	10,0	232
Goltix WG 70	1,2,4-Triazinon	71	19,7	534
Oxazolidinon	Carbamat	100	16,1	310
Acrylnitril-Butadien- Styrol-Copolymerisat (ABS)	Polymerwerkstoff	100	6,7	134
Melamin-Formaldehyd- Harz (MF)	Polymerwerkstoff	100	30,0	600
Polyurethan (PUR)	Polymerwerkstoff	100	8,0	160

* Der Stickstoff der thermisch zersetzten Substanzen kann primär auch zu NH₃, NO_x, N₂ oder stickstoffhaltigen organischen Verbindungen umgesetzt werden.

4.3 ERGEBNISSE

4.3.1 PARAMETERABHÄNGIGKEIT

Der Einfluss der verschiedenen experimentellen Parameter wird am Beispiel der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute von N-Ethylmorpholin untersucht. Bei der Variation des Zuluftvolumenstroms wurde jeweils ca. 10 mg der Substanz eingesetzt. Der Ofen wurde mit einer Temperatur von 900 °C betrieben. Während bei niedrigem Zuluftvolumenstrom offenbar der zugeführte Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung nicht ausreicht, erkennbar an der vermehrten Bildung von Kohlenmonoxid, führt bei hohem Zuluftvolumenstrom die aufgrund der Verdünnung reduzierte Substanzkonzentration in der Gasphase zu einer Verringerung der Ausbeuten (Abbildung 4.2). Aus diesem Verhalten resultiert für die Kohlendioxidausbeute ein Maximum bei einem Zuluftvolumenstrom von 0,49 l min⁻¹, für die Kohlenmon-

oxidausbeute bei $0,235 \text{ l min}^{-1}$. Diese Einflussfaktoren führen bei allen unter diesem Aspekt untersuchten Substanzen zu ähnlichen Ergebnissen, wobei bei einigen Verbindungen mit Erreichen der jeweiligen Zündgrenze ein zusätzlicher Sprung in der ansonsten stetig verlaufenden funktionalen Abhängigkeit zu beobachten ist.

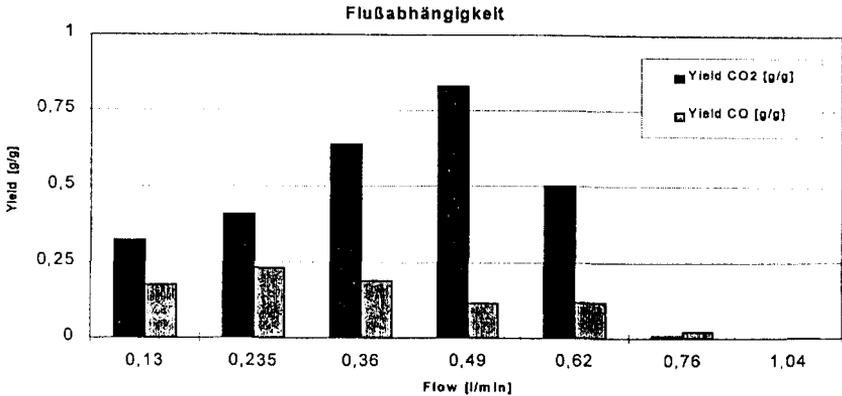


Abbildung 4.2 Abhängigkeit der CO₂/CO-Ausbeute vom Zuluftvolumenstrom für N-Ethylmorpholin (900 °C Ofentemperatur, 9 mg Einwaage)

Bei den Versuchen mit unterschiedlicher Einwaage wurde der Ofen ebenfalls mit 900 °C betrieben. Der Zuluftvolumenstrom betrug jeweils $0,5 \text{ l min}^{-1}$. Es ist zu erkennen, dass unter den genannten Randbedingungen erst ab einer Mindestmenge von 9 mg N-Ethylmorpholin eine vollständige Verbrennung möglich ist (Abbildung 4.3). Bei geringerer Menge wird offenbar keine zündfähige Konzentration der Substanz im Rohr erreicht. Trotz eines ausreichenden Sauerstoffangebots wird nur ein geringer Anteil des eingesetzten Materials mit dem Sauerstoff umgesetzt. Da die Kohlenmonoxidausbeute höher als die Kohlendioxidausbeute ist, muss man von einer unvollständigen Verbrennung ausgehen. Kann sich bei größerer Einwaage im Verbrennungsraum eine zündfähige Konzentration aufbauen, so verlagern sich die Verhältnisse zugunsten einer vollständigeren Verbrennung mit erheblich höherer Kohlendioxidausbeute.

4 Mikroverbrennungsapparatur

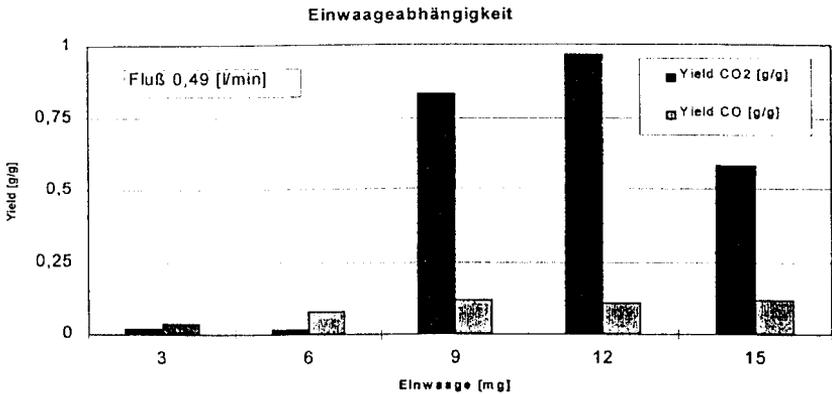


Abbildung 4.3 Abhängigkeit der CO₂/CO-Ausbeute von der Einwaage für N-Ethylmorpholin (900 °C Ofentemperatur, 0,49 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom)

Die bisher beschriebenen Effekte hängen neben der sich in der Gasphase jeweils einstellenden Substanzkonzentration auch wesentlich von dem vor Ort zur Verfügung stehenden Sauerstoffmenge ab. Zwangsläufig musste auch der Einfluss des Sauerstoffanteils in der Zuluft variiert werden. Bei diesen Untersuchungen wurde wiederum eine Ofentemperatur von 900 °C gewählt, die Substanzmenge betrug 9 mg, der Zuluftvolumenstrom 0,49 l min⁻¹. Erwartungsgemäß verringert sich die Kohlendioxidausbeute mit abnehmender Sauerstoffkonzentration in der Zuluft drastisch (Abbildung 4.4). Im Gegensatz dazu ist nur bei der Verringerung der Sauerstoffkonzentration von 20 % auf 15 % eine nennenswerte Erhöhung der Kohlenmonoxidausbeute erkennbar. Bei weiterer Verringerung des Sauerstoffangebots bleibt die Kohlenmonoxidausbeute fast konstant. Verständlicherweise können Kohlendioxid und Kohlenmonoxid nur dann entstehen, wenn auch Sauerstoff für die Oxidation des Kohlenstoffs vorhanden ist. Umgekehrt entsteht bei Abwesenheit von Sauerstoff (0 Vol.-%) kein Kohlendioxid oder Kohlenmonoxid.

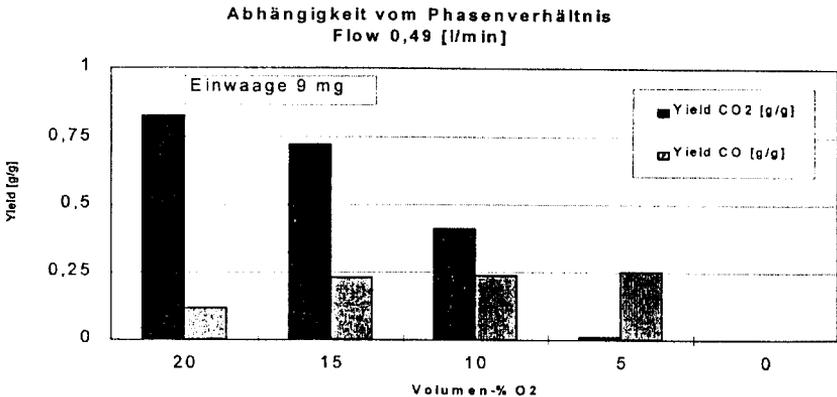


Abbildung 4.4 Abhängigkeit der CO₂/CO-Ausbeute vom Sauerstoffangebot für N-Ethylmorpholin (900 °C Ofentemperatur, 0,49 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom, 9 mg Einwaage)

Da für alle Versuche dieselbe Versuchsgeometrie verwendet wurde kann somit der jeweils zur Verfügung stehende Sauerstoffanteil bestimmt werden. Diese Korrelation wurde erst durch die oben angesprochenen Modifikationen der Mikroverbrennungsapparatur ermöglicht, welche die unterschiedlichen Restriktionen der verschiedenen Sammler und Analysegeräte regelungstechnisch kompensiert und damit Druckschwankungen im Verbrennungsraum vermeidet. Unabhängig vom Belegungszustand und der damit verbundenen Restriktion des eingesetzten Sammlers wird der Verbrennungsraum bei konstantem Volumenstrom drucklos gehalten, so dass der im Trägergas eingestellte Sauerstoffanteil tatsächlich zur Verfügung steht.

4.3.2 SCHADSTOFFENTSTEHUNG AM BEISPIEL VON HCN

Während im vorherigen Abschnitt in Teilbereichen über Resultate zur Untersuchung der Parameterabhängigkeit der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute am Beispiel von N-Ethylmorpholin berichtet wurde, steht nun die Freisetzung des Atemgiftes HCN bei der thermischen Zersetzung stickstoffhaltiger Substanzen im Vordergrund. Von den im Brandfall entstehenden Schadstoffen sind die Brandgase CO und HCN bekanntermaßen aufgrund ihrer akuten Toxizität von besonderer Relevanz.

4 Mikroverbrennungsapparatur

Über den Einfluss der Ventilation auf die CO-Bildung wurde in der Vergangenheit ausführlich in der Literatur berichtet (CO/CO₂ - Verhältnis) [4-4]. Dagegen sind über den Zusammenhang zwischen Sauerstoffangebot und HCN-Bildung bisher kaum Ergebnisse publiziert worden. Das Ziel der im Folgenden ausgewerteten Versuche in der Mikroverbrennungsapparatur bestand darin, eine vermutete Korrelation zwischen HCN-Ausbeute und Ventilation (Sauerstoffangebot) aufzuzeigen sowie gegebenenfalls bestehende Temperaturabhängigkeiten darzustellen. Des weiteren wurde von den Untersuchungen ein Beitrag zur Klärung einer möglichen Strukturabhängigkeit der HCN-Freisetzung erwartet.

Der Stickstoff der thermisch zersetzten Substanzen kann primär zu HCN, NH₃, NO_x, N₂ oder organischen stickstoffhaltigen Verbindungen umgesetzt werden. Die HCN-Ausbeute bei der Zersetzung der hier untersuchten Substanzen kann bei 900 °C bis zu 50% der maximal möglichen Ausbeute betragen. Sekundär kann bereits gebildetes HCN in einer Konkurrenzreaktion durch Oxidation zu NO_x umgesetzt werden.

Im ersten Schritt wurde die Abhängigkeit der HCN-Ausbeute von der Ofentemperatur untersucht (Abbildung 4.5). Die HCN-Ausbeute steigt im Allgemeinen mit steigender Temperatur. So ist sie bei der Mehrzahl der untersuchten Substanzen bei 900 °C größer als bei 600 °C, wobei die Differenz unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann. Die Zunahme der HCN-Ausbeute kann auf die mit steigender Temperatur erhöhte Zersetzungsenergie zurückgeführt werden.

Bei den Polymeren ABS und MF steigt die HCN-Ausbeute im untersuchten Temperaturintervall ebenfalls monoton mit steigender Temperatur. Polyurethan zeigt dagegen ein deutliches Maximum der HCN-Ausbeute bei 600 °C. Eine spontane Erklärung hierfür wurde nicht gefunden. In der Literatur wird von einem HCN-Minimum zwischen 600 °C und 800 °C berichtet. Dieses wird mit einem oxidativen Bereich in Zusammenhang gebracht [4-5].

Entgegen erster Erwartung wurden bei vollventilierten Bränden im allgemeinen höhere HCN-Ausbeuten gemessen als unter pyrolytischen Bedingungen (Abbildung 4.6). Bei diesem Effekt handelt es sich in erster Näherung um einen indirekten Temperatureinfluss. Bei Bränden mit offener Flammenentwicklung entstehen lokal, d. h. am Ort des Brandgeschehens, infolge der freigesetzten Verbrennungswärme höhere Temperaturen als die am Ofen eingestellte Temperatur. Für die untersuchten Stoffe wurde das Maximum der HCN-Ausbeute im bei 10 Vol.-% Sauerstoff in der Zuluft erreicht. Sowohl unter pyrolytischen Verhältnissen als auch im vollventilierten Brand traten deutlich geringere Ausbeuten auf. Als Erklärung bietet sich an, dass bei geringerem Sauerstoffangebot weniger HCN durch Oxidation verbraucht wird. Diese Beobachtung ist für eine Abschätzung des Gefährdungspotentials nicht unerheb-

lich, da offensichtlich beim ventilationsgesteuerten Brand mit den höchsten Schadgaskonzentrationen zu rechnen ist.

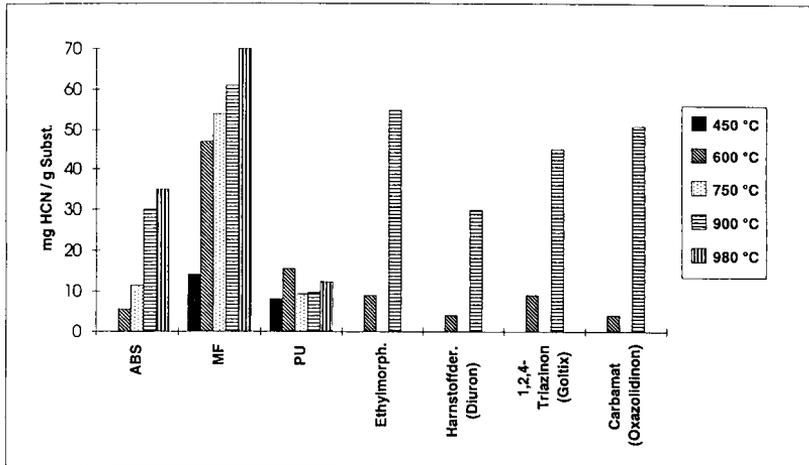


Abbildung 4.5 HCN-Ausbeute in Abhängigkeit von der Ofentemperatur

Die Polymere zeigen bezüglich der Ventilationsabhängigkeit der HCN-Bildung bei 900 °C kein so eindeutiges Verhalten wie die oben genannten Pestizide und Modellverbindungen. Bei Melamin-Formaldehyd wurde die höchste HCN-Ausbeute unter pyrolytischen Bedingungen festgestellt. Keine wesentliche Abhängigkeit vom Sauerstoffanteil ist bei PU zu beobachten. Bei der Zersetzung von ABS steigt die HCN-Ausbeute sogar mit steigendem O₂-Gehalt. Dieses steht allerdings im Widerspruch zu Ergebnissen aus [4-6]. Hier wurden bei 10 Vol.-% O₂ bei einer Verbrennungstemperatur von 800 °C die höchsten HCN-Ausbeuten gemessen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der HCN-Generierung ist der Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt der verbrannten Substanzen und der HCN-Ausbeute (bestimmt bei 900 °C und 20 Vol.-% Sauerstoff). Es wird im Allgemeinen eine zunehmende HCN-Ausbeute mit steigendem Stickstoffgehalt festgestellt, wobei es jedoch deutliche Abweichungen von einer linearen Korrelation gibt, die eventuell auf Unterschiede in der chemischen Struktur der einzelnen Substanzen zurückgeführt werden können.

4 Mikroverbrennungsapparat

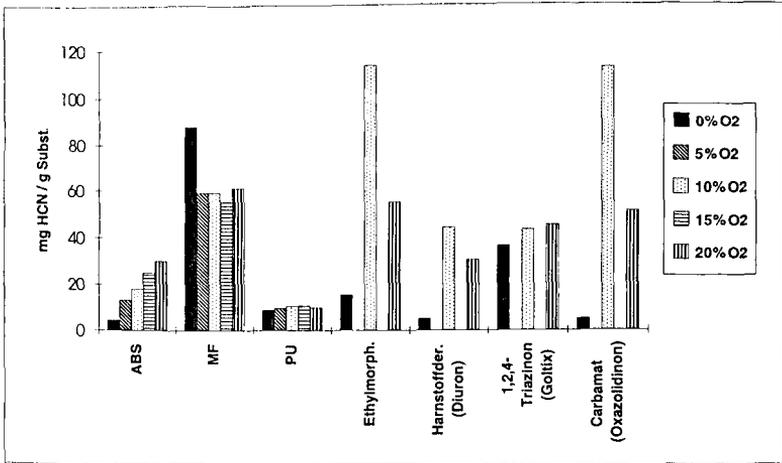


Abbildung 4.6 HCN-Ausbeute in Abhängigkeit vom Sauerstoffanteil in der Zuluft

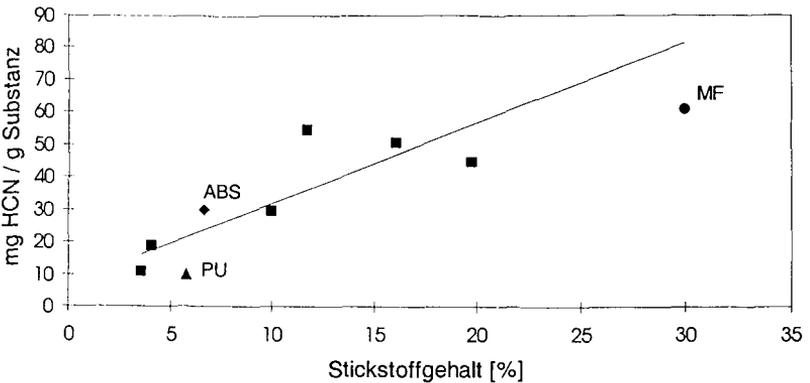


Abbildung 4.7 HCN-Ausbeute in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs (900 °C Ofentemperatur, 20 Vol.-% Sauerstoff in der Zuluft)

4.4 LITERATURHINWEISE

[4-1] DIN 53436

[4-2] T.W. Dolzine: Anal. Chem. 54 (1982), 470-473

[4-3] P. Nascimento: Dissertation TU Clausthal (1982), 4-7

[4-4] V. Brabauskas: Fire and Materials 19 (1993), 205-213

[4-5] D. Rennoch: Forschungsbericht 123, BAM Berlin (1986), 104

[4-6] J.V. Rutkowski, B. Levin Fire and Materials 10 (1986), 93-105

4 Mikroverbrennungsapparatur

5 UNTERSUCHUNGEN IN DER CONE-KAMMER

Für die Charakterisierung des von Baustoffen und Lagergütern ausgehenden Risikos der Entzündung, Brandausbreitung und Brandwirkung sind Kenntnisse zur Energiefreisetzungsrate, Abbrandrate, effektiven Verbrennungswärme und Freisetzung von Brandprodukten (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid) von Bedeutung. Die Bestimmung dieser Größen ist unter praxisingerechten Bedingungen einerseits mit erheblichem technischem - und damit 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.

Als Ersatzstoff für feste Chemikalien wurde ein Polyethylen Granulat der Firma BASF mit der Bezeichnung Lupolen 5021 D eingesetzt. Die Flüssigkeiten wurden durch Glysantin G48 der Firma BASF ersetzt.

5.1 VERSUCHSAUFBAU

Das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [5-1] stellt einen einleitend beschriebenen Versuchsaufbau im Labormaßstab dar. Bei diesem Verfahren erzeugt ein kegelförmiger, elektrisch beheizter Strahler (engl. Cone-Heater) in der Ebene der maximal 100 cm² großen Materialoberfläche eine homogene Strahlungsflussdichte (Leistung pro Flächeneinheit), durch die der zu untersuchende Stoff erwärmt wird. Die Strahlungsflussdichte kann im Bereich 0 – 100 kW/m² (maximale Heizertemperatur: 1000 °C) eingestellt werden. Zur Einstellung wird die Strahlungsflussdichte mit einer wassergekühlten Schmidt-Boelter-Sonde gemessen. Ein zusätzlicher, periodisch erzeugter Zündfunke in unmittelbarer Nähe zur Probenoberfläche (10 mm Abstand) dient zur Entzündung der infolge der Erwärmung und Zersetzung austretenden Pyrolyseprodukte (Abbildung 5.1). Nach der Entzündung verbrennen die Zersetzungsprodukte in einer Diffusionsflamme, die Höhen bis zu 40 cm erreichen kann. Daher ist dieser Aufbau aus Gründen der Arbeitssicherheit in einer von unten und oben belüfteten, mit Glastüren geschützten Kammer aufgestellt.

Oberhalb des in Abbildung 5.1 skizzierten Aufbaus befindet sich eine Abzughaube mit kastenförmigem Aufsatz. Ein horizontales Rauchgasrohr mit Gasentnahmesonde verbindet den Aufsatz mit einem Gebläse. Das Gebläse fördert die Rauchgase über ein vertikales Rohr mit Messsonden (orifice-plate) für die Massenstrombestimmung. Das Gebläse wird mit

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

geregelter Absaugleistung betrieben (Regelbereich: 20 – 30 l/s, bezogen auf 25 °C Gastemperatur). Die aus dem vertikalen Rohr austretenden Gase werden in ein Absaugsystem mit Filteranlage übernommen. Diese Rauchgasführung ermöglicht die vollständige Absaugung aller in der offenen Kammer entstehenden Rauchgase. Bei dieser Art der Zuluft- und Rauchgasführung muss der Rauchgasvolumenstrom bestimmt werden. Für die vorherige Kalibrierung wird ein kleiner Gasbrenner benötigt, bei dessen Betrieb die Methangasmenge erfasst wird.

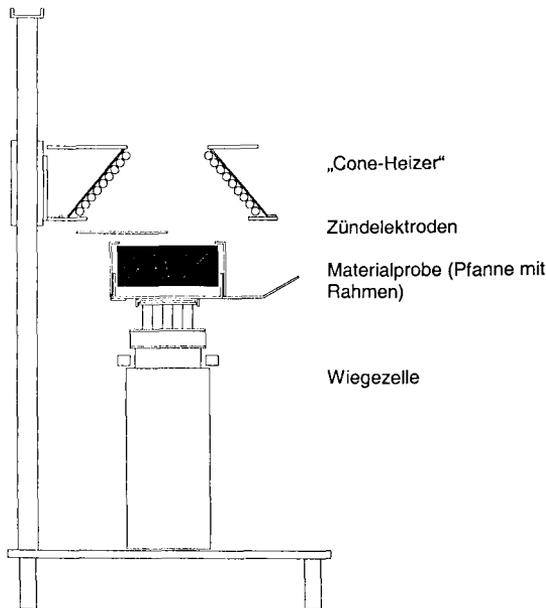


Abbildung 5.1 Plattform, bestehend aus Bodenplatte, Führungsschienen, Wiegeeinrichtung, Cone-Heizer und Zündelektroden mit Materialprobe

Die über die Gasentnahmesonde abgezweigten Rauchgase werden über die Gasanalysestrecke (Abbildung 5.2) einem Sauerstoff- und einem Kohlendioxid-/Kohlenmonoxidanalyser zugeführt. Für die Auswertung wird das Prinzip der Sauerstoffkalorimetrie [5-2, 5-3, 5-4, 5-5] angewandt, welches besagt, dass die bei der Verbrennung freigesetzte Energie

proportional zum verbrauchten Sauerstoff ist. Durch die Messung der Rauchgaszusammensetzung und Rauchgasmenge und des Probengewichtes kann daher der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrate (Brandleistung), der Abbrandrate, der effektiven Verbrennungswärme, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidausbeute berechnet werden. Außerdem wird der Zeitpunkt der Entzündung erfasst.

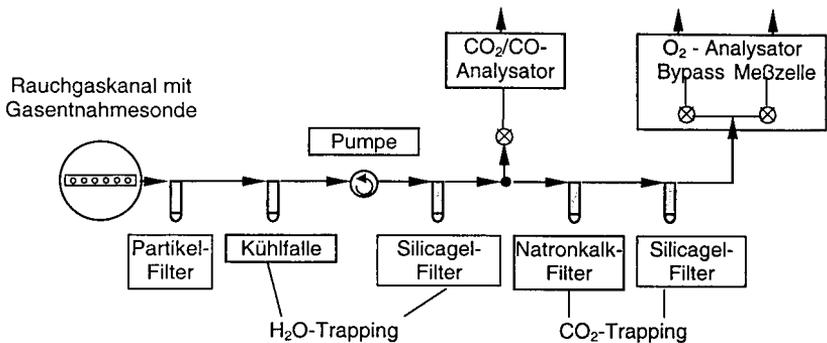


Abbildung 5.2 Aufbau der Gasanalysestrecke für das Cone-Calorimeter mit Wasserdampf- und Kohlendioxid-Trapping gemäß ISO 5660 [5-1]

Die Erfahrung zeigt, dass vornehmlich durch die Abhängigkeit des Zündzeitpunktes und der Energiefreisetzungsrate von der eingestellten Strahlungsflussdichte das Abbrandverhalten von Materialien charakterisiert werden kann. Eine Übertragung der mit dem Cone-Calorimeter bestimmten Eigenschaften auf die Beschreibung des Brandverhaltens im realen Maßstab ist aber nur eingeschränkt möglich, da Einflüsse der Ventilationsbedingungen mit dem in ISO 5660 [5-1] beschriebenen Versuchsaufbau nicht untersucht werden können.

Will man das Abbrandverhalten bei Variation der Ventilationsbedingungen - gegeben durch Menge und Zusammensetzung (Sauerstoffanteil) der Zuluft - untersuchen, so muss der Versuchsaufbau grundsätzlich geändert werden. Vom Hersteller des Cone-Calorimeters wurde der in Abbildung 5.3 dargestellte Aufbau angeboten. Diese Modifikation der Plattform wird nach Angaben des Herstellers von verschiedenen Forschungslabors außerhalb Deutschlands eingesetzt.

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

Bei diesem Aufbau erfolgt die Erwärmung des Materials und die Entzündung entstehender Zersetzungsprodukte auf gleiche Weise wie im ursprünglichen Cone-Calorimeter. Allerdings erfolgt dies im geschlossenen System bestehend aus Vormischkammer und 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 beschriebene Abzugsystem des ursprünglichen Cone-Calorimeters aufgenommen. Tatsächlich wird hier die in Abbildung 5.1 dargestellte Plattform des Cone-Calorimeters durch den geschlossenen Aufbau mit der Kammer ersetzt. Die Vielfalt der Untersuchungsmöglichkeiten wird mit diesem Aufbau eingeschränkt, da der Cone-Heizer nicht schwenkbar ist und somit Proben nicht vertikal angeordnet werden können.

Bei starker Energiefreisetzungsrate, 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. Dies ist der Grund, warum das angebotene System nicht beschafft und statt dessen ein individueller Aufbau entworfen und erstellt wurde. Nachträglich haben sich die Befürchtungen auch bestätigt: Bei einem Forschungsvorhaben, das sich auch mit Bränden in Chemiekalienlagern beschäftigte, wurde ein vergleichbarer Aufbau eingesetzt [5-6]. Durch die nachträgliche Verbrennung außerhalb der Kammer wurden bei diesen Versuchen die Verbrennungseigenschaften so verändert, dass eine Korrelation zwischen Energiefreisetzungsrate, Abbrandrate und Gesamtenergiefreisetzung und der eingestellten Zuluftmenge nur schwach ausgeprägt waren.

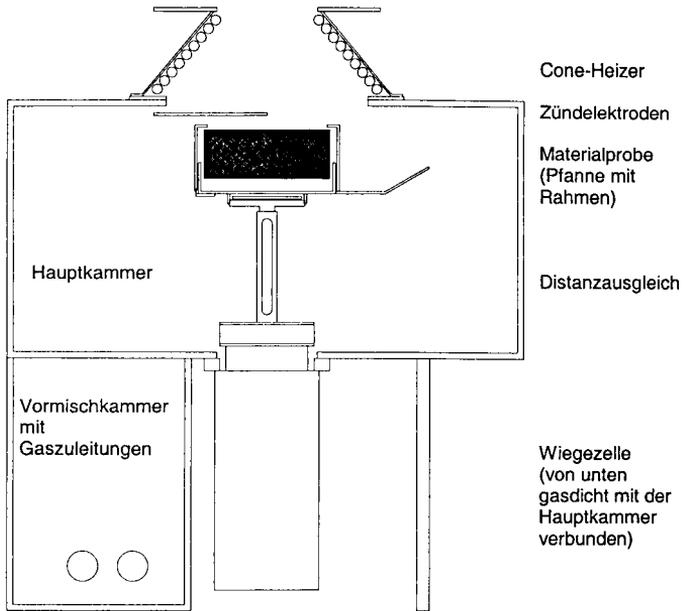


Abbildung 5.3 Modifizierte Plattform für das Cone-Calorimeter zur Untersuchung bei variabler Zuluftmenge und Zusammensetzung (Anbieter: Fire Testing Technology, vormals Rheometric Scientific)

Bei der Eigenentwicklung für ein Cone-Calorimeter mit gesteuerten Ventilationsbedingungen, der Cone-Kammer (Abbildung 5.4), wird die gesamte Plattform aus dem offenen Raum des ursprünglichen Cone-Calorimeters in eine geschlossene Kammer umgesetzt. Auch das Abzugssystem wird im Gegensatz zum ursprünglichen oder zum angebotenen modifizierten Cone-Calorimeter nicht mehr benutzt. Dafür ist auf der Oberseite der ansonsten geschlossenen Kammer ein Rohr mit zwei Blenden und den Entnahmesonde montiert. Die Analyse der Rauchgaszusammensetzung erfolgt mit der in Abbildung 5.2 dargestellten Gasanalysestrecke, wobei ein zweiter CO_2 -/ CO -Analysator mit höherem Messbereich hinter den ersten geschaltet wurde. 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 Abbildung 5.4 nicht darge-

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

stellt) angebracht, das den Gasstrom horizontal ablenkt. Die Rauchgase strömen durch das vertikale Rohr an den Entnahmesonden vorbei, treten aus und werden vom Absaugsystem übernommen.

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

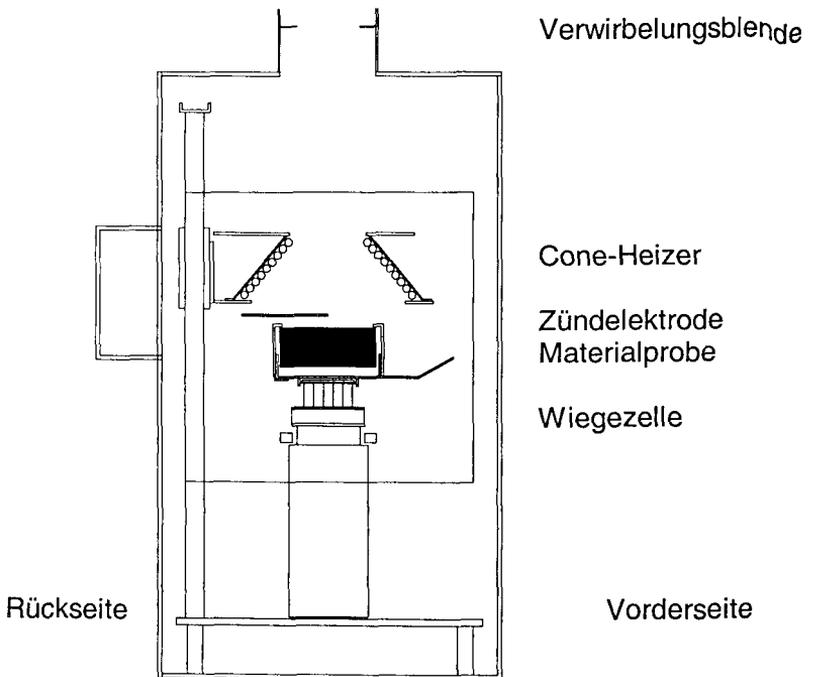


Abbildung 5.4 Aufbau der Cone-Kammer, Seitenansicht

Die Vorderseite kann vollständig abgenommen werden, damit die komplette Plattform mit Wiegeeinrichtung, Probenaufnahme, Zündelektroden und Cone-Heizer eingesetzt oder herausgenommen werden kann. An der Vorderseite ist eine zusätzliche Klappe (15 cm x 15 cm) angebracht, durch die der Probenträger (Pfanne) mit der entsprechenden Materialprobe hineingebracht bzw. herausgenommen werden kann. Durch die beiden Fenster in der linken und rechten Seitenwand kann das Brandverhalten beobachtet werden. Zur Verwendung des Methanbrenners oder der Schmidt-Boelter-Sonde (Einstellung der Strahlungsflussdichte) muss lediglich die rechte Scheibe herausgenommen werden. Dann kann der Brenner bzw. die Schmidt-Boelter-Sonde in die Halterung am Cone-Heizer eingesetzt werden. Die elektrischen Zuleitungen für den Cone-Heizer (Thermoelemente und Stromversorgung), für die Wiegeeinrichtung und die Zündelektroden (Motorsteuerung und Hochspannungsversorgung) werden durch die Rückwand geführt. Außerdem kann der Aufnehmer für die Einstellung der Strahlungsflussdichte (Schmidt-Boelter-Sonde) angeschlossen und mit Kühlwasser versorgt werden. Zusätzlich wurde eine Anschluss für die Methanversorgung des Kalibrierbrenners montiert. In der Rückwand befindet sich eine Aussparung, in die das Gegengewicht der Zündelektroden hineinschwenken kann, nachdem die Entzündung des Materials erfolgt ist. Das Gesamtvolumen der Kammer beträgt (ohne Einbauten) ca. 130 l.

Da hier, im Gegensatz zum modifizierten Cone-Calorimeter von der Industrie (Anbieter: Fire Testing Technology, Abbildung 5.3), die Gasentnahme vor dem Mischen mit Umgebungsluft erfolgt, wird die Rauchgaszusammensetzung in einem 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. Diese Form der Rauchgasführung und Gasanalyse stellt ein geschlossenes System dar. Dadurch vereinfachen sich die Berechnungsverfahren der Sauerstoffkalorimetrie. Eine Kalibrierung des Abzugsystems mit einem Methanbrenner ist nicht notwendig, da die Kenntnis der Zuluftmenge und -zusammensetzung für die sauerstoffkalorimetrische Auswertung ausreicht. Trotzdem wurde die Funktionsweise des experimentellen Aufbaus und die Richtigkeit der Berechnungsformel überprüft, indem die über den Sauerstoffverbrauch berechnete Energiefreisetzungsrate mit der aus dem Methanmassenstrom bestimmten Brennerleistung verglichen wurde. Die festgestellten Abweichungen lagen lediglich im Bereich der Ungenauigkeit der eingesetzten Messgeräte.

Bei diesem Aufbau werden eingesetzt:

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

- HI-TEC Volumenstromregler Luft 4 – 1000 l/min (bezogen auf 20 °C, 1 bar)
- SERVOMEX 540 A Sauerstoffanalysator 0 – 25 Vol.-% O₂
- Siemens Ultramat 22 P Gasanalysator 0 – 4 Vol.-% CO₂, 0 – 0,1 Vol.-% CO
- Siemens Ultramat 22 P Gasanalysator 0 – 20 Vol.-% CO₂, 0 – 3 Vol.-% CO
- Wiegeeinrichtung max. 3,5 kg, Messbereich 0 – 500 g
- MEDTHERM Schmidt-Boelter-Sonde 0 – 100 kW/m²
- MKS Volumenstrommesser Luft 0 – 50 l/min ¹⁾ (für Methanbrenner)
- Mantelthermoelemente NiCr-Ni Typ K

Alle Messwertgeber sind an einen Mehrkanal-A/D-Wandler angeschlossen. Die Abfrage der Messwerte erfolgt im Intervall von 0,5 s. Die Daten werden auf einem Personal-Computer gespeichert und mit einem handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramm bearbeitet. Die Auswertungsgrundlagen sind im Anhang dargestellt.

Zur Vorbereitung der Versuchsserie wurde im ersten Schritt die Beziehung zwischen der Temperatur des Cone-Heizers und der daraus resultierenden Strahlungsflussdichte für eine horizontale Probenanordnung in der Ebene 25 mm unterhalb der Heizer-Unterkante betrachtet. Dazu wurden verschiedene Temperaturen eingestellt und nach Erreichen des stationären Zustands (Schwankungen der Heizer-Temperatur im Bereich der Regelbandbreite von ± 2 K) die Strahlungsflussdichte erfasst. Da im weiteren mit Flüssigkeiten oder schmelzenden Feststoffen gearbeitet wurde, konnte auf die Vermessung der Strahlungsflussdichte bei vertikaler Anordnung verzichtet werden.

Aus dieser Untersuchung resultierte die in Abbildung 5.5 dargestellte „Einstellkurve“. Für die weiteren Untersuchungen wurden die angegebenen Temperaturen für die jeweils gewünschte Strahlungsflussdichte zur thermischen Beaufschlagung des Materials eingestellt. Die exemplarische Überprüfung vor einzelnen Versuchen im Verlauf der weiteren Untersuchungen ergab keine nennenswerte Verschiebung der Heizer-Temperaturen. Entsprechend wurde auch beim Cone-Calorimeter (Einbau der Plattform in der offenen Kammer) vorgegangen. Es ergab sich für den Aufbau gemäß ISO 5660 [5-1] eine identische „Einstellkurve“. Somit hat die geschlossene Kammer keinen erkennbaren Einfluss auf die Beziehung zwischen Heizer-Temperatur und Strahlungsflussdichte auf der Probenoberfläche.

Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe des Methanbrenners die Auswertungsverfahren und die Funktion der Cone-Kammer überprüft. Bei diesen Versuchen wurde zusätzlich an der oberen Blende im Rauchgasrohr der Differenzdruck und die Rauchgastemperatur erfasst. Die Gerätekonstante C_G , für deren Bestimmung beim Cone-Calorimeter die Kalibrierung mit dem

¹⁾ l: Normliter, Volumen bezogen auf 0 °C und Normaldruck

Methanbrenner durchgeführt wird, wurde hier ohne Brenner mit bekanntem Zuluftstrom bestimmt.

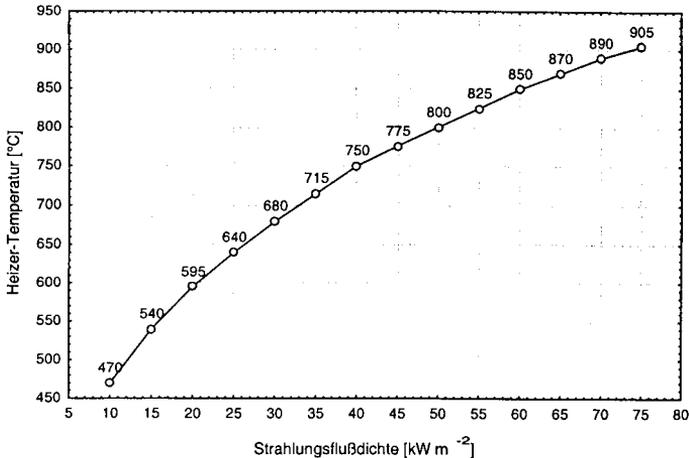


Abbildung 5.5 Einstellung der Heizertemperatur für die Cone-Kammer

Für die eigentliche Überprüfung wurde bei konstantem Zuluftvolumenstrom die Leistung des Methanbrenners in Stufen variiert. In Abbildung 5.6 ist das Ergebnis eines dieser Versuche dargestellt. Hierbei wurde der Methanbrenner für ca. 2 Minuten mit 0,5 kW und danach für ca. 4 Minuten mit 5 kW betrieben. Die Energiefreisetzungsrate wurde einerseits über den Zuluftvolumenstrom, andererseits gemäß ISO 5660 [5-1] mit Hilfe der Differenzdruck- und Temperaturmessung unter Anwendung der vorher ermittelten Gerätekonstante, also mit Kenntnis des Abluftvolumenstroms berechnet.

Die gemäß ISO 5660 [5-1] über die Rauchgasmenge berechnete Energiefreisetzungsrate zeigt sehr starke Schwankungen bei dem Niveau von 5 kW. Diese werden durch die Differenzdruckmessung in der turbulenten Strömung des Rauchgases hervorgerufen. Allerdings wurde die Auswertung über den Abluftvolumenstrom (ISO 5660) für die weiteren Versuche nicht mehr angewendet.

Die über den Zuluftvolumenstrom berechnete Energiefreisetzungsrate zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Brennerleistung. Dadurch ist nachgewiesen, dass zum einen alle

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

Messaufnehmer richtig eingestellt sind und dass zum anderen die Auswertungsmethode richtig angewendet werden kann.

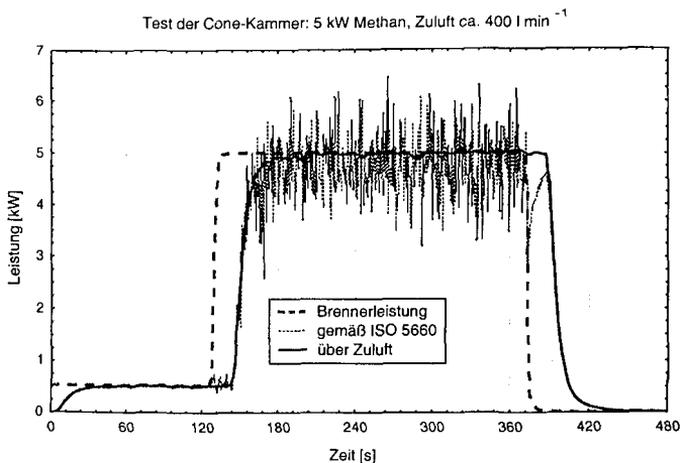


Abbildung 5.6 Verlauf der ermittelten Energiefreisetzungsrates

Abschließend konnte anhand dieser Versuche das Ansprechverhalten des Gesamtsystems aus Kammer, Gasentnahme und Gasanalyse beurteilt werden. Bei Betrachtung eines einzelnen Versuchs könnte man schließen, dass die Systemansprechzeit als Funktion des Zuluftvolumenstroms beschrieben werden kann. Tatsächlich ist die Systemansprechzeit aber auch über die Strömungsgeschwindigkeit von der Rauchgastemperatur und der Brennerleistung bzw. von der Energiefreisetzungsrates abhängig. Daher wurde bei der Auswertung der Versuche eine Korrektur der Messwerte über die Systemansprechzeit nicht durchgeführt.

Bei Vorversuchen mit dem Methanbrenner und höherer Brennerleistung (6 kW) wurde eine starke Verformung der Kammeroberseite, des vertikalen Rohrs und des Verbindungsflansches beobachtet. Das System wurde am Flansch undicht, Verbrennungsgase traten aus. Die Bedingungen für die Ermittlung der Energiefreisetzungsrates wurden somit nicht mehr eingehalten. Daher sollten nur Versuche in der Kammer durchgeführt werden, bei denen die Energiefreisetzungsrates auf 5 – 6 kW begrenzt bleibt.

5.2 BRANDVERHALTEN IN DER CONE-KAMMER

Bei den Untersuchungen des Lupolen 5021 D Granulat und der Flüssigkeit Glysantin G48 wurde die thermische Beaufschlagung durch die eingestellte Strahlungsflussdichte und die Ventilation durch den Zuluftvolumenstrom variiert. Vom Hersteller / Lieferanten wurden der Heizwert und die chemische Zusammensetzung der beiden Materialien bestimmt, so dass daraus gemäß der im Anhang beschriebenen Auswertungsgrundlagen die notwendigen Materialparameter berechnet werden konnten (Tabelle 5.1).

Für die Untersuchungen von Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 wurde grundsätzlich die Probenpfanne auf einer Fläche von $110,25 \text{ cm}^2$ mit 100 g des PE Granulats bzw. 113 g (100 ml) der Flüssigkeit Glysantin G48 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 in der Cone-Kammer durchgeführt. Für die thermische Beaufschlagung wurden drei Niveaus für die Strahlungsflussdichte gewählt: $15, 25, 40 \text{ kW m}^{-2}$. In einem Versuch wurde Lupolen 5021 D Granulat mit 10 kW m^{-2} beaufschlagt. Da es hierbei innerhalb von 30 Minuten nicht zur Entzündung kam, wurde im weiteren auf eine thermische Beaufschlagung mit weniger als 15 kW m^{-2} verzichtet. Als obere Grenze für die thermische Beaufschlagung wurde eine Strahlungsflussdichte von 40 kW m^{-2} gewählt, da mit Lupolen 5021 D Granulat bereits bei dieser Beaufschlagung eine Energiefreisetzungsrates von ca. 6 kW in der Kammer auftritt. Für den Zuluftvolumenstrom wurden Einstellungen von 25 l min^{-1} bis 400 l min^{-1} gewählt, wobei die obere Grenze durch die Pressluftversorgung vorgegeben wurde.

Tabelle 5.1 Zusammenstellung der Materialparameter

Material	Lupolen 5021 D Granulat	Glysantin G 48
Heizwert H_u [kJ g^{-1}]	43,19	16,6
Summenformel	CH_2	CH_3O
Expansionsfaktor α	1,0698	1,2095
Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchtem Sauerstoff E^V [kJ m^{-3}] (Volumen bezogen auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$)	16509	16846
stöchiometrischer Luftbedarf r [$\text{g}_{\text{Luft}} \text{g}_{\text{Brennstoff}}^{-1}$]	14,835	5,572

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

Tabelle 5.2 Versuche in der Cone-Kammer

Lupolen 5021 D Granulat			
Strahlungsflussdichte [kW m ⁻²]	Zuluftvolumenstrom [l/min] (bezogen auf 20 °C)	Versuchsindex	
10 – 15	(100 – 200)	(7)	
15	25	12	
	50	10	
	100	8	
	200	9	
25	25	11	
	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 ⁻²]	Zuluftvolumenstrom [l/min] (bezogen auf 20 °C)	Versuchsindex	
15	25	33	
	50	31	
	100	32	
	200	27	
25	25	25	
	50	22	
	100		28
			21
			30
		200	23
			29
		300	26
	400	24	
40	50	36	
	100	35	
	200	34	
	400	37	

In Tabelle 5.2 ist eine Übersicht der Versuche zusammengestellt. Eine vollständige Darstellung aller Versuchsergebnisse (zeitliche Verläufe von relativer Energiefreisetzungsrate, Probenmasse, relative Abbrandrate, effektive Verbrennungswärme, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute) ist dem Anhang zum Abschlussbericht zu entnehmen.

5.2.1 ENTZÜNDUNG

Durch Variation der Strahlungsflussdichte (thermische Beaufschlagung) kann das Entzündungsverhalten von Materialien im Cone-Calorimeter untersucht werden. Bei den Untersuchungen eines Materials in der Cone-Kammer wird bei gleicher Strahlungsflussdichte zwar zwischen den einzelnen Versuchen der Zuluftvolumenstrom variiert, nicht aber die Zusammensetzung der zuströmenden Luft. Somit dürfte kein Einfluss des Zuluftvolumenstroms auf das Entzündungsverhalten eines Materials bemerkbar sein. Eine Analyse der für Lupolen

5021 D Granulat bzw. Glysantin G48 ermittelten Zündzeitpunkte bestätigt diese Annahme. Andernfalls – der Zuluftvolumenstrom würde den Zündzeitpunkt beeinflussen – müsste die Zuluftführung in der Kammer überprüft werden.

Anhand des Zusammenhangs zwischen Zündzeitpunkt und Strahlungsflussdichte kann eine kritische Wärmestromdichte bestimmt werden. Die kritische Wärmestromdichte ist der untere Grenzwert, bei dem keine Entzündung mehr erfolgen kann, d. h. der Wert des Zündzeitpunktes gegen unendlich strebt. Es gibt zwei Möglichkeiten, den Zusammenhang darzustellen:

Thermisch dickes Verhalten kann angenommen werden, wenn die Probendicke größer als die charakteristische thermische Leitungslänge ist. Dies führt zum Schluss, dass der Zündzeitpunkt proportional zum Kehrwert des Quadrats der Strahlungsflussdichte ist. Um diesen Zusammenhang zu bestätigen müsste sich bei einer grafischen Auftragung des Kehrwerts der Wurzel des Zündzeitpunktes über der Strahlungsflussdichte eine Gerade ergeben. Wenn umgekehrt die charakteristische thermische Leitungslänge größer als die Probendicke ist, spricht man von thermisch dünnem Verhalten. Unter diesen Bedingungen ist der Zündzeitpunkt proportional zum einfachen Kehrwert der Strahlungsflussdichte und die grafische Auftragung des Kehrwerts des Zündzeitpunktes über der Strahlungsflussdichte müsste die Gerade ergeben [5-7].

Die Prüfung beider Annahmen führt zu dem Schluss, dass sowohl bei Lupolen 5021 D Granulat als auch bei Glysantin G48 bezüglich der Entzündung thermisch dünnes Verhalten angenommen werden muss. Durch die entsprechende Interpolation ergibt sich eine kritische Wärmestromdichte von $6,8 \text{ kW m}^{-2}$ für Lupolen 5021 D Granulat bzw. $12,5 \text{ kW m}^{-2}$ für Glysantin G48 (Abbildung 5.7). Erfahrungsgemäß lässt sich ein Material aber nicht bei Einwirkung dieser Strahlungsflussdichte entzünden. Die tatsächliche kritische Wärmestromdichte für Lupolen 5021 D Granulat liegt im Bereich $10 - 15 \text{ kW m}^{-2}$.

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

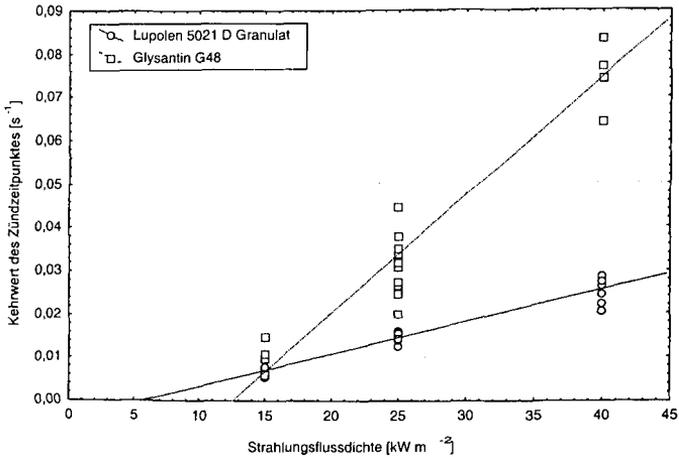


Abbildung 5.7 Thermisch dünnes Verhalten, Bestimmung der kritischen Wärmestromdichte

5.2.2 VERLAUF DER ENERGIEFREISETZUNGSRATE

Bei Betrachtung der relativen Energiefreisetzungsrates ist die Abhängigkeit vom Parameter thermische Beaufschlagung, gesteuert durch die Strahlungsflussdichte auf der Probenoberfläche, und Ventilation, beeinflusst durch den Zuluftvolumenstrom, vorerst getrennt zu untersuchen. Durch die von außen zugeführte Energie wird die Abbrand- bzw. Pyrolyserate maßgeblich gesteuert. Bei höherer Energiezufuhr wird verständlicherweise auch mehr Material umgewandelt und kann – bei ausreichender Sauerstoffzuführung – durch die Verbrennung (Oxidation) Energie freisetzen. Die aus der Verbrennung zusätzlich zugeführte Energie kann die Abbrandrate eventuell noch etwas verstärken. Demzufolge beobachtet man bei hohen Strahlungsflussdichten auch höhere Energiefreisetzungsrates.

Für beide Stoffe lässt sich aus Kenntnis der chemischen Zusammensetzung und des Heizwerts und der Voraussetzung einer vollständigen Verbrennung bei vorgegebenem Zuluftvolumenstrom die maximale relative Energiefreisetzungsrates (Fläche festgelegt) berechnen (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3 Maximale relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom (theoretisch)

Zuluftvolumenstrom [l/min] (bezogen auf 20 °C)	maximale relative Energiefreisetzungsrate [kW m ⁻²] (bezogen auf eine Probenfläche von 110,25 cm ²)		
	Lupolen 5021 D Granulat	Glystantin G48	Allgemein
25	129	131	134
50	257	262	268
100	514	524	536
200	1028	1049	1071
300	1542	1573	1607
400	2056	2098	2142

5.2.2.1 EINFLUSS DER THERMISCHEN BEAUFSCHLAGUNG

In Abbildung 5.8 ist der Verlauf der relativen Energiefreisetzungsrate bei unterschiedlichen Strahlungsflussdichten und als ausreichend angesehener Zuluft (200 l min⁻¹) für beide Materialien gegenübergestellt. Die frühere Entzündung von Glystantin G48 gegenüber Lupolen 5021 D Granulat wird durch den früheren Einsatz der Energiefreisetzungsrate wiedergegeben. Bei Lupolen 5021 D Granulat steigt die Energiefreisetzungsrate langsamer an. Dieses Material brennt aber bei vergleichbarer Masse erheblich länger. Bei einer geringen thermischen Beaufschlagung (15 kW m⁻²) erreicht die Energiefreisetzungsrate von Glystantin G48 das Niveau von Lupolen 5021 D Granulat. Ansonsten werden für Lupolen 5021 D Granulat höhere Werte als bei Glystantin G48 erreicht. Beim Vergleich der beiden Materialien ist zu beachten, dass der Heizwert von Lupolen 5021 D Granulat mehr als 2,5-mal größer als der von Glystantin G48 ist.

Bei einem Zuluftvolumenstrom von 200 l min⁻¹ wäre maximal eine relative Energiefreisetzungsrate von mehr als 1000 kW m⁻² bei stöchiometrischer Verbrennung möglich. Demgegenüber beträgt die Grenze bei 100 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom nur noch etwa 500 - 530 kW m⁻² (Tabelle 5.3). Unter diesem Aspekt ist verständlich, dass bei 40 kW m⁻² Strahlungsflussdichte die maximale relative Energiefreisetzungsrate von Lupolen 5021 D Granulat bei 100 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom um ca. 10 % geringer ist: Es wird nicht mehr ausreichend Sauerstoff zugeführt (Abbildung 5.9). Zusätzlich muss bemerkt werden, dass bei geringerer Strahlungsflussdichte (15, 25 kW m⁻²) die relative Energiefreisetzungsrate von Glystantin

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

G48 höher als von Lupolen 5021 D Granulat ist. Wird die Zuluftmenge noch einmal halbiert (50 l min^{-1}) reduziert sich auch die maximal mögliche relative Energiefreisetzungsrate auf ca. 260 kW m^{-2} . Dies ist auch der Maximalwert der relativen Energiefreisetzungsrate von Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 bei einer Strahlungsflussdichte von 40 kW m^{-2} (Abbildung 5.10). Bei einem Zuluftvolumenstrom von 25 l min^{-1} wird nur bei einer thermischen Beaufschlagung mit 15 kW m^{-2} die Obergrenze der relativen Energiefreisetzungsrate von ca. 130 kW m^{-2} bei beiden Materialien nicht erreicht (Abbildung 5.11).

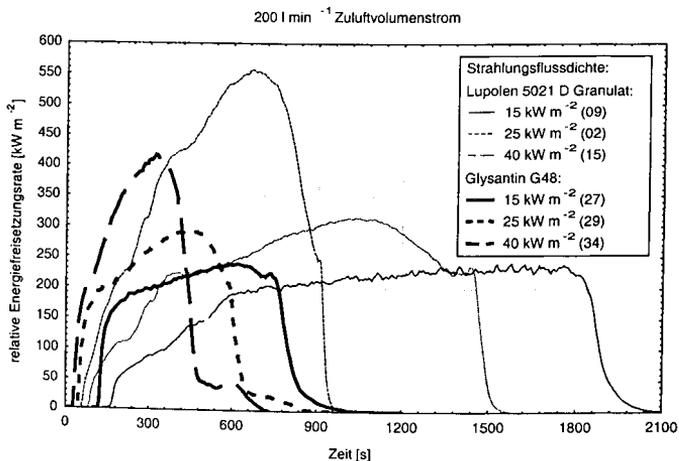


Abbildung 5.8 Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 200 l min^{-1} Zuluftvolumenstrom

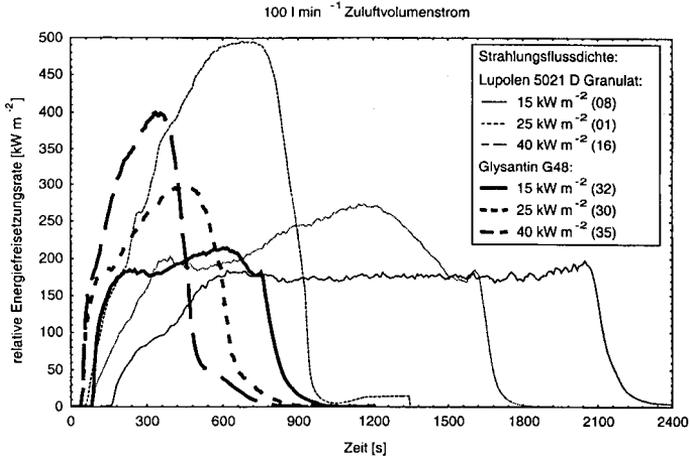


Abbildung 5.9 Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 100 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom

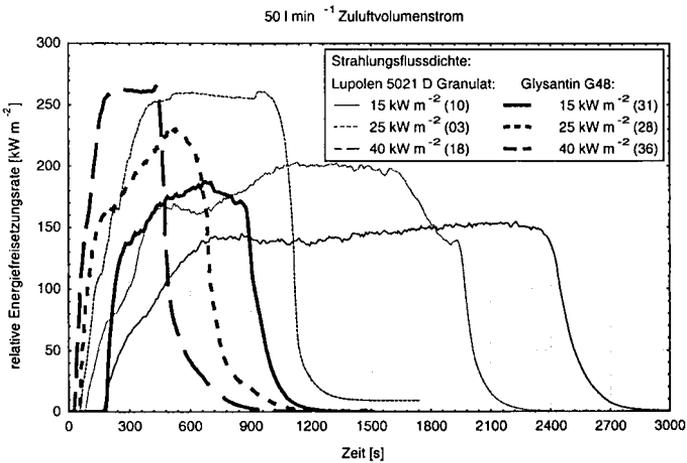


Abbildung 5.10 Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 50 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

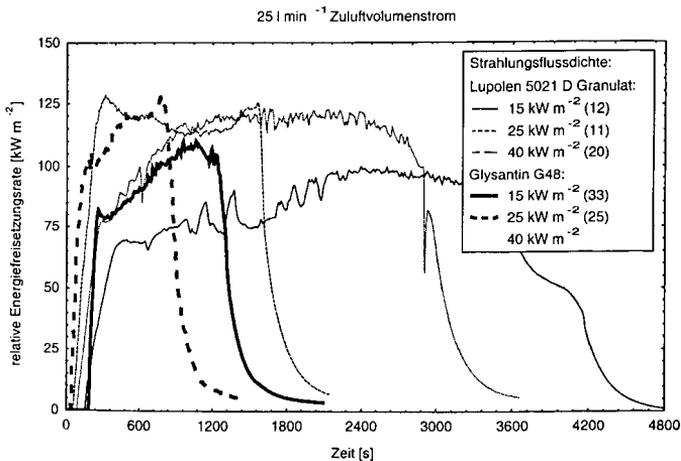


Abbildung 5.11 Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 25 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom

5.2.2.2 EINFLUSS DER VENTILATION

Nachdem der Einfluss des Parameters Strahlungsflussdichte analysiert wurde, wird jetzt der Augenmerk auf die Ventilation gelegt. Bei Betrachtung der folgenden Abbildungen erkennt man, dass mit abnehmendem Zuluftvolumenstrom auch die relative Energiefreisetzungsrate kleiner wird. Selbstverständlich kann bei niedrigen Zulufraten die theoretisch mögliche relative Energiefreisetzungsrate nicht überschritten werden (Tabelle 5.3). Betrachtet man das Verhalten von Lupolen 5021 D Granulat bei einer starken thermischen Beaufschlagung von 40 kW m⁻² so scheint bei ausreichend Zuluft (150, 200, 400 l min⁻¹) sich die Energiefreisetzungsrate unabhängig vom Wert des Luftüberschusses zu entwickeln (Abbildung 5.12). Nur die maximale Energiefreisetzungsrate scheint mit zunehmendem Zuluftvolumenstrom geringfügig zu steigen. Bei Glysantin G48 ist aber ein Einfluss der Zuluft auch bei einer höheren Beaufschlagung (40 kW m⁻²) schon offensichtlich: Bei höherem Zuluftvolumenstrom steigt die relative Energiefreisetzungsrate schneller an und erreicht im Maximum auch einen höheren Wert (Abbildung 5.13).

Betrachtet man das bei der Versuchsreihe gewählte mittlere Niveau der Strahlungsflussdichte von 25 kW m⁻² so ist die Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs der mittleren Energiefreisetzungsrate vom Zuluftvolumenstrom bei Lupolen 5021 D Granulat eindeutig

(Abbildung 5.14). In der Anfangsphase steigt die relative Energiefreisetzungsrate unabhängig von der Zuluftmenge an. Bei kleineren Zuluftströmen bricht der Anstieg früher ab und die maximale relative Energiefreisetzungsrate ist kleiner als bei höheren Zuluftvolumenströmen. Bei gleicher thermischer Beaufschlagung ist dieser Effekt allerdings bei Glysantin G48 weniger auffällig (Abbildung 5.15).

Wird der Materialoberfläche noch weniger Energie von außen zugeführt (Strahlungsflussdichte 15 kW m^{-2}) so zeigt sich auch bei ausreichender Ventilation eine auffällige Verringerung der relativen Energiefreisetzungsrate mit abnehmendem Zuluftvolumenstrom (Abbildung 5.16, Abbildung 5.17). Sicherlich befinden sich beide Materialien bei einem Zuluftvolumenstrom von 25 l min^{-1} und 50 l min^{-1} , Lupolen 5021 D Granulat eventuell auch noch bei 100 l min^{-1} , in einem ventilationsgesteuerten Brand. Bei höheren Zuluftvolumenströmen wird die maximal möglich relative Energiefreisetzungsrate gemäß Tabelle 5.3 bei weitem nicht erreicht (Abbildung 5.18).

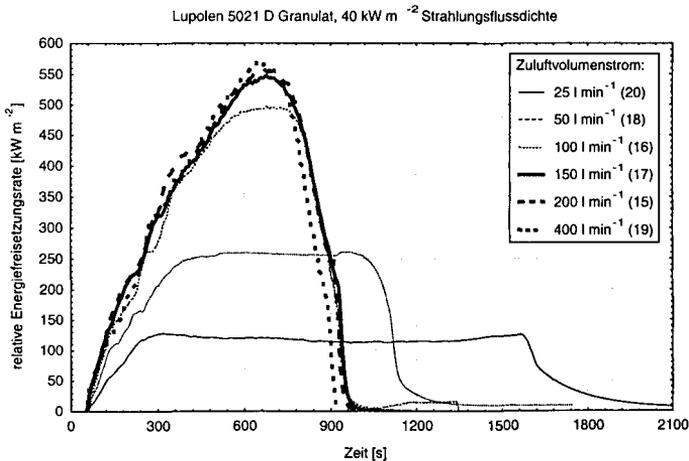


Abbildung 5.12 Lupolen 5021 D Granulat, Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 40 kW m^{-2} Strahlungsflussdichte

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

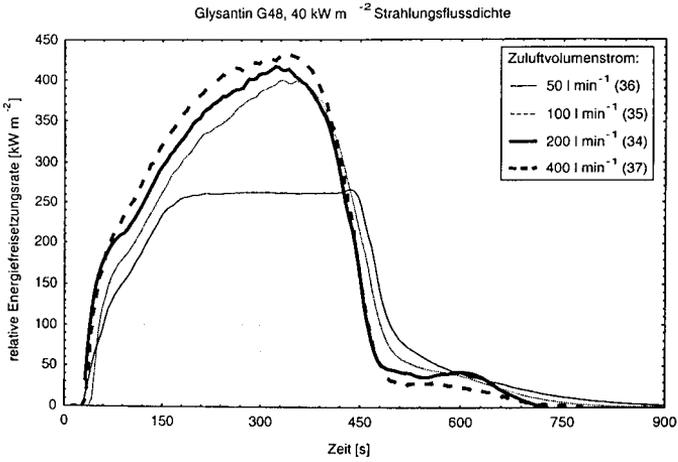


Abbildung 5.13 Glysantin G48, Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 40 kW m⁻² Strahlungsflussdichte

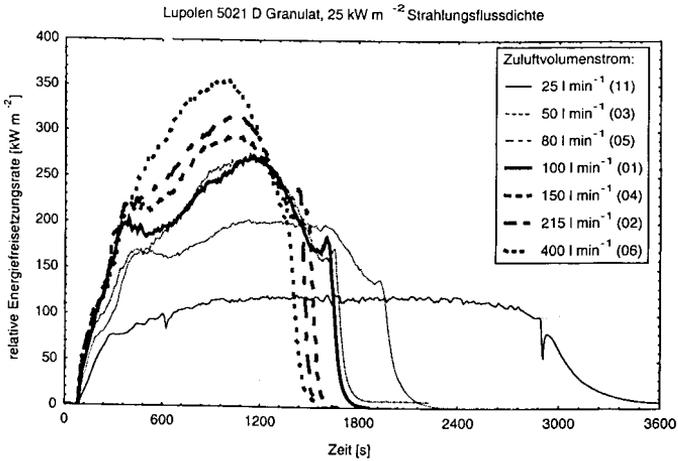


Abbildung 5.14 Lupolen 5021 D Granulat, Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 25 kW m⁻² Strahlungsflussdichte

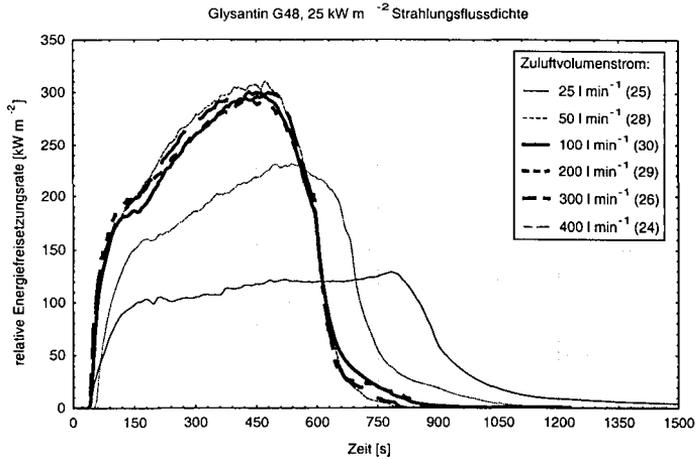


Abbildung 5.15 Glystantin G48, Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 25 kW m⁻² Strahlungsflussdichte

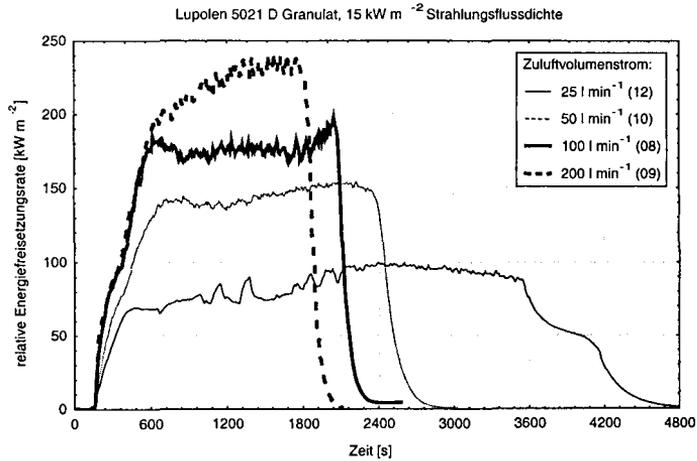


Abbildung 5.16 Lupolen 5021 D Granulat, Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 15 kW m⁻² Strahlungsflussdichte

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

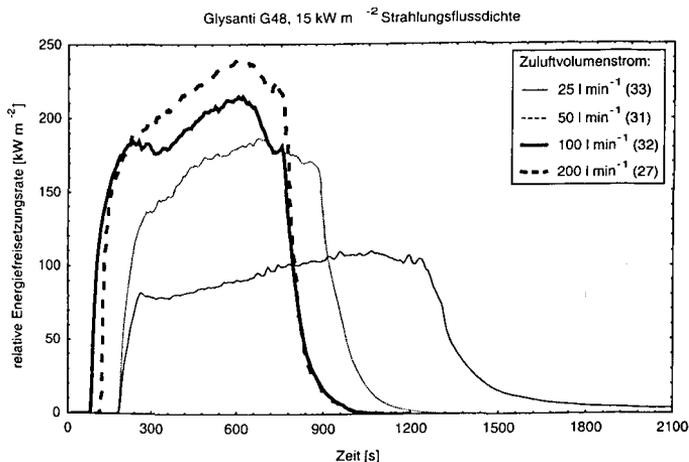


Abbildung 5.17 Glystant G48, Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei 15 kW m⁻² Strahlungsflussdichte

Zusammenfassend ist die maximale relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom für Lupolen 5021 D Granulat und Glystant G48 (Abbildung 5.18) dargestellt. Bei Lupolen 5021 D Granulat nimmt die maximale relative Energiefreisetzungsrate bei 15 kW m⁻² und 25 kW m⁻² mit zunehmendem Zuluftvolumenstrom auch im Bereich ausreichender Sauerstoffversorgung zu. Bei einer Strahlungsflussdichte von 40 kW m⁻² ist dagegen ab 150 l min⁻¹ keine nennenswerte Steigerung der maximalen relativen Energiefreisetzungsrate mehr zu erkennen. Bei Glystant G48 wird diese „Stagnation“ bereits bei einer thermischen Beaufschlagung mit 25 kW m⁻² bei einer Zuluftmenge von 100 l min⁻¹ erreicht.

In Abbildung 5.18 und Abbildung 5.19 ist jeweils die maximal mögliche relative Energiefreisetzungsrate bei stöchiometrischer Verbrennung gemäß Tabelle 5.3 als Gerade zusätzlich eingetragen. Die maximale relative Energiefreisetzungsrate liegt bei geringen Zuluftvolumenströmen auf dieser Linie. Die mittlere relative Energiefreisetzungsrate ragt bei kleinen Zuluftvolumenströmen allenfalls an diese Grenze heran. Durch diese Darstellung kann eindrucksvoll gezeigt werden, dass durch die Ventilation (Zuluftmenge) die Brandleistung begrenzt ist und die maximale Energiefreisetzungsrate mit einfachen Mitteln aus dem Zuluftvolumenstrom (oder Zuluftmassenstrom) berechnet werden kann.

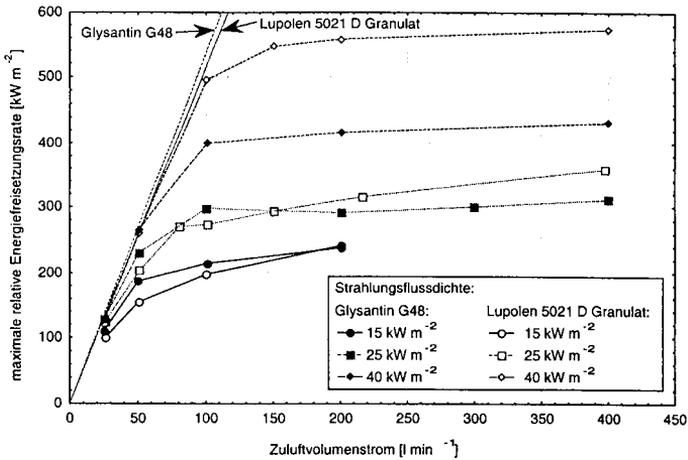


Abbildung 5.18 Maximale relative Energiefreisetzungsrate als Funktion der Ventilation

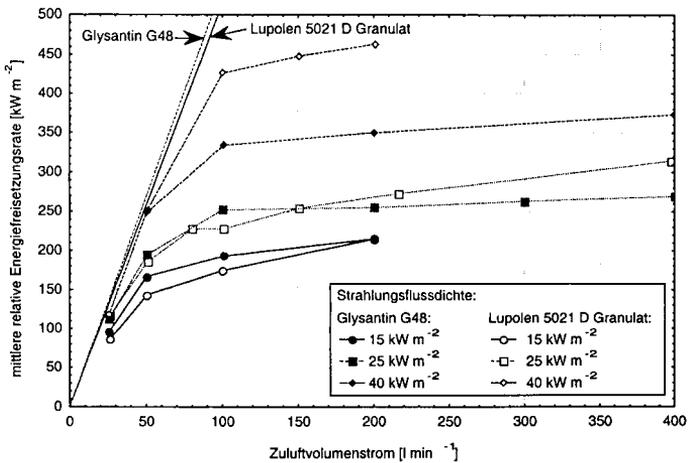


Abbildung 5.19 Mittlere relative Energiefreisetzungsrate als Funktion der Ventilation

5.2.3 BESCHREIBUNG DES ABBRANDVERHALTENS MIT HILFE DES ZULUFTVERHÄLTNISSSES

Für die vergleichende Beschreibung ist der Zuluftvolumenstrom als Parameter nicht geeignet. Die Ventilationsbedingungen werden besser durch das Verhältnis von angebotener Zuluftmenge zu der für eine stöchiometrische Verbrennung notwendige Luftmenge – das Zuluftverhältnis ZLV– bzw. den Kehrwert, das globale Äquivalenzverhältnis GER charakterisiert. Der Nenner des ZLV bzw. Zähler des GER berechnet sich aus dem Produkt von Abbrandrate und Zuluftbedarf r . In der weiteren Darstellung wird das Zuluftverhältnis ZLV verwendet, da es nach Meinung der Autoren sehr anschaulich die Ventilationsverhältnisse widerspiegelt.

Selbstverständlich wäre es möglich, für jeden Zeitpunkt im Verlauf der Verbrennung / des Versuchs ein „zeitlich aufgelöstes“ Zuluftverhältnis anzugeben indem der aktuelle Zuluftvolumenstrom in Verhältnis zur Abbrandrate zusammen mit dem stoffspezifischen Zuluftbedarf zum entsprechenden Zeitpunkt gebracht wird. Diese Vorgehensweise würde aber zu einer sehr großen, unübersichtlichen Datenmenge führen, aus der Gesetzmäßigkeiten schwer abzulesen wären. Daher wird die allgemein übliche Bewertung des Abbrandverhalten auf Basis von Mittelwerten angewendet. Für die Bestimmung des Zeitintervalls, über das die Mittelwertbildung stattzufinden hat, wird das „MLR“-Kriterium entsprechend ISO 5660 [5-1] benutzt.

Die mittlere relative Abbrandrate von Lupolen 5021 D Granulat steigt bei einem Zuluftverhältnis oberhalb 1,5 geringfügig an (Abbildung 5.20). Mit abnehmendem Zuluftverhältnis unterhalb des Wertes von 1,5 sinkt die mittlere relative Abbrandrate stark ab. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei Glysantin G48 zu beobachten: Bei einer Strahlungsflussdichte von 15 kW m^{-2} und 25 kW m^{-2} sinkt die mittlere relative Abbrandrate bei einem Zuluftverhältnis unterhalb von 2 stark ab. Bei einer Strahlungsflussdichte von 40 kW m^{-2} beeinflusst das Zuluftverhältnis die mittlere relative Abbrandrate von Glysantin G48 nicht nennenswert. Dieser Unterschied im Verhalten von Glysantin G48 im Gegensatz zu Lupolen 5021 D Granulat kann erklärt werden, wenn man annimmt, dass Lupolen 5021 D Granulat erheblich mehr Energie aufnehmen muss, um in die Phase überführt zu werden, in der es mit dem Luft-sauerstoff reagiert und verbrennt und ein erheblicher Teil dieser Energie durch die Verbrennung selbst und nicht durch die Strahlung des Cone-Heizers bereitgestellt wird.

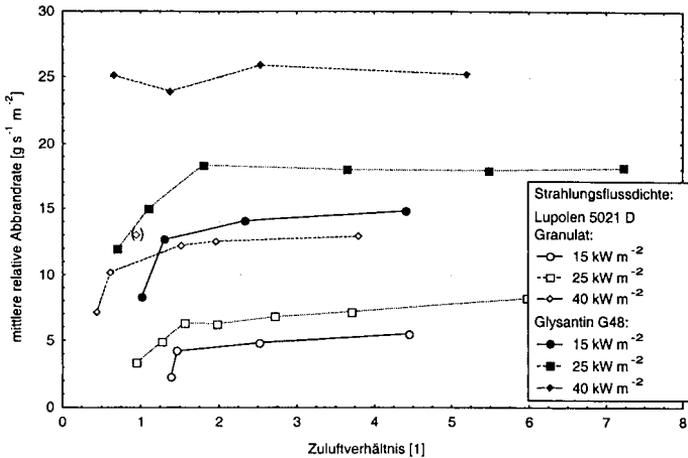


Abbildung 5.20 Mittlere relative Abbrandrate

Als nächstes wird die Abhängigkeit der mittleren relativen Energiefreisetzungsrate vom Zuluftverhältnis betrachtet (Abbildung 5.21). Wird mit 15 kW m^{-2} oder 25 kW m^{-2} Strahlungsflussdichte beaufschlagt, so ist die mittlere relative Energiefreisetzungsrate bei niedrigem Zuluftverhältnis bei Lupolen 5021 D Granulat kleiner als bei Glysantin G48. Erst mit zunehmendem Luftangebot kann sich der Brand von Lupolen 5021 D Granulat voll entwickeln. Bei großer Strahlungsflussdichte (40 kW m^{-2}) verliert die Vorwärmung des Lupolen 5021 D Granulat durch die eigene Verbrennung und Energiefreisetzungsrate an Einfluss. Daher ist unter diesen Randbedingungen die relative Energiefreisetzungsrate von Lupolen 5021 D Granulat schon bei kleinen Zuluftverhältnissen größer als die von Glysantin G48.

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

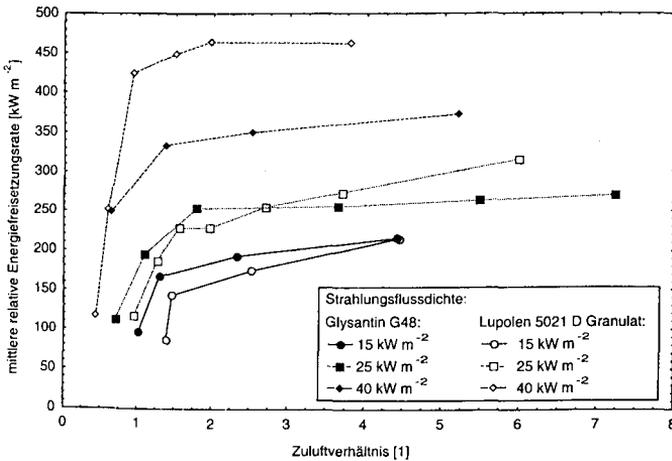


Abbildung 5.21 Mittlere relative Energiefreisetzungsrate

Für eine übergreifende Betrachtung ist es sinnvoll, anstelle der effektiven Verbrennungswärme die Verbrennungseffektivität (Verhältnis von effektiver Verbrennungswärme zu unterem Heizwert) als normierte Größe zu betrachten (Abbildung 5.22). Bei Glystantin G48 stellt sich der Zusammenhang zwischen Verbrennungseffektivität und Zuluftverhältnis relativ einfach dar: Oberhalb eines Zuluftverhältnisses von ca. 1,5 nimmt die Verbrennungseffektivität nur unwesentlich zu und erreicht einen maximalen Wert von ca. 0,9. Unterhalb des genannten Wertes von 1,5 verringert sich die Verbrennungseffektivität mit abnehmender Zuluftmenge erheblich. Ein Zusammenhang zwischen Strahlungsflussdichte und Verbrennungseffektivität ist für Glystantin G48 nicht eindeutig erkennbar. Für Lupolen 5021 D Granulat ist der Einfluss des Zuluftverhältnisses auf die Verbrennungseffektivität nur bei der hohen externen Beaufschlagung (40 kW m^{-2}) mit dem von Glystantin G48 vergleichbar, allerdings nimmt hier die Verbrennungseffektivität mit zunehmendem Zuluftverhältnis schon eher wieder ab. Bei den beiden anderen Niveaus der Strahlungsflussdichte (15 kW m^{-2} , 25 kW m^{-2}) ist dagegen bemerkenswert, dass bei einem Zuluftverhältnis in der Nähe des Wertes 1 die Verbrennungseffektivität wieder ansteigt.

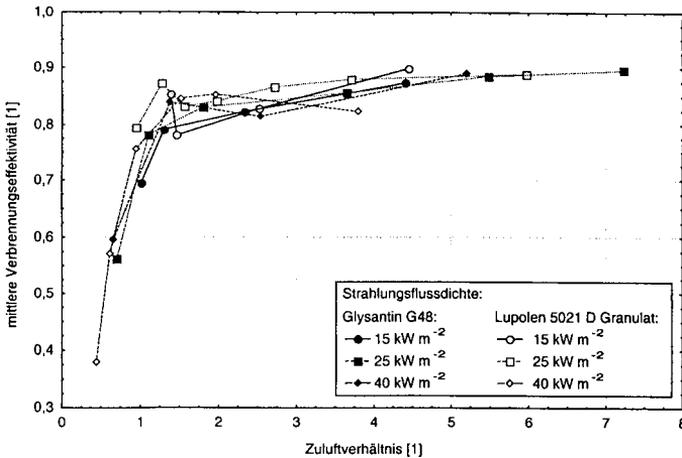


Abbildung 5.22 Mittlere Verbrennungseffektivität

Die Schadgasausbeute, insbesondere die Ausbeute von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, ist neben der effektiven Verbrennungswärme bzw. der Verbrennungseffektivität eine wichtige Größe zur Charakterisierung der Verbrennungseigenschaften und zur Beschreibung der Gefährdung von Personen bzw. der Umwelt. Üblicherweise wird die Ausbeute als Verhältnis der entstandenen Masse des jeweiligen Verbrennungsproduktes zur umgesetzten Brennstoffmasse angegeben. Die Kohlendioxidausbeute (Abbildung 5.23) von Lupolen 5021 D Granulat bzw. Glysantin G48 verhält sich bezüglich Variationen der Strahlungsflussdichte oder Zuluftmenge analog zur Verbrennungseffektivität. Aufgrund des geringeren Kohlenstoffanteils ist die Kohlendioxidausbeute für Glysantin G48 insgesamt erheblich niedriger als bei Lupolen 5021 D Granulat. Hier nicht dargestellt ist die vollständige Kohlenstoffbilanzierung, d. h. zu einen die Gesamtmasse des freigesetzten Kohlenstoffs, die sich aus der Abbrandrate ergibt, und zum anderen die Masse des Kohlenstoffs, der in den Verbrennungsprodukten Kohlendioxid und Kohlenmonoxid gebunden wird. Eine Betrachtung der sich daraus ergebenden stöchiometrischen Umsetzung zeigt, dass mit ausreichender Ventilation, Zuluftverhältnis 1,5 und größer, sowohl bei Lupolen 5021 D Granulat als auch bei Glysantin G48 ca. 80 – 85 % des freigesetzten Kohlenstoffs zu Kohlendioxid oxidiert werden.

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

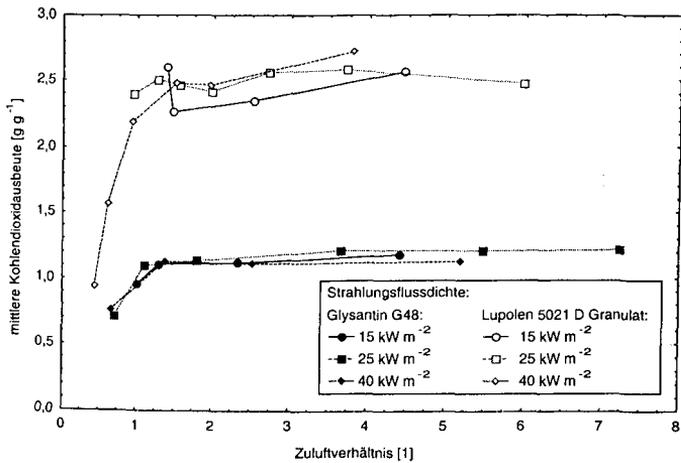


Abbildung 5.23 Mittlere Kohlendioxidausbeute

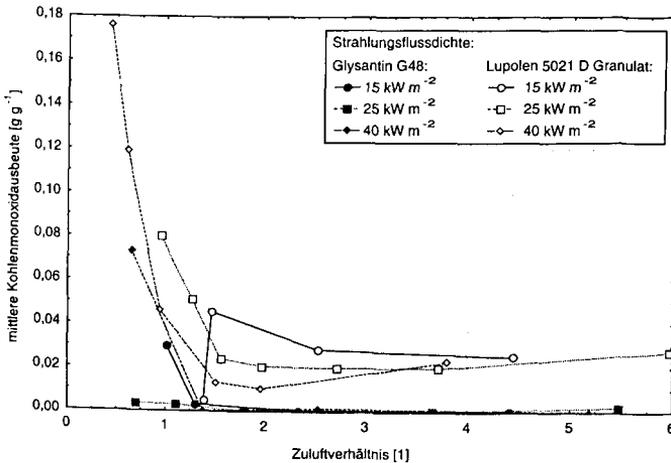


Abbildung 5.24 Mittlere Kohlenmonoxidausbeute

Die Kohlenmonoxidausbeute (Abbildung 5.24) verhält sich bei Lupolen 5021 D Granulat wie erwartet: Mit zunehmender Strahlungsflussdichte wird die Umsetzung des Kohlenstoffs besser, d. h. es entsteht weniger Kohlenmonoxid. Außerdem zeigt sich bei hoher Strahlungs-

flussdichte ein ausgeprägtes Minimum der Kohlenmonoxidausbeute bei einem Zuluftverhältnis von ca. 2. Dieses Minimum verschiebt sich scheinbar mit abnehmender Strahlungsflussdichte zu größeren Zuluftverhältnis-Werten. Ein vergleichbarer Effekt ist bei Glysantin G48 nicht nachweisbar.

Betrachtet man wiederum die stöchiometrischen Verhältnisse, d. h. der stoffspezifische Kohlenstoffanteil wird berücksichtigt, dann erkennt man bei der Kohlenmonoxidausbeute, dass sich Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 auch in einer anderen Beziehung unterscheiden. Bei ausreichender Zuluftmenge – Zuluftverhältnis größer als 1,5 – ist die stöchiometrische Kohlenmonoxidausbeute von Lupolen 5021 D Granulat zehnmal größer als die von Glysantin G48, die massenbezogene Kohlenmonoxidausbeute also um den Faktor 20 größer. Betrachtet man wiederum die stöchiometrischen Verhältnisse, so weist Glysantin G48 bei einem Zuluftverhältnis von weniger als 1,5 aber eine ähnlich große massenbezogene Kohlenmonoxidausbeute und sogar eine höhere stöchiometrisch Kohlenmonoxidausbeute als Lupolen 5021 D Granulat auf.

5.3 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Aufgrund der Probenmenge und Probenabmessung stellt die Cone-Kammer einen Zwischenschritt zwischen Mikroverbrennungsapparatur und Raumbrandversuch dar. Gegenüber der Mikroverbrennungsapparatur bietet die Cone-Kammer folgende Vorteile:

1. Durch die aufwendige Messtechnik kann eine Vielzahl von Brandeigenschaften gemessen bzw. berechnet werden, besonders zu nennen ist hier die Wiegeeinrichtung, die eine direkte Berechnung der Abbrand- bzw. Pyrolyserate ermöglicht. Somit kann bei bekanntem Zuluftbedarf r direkt das Zuluftverhältnis ZLV bzw. das globale Äquivalenzverhältnis GER berechnet werden. Damit sind die Verbrennungsrandbedingungen bezüglich der Ventilation eindeutig bestimmt.
2. Die thermische Beaufschlagung der Probenoberfläche ist durch die Strahlungsflussdichte als Versuchsparameter eindeutig bestimmt und reproduzierbar. Diese Größe ist im Gegensatz zur Temperatur des Ringofens bei der Mikroverbrennungsapparatur auch auf Verhältnisse im Naturbrand übertragbar.
3. Aufgrund der Probenmenge erfolgt die Verbrennung über einen längeren Zeitraum, so dass die Anforderungen an die Genauigkeit und zeitlich Auflösung (Ansprechzeit)

5 Untersuchungen in der Cone-Kammer

der eingesetzten Messgeräte in akzeptablen Verhältnis zum technischen Aufwand stehen. Alle wichtigen Größen können zeitabhängig erfasst werden.

4. Auf Basis der Sauerstoffkalorimetrie können detaillierte Ergebnisse zur Energiefreisetzungsrates, effektiven Verbrennungswärme und zur Schadgasausbeute in Abhängigkeit von den Ventilationsrandbedingungen und der thermischen Belastung ermittelt werden.
5. Die Verbrennung erfolgt auch im Bereich sehr geringer Zuluftmengen unter praxisgerechten Bedingungen mit einer Diffusionsflamme. Verschwelungen ohne sichtbare Flamme wurden bei den durchgeführten Untersuchungen nicht beobachtet.

Bei der Cone-Kammer werden mit Ausnahme der Zuluftversorgung und -regelung und der Kammer ausschließlich Komponenten des Cone-Calorimeters [5-1] verwendet.

Allerdings muss auch ein wesentlicher Nachteil erwähnt werden: Aufgrund der mindestens 100fach größeren Brennstoffmenge im Vergleich zur Mikroverbrennungsapparatur ist unter ungünstigen Bedingungen mit einer entsprechend hohen Freisetzung von gesundheitsschädlichen Verbrennungsprodukten zu rechnen. Zwar wird einer großer Teil über das Rauchgasrohr abgeführt, mit einer Kontamination des Rohrleitungssystem durch Kondensation ist aber zu rechnen. Ebenfalls kritisch ist zu betrachten, dass gerade bei Untersuchungen mit Luftmangel, wenn mit einer überdurchschnittlichen Entstehung von toxischen Verbrennungsprodukten zu rechnen ist, auch vermehrt Rauch bzw. Ruß entsteht und dieser sich im Inneren der Kammer verstärkt niederschlägt. Deshalb ist beim Reinigen der Kammer nach jedem dieser Versuche mit großer Sorgfalt und verstärkten Vorsichtsmaßnahmen im Labor vorzugehen. Dieser Aufwand allein bei der Nachbereitung von einzelnen Versuchen führt zu hohen Kostensteigerungen. Unabhängig von den Kosten konnten aus Gründen der Arbeitssicherheit und zur Vermeidung von Gesundheitsgefährdungen in der dargestellten Untersuchungsreihe nicht mit Materialien gearbeitet werden, die toxische Bestandteile enthalten oder bei der Verbrennung stark gefährdende Produkte erzeugen.

Durch die Untersuchungen von Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 (Abschnitt 5.2) konnte nachgewiesen werden, in welcher Abhängigkeit die einzelnen Verbrennungseigenschaften zu den Randbedingungen „Ventilation“, gegeben durch den geregelten Zuluftvolumenstrom, und thermische Beaufschlagung, gegeben durch die Strahlungsflussdichte, stehen.

Es ist erkennbar, dass die relative Energiefreisetzungsrate vom brennenden Material selbst abhängig ist. Auch ist nachgewiesen, dass mit zunehmender Energiezufuhr von außen (Strahlungsflussdichte) die relative Energiefreisetzungsrate wächst. Es zeigt sich, dass bei geringer thermischer Beaufschlagung die relative Energiefreisetzungsrate mit steigendem Zuluftverhältnis wächst, bei großer thermischer Beaufschlagung und ausreichender Sauerstoffversorgung (Zuluftverhältnis $>$ ca. 1,5) aber keine nennenswerte Steigerung der Energiefreisetzungsrate mit zunehmendem Zuluftverhältnis auftritt. Folgende Abhängigkeit vom Material wurde bei den Untersuchungen festgestellt: Bei Glysantin G48 bedeutet große thermische Beaufschlagung eine Strahlungsflussdichte von 25 kW m^{-2} , bei Lupolen 5021 D Granulat aber eine Strahlungsflussdichte von 40 kW m^{-2} .

Im Gegensatz zur relativen Energiefreisetzungsrate zeigen die effektive Verbrennungswärme und die Kohlendioxidausbeute (massenbezogen) von Glysantin G48 keine stark ausgeprägte Abhängigkeit von der thermische Beaufschlagung. Ebenso ist die Abhängigkeit von der Ventilation nicht so deutlich, abgesehen davon, dass unterhalb eines Zuluftverhältnisses von 1,5 die effektive Verbrennungswärme und die Kohlendioxidausbeute stark abfallen. Dagegen zeigen sich bei Lupolen 5021 D Granulat noch zusätzliche Strukturen im Verlauf dieser beiden Parameter, die mit dem zusätzlich Phasenübergang, dem Schmelzen, vor Beginn der Pyrolyse zusammenhängen. Es zeigt sich dagegen bei Betrachtung der „normierten“ Größen Verbrennungseffektivität und stöchiometrische Kohlendioxidausbeute, dass trotz der Eigenheiten von Lupolen 5021 D Granulat bei kleiner thermischer Beaufschlagung sich beide Materialien sehr ähnlich verhalten. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden untersuchten Materialien zeigt sich in der Kohlenmonoxidausbeute. Während im „ventilationsgesteuerten“ Fall (Zuluftverhältnis kleiner 1,5) die Kohlenmonoxidausbeute für beide Materialien in der gleichen Größenordnung liegt, weist Lupolen 5021 D Granulat im „brandlastgesteuerten“ Fall (Zuluftverhältnis größer 1,5) eine 10mal größere stöchiometrische bzw. 20mal größere massenbezogenen Kohlenmonoxidausbeute auf.

5.4 LITERATURHINWEISE

- [5-1] ISO 5660 Fire tests - Reaction to fire; part 1: Rate of heat release from building products (Cone Calorimeter Method). 1999
- [5-2] Thornton, W. M.: The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds. Philosophical Magazine, Vol. 33 , pp. 196-203, 1917
- [5-3] Huggett, C.: Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption. Journal of Fire and Flammability, Vol. 12, 1980
- [5-4] Parker, W. J.: Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. Journal of Fire Sciences, Vol. 2, September/October 1984, p. 381 - 395
- [5-5] Janssens, M. and Parker, J.: Oxygen Consumption Calorimetry. pp. 31-59 in Heat Release in Fires / edited by V. Babrauskas and S. J. Grayson, Elsevier Science Publishing CO., New York, 1992
- [5-6] 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. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1810
- [5-7] Drysdale, D.: An introduction to fire dynamics. 2nd edition, Chichester, 1999

6 RAUMBRANDVERSUCHE MIT „REINEN“ BRANDLASTEN IM GEBINDEMAßSTAB

Mit Hilfe der Cone-Kammer ist es möglich, das Brandverhalten von „reinen“ Materialien unter kontrollierten Randbedingungen der Ventilation und Aufheizung im Labormaßstab zu untersuchen. Es ist weiterhin notwendig zu untersuchen, in welcher Form sich die Variation dieser Randbedingungen auf den natürlichen Brand unter realen Randbedingungen auswirken. Daher ist es notwendig, mit den entsprechenden Materialien Brandversuche unter praxisgerechten Bedingungen durchzuführen. Zu den praxisgerechten Bedingungen gehört zum einen die entsprechende Brandlastmenge und Anordnung, zum anderen ein ausreichend großer Brandraum mit den in der Praxis üblichen Umfassungsbauteilen und ebenso die richtige Form der Zuluftführung sowie der Rauch- und Wärmeabfuhr. Um die Übertragbarkeit sicherzustellen ist es notwendig, die sich beim Naturbrand einstellenden Bedingungen zu erfassen, d. h. die in den Brandraum einströmende Luftmenge muss gemessen werden, um die Korrelation zum geregelten Zuluftvolumenstrom unter Berücksichtigung des Zuluftverhältnisses ZLV bzw. des globale Äquivalenzverhältnis GER im Vergleich zu den Versuchen in der Cone-Kammer zu ermöglichen. Dabei muss sichergestellt werden, dass das Abbrandverhalten mit vergleichbaren Materialparametern wie die Erfassung von Abbrandrate, der Energiefreisetzungsrate und der Entstehung von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid bewertet wird. Diese Anforderungen werden durch den Versuchsaufbau „Room-Corner-Test“ gemäß ISO 9705 [6-1] erfüllt. Der Room-Corner-Test wurde für die Klassifizierung des Abbrandverhaltens von Wand- und Deckenbekleidungen konzipiert und wird international als Referenzszenario für die Durchführung von Brandversuchen im realen Maßstab verwendet.

6.1 BRANDKAMMER UND RAUCHABZUGSYSTEM

Der Room-Corner-Test besteht aus einem Brandraum mit einer Grundfläche von $3,6 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ und einer Höhe von $2,4 \text{ m}$ (Volumen: 21 m^3). Die Wände sind aus Porenbeton gefertigt (Abbildung 6.1).

Der Raum besitzt eine $2,0 \text{ m}$ hohe und $0,8 \text{ m}$ breite Ventilationsöffnung (Tür). Durch die geöffnete Tür strömen die Rauchgase im oberen Bereich ab und die Zuluft gelangt durch den unteren Teil derselben Öffnung in den Brandraum. Für die Versuche wurde die Größe der Öffnung variiert.

6 Raumbrandversuche mit „reinen“ Brandlasten im Gebindemaßstab

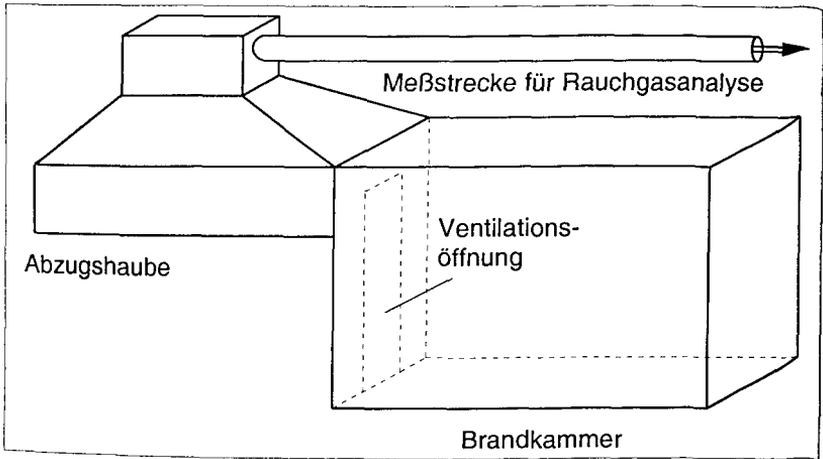


Abbildung 6.1 Schematische Skizze vom Aufbau des Room-Corner-Test (RCT) nach ISO 9705 [6-1]

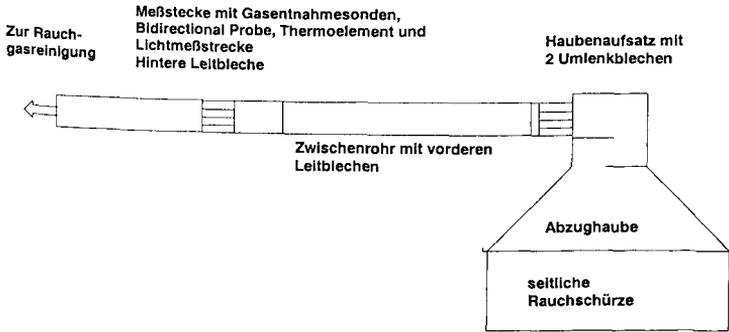


Abbildung 6.2 Abzugshaube mit anschließender Messstrecke für die Rauchgasanalyse

Die aus dem oberen Bereich der Türöffnung austretenden Rauchgase werden unter der 2,9 m × 2,9 m großen Öffnung der Abzugshaube gesammelt. Um ein Ausströmen von Rauchgasen in die Halle zu vermeiden sind an 3 Seiten der Haube 1,0 m tiefe Schürzen eingehängt. Über die Haube, den Haubenaufsatz und die horizontal verlegte Rohrleitung mit der

Messstrecke werden die Gase der Hauptleitung zur Rauchgasreinigung zugeführt (Abbildung 6.2).

Im Abschnitt der Messstrecke befindet sich eine Sonde zur Geschwindigkeitsmessung (Bidirectional Probe) zusammen mit einem Mantelthermoelement. Am gleichen Ort wird der Volumenstrom im Rauchgaskanal bestimmt. Weiterhin ist im Rauchgaskanal ein Rohr mit Bohrungen auf der Leeseite zur Strömungsrichtung als Gasentnahmesonde in diesem Bereich angebracht. Über diese Gasentnahmesonde wird Rauchgas einer Gasanalysestrecke zugeführt. Abweichend vom Vorschlag der ISO 9705 [6-1] ist die Gasanalysestrecke analog zum verwendeten Meßaufbau für die Untersuchung beim Cone-Calorimeter bzw. bei der Cone-Kammer (Abbildung 6.3).

Der Boden des Room-Corner-Test ist als Wiegeeinrichtung ausgebildet. Da mit kleineren Brandlastmengen gearbeitet werden sollte, wurde eine Wiegeeinrichtung (Messbereich 0 – 1800 kg) in der Mitte des Brandraums aufgebaut, da die im Room-Corner-Test fest installierte Waage nicht die erforderlichen Messgenauigkeiten aufweist. Die Oberkante der Abbrandwaage befindet sich 410 mm über dem Brandraumboden. Für Brandversuche mit flüssigen oder schmelzenden Materialien standen zwei quadratische, 21 cm hohe Stahlwannen zur Verfügung, deren Kantenlänge 70 cm (kleinere, 0,5 m² Fläche) bzw. 100 cm (größere, 1 m² Fläche) beträgt.

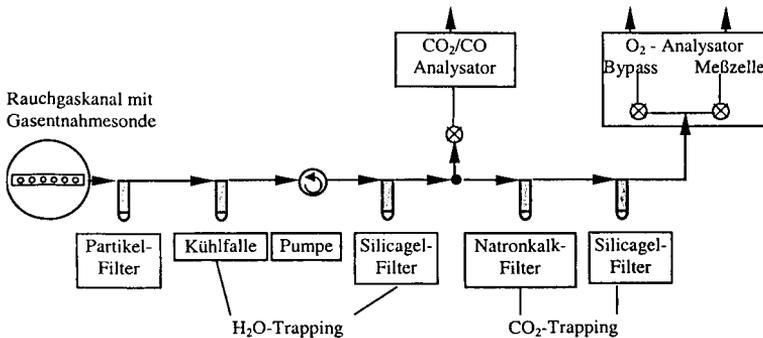


Abbildung 6.3 Gasanalysestrecke für den Room-Corner-Test

6 Raumbrandversuche mit „reinen“ Brandlasten im Gebindemaßstab

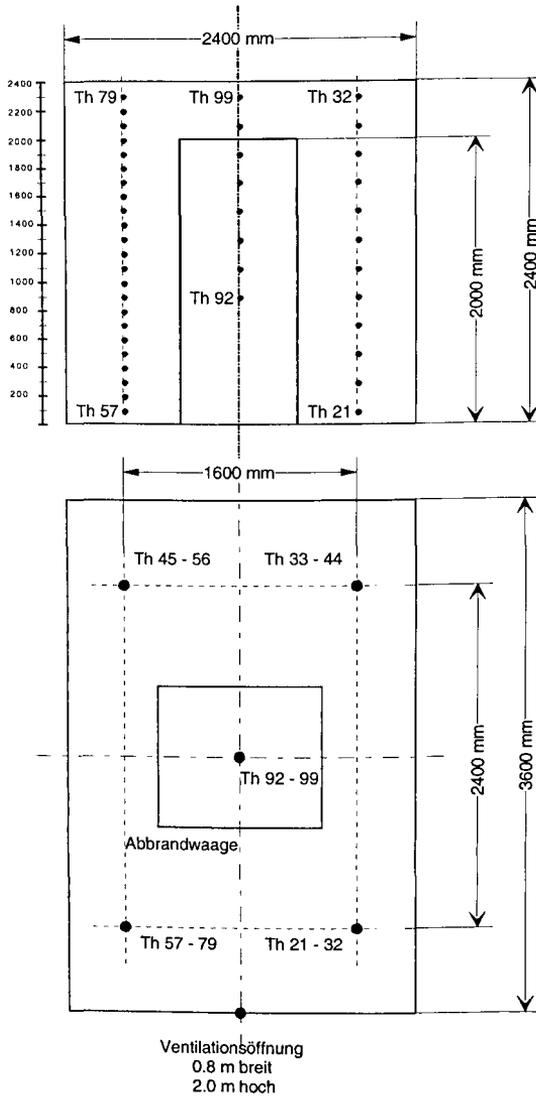


Abbildung 6.4 Temperaturmessstellen im Brandraum, Aufriss (oben) und Draufsicht (unten) des Brandraums (Maße in mm)

6 Raumbrandversuche mit „reinen“ Brandlasten im Gebindemaßstab

Zur Dokumentation und Bewertung des Brandverlaufs wurde die Temperaturverteilung in der Brandkammer erfasst. Dazu dienten vier vertikale Messbäume, die symmetrisch zur Brandlast im Brandraum aufgestellt wurden. Außerdem wurde eine Messkette über der Brandlast angebracht. Die Positionen der Temperaturmessstellen kann Abbildung 6.4 entnommen werden. Die Thermoelemente der Positionen 21 - 32, 33 - 44 und 45 - 56 waren in Abständen von 20 cm angeordnet. Die Abstände der Messstellen untereinander an der vertikalen Messkette vorne links (Positionen 57 - 79) betrug 10 cm. Die Thermoelemente der fünfte Messkette in der Mitte des Brandraumes über der Brandlast tragen die Bezeichnungen Positionen 92 - 99. Hier waren die Temperaturmessstellen im Abstand von 20 cm angebracht.

Um die Strömungsvorgänge in der Türöffnung zu erfassen, wurden gemäß Abbildung 6.5 Thermoelemente und bidirektionale Drucksonden zur Geschwindigkeitsmessung an den Positionen 80 - 91 und 100 installiert. Die Drucksonden haben die Bezeichnung 1 - 11, 13,14. Die Differenzdruckaufnehmer sind so mit den Drucksonden verbunden, dass in den Raum einströmendes Gas einen positiven Druck, ausströmendes Gas einen negativen Staudruck erzeugt.

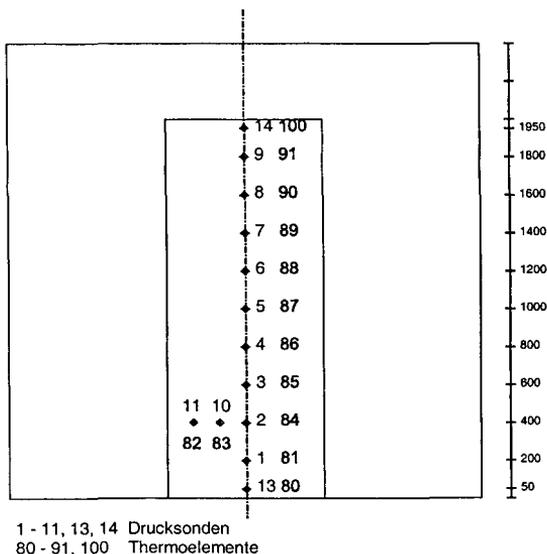


Abbildung 6.5 Temperatur- und Staudruckmessung in der Tür (Maße in mm)

6 Raumbrandversuche mit „reinen“ Brandlasten im Gebindemaßstab

Zusätzlich wurden unter der Decke des Brandraumes an den Positionen M1 und M2 zwei Platten aus Stahl (Vergleichselemente) aufgehängt. Bei M1 handelt es sich um eine m-Faktor-Platte mit definierten Abmessungen in Anlehnung an DIN 18230 Teil 2 [6-2]. Im Abstand von 50 mm von der exponierten Oberfläche (Unterseite) befindet sich im Inneren dieser Platte ein Thermoelement (Th 15), welches stellvertretend für unterschiedliche brandbeanspruchte Bauteile mit thermischer Isolierung durch Beton, Putz oder andere Brandschutzbekleidung die Erwärmung aufzeichnen soll. Zur Kontrolle ist ein weiteres Thermoelement (Th 14) in 30 mm Abstand zur Oberfläche eingebaut. Um ggf. Unterschiede bezüglich der Brandwirkungen bei weniger stark isolierten Bauteilen feststellen zu können, wird eine zweite, 30 mm dicke Stahlplatte (Vergleichselement M2) mit einem Thermoelement (Th 13) in 15 mm Abstand zur exponierten Oberfläche angebracht. Die Vergleichselemente wurden jeweils seitlich mit einem isolierenden Material ummantelt; hierdurch sollte erreicht werden, dass sich die Stahlplatten im Wesentlichen nur über die dem Brandgeschehen zugewandten Oberfläche aufheizen.

In der Mitte zwischen den beiden Vergleichselementen wurden zwei Wärmestromdichtensonden (WS1, WG1) vom Typ Gardon Gage (MEDTHERM Typ 64) montiert. Mit der Sonde WG1 wird die gesamte Wärmestromdichte (Konvektion und Wärmestrahlung) gemessen. Die Sonde WS1 ist mit einem Infrarotfenster ausgestattet, so dass durch sie nur der radiative Anteil der Wärmestromdichte erfasst wird. Mit diesen beiden Sonden wird der auf die Vergleichselemente treffende Wärmestrom ermittelt.

Mit Hilfe der Gasentnahmesonde GA1 in der vorderen linken Brandraumecke unterhalb der Decke und den angeschlossenen Gasanalysatoren für Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid konnte die Zusammensetzung der Rauchgasschicht bestimmt werden. Die Zusammensetzung der Kaltgasschicht bzw. der zum Brand zuströmenden Zuluft innerhalb der Kammer wurde über die Gasentnahmesonde GA2 mit einem Sauerstoff- und einem Kohlendioxidanalysator erfasst.

Weiterhin wurden noch Wärmestromdichtemessungen mit den Gardon-Gage-Sonden WG2 (Gesamtwärmestromdichte) und WS2 (radiative Wärmestromdichte) im unteren Bereich der Brandkammer auf Höhe der Brandlast hinter der Wiegebühne (neben der Gasentnahmesonde GA2) durchgeführt.

Alle Messwertgeber sind an einen Mehrkanal-A/D-Wandler angeschlossen. Die Abfrage der Messwerte erfolgt im Intervall von 10 s. Die Daten werden auf einem Personal-Computer gespeichert und mit einem handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramm bearbeitet. Die Auswertungsgrundlagen sind im Anhang dargestellt.

6 Raumbrandversuche mit „reinen“ Brandlasten im Gebindemaßstab

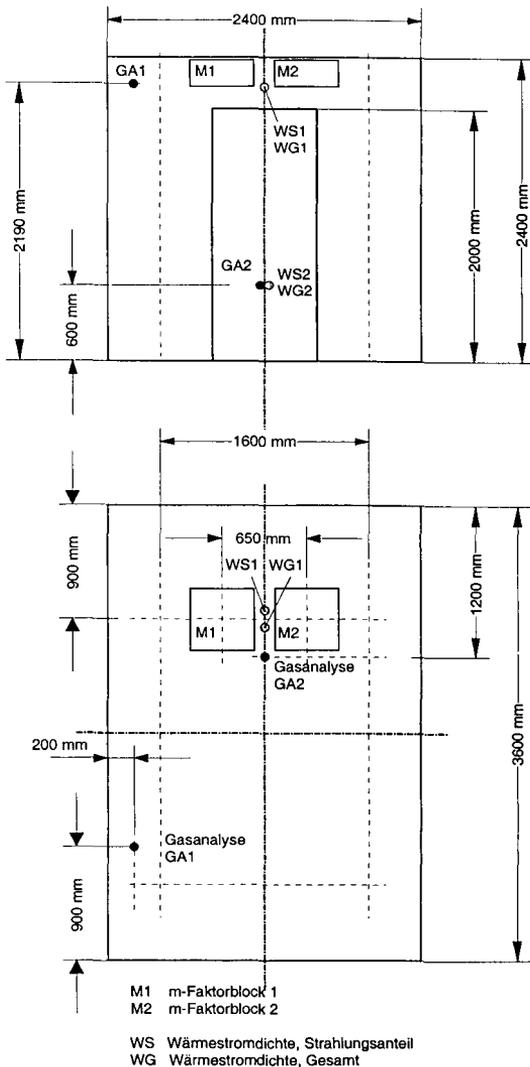


Abbildung 6.6 Position der Vergleichselemente, der Gasentnahmesonden und der Wärmestromdichtemessung, Aufriss (oben) und Draufsicht (unten) des Brandraums (Maße in mm)

6.2 BRANDLASTEN

Für die Versuche wurden vier verschiedene Brandlasten, wie in Tabelle 6.1 beschrieben, eingesetzt. Dabei handelte es sich zu einen um die beiden auch in der Cone-Kammer untersuchten Materialien Lupolen 5021 D Granulat (PE-Granulat) und Glysantin G48. Zum anderen wurden Hydrauliköl Mobil DTE Medium als weitere brennbare Flüssigkeit und die als „Normbrandlast“ bei der Bestimmung des Abbrandfaktors m [6-2] bekannten Holzkruppen (in Stäben 40 x 40 mm und 800 mm lang) untersucht. Weiterhin wurde für die Kalibrierung der Sauerstoffverbrauchsmessung gemäß ISO 9705 [6-1] Propan für die Propangasbrenner (0,3 x 0,3 m²) bis 200 kW in den Versuchen eingesetzt.

Für Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 wurden der untere Heizwert und die chemische Zusammensetzung (Summenformel) vom Hersteller / Lieferanten ermittelt. Der Heizwert für das Holz der Holzkruppen wurde am iBMB gemäß DIN 51900 Teil 2 [6-3] bestimmt. Die chemische Zusammensetzung des Holzes wurde entsprechend der üblichen Annahmen festgesetzt. Der Heizwert für das Hydrauliköl Mobil DTR Medium wurde in Anlehnung an die gängige Literatur [6-4] gewählt. Die Proportionalitätsfaktoren für die Sauerstoffkalorimetrie konnten für das Holz und das Hydrauliköl nicht berechnet werden. Daher wird bei diesen beiden Stoffen mit dem Satz der Standardparameter aus der gängigen Literatur [6-5] gerechnet. Die Angaben für Propangas wurden ISO 9705 [6-1] entnommen.

Tabelle 6.1 Eingesetzte Brandlasten

	unterer Heizwert H_u	Summen- Formel	Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchtem Sauerstoff E	
			[MJ kg ⁻¹]	[MJ m ⁻³]
Lupolen 5021 D Granulat	43,2	CH ₂	12,6	16,5
Glysantin G48	16,6	CH ₃ O	12,9	16,9
Holz (Fichte)	18,2	C ₆ H ₁₀ O ₅	13,1	17,2
Mobil DTE Medium	40,5	-	13,1	17,2
Propan	46,4	C ₃ H ₈	12,8	16,8

Das Holz wurde direkt auf der Wiegeeinrichtung zu Holzkruppen mit einer Packungsdichte von 50 % Holz aufgestapelt. Das Hydrauliköl Mobil DTE Medium und das Lupolen 5021 D

Granulat wurden in der kleineren Wanne (Fläche 0,5 m²) verbrannt, für das Glysantin G48 wurde die größere Wanne (Fläche 1 m²) eingesetzt.

Zur Zündung von Lupolen 5021 D Granulat, Glysant G48 und Hydrauliköl Mobil DTE Medium wurde die Oberfläche der Brandlast solange mit einem 18 kW Gasbrenner (Bunsenbrenner) erhitzt, bis ein selbständiges Weiterbrennen eingesetzt hatte. Die Entzündung der Holzkrippen erfolgte mit Hilfe zweier mit Isopropanol gefüllter Schalen, die unter die Holzkrippen geschoben wurden.

6.3 VARIATION DER VENTILATIONSÖFFNUNG

Neben des Einsatzes unterschiedlicher Brandlasten sollte vor allem der Einfluss der Ventilationsparameter untersucht werden. Dazu wurde die Tür (0,8 m breit, 2 m hoch) mit Mauersteinen zum Teil vom Boden des Brandraumes beginnend verschlossen. In Tabelle 6.2 sind die Abmessungen für die unterschiedlichen Varianten der Ventilationsöffnung zusammengestellt.

Tabelle 6.2 Größe der untersuchten Ventilationsöffnungen

Öffnungsindex	Breite (m)	Höhe (m)	Fläche (m ²)
1	0,8	2,0	1,6
2	0,6	2,0	1,2
3	0,4	2,0	0,8
4	0,2	2,0	0,4
5	0,1	2,0	0,2
6	0,04	2,0	0,08
7	0,1	0,5	0,05
8	unten: 0,56 oben: 0,60	0,7 0,7	0,812
9	unten: 0,56 oben: 0,60	0,3 0,3	0,34

6.4 PROGRAMM

Eine Übersicht der durchgeführten Versuche mit den zugehörigen Ventilationsöffnungen ist in Tabelle 6.3 zusammengestellt.

Tabelle 6.3 Durchgeführte Versuche mit untersuchten Ventilationsöffnungen

Nr	Brandlast	Poolfläche	Öffnungs- Index	A_v (m ²)
1	200 kW Kiesbettbrenner		1	1,6
2	200 kW Kiesbettbrenner		2	1,2
3	200 kW Kiesbettbrenner		3	0,8
4	200 kW Kiesbettbrenner		4	0,4
5	200 kW Kiesbettbrenner		8	0,812
6	200 kW Kiesbettbrenner		9	0,34
7	50 kg Holzkrippe, ca. 6% Feuchte		1	1,6
8	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		1	1,6
9	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		4	0,4
10	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		5	0,2
11	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		7	0,05
12	35 kg Holzkrippe, ca. 8% Feuchte		6	0,08
13	200 kW Kiesbettbrenner		1	1,6
14	22,5 kg Glysantin G48	0,5 m ²	3	0,8
15	25 kg Lupolen 5021 D Granulat	0,5 m ²	3	0,8
16	25 kg Lupolen 5021 D Granulat	0,5 m ²	4	0,4
17	25 kg Lupolen 5021 D Granulat	0,5 m ²	1	1,6
18	22,5 kg Glysantin G48	1,0 m ²	3	0,8
19	22,5 kg Glysantin G48	1,0 m ²	4	0,4
20	22,5 kg Glysantin G48	1,0 m ²	5	0,2
21	17 kg Mobil DTE Medium	0,5 m ²	4	0,4
22	17 kg Mobil DTE Medium	0,5 m ²	3	0,8
23	17 kg Mobil DTE Medium	0,5 m ²	1	1,6
24	45 kg Glysantin G48 zusätzlich kleine Holzkrippe	1,0 m ²	4	0,4
25	22.5 kg Glysantin G48	1.0 m ²	6	0,08

6.5 AUFBEREITUNG DER MESSWERTE

Für die Ermittlung der effektiven Verbrennungswärme werden bei der Auswertung der Messergebnisse "online" erfasste Daten verwendet, die naturgemäß stark streuen. Dies wird durch die Bildung der Ableitung zur Berechnung der Abbrandrate noch verstärkt. Abbildung 6.7 zeigt beispielhaft die Einzelergebnisse für die zeitliche Entwicklung der effektiven Verbrennungswärme von Polyethylen, gemessen bei einer Ventilationsöffnung von 0,8 m².

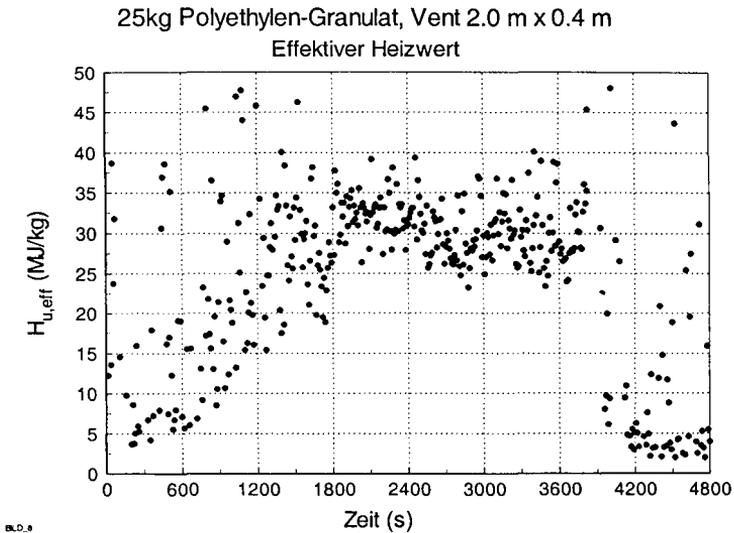


Abbildung 6.7 Effektive Verbrennungswärme bei einem Versuch mit Lupolen 5021 D Granulat, Ventilationsfläche 0,8 m²,

Angeichts der starken Streuung der „Messwerte“ muss eine Mittelwertbildung erfolgen. Deshalb werden hier drei verschiedene Methoden verglichen:

Methode 1: Es wird ein arithmetischer Mittelwert aus den Messwerten gebildet, die zwischen den Zeitpunkten t_1 (10 % der eingesetzten Brennstoffmasse verbraucht) und t_2 (90 % der eingesetzten Brennstoffmasse verbraucht) liegen.

6 Raumbrandversuche mit „reinen“ Brandlasten im Gebindemaßstab

Methode 2: Die arithmetische Mittelwertbildung erfolgt über den Zeitraum, in dem die Abbrandrate annähernd konstant.

Methode 3: Durch Integration der gemessenen Energiefreisetzungsrate wird die freigesetzte Energie Q bestimmt. Die mittlere effektive Verbrennungswärme ergibt sich als Quotient aus freigesetzter Energie Q und der bis zu diesem Zeitpunkt verbrannten Masse m des Brandgutes. Als obere Integrationsgrenze gilt der Zeitpunkt t_2 , bei dem 90 % der eingesetzten Brennstoffmasse verbrannt sind.

Die drei Methoden liefern bezogen auf die einzelnen Stoffe Lupolen 5021 D Granulat, Glysantin G48 und Hydrauliköl Mobil DTE Medium sehr ähnliche Ergebnisse. Anders verhält es sich beim inhomogenen Brennstoff Holz. Hier liegen Methode 1 und Methode 2 relativ weit auseinander, Methode 3 liefert mittlere Werte (Abbildung 6.8).

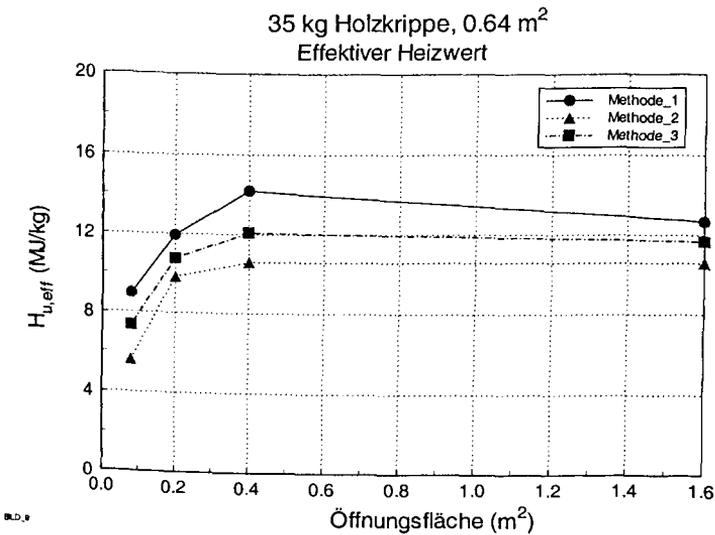


Abbildung 6.8 Effektive Verbrennungswärme von Holz, Einfluss der Berechnungsmethode

6.6 VERSUCHSERGEBNISSE

6.6.1 VERBRENNUNGSEFFEKTIVITÄT

Für die Bestimmung von Parametern, die das Abbrandverhalten dieser Stoffe unter realen Randbedingungen erfassen, sind aus der Vielzahl der vorliegenden Versuche (Tabelle 6.3) die Versuchsergebnisse zu vergleichen, bei denen nur ein Parameter variiert wird. Dadurch kann der Einfluss dieses Parameters auf das Abbrandverhalten eindeutig bestimmt werden. Im vorliegenden Fall wurde die Untersuchung im Room-Corner-Test mit der Fragestellung durchgeführt, den Einfluss der Ventilationsrandbedingungen auf das Brandverhalten eines Materials zu ermitteln. Dabei wurde also der Parameter Größe der Öffnungsfläche variiert.

Die Bilder Abbildung 6.9 bis Abbildung 6.12 zeigen die Ergebnisse für die Verbrennungseffektivität, wie sie aus den Versuchsdaten ermittelt worden ist. Dabei werden die Ergebnisse aus den drei Methoden, die im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden, einander gegenübergestellt.

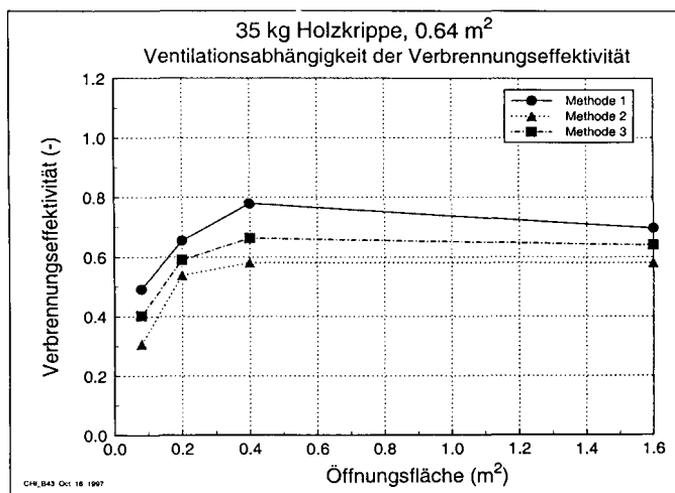


Abbildung 6.9 Verbrennungseffektivität von Holzkrippen

6 Raumbrandversuche mit „reinen“ Brandlasten im Gebindemaßstab

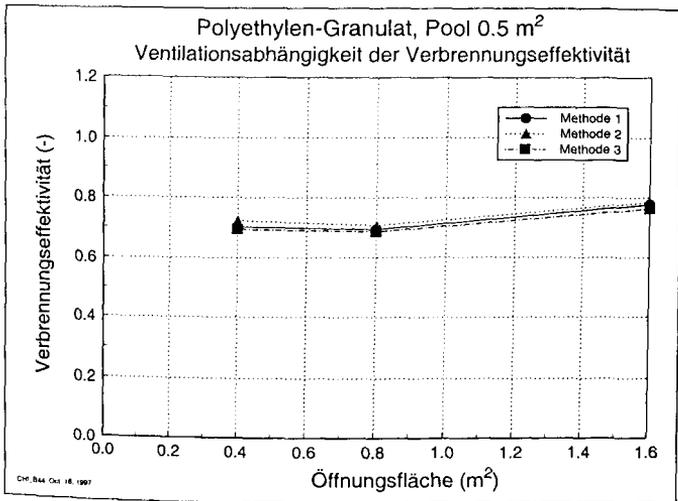


Abbildung 6.10 Verbrennungseffektivität für Lupolen 5021 D Granulat

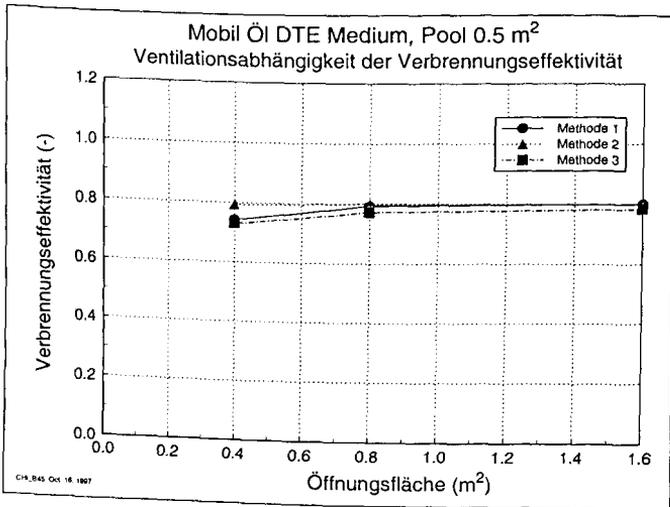


Abbildung 6.11 Verbrennungseffektivität für Mobil DTE Medium Hydrauliköl

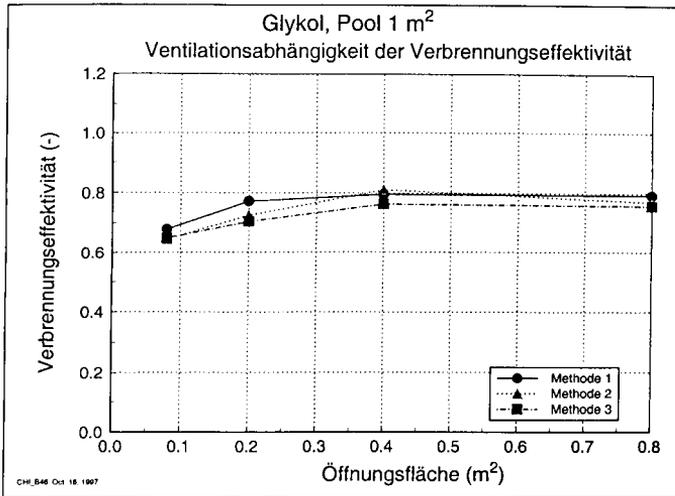


Abbildung 6.12 Verbrennungseffektivität für Glysantin G48

Im weiteren wird Methode 1 in modifizierter Form benutzt (siehe nächster Abschnitt), da diese Form der Intervallfestlegung in ähnlicher Form für die Auswertung der Versuche in der Cone-Kammer benutzt wurde und auch international anerkannt ist (Einbindung in ISO 5660 [6-6]). Diese Wahl erscheint vertretbar, da sich nur bei der Auswertung der Versuche mit Holzrippen nennenswerte Unterschiede in den Mittelwerten in Abhängigkeit von der Intervallfestlegung zeigten.

Die Messdaten für die Abnahme der Brennstoffmasse (Restmasse), die Abbrand- und Energiefreisetzungsrate, sowie der effektiven Verbrennungswärme sind in den Diagrammen des Anhangs dargestellt.

6.6.2 MATERIALPARAMETER ZUR BESCHREIBUNG DES BRANDVERHALTENS

Für die vergleichende Betrachtung des Brandverhaltens einzelner Stoffe im Room-Corner-Test und im in der Cone-Kammer wurden die skalen-übergreifenden Materialparameter effektive Verbrennungswärme bzw. Verbrennungseffektivität, Kohlendioxid- und Kohlen-

monoxidausbeute betrachtet. Bei den Brandversuchen im Room-Corner-Test kann eine externe thermische Beaufschlagung im Gegensatz zur Cone-Kammer nicht definiert und eingestellt werden. Mit Hilfe der Vermessung der Strömung in der Türöffnung kann aber der Zuluftvolumenstrom bestimmt werden. Somit kann aus dem Zuluftvolumenstrom und der Abbrandrate auch für diese Versuche das globale Äquivalenzverhältnis GER bzw. das Zuluftverhältnis ZLV als die die Ventilationsrandbedingungen beschreibender Parameter berechnet werden.

Für die Bildung der Mittelwerte wurde jeweils eine Zeitspanne ausgewählt, während der die Abnahme der Brandlast-Restmasse relativ kontinuierlich verläuft. Deswegen wurde bei allen Versuchen die Zeitspanne zwischen 90 % und 20 % der Brandlastmasse gewählt. Die untere Grenze von 10 % bei der Bestimmung der effektiven Verbrennungswärme (Methode 1) wurde auf 20 % heraufgesetzt, da zum Brandende hin starke Streuungen bei der Messung auftreten und die Mittelwertbildung beeinflussen.

Der Massenstrom der in den Brandraum eintretenden Luft wird aus den in der Türöffnung gemessenen Druckdifferenzen berechnet. Zuerst wird für jeden Zeitschritt die Lage der Neutralen Ebene bestimmt. Anschließend werden für die einzelnen Messpunkte die Strömungsgeschwindigkeiten aus der Differenzdruck- und Temperaturmessung bestimmt. Die Volumen- bzw. Massenströme ergeben sich aus der Integration über die Öffnungsbreite und die Höhe vom Boden ($z=0$) bis zur Lage der Neutralen Ebene. Dabei muss die Form des Geschwindigkeitsprofils mit einem Einströmkoefizienten bewertet werden. Der Einströmkoefizient ($C_{D,e} = 0,68$) wurde hierbei gemäß [6-7, 6-8] gewählt. Um die Massenbilanzierung abzuschließen muss ebenso der austretende Volumen- bzw. Massenstrom bestimmt werden. Dies geschieht auf gleiche Weise durch Integration von der Neutralen Ebene bis zur Unterkante des Türsturzes. Da die Temperaturmessung im oberen Bereich der Tür zum einen durch die Strahlung aus dem Brandraum stark fehlerbeeinflusst, zum anderen die Angaben bzw. Festlegungen zum Ausströmkoefizienten mit großen Unsicherheiten behaftet war, erfolgte die Bestimmung des Abluftstroms alternativ über Kohlendioxidbilanzierung (siehe Anhang A).

Die für den Vergleich mit der Cone-Kammer-Untersuchung notwendigen Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Tabelle 6.4 Beschreibung des Abbrandverhaltens in Abhängigkeit von den Ventilationsrandbedingungen

Nr.	Brandlast	A_v [m ²]	ZLV [1]	\bar{m}_{ein} [kg s ⁻¹]	\dot{m}_b [kg s ⁻¹]	$\Delta h_{e,\text{eff}}$ [kJ g ⁻¹]	Y_{CO_2} [g g ⁻¹]	Y_{CO} [g g ⁻¹]	SEA [m ² kg ⁻¹]
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

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Room-Corner-Test sind sicherlich für den brandlastgesteuerten Fall ($ZLV > 1$) allgemein verwendbar. Für den ventilationsgesteuerten Brand ist die Anwendung der Materialparameter aus Tabelle 6.4 kritisch: Es ist nicht auszuschließen, dass bei den entsprechenden Versuchen außerhalb des Brandraum eine „Nachverbrennung“ stattgefunden hat, durch die unverbrannter Brennstoff und Kohlenmonoxid mit Sauerstoff beim Einnischen von Umgebungsluft in die ausströmenden Rauchgase unter der Abzughaube oxidiert wurden. Dadurch erhöht sich die rechnerische Energiefreisetzungsrate, die Kohlenmonoxidausbeute wird kleiner. Diese Vorgänge sind vergleichbar mit den Vorgängen bei der modifizierte Plattform für das Cone-Calorimeter der Firma Fire Testing Technology. Dies führte dazu, dass die Cone-Kammer entwickelt und aufgebaut wurde. Eine weiterführende Diskussion erfolgt im Abschnitt 8 beim Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen mit unterschiedlichem Versuchsmaßstab.

6.7 LITERATURHINWEISE

- [6-1] ISO 9705 Fire tests - Full-scale room test for surface products. 1996.
- [6-2] DIN 18230 Teil 2: Baulicher Brandschutz im Industriebau - Ermittlung des Abbrandverhaltens von Materialien in Lageranordnung. Ausgabe Januar 1999.
- [6-3] DIN 51900 Teil 2: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes - Verfahren mit isothermen Wassermantel. Ausgabe 1997.
- [6-4] Bouhafid et al.: Fire Safety Journal 15 (1889) 367-390
- [6-5] Parker, W. J.: Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. Journal of Fire Sciences, Vol. 2, September/October 1984, p. 381 - 395
- [6-6] ISO 5660 Fire tests - Reaction to fire; part 1: Rate of heat release from building products (Cone Calorimeter Method). 1999
- [6-7] Prah, J.; Emmons, H.W.: Fire induced flow through an opening. Combustion and Flame, 25 (1975) 369-385.
- [6-8] Sundström, B.; Wickström, U.: Fire: Full scale tests, calibration of test room - part 1. Technical report SP-Rapp 1981:48, Boras, Sweden, 1981.

7 RAUMBRANDVERSUCHE MIT REALEN LAGERANORDNUNGEN

Reale Lageranordnungen bestehen aus einer großflächigen und hohen Zusammenstellung von Brandlasten mit praxisgerechten Abständen. Zur Anbindung an die Versuche im Room-Corner-Test wurden Poolbrände mit PE-Granulat und Glykol durchgeführt. Anschließend wurden Versuche in Regal- und Blocklagerung mit Verpackungsmaterial für feste und flüssige Chemikalien durchgeführt. Im dritten Schritt wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Verpackungsmaterialien mit ungefährlichen Ersatzstoffen für die Chemikalien gefüllt waren.

7.1 BRANDKAMMER UND RAUCHABZUGSYSTEM

Zur Durchführung von Versuchen in realen Lageranordnungen wurde eine Brandkammer verwendet, die ursprünglich für die Prüfung von Stützen konzipiert wurde. Die lichte Höhe des Brandraums beträgt 5,6 m bei einer quadratischen Grundfläche, Kantenlänge 3,6 m. Dieser Brandraum besitzt mit ca. 72 m³ gut das dreifache Volumen des Room-Corner-Test (21 m³). Die Öffnung der Brandkammer ist 3,6 m hoch und 0,6 m breit. Durch die Öffnung austretende Rauchgase werden in einer Haube gesammelt und vom gleichen Rauchabzugssystem aufgenommen, wie beim Room-Corner-Test. Die Messstrecke wurde lediglich um das Zwischenrohr mit den vorderen Leitblechen verkürzt, sodass die Messstrecke mit den Sonden näher an der Abzughaube liegt. Auf dem Boden der Brandkammer ist eine 3 m x 3 m große Wiegebühne auf drei Messzellen aufgebaut. Diese Abbrandwaage hat einen Messbereich von 0 – 6000 kg abzüglich des Gewichts der Bühne und der eventuell darauf aufgestellten Stahlwannen, in denen die Brandlast aufgebaut wird.

7.2 BESCHREIBUNG DER EINGESETZTEN MESSTECHNIK

Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2 zeigen die Versuchseinrichtung im vertikalen und horizontalen Schnitt. Über die Grundfläche sind vier vertikale Messketten mit Thermoelementen verteilt. Der Abstand der Thermoelemente vertikal untereinander ist konstant. In der Mittelachse der Ventilationsöffnung wurden 12 Bi-directionals zusammen mit den entsprechenden Temperaturmessstellen zur Messung der Druckdifferenz und Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit installiert (Abbildung 7.3). Die Drucksonden sind so angeschlossen, dass der zuströmende Luftstrom in den Brandraum hinein einen positiven Staudruck an den Bidirectionals erzeugt. An der mit GA1 bezeichneten Position befindet sich eine Entnahmesonde für

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

Rauchgas. Mit der angeschlossenen Gasanalyse kann der Sauerstoff-, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid- und Stickoxidgehalt im Messgas festgestellt werden. Zur Messung der Wärmestromdichte wurden zwei Gardon-Gage-Sonden installiert. Eine Sonde mit der Bezeichnung GG1 war im Bodenbereich angebracht, die zweite in der Mitte der Ofendecke. Weitere Angabe zur Messtechnik können Tabelle 7.1 entnommen werden.

Die aus dem oberen Bereich der Türöffnung austretenden Rauchgase werden unter der 2,9 m x 2,9 m großen Öffnung der Abzughaube gesammelt. Um ein Ausströmen von Rauchgasen in die Halle zu vermeiden sind an 3 Seiten der Haube 1,0 m tiefe Schürzen eingehängt. Über die Haube, den Haubenaufsatz und die horizontal verlegte Rohrleitung mit der Messstrecke werden die Gase der Hauptleitung zur Rauchgasreinigung zugeführt. Im Abschnitt der Messstrecke befindet sich zum einen die Bidirectional Probe zusammen mit einem Mantelthermoelement zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. unter Verwendung einer Kalibriergröße zur Bestimmung des Volumenstrom im Rauchgaskanal. Zum anderen ist ein Rohr mit Bohrungen auf der Leeseite als Gasentnahmesonde in diesem Bereich angebracht. Über diese Gasentnahmesonde wird Rauchgas einer Gasanalysestrecke zugeführt. Abweichend vom Vorschlag der ISO 9705 [7-1] ist die Gasanalysestrecke analog zur Strecke beim Cone-Calorimeter bzw. bei der Cone-Kammer aufgebaut (siehe Seite 6.3).

Alle Messwertgeber sind an einen Mehrkanal-A/D-Wandler angeschlossen. Die Abfrage der Messwerte erfolgt im Intervall von 10 s. Die Daten werden auf einem Personal-Computer gespeichert und mit einem handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramm bearbeitet. Die Auswertungsgrundlagen sind im Anhang A dargestellt.

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

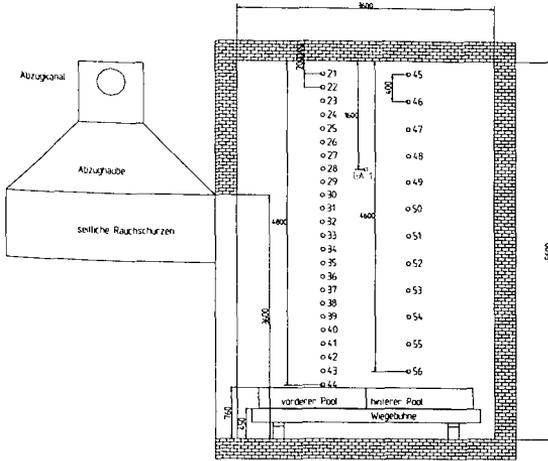


Abbildung 7.1 Seitenansicht der Brandkammer, Maße in mm

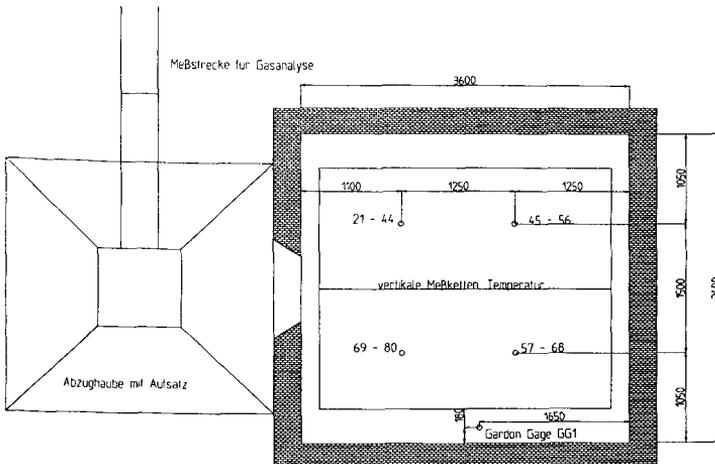


Abbildung 7.2 Grossbrandhaus (Grundriss). Maße in mm.

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

Tabelle 7.1 Messausrüstung

Messgröße	Ausrüstung
Temperatur im Brandraum	1 vertikale Messstrecke mit 24 Thermoelementen, vertikaler Abstand untereinander: 200 mm
	3 vertikale Messstrecken mit jeweils 12 Thermoelementen, vertikaler Abstand untereinander: 400 mm
Geschwindigkeit der durch die Öffnung ein- und ausströmenden Gase	12 Bi-directionals, die auf der Mittelachse der Ventilationsöffnung angebracht wurden
	12 Thermoelemente, die in unmittelbarer Nähe der Bi-directionals die Temperatur messen
Masse der Brandlast	Wiegebühne: Stahlrahmen, der mit Gasbetonsteinen vor zu starker Erwärmung geschützt wird. Darunter stehen drei Wägezellen zur Messwertaufnahme
	2 Stahlwannen mit einer Fläche von jeweils 1.5 x 3.0 m ²
Zusammensetzung der Brandgase im Brandraum	Sammelstelle (GA 1), O ₂ , CO ₂ , CO and NO Analysator von Maihak, MULTOR
Wärmestromdichte	2 Gardon Gage Sonden, je eine im Decken und Bodenbereich zur Messung der Gesamt-Wärmestromdichte (radiativer und konvektiver Anteil)
Energiefreisetzungsrate, Ausbeuten von CO ₂ und CO, Rauchentstehung	Bi-directional und Thermoelement, die in der Mittelachse des Abgasrohres installiert
	Sammelstelle im Abgasrohr für O ₂ , CO ₂ and CO-Analyse, in 10 cm Abstand zur Druckmessstelle
	Rauchdichte Messgerät vom Typ MAURER

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

		Höhe (mm)
B01	- Th 81	- 300
B02	- Th 82	- 620
B03	- Th 83	- 940
B04	- Th 84	- 1200
B05	- Th 85	- 1500
B06	- Th 86	- 1800
B07	- Th 87	- 2100
B08	- Th 88	- 2400
B09	- Th 89	- 2700
B10	- Th 90	- 3000
B11	- Th 91	- 3300
B12	- Th 92	- 3550

BiDi Baum an der
Öskar-Öffnung
Breite der Öffnung:
600 mm
Höhe der Öffnung:
3600 mm

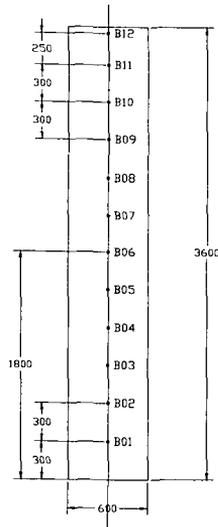


Abbildung 7.3 Anordnung der Drucksonden (BiDi) in der Ventilationsöffnung

7.3 BRANDLASTEN

Bei diesen Versuchen wird die Brandlast durch den Lagergut-Ersatzstoff, die Verpackung und die Lagerart bestimmt. In Tabelle 7.2 sind alle in der großen Brandkammer durchgeführten Versuche zusammengestellt. Dabei muss bei der Lagerung zwischen Block- und Regallagerung unterschieden werden. Bei der Regallagerung ist zusätzlich eine Differenzierung bezüglich der benutzten Regalböden (geschlossener Boden, Gitterrost) zu treffen. Der „Pool“ ist zwar keine praxiserhaltende Lagerart, die Poolbrände mit Glysantin G48 oder Lupolen 5021 D Granulat mussten aber durchgeführt werden, damit eine Anbindung in die Skalierung an die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Versuche im Room-Corner-Test erfolgen kann. Ansonsten wurde der Stoff in die übliche Verpackung gefüllt: Lupolen 5021 D Granulat in die sog. Feststoffverpackung, Glysantin G48 in die Fluidverpackung.

Lupolen 5021 D Granulat (ca. 1,6 kg) wurde in Kleinkartons gefüllt, die aus einer dreischichtigen Innenverpackung (Aluminiumfolie, Kunststoff, Papier) in einem Pappkarton (14 cm breit, 8 cm tief, 25 cm hoch) aufgebaut sind. Zehn dieser Kleinkartons sind in einem Karton (43 cm breit, 30 cm tief, 28 cm hoch) aus Wellpappe als Feststoffverpackung zusammengefasst. Flüssiges Glysantin G48 wird in 1 l PE-Flaschen mit Schraubdeckel gefüllt (24 cm

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

hoch, 9 cm Durchmesser). In Wellpappe-Kartons (46,5 cm breit, 19,5 cm tief, 26 cm hoch) werden zehn dieser Flaschen zu einer Fluidverpackung zusammengefasst.

Die Anzahl der Kartons pro Lage bei Blockanordnung bzw. die Anzahl der belegten Böden bei Regallagerung und die Anzahl der Karton in jeder Lage bzw. auf jedem Boden sind als weitere Parameter der Brandlastanordnung aufgeführt. In zwei Versuchen (Nr. 27, 31) wurden zwei Regale parallel zueinander aufgebaut. In diesen Versuchen sollte der Feuerübergang von einem Regal auf das andere betrachtet werden. Um den Einfluss der Füllung zu untersuchen, wurden teilweise auch Flaschen ohne Glysantin G48 bzw. Kleinkartons ohne Lupolen 5021 D Granulat verwendet.

Die Versuche mit Lageranordnungen wurden jeweils mit einer offenen Dose (Durchmesser ca. 11 cm) und 300 ml Isopropanol gezündet. Die Dose wurde unter die linke untere Ecke der Versuchsanordnung gestellt (Abbildung 7.4).

Bei allen Versuchen war die Ventilationsöffnung (Brandraumtür) vollständig geöffnet (0,6 m x 3,6 m). Bei den Versuchen 11, 26 und 27 musste wegen der starken Brandentwicklung die Brandraumtür zwischenzeitlich geschlossen werden. Deswegen liegen bei diesen drei Versuchen nur in der Anfangsphase Messdaten zur Energiefreisetzungsrate vor.

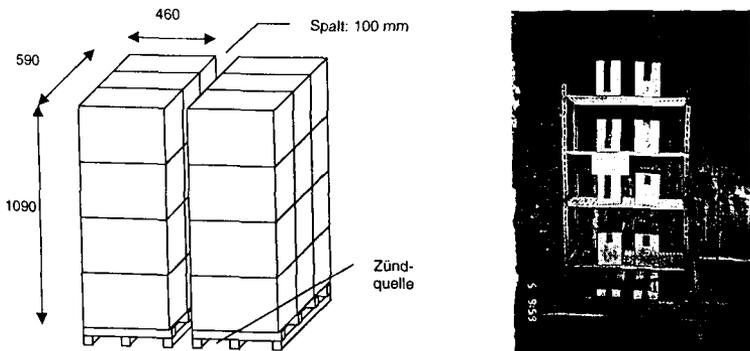


Abbildung 7.4 Versuchsanordnung für Blocklagerung (links) mit vier Ebenen Kartons; Regalanordnung mit 5 Ebenen (rechts), Maße in mm

Tabelle 7.2 Übersicht der durchgeführten Versuche

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 ²	25 kg PE		
02	Pool	Poolfläche 1.0 m ²	50 kg PE		
03	Pool	Poolfläche 1.0 m ²	45 kg Glykol		
04	Pool	Poolfläche 4.5 m ²	90 kg Glykol		
05	Pool	Poolfläche 9.0 m ²	157 kg Glykol		

Bei diesen Versuchen wurden 2 Gitterregale mit einem Abstand von 0.5 m zueinander eingesetzt.

(Die Versuche Nr. 06, 10, 18, 28, 29, und 30 werden bei der Diskussion nicht berücksichtigt.)

7.4 VERSUCHSERGEBNISSE

7.4.1 POOLFEUER

Im ersten Teil der Ergebnisdarstellung werden die gemessenen Energiefreisetzungsraten untereinander verglichen. In Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6 werden die drei Poolbrände mit Glysantin G48 als Brandlast einander gegenübergestellt. Die in Abbildung 7.5 dargestellte Energiefreisetzungsrate zeigt für den Pool von 1 m² Grundfläche eine maximale Energiefreisetzungsrate von annähernd 200 kW. Die Vergrößerung der Poolfläche führt allerdings zu einer unterproportionalen Steigerung der Energiefreisetzungsrate, was sich auch in der Abbrandrate (Abbildung 7.6) widerspiegelt. Während der Brandentwicklung zeigt sich kein nennenswerter Einfluss der Poolfläche auf die Energiefreisetzungsrate oder die Abbrandrate. Die Abbrandrate bei den drei Versuchen zeigt den gleichen zeitlichen Verlauf wie die Energiefreisetzungsrate.

Die Poolflächen von 1 m² und 4,5 m² konnten mit einer einzelnen Wanne realisiert werden, die sich in der hinteren Position auf der Wiegeeinrichtung befand (vgl. Abbildung 7.1). Beim Versuch mit dem 9 m² großen Glysantin G48-Pool musste eine zweite 4,5 m² 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.

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 m² und 1 m²) hinsichtlich der Materialparameter zur skalenübergreifenden Beschreibung des Brandverhaltens ausgewertet (Tabelle 7.3). Die Poolbrände verlaufen in dieser Brandkammer 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 vorherrschte, verändert sich die Kohlenmonoxidausbeute nicht wesentlich. Trotzdem verringern sich die Kohlendioxidausbeute und die effektive Verbrennungswärme geringfügig.

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

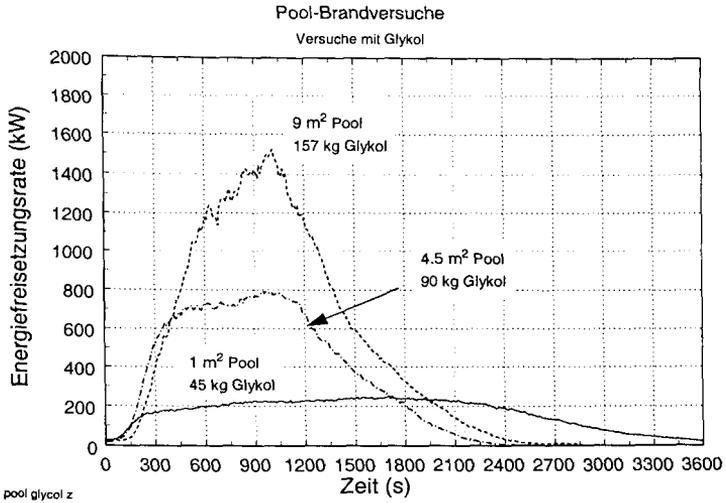


Abbildung 7.5 Energiefreisetzungsrate bei Poolbränden mit Glysantin G48

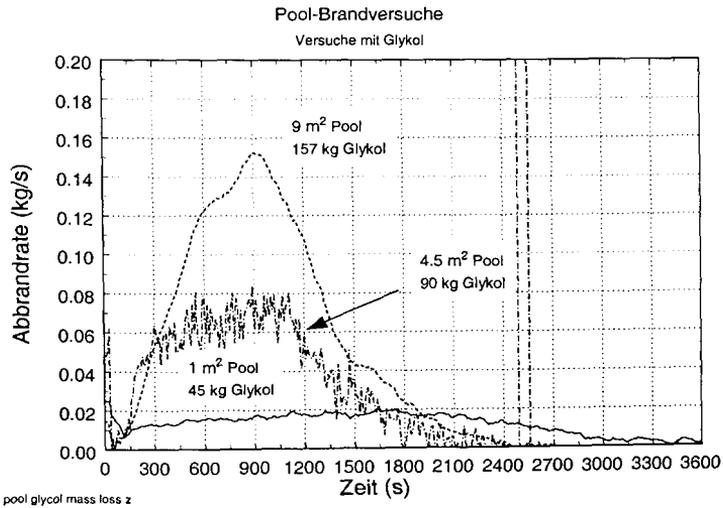


Abbildung 7.6 Abbrandrate bei Poolbränden mit Glysantin G48

Tabelle 7.3 Beschreibung des Abbrandverhaltens in Abhängigkeit von den Ventilationsrandbedingungen

Versuch	\dot{m}^1 [kg/s]	\dot{m}^{*2} [kg m ⁻² s ⁻¹]	$Y_{CO_2}^3$ [g g ⁻¹]	Y_{CO}^4 [g g ⁻¹]	$\Delta h_{c,eff}^5$ [kJ g ⁻¹]	ZLV ⁶ [1]
Lupolen 5021 D Granulat, 0,5 m ²	0,011	0,011	2,051	0,0121	31,80	≈ 7,5
Lupolen 5021 D Granulat, 1,0 m ²	0,022	0,011	1,920	0,0125	28,80	≈ 5,7
Glystantin G48, 1,0 m ²	0,017	0,017	1,057	0,0007	13,37	≈ 12
Glystantin G48, 4,5 m ²	0,064	0,014	0,944	0,0008	11,16	≈ 4
Glystantin G48, 9,0 m ²	0,130	0,014	0,789	0,0008	11,03	≈ 2

¹ Abbrandrate

² relative Abbrandrate

³ Kohlendioxidausbeute

⁴ Kohlenmonoxidausbeute

⁵ effektive Verbrennungswärme

⁶ stöchiometrisches Zuluftverhältnis

Bei der Verbrennung von Glystantin G48 besteht ein erheblicher Unterschied in der relativen Abbrandrate zwischen dem kleinen 1 m² Pool und den größeren 4,5 m² bzw. 9 m² 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.

7.4.2 BLOCKLAGERUNG MIT DER FLÜSSIGKEIT GLYSANTIN 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 übereinander 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 Energiefreisetzungsrate 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 Glystantin G48 in einem Block zusammengestellt. Der Einfluss der bren-

nenden Verpackung auf die Energiefreisetzungsrate kann durch Vergleich mit dem Versuch des 4,5 m² großen Glysantin G48-Pools deutlich gemacht werden.

In Abbildung 7.7 sind die zeitlichen Verläufe der Energiefreisetzungsrate für die genannten Versuche mit Blocklagerung von Flüssigkeiten bzw. Flüssigkeitsverpackung und vom 4,5 m² großen Pool-Brand gegenübergestellt.

Für die Blocklagerung zeigte sich in der Anfangsphase ein Anstieg der Energiefreisetzungsrate, der nahezu unabhängig von der Höhe des errichteten Blockes und von der Füllung der Kartons ist. Nach den ersten 600 Sekunden begann das Glysantin G48 aus den Flaschen zu laufen und entzündete sich, so dass die Energiefreisetzungsrate stark ansteigt. Ein großer Einfluss der gefüllten Flaschen (Wärmesenke) ist bei den entsprechenden beiden Versuchen im Verlauf der Energiefreisetzungsrate nicht zu erkennen. Der maximale Wert der Energiefreisetzungsrate aus dem Versuch mit den 120 l Glysantin G48 unterscheidet sich nur geringfügig von dem des 4,5 m² Pools. Ein Anwachsen der Energiefreisetzungsrate 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 Entzündung die Energiefreisetzungsrate 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 CO₂-Handfeuerlöscher bekämpft. Daher sinkt kurzzeitig die Energiefreisetzungsrate ab, bevor die Wirkung des Eingriffs nachlässt und die Energiefreisetzungsrate wieder ansteigt. Der Maximalwert liegt dann aber deutlich über dem des 4,5 m² Pools. Hier macht sich wegen der insgesamt 4 Ebenen die Höhe des Aufbaus mit einer stark vergrößerten brennenden Oberfläche bemerkbar.

Der direkte Vergleich (Abbildung 7.8) zeigt, dass die Höhe eines Blocks (Anzahl der Kartonschichten übereinander) bei der Entzündung und während der Brandausbreitung keinen nennenswerten Einfluss auf die Energiefreisetzungsrate hat. Die Brandleistung stagniert bei einem niedrigen Blockaufbau vorzeitig, nachdem die Brandausbreitung über die gesamte Oberfläche fortgeschritten ist, die maximale Energiefreisetzungsrate ist erwartungsgemäß kleiner. Umgekehrt betrachtet steigt die Energiefreisetzungsrate beim höheren Aufbau (4 Schichten) nicht um den Faktor 2 gegenüber dem halb so hohen Aufbau (2 Schichten). Von der Verpackung allein kann keine mit der Oberfläche proportionale oder sogar überproportionale Steigerung der Energiefreisetzungsrate verursacht werden. Vielmehr wird die

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

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

Der Einfluss des Materials (z. B. Glysantin G48) kann sowohl am Beispiel des niedrigen Aufbaus mit 2 Kartonschichten (Abbildung 7.9) als auch am Beispiel des doppelt so hohen Aufbaus mit 4 Schichten (Abbildung 7.10) demonstriert werden. Demnach scheint die Entzündung der Kartons und die Brandausbreitung über die vertikalen Flächen durch zusätzliche Wärmekapazität der Glysantin G48-Füllung nicht nennenswert verringert zu werden. Der verlangsamte Anstieg der Energiefreisetzungsrate beim Versuch mit den insgesamt 24 gefüllten Kartons scheint eine Folge des zufälligen Abrutschen 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 ist und die die Fläche der auslaufenden Flüssigkeit begrenzt, hat keinen erkennbaren Einfluss auf den zeitlichen Verlauf oder die Größe der Energiefreisetzungsrate.

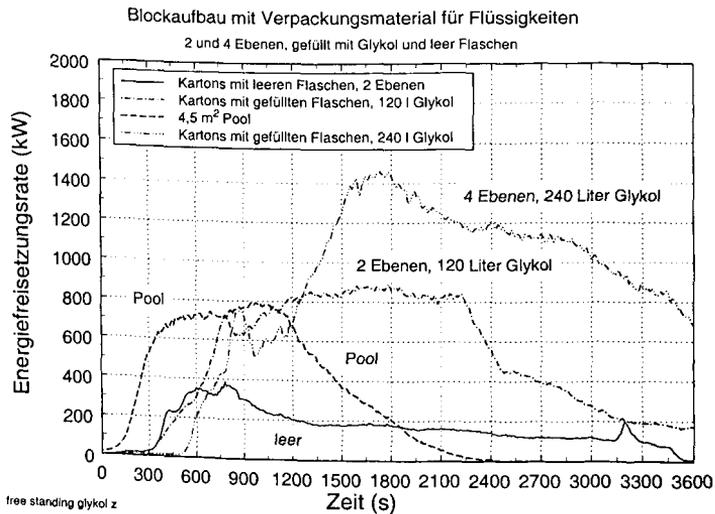


Abbildung 7.7 Energiefreisetzungsrate von Glysantin G48 beim Poolbrand und bei Blocklagerung

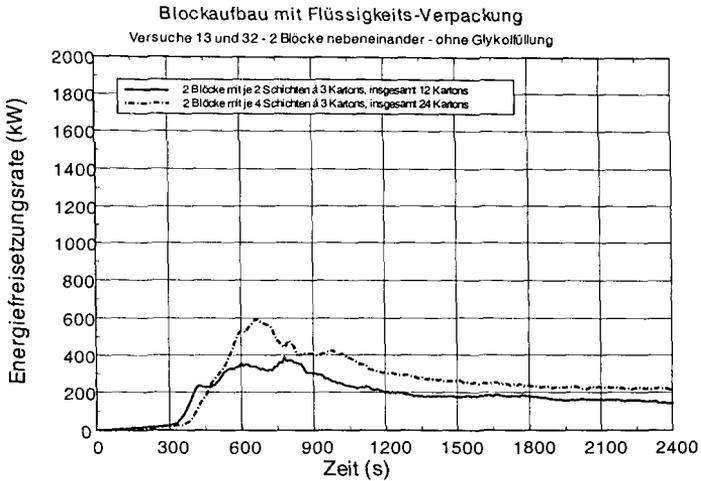


Abbildung 7.8 Einfluss der Höhe des Stapels bei Blocklagerung

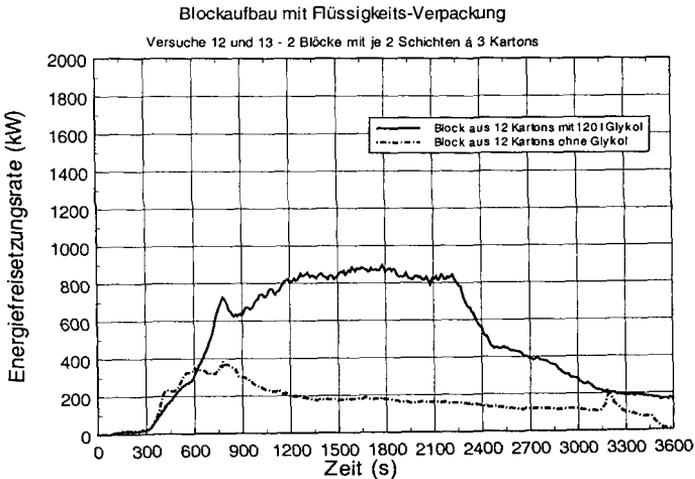


Abbildung 7.9 Einfluss von Verpackung und Füllung bei Blocklagerung (flacher Stapel)

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

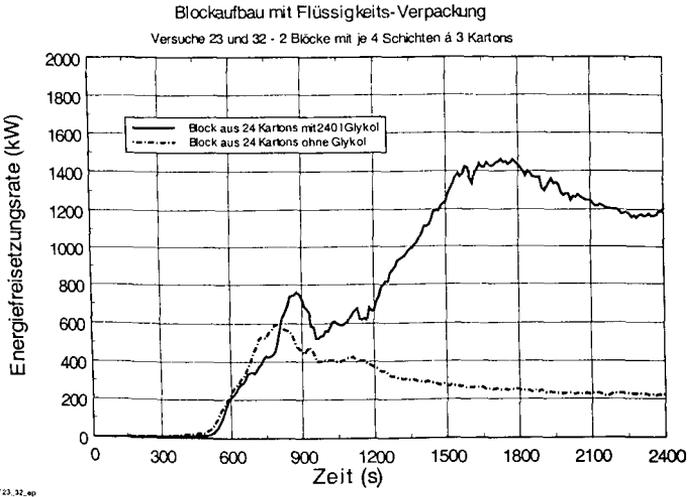


Abbildung 7.10 Einfluss von Verpackung und Füllung bei Blocklagerung (hoher Stapel)

7.4.3 REGALLAGERUNG MIT DER FLÜSSIGKEIT GLYSANTIN G48

Bei der Betrachtung des Brandverlaufs bei Regallagerung kommt dem Aufbau des Regals selbst eine gewisse Bedeutung zu: Während bei Verwendung von Gitterrosten auslaufendes bzw. herausrieselndes Material durch die Löcher im Boden herabtropfen kann, werden sich bei geschlossenen Regalböden vor dem Abtropfen auf jeder Ebene Lachen bilden. Bei den in Abbildung 7.11 dargestellten Versuchen wurden geschlossene Regalböden verwendet, während bei den in Abbildung 7.12 dargestellten Versuchen als Regalböden Gitterroste eingesetzt wurde. Ansonsten waren die Regale gleichartig aufgebaut. Es wurden unabhängig vom Regaltyp je 2 Kartons pro Regalboden aufgestellt.

Die drei in Abbildung 7.11 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.

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

In Abbildung 7.12 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.

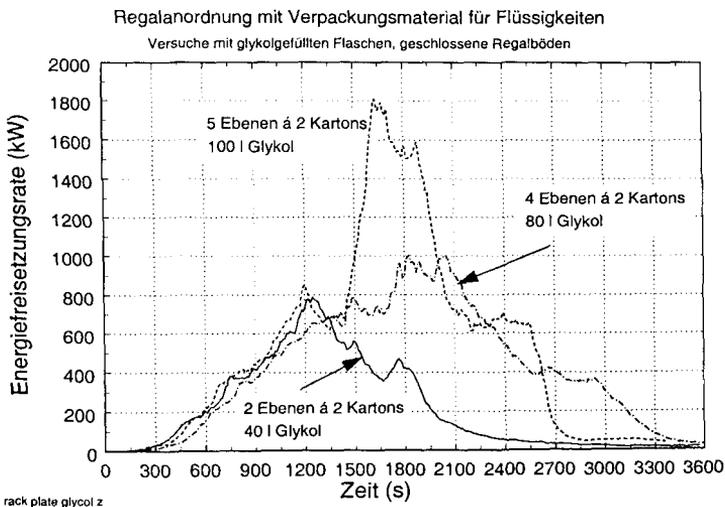


Abbildung 7.11 Energiefreisetzungsrate von Glysantin G48 in Regalanordnungen
(geschlossene Regalböden)

Wenn man vom zeitlich Versatz der beiden Versuche mit 4 bestückten Regalböden absieht, so steigt in allen Versuchen die Energiefreisetzung 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 Ab-

7 Raumbbrandversuche mit realen Lageranordnungen

brandwanne. 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 Rauchabzugssystem über den Strang der Abzugshaube langanhaltende Brände mit derartig hoher Leistung nicht bewältigt werden können.

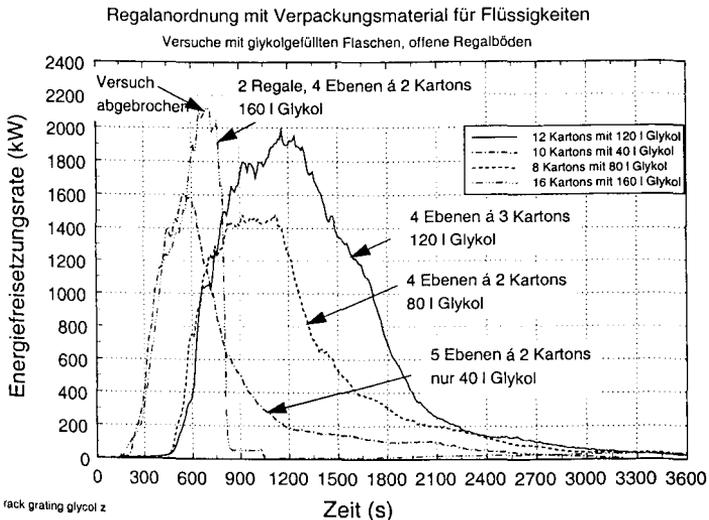
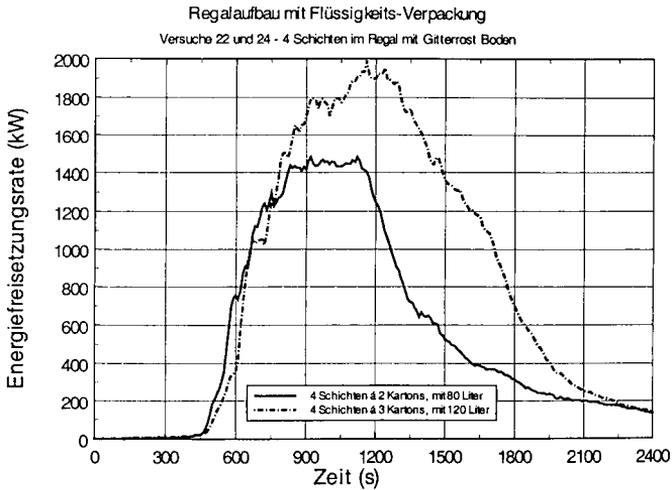


Abbildung 7.12 Energiefreisetzungsrate von Glysantin G48 in Regalanordnungen (offene Regalböden, Gitterroste)

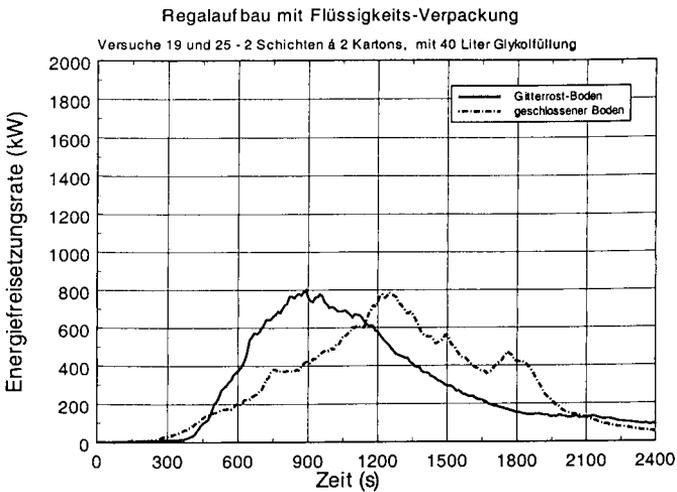
Vergleicht man den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei den beiden Versuchen mit jeweils 4 bestückten Böden, mit 2 bzw. 3 Kartons pro Boden, so scheint in der Anfangsphase die Anzahl der Kartons pro Ebene und somit die Breite der Brandlast keinen erkennbaren Einfluss zu haben (Abbildung 7.13). Allerdings steigt die maximale Energiefreisetzungsrate und die Branddauer beim Versuch mit 3 Kartons pro Ebene gegenüber dem Versuch mit 2 Kartons pro Ebene.

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen



V22_24_ep

Abbildung 7.13 Einfluss der Brandlastmenge bei Regallagerung mit offenen Böden



V19_25_ep

Abbildung 7.14 Vergleich offene – geschlossene Regalböden bei 2 Schichten

7 Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

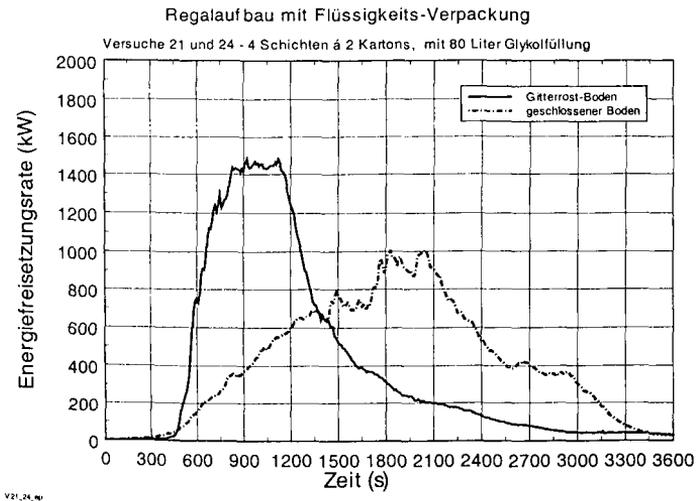


Abbildung 7.15 Vergleich offene – geschlossene Regalböden bei 4 Schichten

Der Unterschied bei der Brandentwicklung zwischen geschlossenen Regalböden und Gitterrosten als Regalböden ist eindeutig: Sind lediglich zwei Ebenen mit Kartons bestückt, erreicht die maximale Energiefreisetzungsrate das gleiche Niveau (Abbildung 7.14). Allerdings erfolgt die Brandausbreitung im Fall der offenen Böden erheblich schneller und entsprechend schnell steigt auch die Energiefreisetzungsrate an. Ist das Regal auf 4 Ebenen bestückt so kommt zur schnelleren Brandausbreitung und zum stärkeren Anstieg der Energiefreisetzungsrate auch noch eine erhebliche Steigerung der maximalen Brandleistung hinzu (Abbildung 7.15). Die geschlossenen Regalböden führen also zu einer Verringerung der Brandentwicklung (langsamere Brandausbreitung, geringere Steigerung der Energiefreisetzungsrate) und bei einer höheren Bestückung des Regals auch zu insgesamt geringeren Brandleistung im Vergleich zu offenen Regalböden.

7.5 LITERATURHINWEISE

[7-1] ISO 9705 Fire tests - Full-scale room test for surface products. 1996

8 AUSWERTUNG UND ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Die vorgestellten Versuche mit realen Lageranordnungen waren mit einer aufwendigen Messtechnik bestückt. Im vorliegenden Bericht wird auf die Größen eingegangen, die das Brandverhalten des Materials oder die Brandentwicklung beschreiben. Weiterreichende Messtechnik diente als Zusatzinformation, um die Messergebnisse abzusichern. Da der Schwerpunkt der Untersuchungen im Bereich der Brandentwicklung von unterschiedlichen Materialien in unterschiedlichen Anordnungen und Raumgrößen lag, soll bei der zusammenfassenden Beurteilung der Versuchsergebnisse nur darauf eingegangen werden. Weiterreichende Aussagen wie z. B. Aussagen zur Beurteilung der Bauteile und deren Erwärmung sollen in diesem Vorhaben nicht hergeleitet werden.

8.1 ANALYTISCHE BESCHREIBUNG DER BRANDENTWICKLUNG

Die wesentliche Eingabegröße bei Berechnungen von Brandwirkungen ist die Energiefreisetzungsrate \dot{q} . Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Energiefreisetzungsrate $\dot{q}(t)$ war ein Schwerpunkt des Vorhabens der Brandversuche mit realen Lageranordnungen. Durch diese Untersuchungen besteht auch die Möglichkeit, die zeitliche Änderung der Energiefreisetzungsrate an ein Modell anzunähern. Bisher hat sich ein quadratischer Ansatz zur Beschreibung der Energiefreisetzungsrate zumindest in der Phase der Brandausbreitung / Brandentwicklung bewährt [8-1, 8-2]. Die mathematische Formulierung lautet:

$$\dot{q}(t) = \alpha \cdot (t - t_s)^2 \quad \text{für } t > t_s \quad (8.1)$$

Diese Formulierung erlaubt die Berücksichtigung einer zeitlichen Verzögerung um den Wert von t_s , z. B. zur Einbeziehung der Entzündung. In Analogie zur Mechanik wäre der in Gleichung (8.1) benutzte Koeffizient α als Beschleunigung der Energiefreisetzungsrate zu bezeichnen. Der Koeffizient α wird über folgende Beziehung berechnet:

$$\alpha = \frac{\dot{q}(t_2) - \dot{q}(t_1)}{(t_2 - t_s)^2 - (t_1 - t_s)^2} \quad (8.2)$$

Zur Klassifizierung der Brandentwicklung einer Konfiguration aus Brandlaststart und Verpackung werden von Przybyla et. al. 5 Klassen [8-1] vorgeschlagen (Tabelle 8.1). Hierbei bedeutet eine sehr langsame Brandentwicklung ($\alpha < 0,0029$), dass die Brandleistung frühestens nach 5 Minuten (exakt 587 s) den Wert von 1000 kW überschreitet. Für die

8 Auswertung und Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

weiteren Klassen wird diese Zeit jeweils halbiert, so dass bei einer sehr schnellen Brandentwicklung bereits innerhalb von 73 Sekunden (1 ¼ Minuten) die 1000 kW-Grenze überschritten wird. Damit wird bei sehr schneller Brandausbreitung nach 10 Minuten eine Brandleistung von über 67 MW und nach 15 Minuten von über 150 MW erreicht, während bei sehr langsamer Brandausbreitung nach 15 Minuten noch nicht einmal 2,5 MW überschritten werden.

Tabelle 8.1 Einteilung in Brandentwicklungs-Klassen [8-1, 8-2]

Klasse	Wertebereich des Koeffizienten Einheit [kW s ⁻²]	Zeit bis zum Überschreiten von 1000 kW	Brandleistung nach	
			10 Minuten	15 Minuten
sehr schnell	$0,1876 \leq \alpha$	< 73 s	> 67,5 MW	> 152 MW
schnell	$0,0469 \leq \alpha < 0,1876$	73 – 146 s	16,9 – 67,5 MW	38 – 152 MW
mittel	$0,0117 \leq \alpha < 0,0469$	146 – 292 s	4,2 – 16,9 MW	9,5 – 38 MW
langsam	$0,0029 \leq \alpha < 0,0117$	292 – 587 s	1,0 – 4,2 MW	2,3 – 9,5 MW
sehr langsam	$\alpha < 0,0029$	> 587 s	< 1,0 MW	< 2,3 MW

Für die Brandentwicklung bei Feststoffverpackungen mit Lupolen 5021 D Granulat auf einem Regal mit offenen Böden (Gitterroste) erhält man unter Berücksichtigung der langen Entzündungsphase für den Koeffizienten α einen Wert von $0,00342 \text{ kW s}^{-2}$ (Abbildung 8.1). Betrachtet man den Fall der beiden parallel zueinander aufgebauten Regale mit Flüssigkeitsverpackung, so liefert die Anpassungsrechnung einen Koeffizienten $\alpha = 0,0165 \text{ kW s}^{-2}$ (Abbildung 8.2). Demnach liegt im ersten Fall eine langsame, im zweiten eine mittlere Brandentwicklung vor.

Betrachtet man die Brandentwicklung bei Regalanordnung mit geschlossenen Böden so ist eine Anpassung der Energiefreisetzungsrate mit einem quadratischen Polynom nicht möglich. Da es unter diesen Randbedingungen aber sicherlich länger als 20 Minuten dauert, bis die kritische Energiefreisetzungsrate von 1000 kW überschritten wird, kann man hier eine sehr langsame Brandausbreitung annehmen.

8 Auswertung und Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

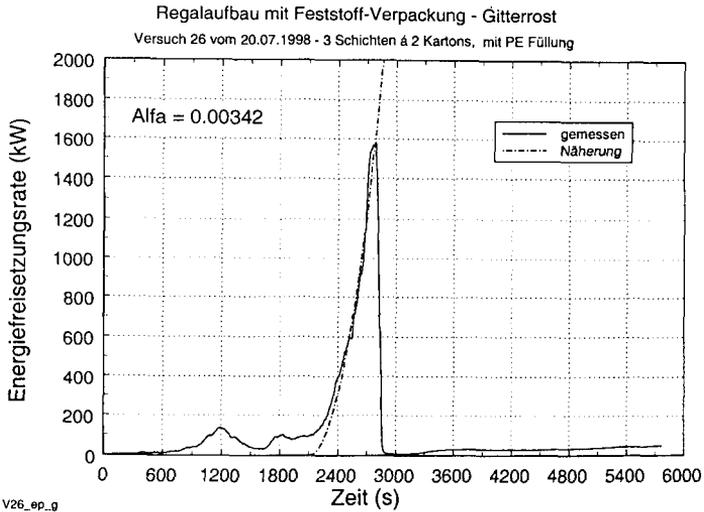


Abbildung 8.1 Brandentwicklung, Regal (Gitterrost) mit Verpackung und PE Füllung

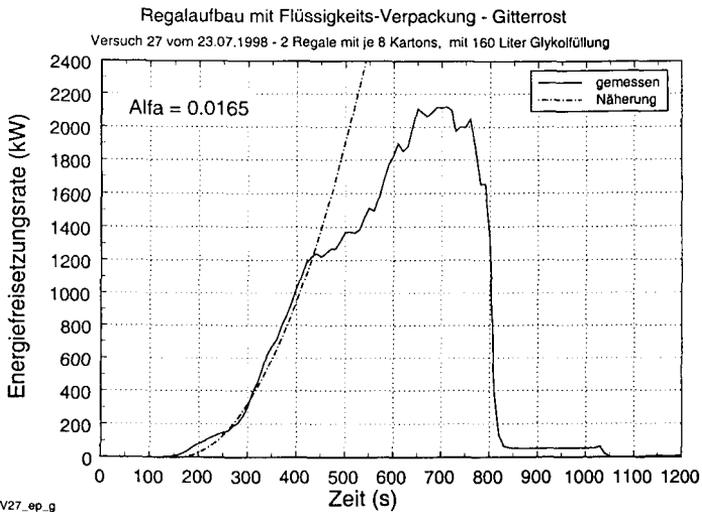


Abbildung 8.2: Brandentwicklung, Regal (Gitterrost) mit Verpackung und Glykolfüllung

Die Entwicklung der Energiefreisetzungsrate bei den Bränden mit Blocklagerung lässt unter diesen Randbedingungen auf eine langsame bis sehr langsame Brandentwicklung

8 Auswertung und Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

schließen. Aber selbst bei Poolbränden mit Glystantin G48 entwickelt sich die Energiefreisetzungsrates in der Anfangsphase zwischen langsam und mittel-schnell.

Bei älteren Versuchen mit Blocklagerung von Pyramin DF ergibt sich bei der entsprechenden Betrachtung der Abbrandrate bzw. Energiefreisetzungsrates eine mittel-schnelle bis schnelle Brandentwicklung [8-3]. Bei diesen Versuchen konnte allerdings mit drei Stapeln und insgesamt sechs Paletten gearbeitet werden.

Weitere Erkenntnisse können aus den Großbrandversuchen in Lageranordnung erworben werden, die im Rahmen des Teilprojektes II durchgeführt worden sind. Der Aufbau der Brandlast ist in Abbildung 8.3 skizziert.

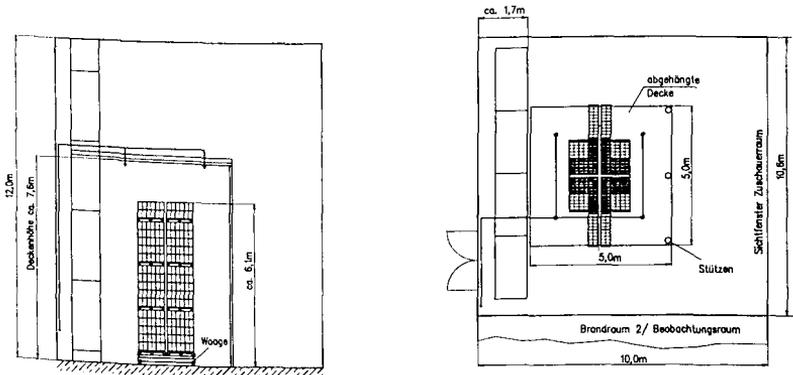


Abbildung 8.3 Aufbau des Blocklagers (die schwarz eingefärbten Bereiche der Kartonagen zeigen die Kartons, die mit PE-Granulat gefüllt waren)

Der zeitliche Verlauf der Masse kann hier für zwei Versuche bis etwa zur 4. Minute mit einem kubischen Ansatz approximiert werden (Abbildung 8.4). Aus dieser Anpassung folgt eine quadratische Funktion für die Abbrandrate bzw. die Energiefreisetzungsrates (Abbildung 8.5). Bei diesen Versuchen ergibt sich für den Koeffizienten der Brandentwicklung α ein Wert von ca. 0,244. Damit ist die Brandentwicklung gemäß Tabelle 8.1 die Brandentwicklung als sehr schnell zu klassifizieren.

Die hier diskutierte Brandentwicklung wird über die Steigerung der Energiefreisetzungsrate (alternativ über die Steigerung der Abbrandrate im Produkt mit der effektiven Verbrennungswärme) definiert. Die Brandentwicklung darf nicht mit der Brandausbreitung im geometrischen Sinne verwechselt werden. Bei der Brandausbreitung wird meist von einer konstanten Fortsetzungsgeschwindigkeit v der Flammenfront ausgegangen [8-4]. Bei flächiger (zweidimensionaler) Brandlastanordnung führt dies zu einer Darstellung der brennenden Fläche $A_B(t)$ in quadratischer Abhängigkeit zur Branddauer t :

$$A_B(t) = \pi \cdot v^2 \cdot (t - t_s)^2 \quad \text{für } t > t_s \quad (8.3)$$

Multipliziert man die brennende Fläche $A_B(t)$ mit einer von den Randbedingungen unabhängigen, zeitlich konstanten relativen Energiefreisetzungsrate so ergibt sich auch eine quadratische Beschreibung der Energiefreisetzungsrate als Funktion der Zeit t :

$$\dot{q}(t) = \dot{q}^* \cdot A_B(t) = \dot{q}^* \cdot \pi \cdot v^2 \cdot (t - t_s)^2 \quad \text{für } t > t_s \quad (8.4)$$

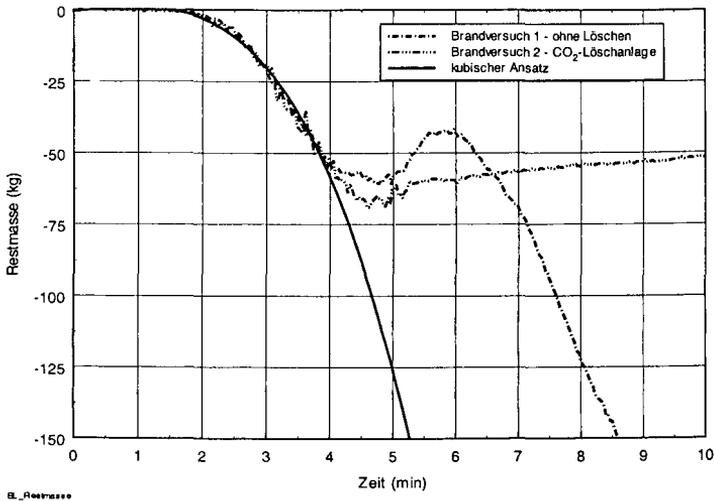


Abbildung 8.4 Zeitlicher Verlauf der Restmasse bei Brandversuchen mit Blocklagerung

8 Auswertung und Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

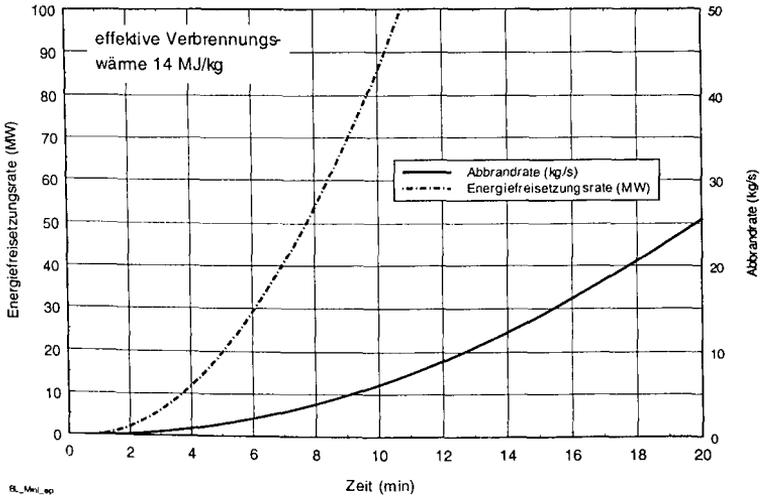


Abbildung 8.5 Extrapolation der Abbrandrate und Energiefreisetzungsrate bei Blocklagerung von Lupolen 5021 D Granulat

Wie vorher aufgezeigt kann der Ansatz der quadratischen Brandentwicklung (Gleichung 8.1) nicht mit der Annahme einer konstanten (geometrischen) Ausbreitungsgeschwindigkeit begründet werden. Tatsächlich ist die sehr anschauliche und wohl auch häufig benutzte Annahme der konstanten Brandausbreitungsgeschwindigkeit nicht experimentell zu verifizieren. Die Vorgabe einer von den Randbedingungen unabhängigen, zeitlich konstanten relativen Energiefreisetzungsrates bzw. relativen Abbrandrate (spez. Abbrandgeschwindigkeit) wird durch die Versuche in der Cone-Kammer widerlegt. Obwohl die Voraussetzungen für diesen Ansatz bisher nicht nachgewiesen wurden, liefert er bezüglich der Brandentwicklung (Steigerung der Energiefreisetzungsrates) gleichwertige Ergebnisse. Dem Anwender einer solchen Vorgehensweise muss bewusst sein, dass sich in der Realität die Flammenfront nicht mit einer konstanten Geschwindigkeit ausbreitet.

Bei den Versuchen für Blocklagerung ergibt sich beim Abbrand einer einzelnen Palette mit Lupolen 5021 D Granulat eine sehr langsame bis langsame Brandentwicklung. Wird die Brandlastmenge und die Höhe der Blocklagerung auf drei Stapel mit jeweils zwei Paletten übereinander aufgestockt, so steigt auch die Brandentwicklung und muss als mittel-schnell bis schnell beurteilt werden. Wird die Brandlastmenge und die Aufbauhöhe weiter vergrößert, so erreicht die Brandentwicklung die Klasse „sehr schnell“. Die Geschwindigkeit der

Brandentwicklung wird zusätzlich durch den Abstand der Lagerblöcke zueinander beeinflusst: Es ist zu vermuten, dass bei den Brandversuchen des Teilprojektes II gerade ein „optimaler“ Abstand der Blöcke zueinander vorlag, so dass noch ausreichend Sauerstoff in den Zwischenraum gelangen konnte. Die Energie der Verbrennung konnte die Oberfläche der Verpackung sehr stark aufheizen und so eine sehr schnelle vertikale Ausbreitung der Flammenfront im Zwischenraum zwischen den Blöcken verursachen.

8.2 VERGLEICHENDE BEWERTUNG DES BRANDVERHALTENS ZWISCHEN LABORMAßSTAB UND RAUMBRANDVERSUCH

Bei der Vorstellung und Diskussion der Versuche in der Mikroverbrennungsapparatur und in der Cone-Kammer wurde das Zuluftverhältnis ZLV bzw. das globale Äquivalenzverhältnis GER eingeführt. Diese Größe 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 Zuluftverhältnis 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 ermittelt 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.

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

In der Cone-Kammer wurden bislang 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 praxisgerechten Bedingungen die Verbrennung nicht unmittelbar durch in den Brandraum einströmende Zuluftmenge gesteuert wird. Vergleicht man die in den Raumbrandversuchen bestimmte Verbrennungseffektivität (Abb. 6.10 und 6.12) bzw. Kohlendioxid- oder Kohlenmonoxidausbeute mit den Untersuchungen der Cone-Kammer (Abschnitt 5.2.2) so lässt sich ein Zuluftverhältnis im Labormaßstab bestimmen, bei dem sich ein vergleichbarer Wert wie bei den Raumbrandversuchen für den jeweiligen Parameter ergibt (Tabelle 8.2).

Anhand der in Tabelle 8.2 benannten Werte für die Verbrennungseffektivität und die Kohlendioxidausbeute wird die bereits bei der Diskussion der Ergebnisse der Cone-Kammer-Untersuchungen festgestellte Korrelation dieser beiden Parameter deutlich. Da die Kohlendioxidausbeute und die Verbrennungseffektivität bzw. effektive Verbrennungswärme mit sinkenden Zuluftverhältnis unterhalb von $ZLV = 1,5$ stark abfallen, liegt man bei einer Risikobetrachtung bezüglich der Energiefreisetzungsrates und der Kohlendioxidentstehungsrates 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.

Die Untersuchungsreihe in der Mikroverbrennungsapparatur (siehe auch Teilprojekt 2) hat gezeigt, dass sich die Ausbeute von anderen toxischen Verbrennungsprodukten analog zur Kohlenmonoxidausbeute verhält, d. h. unter ventilationsgesteuerten Randbedingungen ($ZLV < 1$ bzw. $GER > 1$) ist die Ausbeute in der Größenordnung einer Zehnerpotenz höher als unter brandlastgesteuerten Verhältnissen ($ZLV > 1$ bzw. $GER < 1$). Zu vergleichbaren Ergebnissen führen auch schwedische Untersuchungen, die in der Room Corner Test Kammer mit reduzierter Öffnungsfläche durchgeführt wurden [8-5]. Bei einer Steigerung der Kohlenmonoxidausbeute um einen Faktor von 5 – 10, abhängig vom Material, ergaben sich bei diesen Versuchen beim Vergleich der Ausbeuten von ausgewählten organischen Komponenten Erhöhungen um den Faktor von 20 – 50 zwischen ausreichend ventiliertem ($GER < 1$) und unterventiliertem Brand ($GER > 1$).

Tabelle 8.2 Zuluftverhältnis in der Cone-Kammer

Brennstoff	Lupolen 5021 D Granulat	Glystantin G48
	äquivalentes Zuluftverhältnis in der Cone-Kammer	
Y_{CO_2}	< 1	≈ 1
Y_{CO}	≈ 2	1,8 - 2,3
$\Delta H_{c,eff}$	< 1	≈ 1

Daher ist bei der Anwendung von Ausbeuten, die mit Hilfe einer Mikroverbrennungsapparatur bestimmt wurden, auf den entsprechenden Anwendungsbereich zu achten. 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 überhöhten Festlegung der Gefährdung.

Es wäre denkbar, dass das Abbrandverhalten – Energiefreisetzung und Freisetzung von Verbrennungsprodukten – für einzelne Materialien oder für Materialgruppe als Funktion des Zuluftverhältnisses dargestellt wird. Für die in der Cone-Kammer ausführlich untersuchten Materialien Lupolen 5021 D Granulat und Glystantin G48 kann die Verbrennungseffektivität als Verhältnis von effektiver Verbrennungswärme im Naturbrand zum unteren Heizwert mit einer in Abbildung 8.6 eingezeichneten Funktion angegeben werden.

Bei Betrachtung der stöchiometrischen Kohlendioxidausbeute ergibt sich für beide Materialien ebenfalls eine gemeinsame Funktion. Allerdings ist es allgemein üblich, die Kohlendioxidausbeute als Verhältnis der freigesetzte Kohlendioxidmasse zur umgesetzten Brennstoffmasse darzustellen. Da hierbei die chemische Zusammensetzung mit eingeht, erhält man für verschiedene Stoffe auch unterschiedliche abdeckende Darstellungen der Kohlendioxidausbeute (Abbildung 8.7).

8 Auswertung und Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

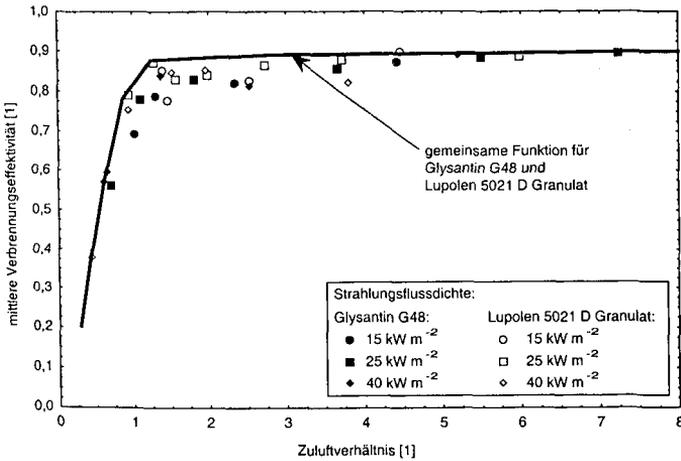


Abbildung 8.6 Verbrennungseffektivität in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

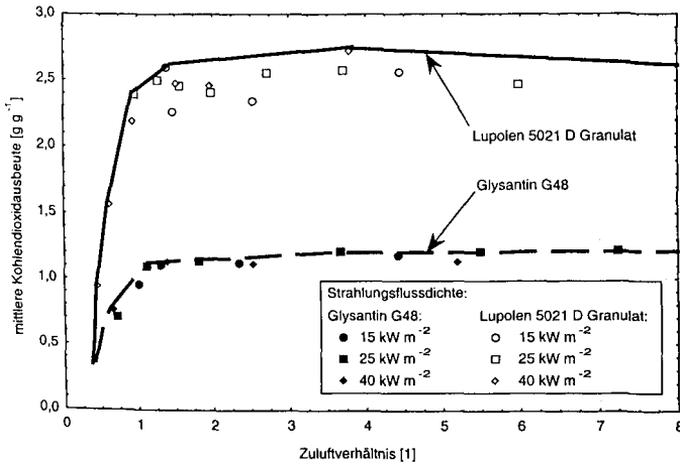


Abbildung 8.7 Kohlendioxidausbeute für Glystantin G48 und Lupolen 5021 D Granulat in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

Im Gegensatz zur Verbrennungseffektivität oder zur stöchiometrischen Kohlendioxidausbeute lässt sich bei Lupolen 5021 D Granulat und Glystantin 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 (Abbildung 8.8).

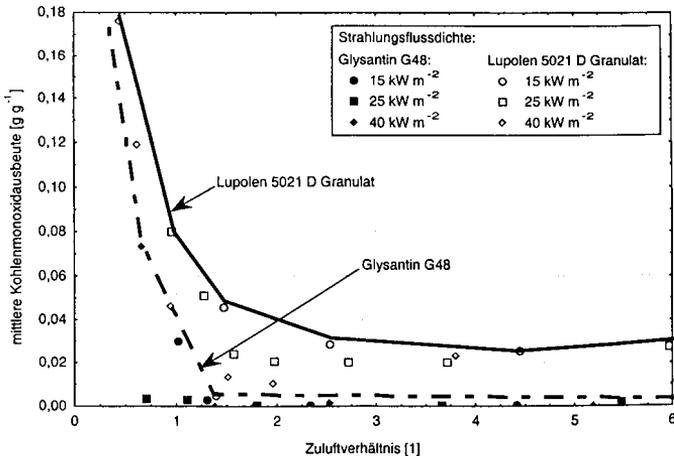


Abbildung 8.8 Kohlenmonoxidausbeute für Lupolen 5021 D Granulat und Glysantin G48 in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

Anhand der Verbrennungseffektivität, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidausbeute wurde gezeigt, dass die Abhängigkeit dieser Parameter von der Ventilationsrandbedingungen vereinfacht dargestellt werden kann. Auf entsprechende Weise lässt sich auch die Ausbeute anderer Verbrennungsprodukte beschreiben. Der funktionale Zusammenhang dieser Materialparameter zum Zuluftverhältnis kann mit der Mikroverbrennungsapparatur oder – wie für die drei o. g. Parameter exemplarisch gezeigt – mit der Cone-Kammer experimentell ermittelt werden. Dabei muss beachtet werden, dass bei festem Zuluftverhältnis die Extremwerte der zu bestimmenden Parameter immer noch von den Randbedingungen der thermischen Beaufschlagung – Heizertemperatur bei der Mikroverbrennungsapparatur oder Strahlungsflussdichte bei der Cone-Kammer – abhängen werden. Für eine abgesicherte Beschreibung ist in jedem Fall eine umfangreiche Untersuchungsreihe für jedes einzelne Material notwendig, in der sowohl die Ventilationsrandbedingungen, als auch die thermische Beaufschlagung variiert werden.

8.3 LITERATURHINWEISE

- [8-1] Przybyla, L.; Gandhi, P.: Flammable Liquids in Plastic Containers. Fire Journal May/June 1990, 38-43
- [8-2] ISO/CD 13388 - Fire safety engineering; Design Fire Scenarios and Design Fires, Draft February 1997
- [8-3] Cabelka, U.: Brände in Pflanzenschutzmittellägern – Erkenntnisse aus Brandversuchen im Tonnenmaßstab. TÜ Bd. 34 (1993) Nr. 11 – November, 442 - 447
- [8-4] Schneider, U. und Lebeda, C: Baulicher Brandschutz. ISBN 3-17-015266-1, W. Kohlhammer, Stuttgart, 2000
- [8-5] Lönnemark, A., Blomqvist, P., Mansson, M. and Persson, H.: TOXFIRE – Fire characteristics and smoke gas analysis in under-ventilated large-scale combustion experiments; Tests in the ISO 9705 room. SP Reort 1996:45, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 1997

9 SCHUTZKONZEPTE UND NACHWEISMETHODEN

9.1 SCHUTZKONZEPTE

9.1.1 EINLEITUNG

Brände beeinflussen die Umwelt und können zu Gefährdungen und Schädigungen des betroffenen Geländes oder der Anlieger (auch im weiteren Sinne) führen. Deshalb muss alles getan werden, um Brände zu verhindern. Ist ein Brand entstanden, so müssen durch geeignete vorbeugende Maßnahmen Voraussetzungen geschaffen worden sein, um die Auswirkungen durch Brände möglichst gering zu halten. Gerade im Bereich der Chemikalienlager, unter denen die Lager für Pflanzenschutzmittel (PSM) durch deren weite Verbreitung eine besondere Rolle spielen, gilt der Grundsatz in besonderem Maße, dass bei einem Brand eine Gefährdung der Umwelt so gering wie möglich sein muss.

Das aus Praxis bekannte und auch bewährte Wissen sowie die Erkenntnisse des aktuellen Standes von Forschung und der Technik wurde in der vorliegenden Studie zusammengefasst. Anhand der Regelwerke und Gesetze kann ein Lager entsprechend der vorliegenden Vorschriften für den Regelfall brandschutztechnisch ausgelegt werden. Darüber hinausgehende detailliertere Anforderungen können über die Umsetzung der noch zu erfüllenden Schutzziele erarbeitet und ggf. Lösungsansätze geschaffen werden. Mit den im dritten Block dargestellten Nachweisverfahren besteht die Möglichkeit, mit entsprechenden Eingangsdaten noch offene Fragestellungen zu beantworten, um die ausreichende Funktion einer gewählten Maßnahme nachzuweisen.

Als praxismgerechte Hilfsmittel für die Nachweisführung und für die Festlegung geeigneter Schutzmaßnahmen soll ein Leitfaden erarbeitet werden, der mittelfristig in das Vorschriftenwerk (z. B. TRGS 514) einfließen könnte. Eine rasche Verbreitung der Forschungsergebnisse wird erreicht, indem der zu erarbeitende Leitfaden kurzfristig in dem zuständigen vfdB-Referat 3 „Brandentwicklung und Brandverlauf“ (unter Leitung des Antragstellers) beraten und als vfdB-Richtlinie verabschiedet wird.

Mittelfristig soll eine Fortschreibung der Sicherheitsregeln für den Brandschutz bei Gefahrstofflagern (z. B. Anhang zu TRGS 514) initiiert werden. Hierfür soll bereits auf dem als Abschluss des Forschungsvorhabens geplanten Workshop geworben werden.

9.1.2 VORSCHRIFTEN UND RICHTLINIEN

Die Vorschriften zur Lagerung von gefährlichen Stoffen sind relativ weit in unterschiedlichen Rechtsbereichen verstreut und deshalb nur schwer zu überblicken. Das liegt daran dass für einen derartigen Bau und Betrieb die Gebiete des Umwelt-, Wasser- und Gewerberechts neben betrachtet werden müssen. Hauptsächlich lassen sich die Vorschriften für den Bau und Betrieb von Anlagen zur Lagerung von Gefahrstoffen in folgenden Rechtsbereichen finden:

- das materielle Baurecht,
- das Immissionsschutzrecht,
- das Recht der überwachungsbedürftigen Anlagen,
- das Chemikalien- und Gefahrstoffrecht und
- das Gewässerschutzrecht.

Einen Überblick für die unter anderem geltenden gesetzlichen Grundlagen gibt die Tabelle 9.1. Anforderungen an die baulichen Schutzmaßnahmen enthalten insbesondere die Bauordnungen der Länder (BauO), die Störfallverordnung (12. BImSchV) sowie die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) und brennbare Flüssigkeiten (TRbF).

Neben den rechtlichen Vorschriften gibt es auch Regelwerke und Empfehlungen technischer Ausschüsse, Betreiberorganisationen oder Versicherungen.

Tabelle 9.1 Wesentliche gesetzliche Grundlagen für den Bau und Betrieb von Anlagen zur Lagerung von Gefahrstoffen

Kurzbezeichnung	Gegenstand
BauO	Bauordnungen der Bundesländer sowie zugehörige Ausführungsvorschriften, insbesondere:
LöRüRL	Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe (Löschwasser-Rückhalte-Richtlinie – LöRüRL, August 1992)
BmSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz (14.5.1990; I.Ä. 03.05.00), dazu
4.BImSchV	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (14.3.97; I.Ä. 23.02.99)

Kurzbezeichnung	Gegenstand
12.BImSchV	Störfallverordnung (26.04.00), Allgemeine Verwaltungsvorschriften zur Störfallverordnung
ChemG	Chemikaliengesetz (25.7.94; I.Ä. 14.5.98), dazu Gefährlichkeitsmerkmale-Verordnung 17.07.90, nach dem Chemikaliengesetz übernommen in GefStoffV vom 26.10.93
ChemPrüfV	Verordnung über Anmelde- und Prüfnachweise nach dem Chemikaliengesetz (1.8.94)
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung (15.11.99), dazu
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe, insbesondere
TRGS 514	Lagern sehr giftiger und giftiger Stoffe in Verpackungen und ortsbeweglichen Behältern (September 1998)
TRGS 515	Lagern brandfördernde Stoffe in Verpackungen und ortsbeweglichen Behältern (September 1998)
TRGS 300	Sicherheitstechnik (18.09.99) Gewerbeordnung (2.3.99; I.Ä. 24.3.99), dazu
VbF	Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (mit Ergänzungen vom 13.12.96)
TRbF	Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten (div. Aktualisierungsstände), Insbesondere
TRbF 100	Allgemeine Sicherheitsanforderungen (Juli 1980; I.Ä. 15.4.97)
TRbF 110	Lager Juli 1980, letzte Änderung 15.04.97
WHG	Wasserhaushaltsgesetz (12.11.96; I.Ä. 25.8.98)
Muster VAwS	Verordnung über Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe (8./9.11.90)

(Fortsetzung von Tabelle 9.1)

Eine Übersicht der folgenden Werke wurde in [9-1] erstellt:

- Empfehlungen des Deutschen Ausschuss für brennbare Flüssigkeiten (DABf),
- Normblätter,
- VCI-Konzept zur Zusammenlagerung von Chemikalien (07/1998),

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

- VCI-Brandschutzkonzept für Chemikalienlager im Hinblick auf den Schutz der Gewässer (04/1987),
- IVA-Leitlinie „Sichere Lagerung von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln (PSM) (1996)“,
- Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebau-richtlinie – M IndBauRL) (Fassung März 2000).

Aus den o.g. Gesetzen und Richtlinien, dem vorliegenden Untersuchungen und unter Berücksichtigung der internationalen Literatur [z.B. 9-2, 9-3, 9-4, 9-5] wird ein Leitfaden zum Brandschutz in Chemikalienlagern erstellt.

Hinweise auf maximale Lagermengen oder Lagerflächen für einen Lagerabschnitt können nur auf der Seite der gesetzlichen Bestimmungen der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) und deren Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten (TRbF), den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) sowie der Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe (LöRüRL) gefunden werden. In unterschiedlichen Stufen werden bauliche und anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen gefordert. Bei den baulichen Maßnahmen werden neben Rettungs- und Angriffswegen für die Feuerwehr hauptsächlich Abtrennungen (Wände und Decken) in feuerbeständiger Bauart F 90-A oder als Brandwand gefordert. Die Herstellung der Bauteile erfolgt aus nichtbrennbaren Baustoffen. Bedachungen müssen widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme sein. Durch Lagerräume gehende Schornsteine dürfen keine Öffnungen in die Lagerräume haben, auch wenn diese Öffnungen durch Schieber, Klappen etc. verschließbar sind.

Dagegen werden automatische Brandmelder mit Weiterschaltung zu einer ständig besetzten Stelle nicht präventiv gefordert. Die Vorhaltung von halbstationären oder automatischen Feuerlöscheinrichtung werden erst nach Überschreitung von Mindestmengen oder ab bestimmten Lagerguthöhen gefordert.

Im Rahmen der M IndBauRL besteht die Möglichkeit, die Mindestanforderungen an den baulichen Brandschutz, insbesondere an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile und die Brennbarkeit deren Baustoffe, die Größe der Brandabschnitte und Brandbekämpfungsabschnitte sowie die Anordnung, Lage und Länge der Rettungswege zu regeln. Industriebauten, die den Anforderungen der M IndBauRL entsprechen, erfüllen die Schutzziele des § 17 Abs. 1 MBO. Die M IndBauRL gilt für Gebäude im Bereich der Industrie und des Gewerbes, insofern sie der Produktion oder Lagerung von Produkten oder Gütern dienen.

9.1.3 STAND DER SICHERHEITSTECHNIK

Die Datenerhebung zum Stand der Sicherheitstechnik bei genehmigungspflichtigen Chemikalienlagern wurde einerseits durch die Berufsfeuerwehr der Stadt Hannover, zum anderen durch den Technischen Überwachungsverein Hannover / Sachsen-Anhalt durchgeführt. Zur Ermittlung des aktuellen Standes konnte dabei vornehmlich auf die Daten für Pflanzenschutzmittellager (PSM-Lager) in Niedersachsen zurückgegriffen werden. Es wäre durchaus möglich, dass sich bei der allgemeinen Betrachtung von Chemikalienlagern oder bei der Erhebung in anderen Regionen ein etwas anderes Bild ergeben könnte.

Die sicherheitstechnische Anlagenauslegung von genehmigungsbedürftigen Pflanzenschutzmittellagern, die seit 1986 in der betrachteten Region errichtet oder geändert wurden und den Grundpflichten/erweiterten Pflichten der 12. BImSchV (StörfallIV) unterlagen, berücksichtigt die Anforderungen zum Schutz der Nachbarschaft vor den Auswirkungen störfallbedingter Stofffreisetzungen. Dabei sind insbesondere Brände innerhalb und außerhalb der Geschäftszeit hinsichtlich der baulichen und sicherheitstechnischen Auslegung und Ausrüstung eines Lagers zugrunde gelegt worden. Die Aufsichtsbehörden für derartige Anlagen haben bei bestehenden Anlagen weitgehend für eine sicherheitstechnische Nachrüstung gesorgt, so dass der Stand der Sicherheitstechnik bei den uns bekannten Anlagen, die überwiegend in Niedersachsen liegen, auch bei Anlagen unter 100 t Lagerkapazität erfüllt wird.

Der Stand der Sicherheitstechnik ist nur aus einer Sichtweise zu beurteilen, bei der die Funktionsweise und das Zusammenwirken der verschiedenen technischen Einrichtungen und die organisatorischen Maßnahmen als Ganzes bewertet werden. Dabei kann es im Einzelfall durchaus zu unterschiedlichen Lösungen kommen, da nur wichtig ist, dass das im Einzelfall zu definierende Schutzziel eingehalten wird.

Mit der dargelegten Bewertung für den Einzelfall wird nachfolgend der Stand der Sicherheitstechnik dargestellt, der sich bei den Abnahmeprüfungen nach § 29a BImSchG für die Praxis herausgestellt hat.

Der Stand der Sicherheitstechnik für ein Pflanzenschutzmittellager ist nach den Anforderungen der StörfallIV erfüllt, wenn Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs keine ernstesten Auswirkungen für Mensch oder Umwelt nach sich ziehen. Zur Beurteilung der zu treffenden Sicherheitsmaßnahmen ist die Einschätzung der stofflichen Gefahrenpotentiale erforderlich.

Die Anforderungen nach einer sicheren Lagerung, die im Wesentlichen in dem Lagerungskonzept des Verbandes der Chemischen Industrie ¹⁾ behandelt ist, können für die im Landhandel üblicherweise vorkommenden Stoffe, für die keine Sonderverordnung vorgesehen ist, in einer vereinfachten Weise umgesetzt werden. Die Stoffe lassen sich entsprechend der Klassen nach der Gefährlichkeit aufteilen, wobei die Einteilung auf dem Zusammenlagerungs-Verbot, nicht aber auf den Risiken der Brandentwicklung und -ausbreitung basiert. Sie gliedern sich in

- Klasse 2 B: Druckgaspackungen (Aerosoldosen) mit Propan/Butan oder Dimethylether als Treibmittel,
- Klasse 3 A: Entzündliche Flüssigkeiten (Hochentzündlich, leichtentzündlich und entzündlich),
- Klasse 3 B: Brennbare Flüssigkeiten,
- Klasse 4.1 B: Entzündbare feste Stoffe, die bei Verwirbelung staubexplosionsgefährlich sind,
- Klasse 5.1: Entzündend wirkende Stoffe mit oxidierenden Eigenschaften (R8, R9 brandfördernd),
- Klasse 6.: Giftige Stoffe (6 A: brennbar, 6 B: nichtbrennbar),
- Klasse 8: Ätzende Stoffe (8 A: brennbar, 8 B: nichtbrennbar),
- Klasse 10: Brennbare Flüssigkeiten mit Flammpunkten über 100°C, die nicht Lagerklasse 3 A oder 3 B sind,
- Klasse 11: Brennbare Feststoffe,
- Klasse 12: Nicht brennbare Flüssigkeiten,
- Klasse 13: Nicht brennbare Feststoffe.

Stoffe, die anderen Lagerklassen zuzuordnen sind, kommen zwar vereinzelt vor und müssen dann im Einzelfall nach den Gegebenheiten des jeweiligen Lagers unter besonderen Bedingungen beurteilt werden. Sie sind für eine Bewertung eines Sicherheitskonzeptes von untergeordneter Bedeutung.

¹⁾ Konzept zur Zusammenlagerung von Chemikalien, VCI 1993, geändert 1998

Zur Erfassung und Beurteilung der Gefahren, die bei einem gestörten Betrieb mit diesen Stoffen auftreten können, sind folgende Störfallszenarien zu berücksichtigen:

- Schwelbrände mit Gefährdung der Nachbarschaft,
- Vollbrände mit Übergreifen auf benachbarte Brandabschnitte,
- Brände in Nachbareinrichtungen zu dem PSM-Lager,
- Eingriffe Unbefugter,
- Freisetzen brennbarer Gase aus Druckgaspackungen bzw. brennbarer Dämpfe aus Lösungsmitteln,
- Reaktion mit Löschwasser unter Freisetzung sehr giftiger Gase,
- Leckagen wassergefährdender Flüssigkeiten,
- und Anfall kontaminierten Löschwassers.

Die sicherheitstechnische Auslegung eines Chemikalienlagers kann den besonderen Gefahrenpotentialen angepasst werden, wenn unterschiedlich genutzte Lagerabschnitte entsprechend des relevanten Störfallszenarios ertüchtigt werden.

In der Praxis sind vier sicherheitstechnisch unterschiedlich ausgestattete Lagerbereiche üblich:

- Ein Lagerabschnitt für Waren ohne Gefährlichkeitsmerkmale (nach GefahrstoffV), die häufig in einer separaten durch den Abwicklungsbereich vom eigentlichen Lager getrennte Halle gelagert werden.
- Ein Lagerabschnitt für Chemikalien ohne besondere Gefahrenpotentiale und Handelsprodukte vergleichbaren Gefahrenpotentials. Hierunter fallen die mit „umweltgefährdend“ (N), „ätzend“ (C), „reizend“ (Xi), „gesundheitsschädlich“ (Xn) eingestuft Produkte. Als „brandfördernd“ (O) eingestufte Stoffe können nach dem Stand der Sicherheitstechnik in diesem Lagerabschnitt gelagert werden, wenn ein Abstand von einer Regalbediengangbreite zu den nächsten brennbaren Stoffen eingehalten wird.
- Ein Lagerabschnitt für giftige und sehr giftige Produkte, die nicht gleichzeitig entzündliche Flüssigkeiten sind und
- ein Lagerabschnitt für entzündliche Flüssigkeiten und Druckgaspackungen.

Bei allen Lagerabschnitten ist die Bodenabdichtung entsprechend den Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes ausgeführt und eine Löschwasserrückhaltung vorgesehen. Die Trennwände zwischen den Lagerabschnitten sind mindestens als F 90 Wände ausgeführt.

Lager für den allgemeinen Agrarbedarf sind im allgemeinen nach dem Stand der Sicherheitstechnik mit einer Brandmeldeanlage auszurüsten, wenn ein Übergreifen des Feuers auf das Chemikalienlager möglich ist.

Im Chemikalienlager kann, in Abhängigkeit von der Größe, Lage und Ausstattung des Lagers und des Gefahrenpotentials, neben der Brandmeldeanlage auch eine automatische Löschanlage gefordert werden. Bei Sprinkleranlagen ist ein von der allgemeinen Stromversorgung unabhängiger Pumpenantrieb, bei CO₂-Löschanlagen zusätzlich Druckentlastungsöffnungen vorzusehen. Lüftungsanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen müssen so angesteuert werden, dass keine Beeinträchtigung der Funktion der Löschanlage eintreten kann.

Zum Schutz vor dem Eingriff Unbefugter ist eine Einbruchmeldeanlage Stand der Sicherheitstechnik.

In den Lagerbereichen, in denen giftige Stoffe gelagert werden, ist eine ausreichende Belüftung vor Arbeitsbeginn vorzusehen, z. B. durch Einschalten der Lüftungsanlage über eine Zeitschaltuhr. Bei Einsatz einer Lüftungsanlage ist diese auf Ausfall zu überwachen und eine Meldung darüber anzuzeigen.

In dem Lagerbereich für entzündliche Flüssigkeiten und Druckgaspackungen ist zusätzlich zu der bereits dargestellten Vorgabe die Elektroinstallation entsprechend den Anforderungen des technischen Regelwerks nach Zone 2 der Explosionsschutzrichtlinien auszulegen. Ein ableitfähiger Boden und der Potentialausgleich an Regalen, Lüftungskanälen und Toren ist vorzusehen. Nach dem Stand der Sicherheitstechnik sind zur Detektion der Stofffreisetzung eine Gaswarnanlage mit raumbezogener Ansteuerungsfunktion für die Lüftungsanlage und Türfeststelleinrichtungen vorhanden. Ein Alarm beim Erreichen einer Grenzkonzentration deutlich unterhalb der unteren Explosionsgrenze (UEG) wird an eine ständig besetzte Stelle weitermeldet, die das Betriebspersonal informiert.

Die betrachteten PSM-Lager sind im allgemeinen mit Feuerlöschern, Notduschen, Fluchtwegbeleuchtung, Augenspülflaschen, Aufsaugmaterial, Bergefassern, Regalanfahrerschutz, Druckknopfmeldern, ggf. Stopptastern, Handauslösetastern für die Löschanlage, Fernsprechverbindungen, optische und akustische Warneinrichtungen, Feuerwehrschlüssel-

kasten, Freischaltelement, Blitzschutzanlage, Türfeststelleinrichtungen, Heizungen und einer belüfteten Gabelstaplerladestation ausgestattet.

Produkte mit Löschmittelunverträglichkeit werden dabei in Stahlschränken in den ihrem Gefahrenpotential entsprechenden Lagerbereichen aufbewahrt.

Ergänzt wird die Anlagensicherheit durch organisatorische Festlegungen zum Lagerbetrieb, Schulung der Beschäftigten, Erstellung des betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplanes, sowie Abstimmung mit der Feuerwehr über den Feuerwehreinsatzplan und der Abstimmung mit der Katastrophenschutzbehörde. Die organisatorischen Anweisungen im Betriebshandbuch regeln darüber hinaus die regelmäßige Prüfung und Wartung der Sicherheitseinrichtungen.

Die Einhaltung der Festlegungen in den einschlägigen Regelwerken (z.B. TRbF, TRGS) ist eine Grundvoraussetzung, auf die in diesem Rahmen nicht weiter eingegangen wird. Abweichungen von diesen Regeln sind im Einzelfall zu begründen. Der Nachweis über die Einhaltung der Schutzziele durch z.B. die vorgenannten Sicherheitsmaßnahmen ist für die jeweilige Anlage individuell zu führen.

9.2 EINGANGSDATEN FÜR NACHWEISMETHODEN

9.2.1 ALLGEMEIN

Für die Durchführung rechnerischer Nachweise ist nicht nur das Brandszenario (vergl. Abschnitt 9.3) von Bedeutung, sondern auch die Kubatur des zu untersuchenden Gebäudes, inklusive der Ventilationsbedingungen oder spezieller Details (z.B. Unterzüge) und die Lage der eingelagerten Brandlasten. Der Grad der zu berücksichtigen Details richtet sich nach der Art der eingesetzten Nachweismethoden. Die Zusammenstellung der notwendigen Gebäudedaten erfolgt hier an einem der ausgesuchten Lagerbeispiele, wobei das größere von beiden Lagern untersucht wird (ca. 400 t Lager, entsprechend Lagerabschnitt III für VbF A III und nichtbrennbare Flüssigkeiten).

Das zweite und kleinere Lager (unter 100 t) wird bei den Nachweismethoden nicht weiter betrachtet. Es handelt sich um eine Lagerfläche von ca. 200 m² für Pflanzenschutzmittel. Der Bereich ist mit optischen Rauchmeldern (Aufschaltung zu einer ständig besetzten Warte und zur Feuerwehrleitstelle) ausgestattet und verfügt gleichzeitig über eine automatische Gaslöschanlage. Die Gaslöschanlage hat eine Vorwarnzeit von 30 Sekunden.

9.2.2 BAULICHE GEGEBENHEITEN

Die für eine Beurteilung eines notwendigen Brandschutzkonzeptes zu führenden Nachweise werden im Folgenden am Beispiel eines Großhandelslagers mit einer Nutzfläche von 2160 m² erörtert. Das Lager ist durch F 90-Wände mit T 90-Schiebetüren in fünf Brandbekämpfungsabschnitte (Bezeichnung nach DIN 18230-1) unterteilt. Das Lager besitzt eine Sprinkleranlage und eine CO₂-Löschanlage. Die Anlagen sind nicht redundant installiert. Die Rauchabführung ist durch eine Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA) sichergestellt, die teilweise automatisch, teils manuell zu öffnen ist. Die mit Riegeln verschlossenen Rolltore müssen im Einsatzfall durch die Feuerwehr geöffnet werden. die Zuluft müssen im Einsatzfall durch die Feuerwehr geöffnet werden.

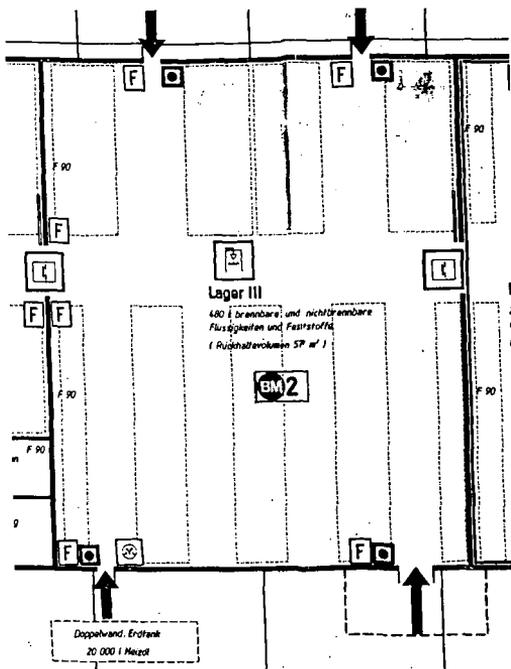


Abbildung 9.1: Skizze des Beispiellagers der Feuerwehr Hannover; Kapazität 400 t

Im vorliegenden Fall wird nur das sog. Teillager III untersucht (Abbildung 9.1), in dessen Bereich eine RWA und eine Sprinkleranlage („nass“) installiert sind. Das Teillager wird für VbF AIII und für nichtbrennbare Flüssigkeiten genutzt. Die Lagerfläche beträgt 720 m² bei einer Kapazität von 400 t. Die mittlere Höhe beträgt 6 m. Das Lager ist für Block- und Regallagerung vorgesehen. Es sind insgesamt 7,2 m² RWA-Fläche und 9,1 m² Zuluftfläche vorhanden.

9.2.3 ERFASSUNG DER BRANDLASTEN

Auf eine detaillierte Auflistung der Brandlasten wird verzichtet. Eine Übersicht über die vorhandenen Brandlasten wird in den folgenden Tabellen gegeben. Neben der Bezeichnung des brennbaren Stoffes und der Art enthalten die Tabellen Angaben zur Masse, dem Heizwert und den m-Faktoren (DIN 18 230). Mit knapp 200 t ist das Lager halb ausgelastet.

Tabelle 9.2 Brandlasten im Regallager

Lfd.	Brennbarer Stoff	Art des Stoffes	Masse (kg)	m-Faktor	Heizwert (MJ/kg)
1	Paletten	Holz	1 892	1	17.28
2	Wickelfolien	LD-PE	28	0.5	43.92
3	Faltschachtel	Karton	1 197	0.5	15.12
4	Säcke	Papier	42	0.5	15.12
5	Säcke	PE	entfällt	0.5	43.92
6	Behälter	PE	2 803	0.5	43.92
7	Produkt	PSM	83 000	1.0	20 ¹⁾

Tabelle 9.3 Brandlasten im Blocklager

Lfd.	Brennbarer Stoff	Art des Stoffes	Masse (kg)	m-Faktor	Heizwert (MJ/kg)
1	Paletten	Holz	2 158	1	17.28
2	Wickelfolien	LD-PE	59	0.5	43.92
3	Faltschachtel	Karton	1 613	0.5	15.12
4	Säcke	Papier	entfällt	0.5	15.12
5	Säcke	PE	135	0.5	43.92
6	Behälter	PE	1 746	0.5	43.92
7	Produkt	PSM	95 000	1.0	20 ¹⁾

¹⁾ Mittelwert, da auch nicht brennbare Produkte vorhanden

9.2.4 EINGANGSGRÖSSE FÜR DIE BERECHNUNGEN: ENERGIEFREISETZUNGS- RATEN

Für die rechnerische Erfassung der Brandwirkungen über Nachweisverfahren, außer bei vereinfachten Nachweisverfahren wie z. B. der DIN 18230, stellt das Brandszenario, und die damit einhergehende Festlegung der Energiefreisetzungsrates die zentrale Eingabegröße dar. Nach heutigen Kenntnissen kann die Energiefreisetzungsrates bislang nur für bestimmte Einzelfälle rechnerisch ermittelt werden. Im Allgemeinen muss die Energiefreisetzungsrates aus Versuchen bestimmt werden.

Eine Basis für die Energiefreisetzungsrates stellen die Brandversuche in Lageranordnung dar, die im Rahmen dieses Projektes am iBMB durchgeführt worden sind (Abschnitt 7). Dort hat sich ergeben, dass auf der sicheren Seite liegend ein quadratischer Anstieg der Energiefreisetzungsrates zu verwenden ist (vergl. Abschnitt 8). Diese Grundannahmen werden im folgenden Abschnitt 9.3 beschrieben.

9.3 BRANDSZENARIEN UND BRANDAUSBREITUNG

9.3.1 ANFORDERUNGEN

Der Brand stellt ein Schadensereignis dar, beim dem durch die schnelle Freisetzung von Energie und chemischen Reaktionsprodukten aus der Verbrennung eine Gefährdung für Personen und Sachen auftritt. Ein „natürlicher“ Brand (Schadenfeuer) durchläuft dabei die Phasen von der Entzündung über die Brandentwicklung (Brandausbreitung) bis hin zum fortentwickelten Brand bzw. Vollbrand. Nachdem der Brennstoff größtenteils umgesetzt ist, klingt der Brand ab. Der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzung und der Produktion von Rauch mit allen seinen Bestandteilen hängt von den brennenden Stoffen ab. Dies sind

- Art der Brandlasten,
- Menge der Brandlasten,
- Zusammenstellung der Brandlasten und
- geometrische Anordnung.

Außerdem wird der Brandverlauf auch durch die Eigenheiten des betroffenen Gebäudes bzw. Gebäudeabschnitts beeinflusst:

- Größe des Gebäudes / Gebäudeabschnitts,
- Physikalische / chemische Eigenschaften der Bauteile und Einbauten,
- Art der Ventilation (natürlich oder maschinell),
- Größe der Ventilationsöffnungen bzw. Kapazität der maschinellen Entrauchungsmaßnahmen,
- Lage der Ventilationsöffnungen.

Weiterhin ist die Brandentstehung selbst für den weiteren Brandverlauf von Bedeutung:

- Art und Intensität der Zündquelle sowie
- Lage der Zündquelle im Brandraum selbst und ihre Anordnung zu anderen Brandlasten.

Die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr oder durch stationäre Anlagen verschiedenster Art stellt einen erheblichen Eingriff in den zeitlichen Verlauf des Brandes dar: Durch diese Einwirkung tritt eine drastische Reduzierung der Energiefreisetzung und Veränderung der Entstehung von (mehr oder weniger gefährlicher) Reaktionsprodukten ein.

Diese Parameter haben einen Einfluss auf die Entzündungs-, Brandentwicklungs- und Vollbrandphase. Durch sich überlagernde Effekte ändern sich die Randbedingungen, so dass eine Beschreibung des Brandverlaufes deutlich erschwert wird. So hängen die relative Energiefreisetzungsrate, die relative Abbrandrate, die effektive Verbrennungswärme, die Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute sowie die spezifische Rauchentwicklung nicht nur von der Brandlast selbst, sondern auch von den Randbedingungen des Brandraumes und der Ventilation ab. Weiterhin haben die temperaturabhängigen physikalischen Eigenschaften (z. B. Dichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, konvektiver und radiativer Wärmeübergang) der Umfassungsbauteile Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Brandraum. Dadurch wird die chemische Umwandlung der Baustoffe im Verlauf eines Brandes beeinflusst. Die Geometrie des Brandraums (Abmessungen) ist relevant. Die Ventilationsbedingungen können sich im Laufe des Brandes ändern, z. B. durch Vergrößerung der Öffnungsflächen bei Zerschlagen von Glasfenstern oder Schmelzen von Lichtkuppeln aus Kunststoff. Das manuelle oder automatische Öffnen von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) stellt auch eine Veränderung der Ventilationsrandbedingungen dar und ist bei der Berechnung zu berücksichtigen.

Diese große Vielfalt an einzelnen Parametern und Wechselwirkungen kann bei der Beurteilung der Brandentwicklung nicht vollständig berücksichtigt werden. Zum einen sind die Parameter, die eine theoretische Beschreibung des Feuers ermöglichen könnten, nur in bestimmten Fällen bekannt. Zum anderen sind die Wechselwirkungen der einzelnen Wechselwirkungen untereinander unzureichend erforscht und beschrieben. Außerdem ist auch zu bedenken, dass ein Feuer an unterschiedlichen Orten innerhalb eines Gebäudes bzw. Gebäudeabschnitts entstehen kann und allein aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen im Gebäude auch stark voneinander abweichende zeitliche Verläufe entstehen können.

Selbst wenn es also möglich ist, eine „Momentaufnahme“ des Gebäudes bzw. Gebäudeabschnitts vorzunehmen, muss die Bewertung der Brandrisiken und darauf aufbauend ein individuelles Schutzkonzept alle möglichen Brandverläufe abdecken. Soll die Nutzung des Gebäudes bzw. Gebäudeabschnitts nicht von Anfang an zu stark eingeschränkt werden, so sind mögliche Änderungen in der Ausstattung, Installation und Nutzung einzubeziehen, wenn über Brandrisiken und ein Schutzkonzept nachgedacht wird. Dies führt zu einer das Brandrisiko abdeckenden Betrachtungsweise.

Einleitend wurde auf die große Vielfalt bei den in einem Gebäude bzw. Gebäudeabschnitt denkbaren Brandverläufen eingegangen. Die Vielfalt beruht unter anderem auf der Unkenntnis über physikalisch/chemische Prozesse bei der Verbrennung von bestimmten Brandlasten, selbst wenn die Randbedingungen – Geometrie, Art der Umfassungsbauteile, Ventilation – bekannt sind. Selbst wenn diese Unkenntnis zum allgemeinen Verlauf von Schadenfeuern nicht bestände, wäre ein Vielzahl von möglichen Brandverläufen zu untersuchen, um den für die spezielle Gebäudesituation kritischsten herauszufinden. Aus solcher Untersuchung resultiert ein Brandverlauf, der alle möglichen Risiken abdeckt. Die Vorgehensweise muss so erweitert werden, dass auch die auf den unzureichenden Kenntnissen zum Brandverhalten von verschiedenen Brandlasten durch Wahl eines konservativen Brandverlaufs abgedeckt werden. Weiterhin ist es notwendig, Nutzungsänderungen durch Wahl eines entsprechenden Brandverlaufs zu berücksichtigen. Zusammenfassend führt dieses Vorgehen zur Forderung, dass durch die Bestimmung eines Brandverlaufs ein Brandszenario festgelegt wird, das alle möglichen / denkbaren Risiken für ein Gebäude / Gebäudeabschnitt abdeckt.

- Das ermittelte Brandszenario ist für die möglichen Risiken abdeckend.
- Das gewählte Bemessungsfeuer ist in der Wirkung dem ermittelten Brandszenario äquivalent.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen ist es notwendig, dass die Brandszenarien für die Auslegung von Brandschutzmaßnahmen auf der Basis konservativer Annahmen aufgestellt werden. Es kann angenommen werden, dass ein tatsächliches Schadenfeuer wahrscheinlich nicht so heftig verlaufen wird. Dabei ist es nicht notwendig, dass der zeitliche Verlauf des Schadenfeuers bzw. des die Risiken abdeckenden Brandszenarios, gegeben durch die Abbrandrate oder Energiefreisetzungsrate, mit dem zeitlichen Verlauf des Bemessungsfeuers übereinstimmt. Wichtig ist aber, dass die Äquivalenz in der Wirkung von beiden nachgewiesen ist.

Es ist davon auszugehen, dass einzelne Risiken nicht durch ein und dasselbe Brandszenario abgedeckt werden können. Als Beispiel kann hier der Unterschied zwischen thermischer Wirkung (Temperaturerhöhung) und Rauchausbreitung genannt werden: Die Erfahrung hat gezeigt, dass ein Brand mit verhältnismäßig kleiner Energiefreisetzungsrate auch nur eine geringe thermische Wirkung aufweist und somit zu geringeren Anforderungen an Bauteile führt. Ein derartiger Brand kann aber unter bestimmten Randbedingungen zu einer erheblich stärkeren Verrauchung führen, wodurch dieser Brand gegebenenfalls auslegungsbestimmend für die Leistungsfähigkeit einer Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA) sein kann. Für die Abdeckung der Risiken für Bauteile (thermische Wirkung) ist ein Brandszenario mit hoher Energiefreisetzungsrate zu wählen.

Bei einer Nutzungsänderung eines Gebäudes / Gebäudeabschnitts ist auf jeden Fall zu prüfen, ob die Brandschutzmaßnahmen, die auf Basis der aus der ursprünglichen Nutzung hergeleiteten Brandszenarios ergriffen wurden, auch weiterhin ihre Gültigkeit haben. Höhere Risiken bei der neuen Nutzung müssen durch angepasste Bemessungsfeuer abgesichert sein, die den Brandszenarios mit höherem Risikopotential äquivalent sind. Beispiel für fatale Konsequenzen einer Nutzungsänderung ohne Prüfung des Brandschutzkonzepts bzw. der Grundlagen für die Bemessung ist das Werk Schweizerhalle der Sandoz AG. Hier wurde ein Gebäude, welches ursprünglich für die Lagerung von Armaturen vorgesehen war, für die Lagerung von Pflanzenschutzmitteln genutzt. Die Konsequenzen sind heute allgemein bekannt.

9.3.2 BESCHREIBUNG DES BRANDSZENARIOS

Abhängig vom zu erfüllenden Schutzziel muss eine mehr oder weniger detaillierte Beschreibung des Brandszenarios erfolgen. Im weiteren sollen die Brandszenarien für zwei verschiedene Schutzziele betrachtet werden:

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

1. Die Flucht und Rettung von Personen und die Ergreifung wirksamer Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr muss gewährleistet sein.
2. Das Gebäude bzw. der Gebäudeabschnitt soll durch den Brand in seiner Standsicherheit nicht gefährdet werden.

Von den Schutzzielen wird nur das erste vom Gesetzgeber ausdrücklich gefordert, wobei hier die Standsicherheit des Gebäudes zumindest für den Zeitraum der Flucht und Rettung vorausgesetzt werden muss.

9.3.2.1 BRANDENTSTEHUNG UND BRANDAUSBREITUNG

Im Gegensatz zur „integralen“ Beschreibung eines (fortentwickelten) Brandes für die Bauteilauslegung muss bei der Beurteilung von Flucht- und Rettungsmöglichkeiten und der Durchführung von Löschmaßnahmen auch der Wirksamkeit von automatischen Lösch- und Brandmeldeanlagen, sowie die Wirkung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen berücksichtigt werden. Die Beschreibung des Brandverlaufs in der Entstehungs- und Ausbreitungsphase, also vor dem Übergang in den fortentwickelten Brand und in den Vollbrand, ist eine wichtige Voraussetzung für die Auslegung von Brandschutzmaßnahmen, die dem Schutz von Personen dienen und wirksame Löscharbeiten ermöglichen. Daher sind die möglichen Brandentwicklungsphasen sorgfältig zu untersuchen.

Für eine brandschutztechnische Dimensionierung sollte mehr als ein Brandszenario untersucht werden, wobei eine besondere Bedeutung auf der Auswahl unterschiedlicher Brandentwicklungszeiten und Energiefreisetzungsraten gelegt werden sollte. Hieraus ergibt sich eine Sensitivitätsanalyse, die bei der Auswahl des „worst case“ Brandszenarios behilflich ist. Hierbei ist der „schlimmste Fall“ bzw. Auslegungsbrand nicht unbedingt das in der Energiefreisetzung stärkste Feuer, sondern kann z.B. auch durch ein lokales Feuer in unmittelbarer Umgebung von bestimmten Bauteilen oder durch ein Feuer mit hoher Rauchgasentstehung oder starker Plumeeinmischung gegeben sein.

Für den Bereich der Brandentwicklungszeiten und Energiefreisetzungsraten sind nur wenige verwertbare experimentelle Daten in der Literatur verfügbar. Zur Bestimmung der Energiefreisetzungsrates wurde in der folgenden Reihenfolge vorgegangen:

- Auswahl sorgfältig durchgeführter großmaßstäblicher Versuche mit dem passenden Untersuchungsgegenstand, d. h. gleiche oder ähnliche Brandlastart und Brandlastanordnung, vergleichbare Raumgeometrie und Ventilationsbedingungen,
- Sammeln experimenteller Daten aus einem Industrie-Kalorimeter oder ähnlichen Untersuchungsverfahren, über die durch direkte (kalorimetrische Bewertung) oder indirekte (Abbrandrate) Vorgaben für eine Energiefreisetzungsrate abgeleitet werden können,
- Sichtung statistischer Daten und Brandereignisse,
- Aufstellung eines quadratischen Ansatzes zur Vorgabe von Energiefreisetzungsrate und Entstehungsraten von Brandprodukten.

Bei dieser Vorgehensweise müssen die Forderungen nach Äquivalenz zwischen dem risikogerechten Brandszenario und Bemessungsfeuer beachtet werden. Eine falsche Wahl des Bemessungsfeuers würde zu geringe Anforderungen an die Brandschutzmaßnahmen bewirken bzw. dem Schutzziel eines einzelnen Gebäudes nicht gerecht werden. Bei einem erheblichen Überschätzen des relevanten Brandszenarios würden sich überzogene Brandschutzanforderungen ergeben, welche die Kosten für den Brandschutz unnötig in Höhe treiben.

9.3.2.2 FORTENTWICKELTER BRAND

Für das Schutzziel Standsicherheit sind eher globale Annahmen zum Brandverlauf zu treffen. Da die Standsicherheit insgesamt gewährleistet werden soll, ist auch der Brand „integral“ zu betrachten. Das Risiko für ein Bauteil wird entsprechend über integrale Größen – vornehmlich Brandlastdichte als Energiemenge pro Fläche (Masse \times Heizwert pro Fläche) – beschrieben. Aus dieser Betrachtung resultiert ein Brandszenario mit maximaler thermischer Belastung, die vornehmlich durch der Brandlastdichte bestimmt ist. Eine Abminderung kann erfolgen, wenn z. B. bei niedriger relativer Energiefreisetzungsrate, unvollständiger Energiefreisetzung oder Brandlastumsetzung, bei wirksamen Wärmeabzugmaßnahmen (RWA) oder bei Vorhandensein von Kapazitäten zur Energieaufnahme (Wärmesenken) eine nennenswerte Verringerung der Energiemenge nachweisbar ist. Sehr schnell abbrennende Stoffe können zu einer verhältnismäßig kurzen, aber intensiven thermischen Belastung führen, die größer als die thermische Belastung von Auslegungsbränden nach Norm sein kann.

Diese Vorgehensweise wird in der Industriebaunorm DIN 18230 durch das Prinzip der äquivalenten Branddauer angewendet, wobei das Abbrandverhalten der Brandlasten durch den Abbrandfaktor m und die Wärmeabfuhr durch Rauch- und Wärmeabzugsanlagen durch den Wärmeabzugsfaktor w berücksichtigt werden. Für den Bereich von kerntechnischen Anlagen steht durch das vereinfachte Nachweisverfahren gemäß KTA 2101.2 ebenfalls ein Nachweis zur Verfügung, der auf der integralen Bewertung beruht. Dieses Verfahren ist für den Fall von ventilationsgesteuerten Bränden anwendbar. Dem Verfahren liegt zugrunde, dass die Energiefreisetzung näherungsweise proportional zum umgesetzten und im Fall des ventilationsgesteuerten Brandes zum zugeführten Sauerstoff ist. Weiterhin kann bei dem Verfahren der Einfluss der Zuluftmenge berücksichtigt werden. Das Abbrandverhalten der Brandlast wird dabei durch die effektive Verbrennungswärme als Produkt aus Heizwert und Verbrennungseffektivität χ charakterisiert.

9.3.3 EREIGNISSE MIT EINFLUSS AUF DAS BEMESSUNGSFEUER

9.3.3.1 ALLGEMEIN

Das Brandszenario ist durch die baulichen und anlagentechnischen Randbedingungen und die Nutzung (Brandlasten, Zündquellen) definiert. Bei dieser Definition ist auch zu beachten, dass beispielsweise nach Erreichen des Flashover-Zeitpunktes der Brandverlauf sich in Abhängigkeit von den aktuellen Ventilationsbedingungen entweder brandlast- oder ventilationsgesteuert einstellt. Ereignisse wie die Aktivierung von automatischen Löschanlagen, das Öffnen von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, die Zerstörung von Fenstern oder anderen Öffnungsabschlüssen haben einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Brandes.

9.3.3.2 VERÄNDERUNGEN DURCH EINEN FLASHOVER

Der Flashover wird durch das schlagartige Entzünden fast aller brennbaren Stoffe im Brandabschnitt charakterisiert. Die dem Wärmestrom ausgesetzten Brandlasten setzen Pyrolysegase frei, die durch das vorhandene Feuer gezündet werden. Die sich daraufhin einstellende Brandphase ist der fortentwickelte Brand, der brandlast- oder ventilationsgesteuert ablaufen kann.

9.3.3.3 EINFLUSS VON AUTOMATISCHEN LÖSCHANLAGEN AUF DEN BRAND- VERLAUF

Durch die Aktivierung automatischer Löschanlagen wird der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrates beeinflusst. Bei einer richtig ausgelegten automatischen Löschanlage wird ihre Aktivierung in der Brandentstehungsphase stattfinden. Je eher automatische Löschanlagen auf den Brand einwirken können, desto wirksamer kann das Feuer bekämpft oder gelöscht werden. Die Aktivierung einer automatischen Löschanlage sollte im Regelfall über eine Brandmeldeanlage zur Feuerwehr weitergemeldet werden.

Im Regelfall kann nach der Auslösung der Löschanlage davon ausgegangen werden, dass der Brand kontrolliert und somit die Energiefreisetzungsrates auf einem konstanten niedrigen Niveau gehalten wird. Sofern unterstellt werden kann, dass die Löschanlage den Brand innerhalb eines bestimmten Zeitraumes zum Verlöschen bringt, wird für die Energiefreisetzungsrates vereinfachend eine lineare Abnahme über diesen Zeitraum berücksichtigt.

Eine ähnliche Wirkungsweise wird von Gaslöschanlagen erzielt, sobald die notwendige Konzentration des Löschgases im Brandraum erreicht ist.

Nationale und internationale Erfahrungen belegen die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen, die gemäß den Regeln der Technik errichtet und gewartet werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass es trotz vorhandener Sprinklerung zu längeren Bränden mit nicht vernachlässigbarer Energiefreisetzung kommen kann, weil die Sprinkleranlage entweder nicht ordnungsgemäß funktioniert oder es aufgrund lokaler Abschirmung des Brandgutes nur bei Teilerfolgen des Löschvorganges bleibt [9-6, 9-7, 9-8, 9-9, 9-10]

Der Verlauf gesprinkelter Brände hängt von folgenden Parametern ab:

- Verlauf des Brandes in der Anfangsphase,
- Auslösezeitpunkt von Sprinklern,
- *Wirksamkeit der Sprinkler und Abklingverhalten des Brandes nach Auslösung.*

Bis zur Auslösung der Sprinkler verläuft ein Brand ungestört. Der Auslösezeitpunkt t_A hängt einerseits von den wählbaren Eigenschaften der Sprinkler - Erwärmungsverhalten (RTI-Wert) und Auslösetemperatur T_A - ab. Andererseits ergibt sich der Zeitpunkt als Funktion der *Energiefreisetzungsrates, der Höhenlage der Sprinklerebene über dem Brandherd und dem horizontalen Abstand des ersten Sprinklers von der Achse der aufsteigenden Heißgase.*

Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe von Modellansätzen für die Temperaturverläufe im aufsteigenden Heißgasstrom (Plume) und im horizontalen Strom unter der Decke (ceiling jet) theoretisch beschrieben werden.

Exemplarisch wurden nach diesen Ansätzen die Auslösezeitpunkte t_A für Sprinkler mit folgenden in Praxis häufig vorkommenden Kennwerten berechnet:

$$RTI = 80 \sqrt{\text{m} \cdot \text{s}} \quad \text{schnelles Ansprechen,}$$

$$RTI = 150 \sqrt{\text{m} \cdot \text{s}} \quad \text{langsames Ansprechen,}$$

$$T_A = 68 - 72 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Auslösetemperatur.}$$

Dabei wird für den Brandraum folgende Geometrie vorausgesetzt:

$$A = 3200 \text{ m}^2 \quad \text{Grundfläche (mittlerer Wert),}$$

$$h = 3 \text{ m} \quad \text{Geschossbau,}$$

$$6 \text{ m} \quad \text{normale Halle,}$$

$$10 \text{ m} \quad \text{hohe Halle.}$$

Die Auswirkung der variierten Parameter auf die Zeit t_A bis zum Ansprechen des ersten Sprinklers ist aus Tabelle 9.4 zu ersehen. Man erkennt, dass bei dem größeren RTI-Wert die Zeitdauer t_A größer wird; das gleiche gilt für einen größeren Abstand r_s des Sprinklers von der Plume-Achse. Gemessen an dem Einfluss der Raumhöhe spielen die Unterschiede aber eine untergeordnete Rolle. Deshalb wird im folgenden auf eine Variation dieser Parameter verzichtet.

Für die Abklingphase eines Brandes nach Auslösung der Sprinkler geht man nach [9-11] davon aus, dass nach Auslösung der Sprinkler keine weitere Brandausbreitung mehr erfolgt und die Energiefreisetzungsrate daher höchstens konstant bleibt. Wenn nachgewiesen werden kann, dass in der jeweiligen Konfiguration mit einer Ablöschung zu rechnen ist, darf ein linearer Abfall der Energiefreisetzungsrate mit einer spezifischen Zeitkonstanten angenommen werden.

Tabelle 9.4 Auslöszeitpunkt t_A des ersten Sprinklers bei variierten Randbedingungen

Brandausbreitung	RTI	Raumhöhe h in m	t_A in s	
			$r_s = 2,8$ m	$r_s = 4,2$ m
Langsam	80	3	530	680
	150	3	580	700
	80	6	780	900
	150	6	810	960
	80	10	1160	1320
	150	10	1200	1360
Schnell	80	3	200	240
	150	3	230	270
	80	6	260	300
	150	6	275	330
	80	10	350	400
	150	10	372	420

Im folgenden werden beide Fälle betrachtet:

- nach Sprinklerauslösung linearer Abfall der Energiefreisetzungsrate (Löschen des Brandes),
- nach Sprinklerauslösung konstante Energiefreisetzungsrate (Kontrollieren des Brandes).

Die aus der Annahme a) resultierenden Verläufe der Energiefreisetzungsrate für unterschiedlich hohe Räume und unterschiedliche Brandausbreitungsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 9.2 dargestellt.

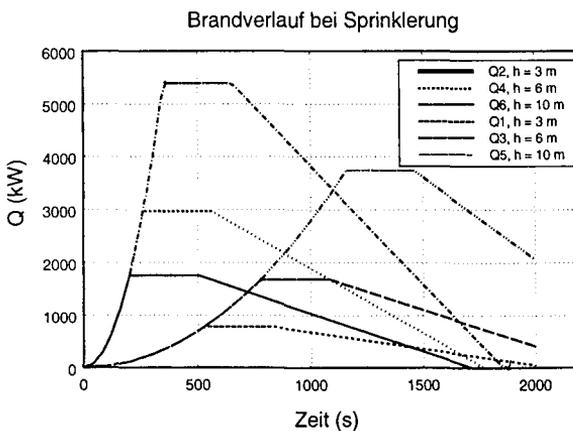


Abbildung 9.2 Energiefreisetzungsrate für unterschiedliche Raumhöhen und Brandausbreitungsgeschwindigkeiten

Aufgrund der durch Sprinklerwirkung begrenzten bzw. kontinuierlich reduzierten Energiefreisetzungsrate ist auch eine entsprechend geringere Rauchgasproduktion zu erwarten. Die Rauchgasproduktion (RP) ergibt sich nämlich als Funktion der Energiefreisetzungsrate (\dot{Q}), der Steighöhe der Rauchgase (Z) und des Rauchpotentials der Brandlast:

$$RP = f(\dot{Q}^{1/3}, Z^{5/3}, \text{Rauchpotential}).$$

Dadurch lassen sich die Anforderungen an den Rauchabzug bei einer Sprinklerung reduzieren.

9.3.3.4 EINFLUSS EINES FEUERWEHRANGRIFFES AUF DEN BRANDVERLAUF

Ein Löschangriff der Feuerwehr kann zu jeder Zeit des Brandverlaufes einsetzen. Über den Zeitpunkt des Eingreifens und die Wirksamkeit der Löschmaßnahmen lassen sich keine pauschalen Angaben machen. Hier sind für das konkrete Projekt im Kontakt mit der örtlichen Feuerwehr die zeitlichen Ereignisse zu beurteilen.

9.3.3.5 ABKLINGPHASE

Wenn ein großer Teil der Brandlast im Gebäude verbraucht ist und/oder keine weitere Brandausbreitung auf benachbarte Räume oder Gebäude stattfindet, setzt die Abklingphase im Brandverlauf ein. In Ermangelung ausreichend abgesicherter Informationen wird davon ausgegangen, dass die sich Energiefreisetzungsrate verringert, wenn 80% bis 90% der anfänglich vorhandenen Brandlast verbrannt ist. Der Rest der Brandlast wird mittels einer linear abfallenden Energiefreisetzungsrate umgesetzt.

9.3.4 ANSÄTZE FÜR DIE BRANDENTWICKLUNG

9.3.4.1 QUADRATISCHER ANSATZ

Die meisten Brände wachsen relativ langsam an, wenn nicht als Brandlast brennbare Flüssigkeiten, brennbare Gase oder leicht brennbare Feststoffe wie Polymerschäume vorhanden sind. Mit wachsender Ausbreitung des Feuers wird auch der Anstieg der Energiefreisetzungsrate deutlich erhöht. Für die Bemessung wird deshalb ein exponentieller oder

quadratischer Ansatz für die Energiefreisetzungsrate benutzt. Diese Ansätze behalten ihre Gültigkeit, bis die Abklingphase des Brandes einsetzt.

Das Brandszenarium wird in Anlehnung an internationale Vorschläge [9-11] durch den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrate wie folgt beschrieben:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \cdot (t - t_0 / t_g)^2 \quad (9.1)$$

oder

$$\dot{Q}(t) = \alpha \cdot (t - t_0)^2 \quad (9.2)$$

wobei

\dot{Q}_0 1000 kW

t_g Brandentwicklungszeit, in der der Brand - in Abhängigkeit der Brandentwicklungsgeschwindigkeit - auf die Energiefreisetzungsrate \dot{Q}_0 von 1000 kW anwächst,

t Zeit in Sekunden nach der Zündung,

t_0 Zeitdauer der „Inkubation“ des Feuers in Sekunden,

α Charakteristischer Brandentwicklungsparameter.

Tabelle 9.5 Brandentwicklungszeit in Abhängigkeit der Brandentwicklungsgeschwindigkeit (nach [9-11, 9-12])

Brandentwicklungs- geschwindigkeit	Dauer bis zum Erreichen von 1 MW	Wertebereich des Koeffizienten Einheit [kW s ²]
sehr schnell	< 73 s	0,1876 ≤ α
schnell	73 – 146 s	0,0469 ≤ α < 0,1876
mittel	146 – 292 s	0,0117 ≤ α < 0,0469
langsam	292 – 587 s	0,0029 ≤ α < 0,0117
sehr langsam	> 587 s	α < 0,0029

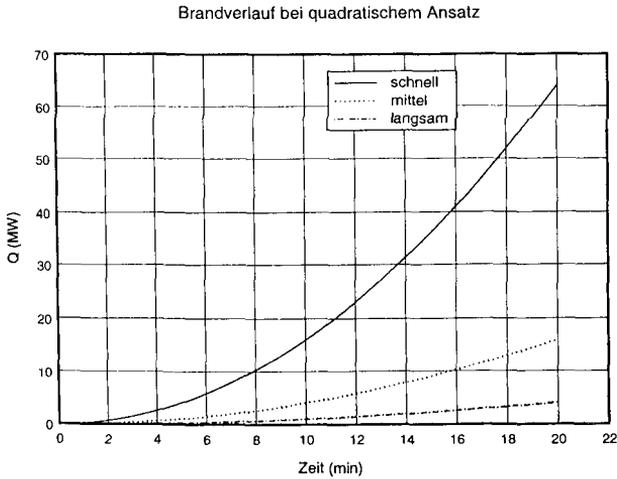


Abbildung 9.3 Energiefreisetzungsrate bei unterschiedlicher Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Das Spektrum der realen Brandverläufe wird durch die langsame, mittlere und schnelle Brandausbreitung hinreichend eingegrenzt; Abbildung 9.3 zeigt die entsprechenden Energiefreisetzungsrate im Vergleich. Die Kategorie „sehr schnell“ wird vorerst nicht betrachtet. Die Inkubationszeit t_0 ist für die praktische Anwendung schwierig zu bestimmen. Sie hängt unter anderem ab vom Material der Zündquelle selber, der geometrischen Konfiguration oder dem Gegenstand, der zuerst gezündet wurde.

Bei Annahme einer radialen Brandausbreitung mit konstanter Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_b kann $\dot{Q}(t)$ eine zeitabhängige Brandfläche $A_b(t)$ zugeordnet werden:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}^* A_b(t) \tag{9.3}$$

mit

$$A_b(t) = \dot{Q}(t) / \dot{Q}^* = \pi (v_b \cdot t - t_0)^2 \tag{9.4}$$

\dot{Q}^* spezifische Energiefreisetzungsrate in kW/m^2 ,

A_b Brandfläche in m^2 .

In Abhängigkeit von der Art und Anordnung der Brandlasten können die in [9-11] angegebenen spezifischen Energiefreisetzungsraten verwendet werden.

Tabelle 9.6 Klassifizierung der Brandheftigkeit nach [9-11]

Energiefreisetzung	Q^*
Hoch	900 kW/m ²
Mittel	600 kW/m ²
Niedrig	300 kW/m ²
sehr niedrig	150 kW/m ²

Mit Hilfe der vorstehenden Ansätze lässt sich der Brandverlauf von der Brandentstehungsphase bis zur Vollbrandphase realistisch bis konservativ beschreiben. Die Vollbrandphase ist erreicht, wenn praktisch alle vorhandenen Brandlasten entzündet sind.

In diesem Stadium des Brandes ist anhand der vorliegenden Randbedingungen zu prüfen, ob der Brand ventilationsgesteuert oder brandlastgesteuert verläuft. Dabei begrenzt in der Regel die Ventilationssteuerung die Energiefreisetzungsrate und die Brandlaststeuerung (Verbrauch der vorhandenen Brandlast) die Branddauer.

Dabei muss untersucht werden, welche Randbedingungen zur Ventilation vorliegen. Der Luftmassenstrom \dot{m}_L , der durch die Ventilationsöffnungen mit der Fläche A_w (und der Höhe H_w) in das Gebäude eintritt, beträgt näherungsweise

$$\dot{m}_L \approx 0.52 \cdot A_w \cdot \sqrt{H_w} \quad (\text{kg/s}). \quad (9.5)$$

Für den Fall, dass der Brand ventilationsgesteuert abläuft, gilt für die maximal mögliche Energiefreisetzungsrate

$$\dot{Q} = \dot{m}_L \cdot \frac{\Delta H_c}{r}, \quad (9.6)$$

oder im Fall eines brandlastgesteuerten Brandes

$$\dot{Q} = \dot{m}_b \cdot \Delta H_c, \quad (9.7)$$

mit

ΔH_c = effektive Verbrennungswärme der Brandlast (MJ/kg),

\dot{m}_b Abbrandrate (kg/s),

r stöchiometrischer Luftbedarf (kg Luft / kg Brennstoff).

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

Sowohl die Branddauer als auch die Energiefreisetzungsrate können durch die Wirkung einer Löschanlage oder die Intervention der Feuerwehr begrenzt werden.

9.3.4.2 SCHWELBRÄNDE

Bei Schwelbränden entsteht eine sehr geringe Energiefreisetzungsrate, die durch eine relativ kleine Abbrandrate hervorgerufen wird. Dieser Vorgang kann sich über einen langen Zeitraum erstrecken, der mit der Bildung von brennbaren Gasen einher geht (Pyrolyse). Bei der Bildung dieser unverbrannten Pyrolyseprodukte können in erheblichem Maße das toxische Kohlenmonoxid (CO) und Ruß entstehen.

Die Entstehung und der Fortgang eines Schwelbrandes hängt unter anderem von folgenden Parametern ab:

- Art der Brandlast,
- Menge des Sauerstoffzutritts durch die Ventilationsöffnungen,
- Stärke der Zündquelle.

Eine besondere Gefahr besteht, wenn zu einem schon längere Zeit währenden Schwelbrand die Sauerstoffzufuhr schlagartig vergrößert wird. Dies kann durch zerstörte Fenster, durch unkontrollierte Betriebszustände der mechanischen Zuluft oder durch das Öffnen einer Tür durch Einsatzkräfte zur Brandbekämpfung entstehen. Durch die Vermischung der unverbrannten Pyrolysegase mit dem hinzugetretenen Sauerstoff und dem Vorhandensein einer Zündquelle (ist durch den Schwelbrand vorhanden) kann es jetzt zu einem schlagartigen Durchzünden des Gasgemisches kommen, das zu einer Verpuffung oder Explosion führen kann. Dieses Phänomen wird „Backdraft“ genannt.

9.3.4.3 BRANDLASTEN

Wenn die Brandlasten für ein Gebäude bekannt sind und sich über die Lebensdauer des Gebäudes nur geringfügig ändern, kann das Design Feuer auf den charakteristischen Energiefreisetzungsraten dieser Brandlasten basieren. Wenn aber eine Nutzungsänderung des Gebäudes nicht auszuschließen ist, muss entweder eine weiterreichende Analyse der für

das Gebäude in Frage kommenden Nutzung vorgenommen werden, oder es muss deutlich bei der Dimensionierung auf die Randbedingungen hingewiesen werden. Bei Abweichungen von diesen Randbedingungen verlieren die brandschutztechnischen Lösungen für das Gebäude ihre Gültigkeit. In jedem Fall müssen diese Annahmen ausreichend dokumentiert werden, so dass bei einer eventuellen Nutzungsänderung mit einem angepassten Bemessungsfeuer der vorhandene Brandschutz überprüft werden kann.

Charakteristische Energiefreisetzungsrate können aus Versuchen mit einem industriellen Möbel-Calorimeter (Furniture-Calorimeter) oder anderer auf der Sauerstoff-Verbrauchsmethode basierenden Kalorimetern bestimmt werden. Diese Versuche werden allerdings meist unter sehr guten Ventilationsbedingungen und ohne Einfluss der Umfassungsbauteile durchgeführt. Deswegen ist zu berücksichtigen, dass sich Energiefreisetzungsrate noch erhöhen können, wenn brennbare Stoffe in einem Raum abbrennen, in dem auch eine Rückkopplung durch eine vorhandene Rauchgasschicht und isolierende Wände stattfinden kann.

Durch die Ausbildung einer Heiß- oder Rauchgasschicht und ihre thermische Beeinflussung der brennbaren Inhalte des Brandraumes kann es zu einer vergrößerten Abbrandrate und damit einer vergrößerten Energiefreisetzungsrate kommen. Ein Brand kann dadurch gegebenenfalls in einem unterventilierten Zustand übergehen. Unterventilierte Brände zeichnen sich durch die Bildung von toxischen Produkten und unverbrannten Pyrolysegasen aus.

Die Energiefreisetzungsrate und Brandentwicklung von Wand- und Deckenbekleidungen sowie einzelner Brandlasten (Lagergüter) können unter anderem im Raumbrandversuch nach ISO 9705 (Room Corner Test) bestimmt werden.

Zusammenfassend kann über den Einfluss der Brandlasten auf das Bemessungsfeuer gesagt werden, dass das Bemessungsfeuer durch die Brandeigenschaften von Referenz-Brandlasten charakterisiert werden darf, wenn folgende Punkte beachtet werden:

1. Es werden Brandlasten angenommen, die zu konservativen Annahmen bei den Brand-szenarios führen, die innerhalb der Lebensdauer des Gebäudes auch bei einer Nutzungsänderung als abdeckend angesehen werden können.
2. Die charakteristischen Brandeigenschaften der Produkte wurden unter praxisgerechten Randbedingungen bestimmt.
3. Durch eine Veränderung der Anordnung der Brandlasten dürfen sich keine wesentlich unterschiedlichen Brandszenarien ergeben.

Ein nicht unwesentlicher Teil der Brandlasten in sicherheitsrelevanten Bereichen eines Gebäudes stellen Kabelbrandlasten dar. Das Brandverhalten von Kabelanlagen mit PVC-Ka-

beln ist umfassend untersucht worden. Die in [9-13] dargestellten Ergebnisse stellen eine umfangreiche Datenbasis für die Beschreibung eines möglichen Brandverlaufs und damit für die Festlegung eines Bemessungsfeuers dar. Die Untersuchungen wurden so durchgeführt, dass die ersten beiden Punkte der voranstehenden Anforderungsliste erfüllt sind. In Abbildung 9.4 ist die Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit von der Branddauer dargestellt. Sie ist so bemessen, dass alle experimentellen Ergebnisse eingeschlossen sind. Zusammen mit den in [9-13] enthaltenen Angaben zur Entstehung von Verbrennungsprodukten und zur Rauchentwicklung lassen sich die thermische Belastung von Bauteilen bestimmen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen auslegen.

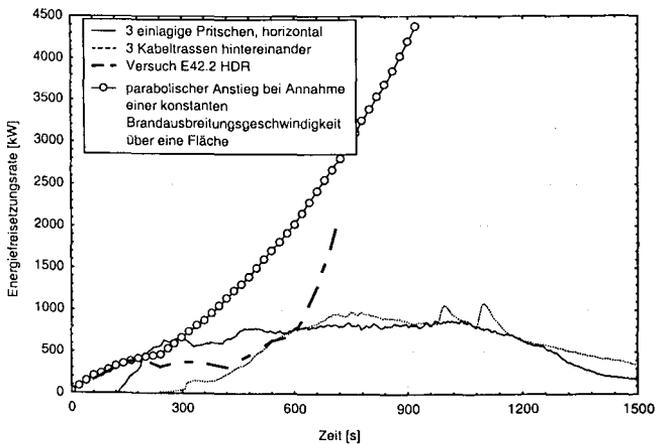


Abbildung 9.4 Energiefreisetzungsrates beim Brand von PVC-Kabeln [9-13]

9.3.4.4 TEMPERATURBEANSPRUCHUNG FÜR DIE BAUTEILAUSLEGUNG

Bei der Wahl des Bemessungsfeuers sind auch in Normen oder Richtlinien vorgegebene thermische Brandbelastungen zu berücksichtigen. Hier ist zuerst die Einheitstemperaturzeitkurve ETK zu nennen, durch die der Temperaturverlauf von typischen Wohnraumbränden abgedeckt wird. Für andere Bereiche gibt es zusätzliche Temperaturkurven, z. B. die Hydrocarbonkurve im Off-Shore Bereich oder Schwelbrandkurve für reduzierte thermische Brandbelastungen. Eine weitere Temperaturbeanspruchung wird in den „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)“ vorgeschrieben.

Diese Temperaturkurven stellen kein Bemessungsfeuer im ursprünglichen Sinne dar, da die Temperatur keinen realen Brandverlauf beschreibt. Ein realer Brand stellt sich in Abhängigkeit von den Brandlasteigenschaften, baulichen Randbedingungen und Ventilationsverhältnissen ein. Aus der Bauteilprüfung ist bekannt, dass in Abhängigkeit vom Baustoff in einer bestimmten Brandkammer unterschiedliche Brennstoffströme (Brandleistungen) benötigt werden, um einen identischen Temperaturverlauf zu bewirken. Auch ist bekannt, dass bei einer Ölbefuerung Bauteile früher versagen als wenn sie bei gleichem Temperaturverlauf mit Gasbefuerung geprüft würden. Trotzdem wird durch diese Temperaturkurven ein äquivalentes Bemessungsfeuer definiert, das die meisten Risiken der thermischen Belastung abdeckt.

9.4 NACHWEIS GEMÄSS DIN 18230-1

Die DIN 18 230-1 dient als ingenieurgemäße Methode für die Bauteilauslegung bei Industriebauten. Dabei gilt für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer der brandschutztechnisch notwendigen Bauteile:

$$\text{erf } t_f = t_a \cdot \alpha_L \cdot \gamma \quad (9.8)$$

mit

$$t_a = q_r \cdot w \cdot c \quad (9.9)$$

Aus den gemäß Tabelle 9.2 und Tabelle 9.3 aufgeführten Brandlasten mit den zugewiesenen m-Faktoren ergibt sich eine rechnerische Brandlast von $q_r = 1449 \text{ kWh/m}^2$. Die Brandlast ist gleichmäßig verteilt. Der Umrechnungsfaktor c für die Art der Umfassungsbau- teile wird mit $c = 0,25$ angesetzt, der w -Faktor beträgt nach den Berechnungen über die An- gaben zu den Ventilationsbedingungen (siehe auch Abschnitt 9.2.1 und 9.2.2) $w = 2,10$. Daraus ergibt sich eine äquivalente Branddauer $t_a = 761 \text{ min}$. Die anlagentechnische Infra- struktur erlaubt bei Vorhandensein einer stationären Löschanlage mit Aufschaltung zur Berufsfeuerwehr (4 Staffeln, entsprechend 24 Personen) eine Reduzierung von t_a mit dem Beiwert $\alpha_L = 0,34$ (kleinstmöglicher Wert gemäß DIN 18230-1). Der Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Brandsicherheitsklassen der untersuchten Bauteile wird zu $\gamma = 1,0$ gesetzt (höchste Anforderungen). Daraus resultiert eine erforderliche Feuerwiderstands- dauer der Bauteile von $\text{erf } t_f = 260 \text{ min}$.

Alle Parameter in den o.g. beiden Gleichungen zur Berechnung von t_f gehen linear ein. In diesem Fall auch der m-Faktor für die Pflanzenschutzmittel (Produkt), weil der Anteil der Pflanzenschutzmittel an der Brandlast bei ca. 95 % liegt. Wird der m-Faktor deshalb von 1,0 auf 0,75 reduziert, so ergibt sich $t_f = 195$ min. Hier bleiben Zweifel, ob ein Nachweis nach DIN 18230-1 bei solchen Lagern zu realistischen Ergebnissen und Beurteilungen führen kann.

9.5 NACHWEIS DER TEMPERATUREN IM PLUMEBEREICH

Durch Berücksichtigung aller die Brandentwicklung bestimmenden Parameter in der Energiefreisetzungsrate können Bemessungsbrände definiert werden. Für die Tragwerksbemessung und die Auslegung von Wärmemeldern und Sprinklern müssen nun die wesentlichen Wirkungen dieser Bemessungsbrände beschrieben werden. Dies geschieht, indem die sich aus den jeweiligen Randbedingungen ergebenden Energiefreisetzungsraten in analytische Ansätze für die Temperaturen im Plume und Ceiling Jet eingesetzt werden.

Der Plume entsteht als Reaktion auf den Verbrennungsvorgang in direkter Abhängigkeit von der Energiefreisetzungsrate. Er bezeichnet den Bereich direkt über dem Feuer, in dem der Ausbrand der noch vorhandenen brennbaren Bestandteile mit leuchtender Flamme vor sich geht und außerdem Luft aus der unmittelbaren Umgebung eingesogen wird. Nach [9-14] durchlaufen alle Brände ein Anfangsstadium, während dem über einer begrenzten Fläche ein Gasstrom infolge des Auftriebs in die oberen Luftschichten des Brandraumes aufsteigt. Dieser Zustand beginnt mit der Entzündung, wird gegebenenfalls durch eine Schwelbrandphase fortgeführt und geht schließlich in die Flammenphase über. Der aufsteigende Gasstrom ist stets turbulent, außer wenn der Brandherd sehr klein ist und sich in der Schwelbrandphase befindet. Der gesamte Massentransport von Rauchgasen und eingemischter Luft findet über den Plume statt. Weitere Details zu den physikalischen Vorgängen im Plume können [9-15] und [9-16] entnommen werden.

Dem Verfahren liegt die Annahme eines lokal begrenzten Brandes (Teilflächenbrandes) zugrunde. Das heißt, die Bauteile werden für den Fall bemessen, dass es direkt unter oder neben ihnen brennt. Die Temperatureinwirkung auf die Bauteile entspricht in diesen Fällen etwa der mittleren Plume-Temperatur.

Zur Ermittlung von Plume-Temperaturen sind zahlreiche Arbeiten im internationalen Rahmen durchgeführt worden. Um aus der Vielzahl von Plumemodellen den für den vorliegenden Fall

am besten geeigneten Ansatz auswählen zu können, müssen zuvor einige Festlegungen in Bezug auf das dem Bemessungsverfahren zugrunde gelegte Brandszenarium gemacht werden. Entscheidend dabei ist die Frage, inwieweit sich bei einem begrenzten Brand in einem großen Gebäude eine Rauchgasschicht ausbilden wird. Die beiden Extremfälle sind einerseits die völlige Abführung der Rauchgase und andererseits die Bildung einer ausgeprägten Heißgasschicht wie bei einem Brand in einem Gebäude gewöhnlicher Größe. Das tatsächliche Szenarium wird zwischen diesen beiden Extremfällen liegen.

Es ist auch bei großzügig ausgelegten Öffnungsflächen nicht damit zu rechnen, dass die Rauchgase vollständig ins Freie abgeführt werden können. Ebenso unwahrscheinlich ist die Bildung einer starken Heißgasschicht, da sich die Rauchgase in einer Industrie- oder Lagerhalle sehr viel weiträumiger verteilen können. Dennoch wird im Bereich des sich ausbreitenden Feuers stets eine mehr oder weniger ausgeprägte Rauchgasschicht entstehen und zwar in Abhängigkeit von Hallengeometrie, Ventilationsbedingungen und Heftigkeit der Brandentwicklung. Auch wenn keine Rauchschrägen angeordnet sind, so sind doch meist Unterteilungen des Dachraumes durch Stahlträger oder Unterzüge vorhandenen und erfüllen je nach Bauteilhöhe die Funktion einer Rauchschräge und hindern den Rauch an der weiteren Ausbreitung. Außerdem verlieren die Rauchgase mit zunehmender Entfernung von der Plume-Achse an Impuls (z. B. durch Reibung und Abkühlung an der Decke), so dass sie wieder herabsinken können. Für den Regelfall wird daher vorausgesetzt, dass die zu bemessenden Bauteile im oberen Plumbereich von einer Heißgasschicht umgeben sind.

Im Plume selbst wird Luft aus der Umgebung eingemischt. Bei Einmischung von heißen Rauchgasen anstelle von kühlerer Umgebungsluft ergeben sich höhere Plume-Temperaturen, so dass die Bauteile stärker beansprucht werden. Nach Untersuchungen in [9-17] kommt es bei Vorhandensein einer Heißgasschicht zu einer „Feedback-Wirkung“: Außerdem stellt sich mit zunehmender Rauchgastemperatur eine verstärkte Wärmestrahlung von der Heißgasschicht auf die Brandlast ein. Dies hat zur Folge, dass das Brandgut rascher pyrolysiert und abbrennt, was ein Anwachsen der Flammen, einen Anstieg der Temperatur der Heißgasschicht und schließlich der Wärmestrahlung auf das Brandgut bewirkt.

Bei der Anwendung der Plume-Ansätze zur Bestimmung der Temperaturen werden in der Regel keine Rauchgasschichten vorausgesetzt, so dass die brandschutztechnische Bemessung bei Verwendung dieser Formeln zu geringe Temperaturen ergeben kann.

Da von einem Brand auf einer begrenzten Fläche ausgegangen wird, muss im Einzelfall stets überprüft werden, ob bereits Flashover-Bedingungen vorliegen. Dies geschieht durch die Kontrolle der Temperatur in der Rauchgasschicht. Von einem Flashover und damit von

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

einem Vollbrand im Brandraum kann ausgegangen werden, wenn die Temperatur größer als 550 °C ist.

Auf Grundlage von umfangreichen Brandsimulationsrechnungen mit einem Mehrraum-Zonenmodell wurden Diagramme entwickelt, aus denen die Temperatur der Rauchgasschicht in Abhängigkeit von der Energiefreisetzungsrate, der Hallengrundfläche, dem Abstand zwischen Brandherd und Decke und den Ventilationsbedingungen entnommen werden kann. Es liegen Diagramme vor für

- Grundflächen von 500 m², 1600 m² und 3200 m²,
- Abstände zwischen Brandherd und Decke von 4 m, 6 m, 10 m und 15 m,
- Energiefreisetzungsraten von 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 und 40 MW,
- Ventilationsverhältnisse zwischen Zu - und Abluft von 0,5%/0,5%, 1,0%/1,0%, 2,0%/2,0%, 2,5%/2,5% und 5,0%/5,0% jeweils bezogen auf die Raumgrundfläche.

Für dazwischen liegende Energiefreisetzungsraten und Abstände kann linear interpoliert werden. Die Umfassungsbauteile des Brandraumes wurden zunächst nicht variiert, da die vier gewählten Parameter den größeren Einfluss auf die Heißgastemperatur haben. Stellvertretend für die Mehrzahl der Industriebauten wurden die umfassenden Wände in Massivbauart und die Decke in Stahltrapezblechbauweise mit Wärmedämmung angenommen. Dabei wurden praxisübliche Maße und Materialien gewählt. Um weitergehende Ergebnisse zu erzielen, können die thermischen Stoffwerte der Umfassungsbauteile variiert werden.

Bei Grundflächen < 500 m² sollte das Verfahren nicht angewendet werden, weil hier mit größerer Wahrscheinlichkeit ein Vollbrand auftritt. Gleiches gilt, wenn die Bedingung $T_{\text{Heißgas}} < 550 \text{ °C}$ nicht eingehalten wird. Für Grundflächen von 3200 m² und mehr werden stets konservative Ergebnisse erzielt.

Es werden drei Bereiche unterschieden, in denen sich das zu bemessende Bauteil befinden kann:

- Fall I: in der Heißgasschicht,
- Fall II: in der Kaltgasschicht,
- Fall III: direkt im Flammenbereich.

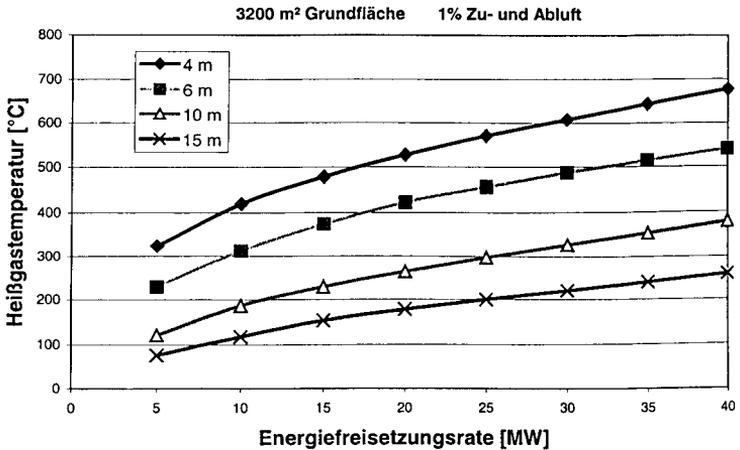


Abbildung 9.5 Heißgastemperatur in Abhängigkeit von der Energiefreisetzungsrate, dem Abstand Brandherd-Decke, der Grundfläche und der Ventilation

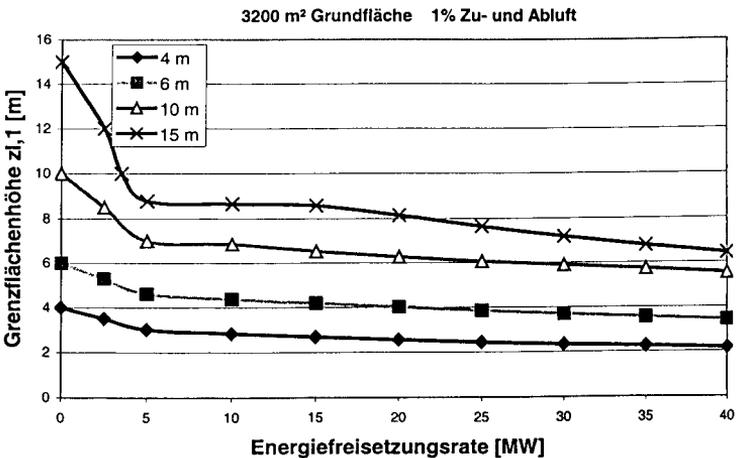


Abbildung 9.6 Grenzflächenhöhe in Abhängigkeit von der Energiefreisetzungsrate, dem Abstand Brandherd-Decke, der Grundfläche und der Ventilation

Für jeden dieser Bereiche existieren spezielle Ansätze, so dass zunächst für jede Energiefreisetzungsrate untersucht werden muss, welcher Fall vorliegt. Im Rahmen der oben be-

schriebenen Brandsimulationsrechnungen wurde neben der Rauchgastemperatur auch der Abstand zwischen Brandherdoberfläche und Unterkante Heißgasschicht ermittelt, der im folgenden mit „Grenzflächenhöhe $z_{i,1}$ “ bezeichnet werden soll.

Bei Kenntnis der Grenzflächenhöhe $z_{i,1}$ kann die Rauchgasschichtdicke y_L leicht berechnet werden. Damit kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob sich das Bauteil in der Heißgas- oder der Kaltgasschicht befindet. Für $z < 0,08 \cdot Q^{2/5}$ muss nach [9-18] Fall III angenommen werden, wobei z die Höhe über dem Brandherd bezeichnet.

$$y_L = H_1 - z_{i,1} \tag{9.10}$$

mit

y_L Rauchgasschichtdicke [m],

H_1 Abstand Brandherd-Decke [m],

$z_{i,1}$ Grenzflächenhöhe (Abstand Brandherd-UK Rauchgasschicht) [m].

Befindet sich das Bauteil in der Heißgasschicht wird ein Ansatz für die Plume-Centerline-temperatur verwendet, der das Vorhandensein einer Heißgasschicht berücksichtigt [9-19]. Das Grundkonzept dieses Ansatzes besteht darin, den realen Brandherd und die Rauchgasschicht durch eine „virtuelle Wärmequelle“ zu ersetzen, die eine andere Energiefreisetzungsrate und einen anderen Abstand zur Decke als der reale Brandherd hat. Als Eingabewert wird neben der Grenzflächenhöhe $z_{i,1}$ und der Rauchgastemperatur $T_{\text{Heißgas}}$ die Temperatur der Kaltgasschicht T_{Kaltgas} benötigt. Sie wird ebenfalls aus Diagrammen entnommen, die mit Hilfe der oben erwähnten Brandsimulationsrechnungen erstellt worden sind. Im Folgenden soll die Anwendung dieses Ansatzes beschrieben werden:

Zunächst wird die Energiefreisetzungsrate Q_1 des realen Brandherdes in einen dimensionslosen Wert umgerechnet.

$$Q_{i,1}^* = \frac{Q_1}{\rho_{\infty,1} \cdot c_{p,\infty,1} \cdot T_{\infty,1} \cdot g^{1/2} \cdot z_{i,1}^{5/2}} \tag{9.11}$$

mit

$Q_{i,1}^*$ dimensionslose Energiefreisetzungsrate des realen Brandherdes [-],

Q_1 Energiefreisetzungsrate des realen Brandherdes [kW],

$\rho_{\infty,1}$ Gasdichte der Kaltgasschicht [kg/m³],

$c_{p,\infty,1}$ spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht [kJ/kgK],

$T_{\infty,1}$ Temperatur der Kaltgasschicht [K],

g Erdbeschleunigung [m/s²],

$z_{1,1}$ Distanz des realen Brandherdes zur Grenzfläche zwischen oberer und unterer Schicht [m].

Anschließend wird die dimensionslose Energiefreisetzungsrate $Q_{1,2}^*$ der „virtuellen Wärmequelle“ berechnet, die sowohl die real vorhandene Energiefreisetzungsrate ersetzt als auch das Vorhandensein einer Heißgasschicht simuliert.

$$Q_{1,2}^* = \left[\frac{1 + C_T \cdot Q_{1,1}^{*2/3}}{\zeta \cdot C_T} - \frac{1}{C_T} \right]^{3/2} \quad (9.12)$$

mit

$Q_{1,2}^*$ dimensionslose Energiefreisetzungsrate der „virtuellen Wärmequelle“ [-],

C_T Konstante (9,115) [-],

Temperaturverhältnis von Rauch- und Kaltgasschicht [-].

Der Abstand $z_{1,2}$ der „virtuellen Wärmequelle“ zur Grenzfläche zwischen oberer heißer Rauchgasschicht und Kaltgasschicht ergibt sich zu:

$$z_{1,2} = \left[\frac{\zeta \cdot Q_{1,1}^* \cdot C_T}{Q_{1,2}^{*1/3} \cdot \left\{ (\zeta - 1) \cdot (\beta^2 + 1) + \zeta \cdot C_T \cdot Q_{1,2}^{*2/3} \right\}} \right]^{2/5} \cdot z_{1,1} \quad (9.13)$$

mit

$z_{1,2}$ Abstand der „virtuellen Wärmequelle“ zur Unterkante der Heißgasschicht [m],

$Q_{1,2}^*$ dimensionslose Energiefreisetzungsrate der „virtuellen Wärmequelle“ [-],

β^2 Konstante (0,913) [-].

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

Mit Hilfe von $z_{1,2}$ lässt sich nun gemäß Abbildung 9.7 die Distanz zwischen der Oberfläche der „virtuellen Wärmequelle“ und der betrachteten Höhenlage, z. B. der Höhe des Untergrundes eines Stahlträgers der Deckenkonstruktion, bestimmen.

$$H_2 = H_1 - z_{1,1} + z_{1,2} \quad (9.14)$$

mit

H_2 Distanz zwischen „virtueller Wärmequelle“ und Decke [m].

Die dimensionslose Energiefreisetzungsrate $Q_{1,2}$ muss für die weiteren Berechnungen in einen dimensionsbehafteten Wert umgeformt werden:

$$Q_2 = Q_{1,2} \cdot \rho_{\infty,2} \cdot c_{p,\infty,2} \cdot T_{\infty,2} \cdot g^{1/2} \cdot z_{1,2}^{5/2} \quad (9.15)$$

mit

Q_2 Energiefreisetzungsrate der „virtuellen Wärmequelle“ [kW],

$\rho_{\infty,2}$ Gasdichte in der Rauchgasschicht [kg/m^3],

$c_{p,\infty,2}$ spez. Wärmekapazität in der Rauchgasschicht [kJ/kgK],

$T_{\infty,2}$ Temperatur in der heißen Rauchgasschicht [K].

Die Berechnung der Temperaturdifferenz zwischen Plume-Centerline und Heißgasschicht erfolgt nach Formel (9.16):

$$\Delta T_{\text{Plume}} = 9,1 \cdot \left[\frac{T_{\infty,2}}{g \cdot c_{p,\infty,2} \cdot \rho_{\infty,2}} \right]^{1/3} \cdot (0,7 \cdot Q_2)^{2/3} \cdot H_2^{-5/3} \quad (9.16)$$

$$T_{\text{Plume}} = T_{\infty,2} + \Delta T_{\text{Plume}} \leq 1200 \text{ °C} \quad (9.17)$$

mit

T_{Plume} Plume-Centerlinetemperatur [K],

ΔT_{Plume} Differenz zwischen Plume-Centerline- und Heißgastemperatur [K].

Die Anwendung der Berechnung von der Plume-Temperaturen unterhalb der Brandraumdecke mit Berücksichtigung einer vorhandenen Heißgasschicht wurde in [9-20] auf Poolbrandversuche mit Brennspritus angewandt. Der Brandraum hat eine Grundfläche von

ca. 45 m^2 und eine lichte Höhe von 6.20 m . Die dort untersuchten Energiefreisetzungsraten liegen im Bereich zwischen 1 MW und 2 MW . Es ergibt sich dort eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen.

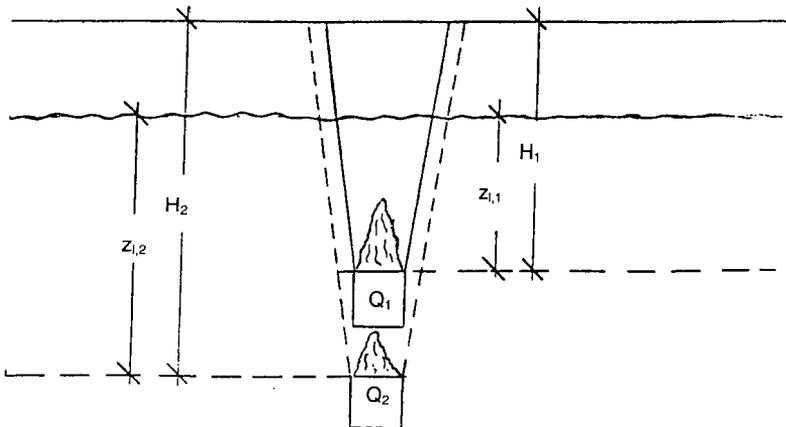


Abbildung 9.7 Ermittlung der Distanz zwischen „virtueller Wärmequelle“ und Decke

Für die brandschutztechnische Bemessung der Bauteile wird die mittlere Plume-Temperatur verwendet, die sich nach [9-21] folgendermaßen ergibt:

$$T_{\text{Plume,m}} = 0,75 \cdot T_{\text{Plume}} + 134 \quad (9.18)$$

mit

$T_{\text{Plume,m}}$ mittlere Plume-Temperatur [K].

Befindet sich das zu bemessende Bauteil nicht direkt an der Deckenoberfläche sondern in der Entfernung h zur Decke (aber in der Heißgasschicht), wird in Gleichung (9.16) anstelle von H_2 der Term $(H_2 - h)$ eingesetzt.

9.6 WÄRMEBILANZRECHNUNGEN MIT MEHRRaum-MEHRZONEN-MODELLEN

9.6.1 ALLGEMEIN

Es existiert weltweit eine Vielzahl von Brandsimulationsmodellen. Die Zielsetzung dieser Brandsimulationsmodelle ist, entsprechend den Aufgabenstellungen, sehr unterschiedlich. Sie reichen von der Beschreibung von Entzündungsvorgängen bis zur Simulation von Brandwirkungen. Für die Auslegung von Brandschutzmaßnahmen sind vor allem die Simulationen (Berechnungen) der Brandwirkungen von großem Interesse. Mit diesen Modellen können transiente Größen wie Temperatur der heißen Rauchgase sowie der kühleren Raumluft, Entwicklung einer Rauchgasschicht, Rauchausbreitung, Aus- und Einströmgeschwindigkeiten durch Ventilationsöffnungen, Konzentrationen der Verbrennungsgase (auch toxischer Bestandteile) etc. berechnet werden, wenn geeignete Eingangsgrößen für die Simulation zur Verfügung stehen. Die Anwendung solcher Modelle bietet sich besonders in Situationen an, bei denen eine Beurteilung der notwendigen Maßnahmen mit Hilfe der standardisierten Regeln nur unzureichend möglich ist und eine experimentelle Untersuchung nur mit großem finanziellen und organisatorischem Aufwand durchgeführt werden kann. Dazu gehören Anwendungen auf Gebäudekomplexe wie große Hallen, Hochregallager, Atriumbauten oder Tunnelanlagen.

Darüber hinaus können mit Simulationsrechnungen Parameterstudien durchgeführt werden, um bestehende oder neu zu installierende brandschutztechnische Einrichtungen zu optimieren und Konzeptänderungen hinsichtlich der Brandschutzanforderungen zu überprüfen. Auch die Beurteilung der Ansprechzeiten von Sprinkleranlagen oder die Berechnung der äquivalenten Branddauer t_3 nach DIN 18230 zur Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer sind mögliche Anwendungsfälle von Brandsimulationsmodellen. Weiterhin ist die Auslegung von Flucht- und Rettungsanlagen durch Berechnung der Rauchgasausbreitung bei verschiedensten Raumgeometrien ein typischer Anwendungsfall eines Brandsimulationsprogrammes.

Bei der Anwendung dieser Modelle sind die zugrunde liegenden Vereinfachungen und Annahmen zu beachten, die zu Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit führen können. Aus der Sicht einer wissenschaftlichen Anwendung ingenieurgemäßer Verfahren ist eine Validierung der unterschiedlichen Modelle für die Zukunft unabdingbar.

In zunehmendem Maße werden Modelle auch in der Praxis eingesetzt. Allerdings ist die Akzeptanz der allgemeinen Anwendung dieser Verfahren noch gering. Die Qualität der eingeführten Modelle kann nur durch einen Vergleich mit großmaßstäblichen Experimenten

nachgewiesen werden. In den letzten Jahren sind eine Reihe geeigneter Großversuche mit entsprechenden Messergebnissen in der Literatur vorgestellt worden.

Die Entwicklung bis hin zu den Mehrraum-Mehrzonenmodellen wurde über folgende Stufen erreicht: Am Anfang der theoretischen Brandforschung stand das Einzonen- oder Vollbrandmodell. Entsprechend der praktischen Erfahrung bei vollentwickelten Bränden wird hier vorausgesetzt, dass der Brandraum gleichmäßig mit heißen Rauchgasen gefüllt ist: das gesamte Brandraumvolumen wird als eine Zone (Kontrollvolumen) betrachtet, in der homogene Verhältnisse (z.B. Temperatur, Gaszusammensetzung) herrschen.

Das generelle Konzept besteht darin, die Rauchgastemperatur aus der Energiebilanz zu bestimmen, deren maßgebenden Werte durch geeignete Submodelle berechnet werden. Charakteristisch für die Vollbrandmodelle ist, dass sie alle Elemente der Brandentwicklungsphase ausklammern und deswegen nur für die Vollbrandphase betreffende Aufgabenstellungen geeignet sind .

Als Weiterentwicklung des Vollbrandmodelles ist das Mehrzonenmodell anzusehen. Dieser Modelltyp basiert im wesentlichen auf folgenden Annahmen:

- Im Brandraum kommt es zur Ausbildung zweier unterschiedlicher Gasschichten, der oberen heißen Rauchgasschicht und der weitestgehend rauchfreien und kühleren Luftschicht.
- Die Schichten werden durch eine imaginäre horizontale Fläche getrennt, die im Prinzip als Barriere gegen einen Massenaustausch wirkt (abgesehen vom Plumemassenstrom und speziellen Austauschwirkungen).
- Jede Schicht hat eine einheitliche Temperatur.
- Die Fluide innerhalb dieser beiden Zonen werden als ruhend angenommen (außer im Plume und den Ventilationsöffnungen), der Druck ist eine Funktion der Höhe und der Zeit.

Die Mehrzonenmodelle berechnen die Energie- und Massenbilanzen getrennt für jede Zone. Von beiden Zonen wird angenommen, dass sie homogen sind, also jeweils eine einheitliche Temperatur und Gasverteilung besitzen. Die Einmischung von Verbrennungsluft in die Flamme und die aufsteigenden Verbrennungsgase wird durch die Plumemodelle beschrieben. Die Ebene der Heißgasgrenzschicht, welche die beiden Zonen voneinander trennt, wird aus den berechneten Massenströmen bestimmt. Das Konzept eines Mehrzonenmodells teilt den

Brandraum in zwei Temperaturbereiche mit einer Trennebene ein. Als Erweiterung der vorhandenen Zonen können zusätzliche Kontrollvolumina verwendet werden, die andere relevante Bereiche wie Wände, Decken, Plume und zusätzliche brennende Objekte als eigene Zonen auffassen.

Eine weiterführende Entwicklung der Zonenmodelle ist durch die Einführung der Mehrraum-Zonenmodelle, mit denen sich der Massen- und Energieaustausch zwischen mehreren Räumen mit unterschiedlichen Ventilationsöffnungen berechnen lässt, erreicht worden. Die Anforderungen an die numerischen Methoden und die Rechenzeiten erhöhen sich dadurch ebenso. Bei der Anwendung der Mehrraummodelle ist besonders auf Konvergenz der Berechnungsalgorithmen und Verbesserung der numerischen Methoden zu achten.

Neben den Neuerungen bei der Numerik gibt es aber auch Weiterentwicklungen im Hinblick auf die Erfassung physikalischer und chemischer Phänomene. Die Bilanzierung der Verbrennungsprodukte auf der Grundlage vorgegebener Entstehungsraten erlaubt beispielsweise die Berechnung von Massenanteilen verschiedener Brandprodukte. Darauf aufbauend wird in der Version des Berechnungsprogrammes FAST [9-22] versucht, die Deposition von HCL an den Raumwänden zu berechnen. In zunehmendem Maße wird auch die Wirkung von Sprinklern und deren Wechselwirkung mit der Rauchgasschicht in die Modelle einbezogen [9-23]. Hier ist noch weitere Entwicklungsarbeit zu leisten.

Die Mehrraum-Zonenmodelle sind international als Hilfsmittel zur Beurteilung der sich bei unterschiedlichen Ventilationsverhältnissen und Brandentwicklungen einstellenden Rauchgasschicht [9-22, 9-24, 9-25, 9-26, 9-27, 9-28] anerkannt und dienen vornehmlich der Beurteilung der Rauchgasausbreitung und damit zum Nachweis, dass die Flucht und Rettung von Personen aus einem Gebäude sowie der Durchführung von wirksamen Löscharbeiten von der Feuerwehr möglich ist. Neben der mittleren Rauchgastemperatur können ebenso die Massenanteile von Brandprodukten abgeschätzt werden. Zu diesem Zweck müssen die Entstehungsraten als Quellterm bekannt sein, deren Bestimmung auf analytischem Wege zur Zeit noch nicht uneingeschränkt möglich ist. Die Abbrandrate muss in der Regel aus experimentellen Daten gewonnen und als Eingangsgröße vorgegeben werden. Neben speziellen Verbrennungsmodellen für bestimmte Brandgüter, kommt beispielsweise bei dem Zonenmodell FIRST [9-25] ein einfacher Ansatz für die Modellierung der Brandausbreitung in möblierten Räumen zur Anwendung. Ein Vergleich von Experiment und Rechnung zeigt positive Ergebnisse, aber auch die Grenzen in Anwendungsbeispielen der Zonenmodellen [9-29, 9-30].

9.6.2 BERECHNUNG VON VERSUCHEN MIT LAGERANORDNUNG

Um Wärmebilanzmodelle als Nachweisverfahren einsetzen zu können, muss gezeigt werden, dass diese Modelle grundsätzlich geeignet sind (vergl. Abschnitt 9.6.1). Dies geschieht vornehmlich anhand von Versuchen im Maßstab 1:1. Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes durchgeführten Brandversuche sollen hier als Datenbasis herangezogen werden, um die mit den Zonenmodellen CFAST [9-31] (in der Version 3.1.6) und FIGARO [9-26] berechneten Werte zu vergleichen.

Die als Eingabegröße für die Modelle benötigte Energiefreisetzungsrate ist in Abbildung 9.8 dargestellt. Hier wird der Brandversuch mit einem Regalaufbau (Gitterrost-Boden) untersucht. Als Brandlast waren vier Kartonlagen mit je zwei Kartons pro Lage vorgesehen. In den Kartons befanden sich insgesamt 80 1 Liter Flaschen mit Glykolfüllung. In Abbildung 9.9 werden exemplarisch die berechneten Temperaturen in der homogenen Heißgasschicht und die über der Höhe gemessenen Temperaturen vergleichend dargestellt. Es zeigt sich, dass die berechneten Temperaturen von FIGARO und CFAST annähernd gleich sind. Eine Abweichung von nur ca. 10 % voneinander ist im Allgemeinen in der normalen Spannbreite von Brandsimulationsmodellen. Weiterhin liegen die berechneten Temperaturen der homogenen Heißgasschicht relativ gut im mittleren Bereich des gemessenen Spektrums.

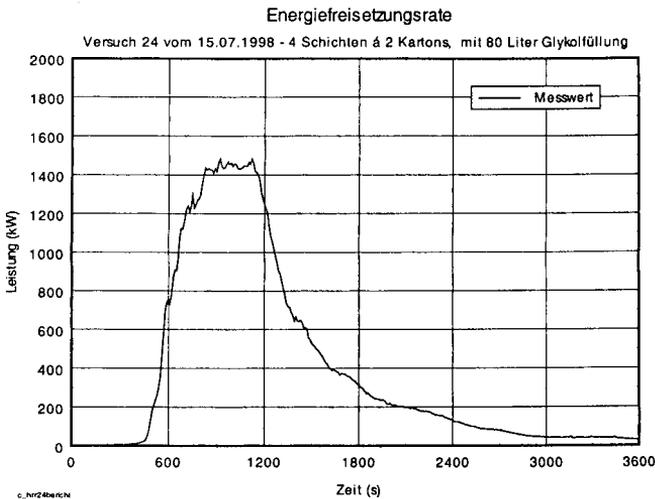


Abbildung 9.8 Gemessene Energiefreisetzungsrate als Grundlage für die Berechnungen

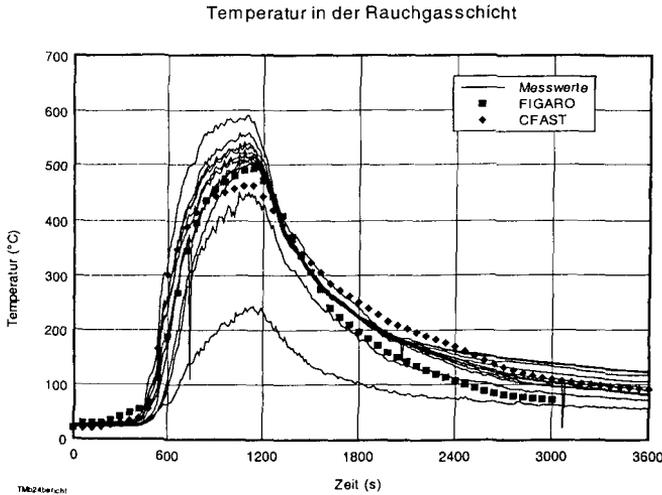


Abbildung 9.9 Berechnete und gemessene Temperaturen bei Regalbrandversuch Nr. 24 mit Flüssigkeitsverpackung und 80 l Glykolfüllung

In Abbildung 9.10 wird die gemessene Lage der neutralen Ebene in der Türöffnung mit den berechneten Werten der Lage der Grenzschicht zwischen unterer Kaltgasschicht und der darüber liegenden Heißgasschicht verglichen. Erfahrungsgemäß liegt die neutrale Ebene in der Türöffnung etwas niedriger als im Brandraum, so dass in diesem Beispiel eine relativ gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten im Vergleich mit beiden Modellen vorliegt.

Für eine umfassende Beurteilung sind die ein- und ausfließenden Massenströme von Bedeutung. Dabei sind besonders die austretenden Brandprodukte von Bedeutung, weil sie die Umwelt und die Nachbarschaft gefährden können. Die beim Abbrand der Brandlast entstehenden Brandprodukte können durch sogenannte Entstehungsraten (Yields in kg Brandprodukt pro kg verbrannte Masse) an die Abbrandrate multipliziert werden. Deshalb erhält die Abbrandrate eine zentrale Bedeutung für die Untersuchung von Chemikalienlager hinsichtlich Störfall Brand. Die Abbrandrate, die bei dem dargestellten Versuch gemessen wurde, und die in den Zonenmodellen vorgegebene umgesetzte Masse ist in Abbildung 9.11 dargestellt.

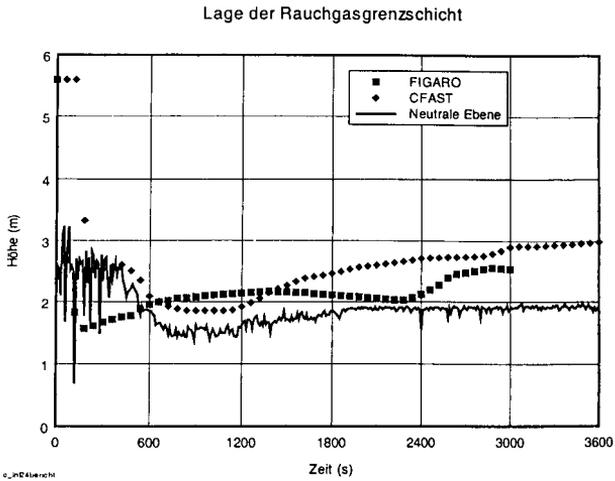


Abbildung 9.10 Berechnete und gemessene Lage der Rauchgasgrenzschicht über dem Boden bei Regalbrandversuch Nr. 24 mit Flüssigkeitsverpackung und 80 l Glykolfüllung

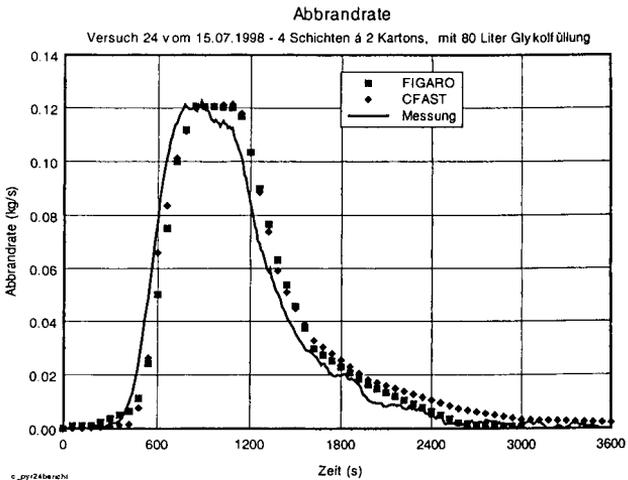


Abbildung 9.11 Abbrandrate bei Regalbrandversuch Nr. 24 mit Flüssigkeitsverpackung und 80 l Glykolfüllung

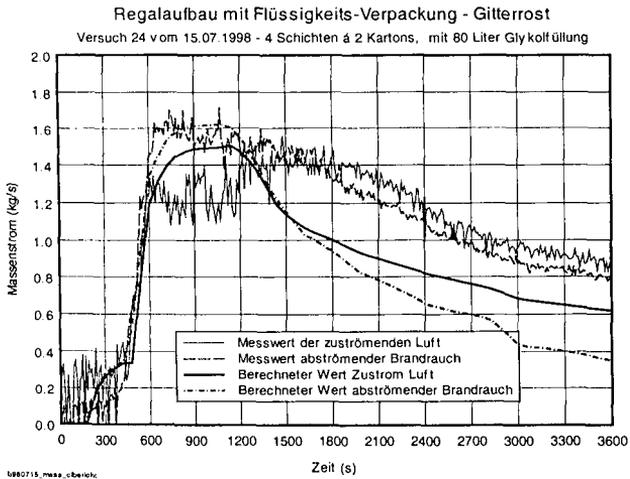


Abbildung 9.12 Berechnete und gemessene Werte der Massenströme in und aus dem Brandraum

Die in Abbildung 9.12 berechneten und gemessenen Massenströme zeigen in der Anfangsphase bis über den Maximalwert der Brandentwicklung hinaus eine gute Übereinstimmung.

Grundsätzlich ist es möglich, mit Zonenmodellen Brände in Lagern im Vorfeld zu berechnen. Voraussetzung ist die richtige Auswahl des Brandszenarios. Mit den aus den berechneten Daten des den Brandraum verlassenden Massenstromes, der Abbrandrate und den Ausbeuten von Brandprodukten, bezogen auf die Abbrandrate, können letztendlich auch die Stoffströme in die Umgebung bestimmt werden.

Im Falle eines stark unterventilierten Brandes ist ein erheblicher Anstieg der Ausbeuten toxischer Brandprodukte und unverbranntem Ausgangsstoff zu verzeichnen. Für den unterventilierten (oder ventilationsgesteuerten) Brand verringert sich aber die Abbrandrate. Dies wurde sowohl aus den Versuchen im Labormaßstab (modifiziertes Cone-Calorimeter) als auch bei den Versuchen im Room-Corner-Test mit Brandlastanordnungen im Gebindemaßstab nachgewiesen, indem bei beiden Versuchseinrichtungen die Ventilationsverhältnisse systematisch variiert wurden.

9.6.3 ERPROBUNG EINES ZONENMODELLES IM RAHMEN EINER BRANDSTÖR-FALLANALYSE AN EINEM KONKRETEN LAGERBEISPIEL

Die praktische Umsetzung der erforderlichen Schutzmaßnahmen gegen Brände in Gefahrstofflagern gemäß der geltenden technischen Regeln und Vorschriften gestaltet sich bei Neubauten relativ problemlos. Hier kann die Auslegung der Konstruktion oder der Einbau von Löschwasser-Rückhalteanlagen nach Bedarf erfolgen. Dies gilt jedoch nicht bei der notwendigen Ertüchtigung bestehender Lager in Gebäuden. Insbesondere im Zusammenhang mit dem erforderlichen Schutzzumfang können die nach dem Stand der Wissenschaft verfügbaren genaueren Nachweisverfahren der Brandsimulationsberechnung wertvolle Dienste leisten, besonders bei strittigen Fragen in Verbindung mit der nach Störfallverordnung erforderlichen Sicherheitsanalyse, wie:

- Quantifizierung der Brandwirkungen,
- Abschätzung der freigesetzten Schadstoffmengen und
- brandschutztechnische Auslegung der Konstruktion.

Als erster Schritt sind hierzu repräsentative Brandszenarien (Bemessungsfeuer) zu beschreiben, die unter den gegebenen Umständen von den Auswirkungen her möglichst abdeckend sein sollen. Folgende Parameter sind zu berücksichtigen, wie Zündquelle, Zündtemperatur der Brandlast, thermische Stoffgrößen für die Brandentstehungsphase. Für die Schadstofffreisetzung in der Phase der Brandausbreitung bis zum vollentwickelten Brand hängt der Brand von der Brandgutanzordnung und -verteilung, den Belüftungsverhältnissen sowie der Form, Größe und den thermischen Eigenschaften des Brandraumes ab.

Auf der Grundlage des in Abbildung 9.13 vorgestellten Brandszenariums wurden Wärmebilanzrechnungen mit dem Mehrraum-Zonenmodell CFAST [9-31] durchgeführt, wobei jeder Raum in zwei Zonen (Heißgas- und Kaltgasschicht) mit homogenen physikalischen Eigenschaften (z. B. mittlere Heißgastemperatur) eingeteilt wird. Der für die Verbrennung notwendige Sauerstoff wird über die untere Kaltgasschicht der Flamme bzw. dem Plume beigemischt. Zum Massen- und Energieaustausch mit der Umgebung und angrenzenden Räumen müssen Öffnungen in der Raummfassung entsprechend der vorliegenden baulichen Gegebenheit definiert werden. Mit einem Mehrraum-Modell kann die Rauchausbreitung über Raumketten (z. B. von einem Büro über einen Flur in angrenzende Büros oder Treppenträume) berechnet werden. Durch die Unterteilung eines großen Raumes (z. B. einer Lagerhalle) oder eines Brandabschnitts in einzelne Räume (besser: Segmente) kann die

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

Temperaturentwicklung und die Rauchausbreitung in diesen Raumketten berechnet und $s_{0,0}$ mit eine ortsabhängige Entwicklung der Verrauchung bestimmt werden.

Für den zu untersuchenden Fall wurden unterschiedliche Energiefreisetzungsraten entwickelt. Mit dem die Brandausbreitung charakterisierenden Koeffizienten $\alpha = 0.0107$ gehört die Energiefreisetzungsrate des in Abbildung 9.13 dargestellten Versuches in die Kategorie „langsame Brandausbreitung“ (vergl. Abschnitt 8). Um eine allgemeine Übertragung auf das reale Lager sicherzustellen, werden ebenso Berechnungen mit einer schneller ansteigenden Energiefreisetzungsrate „schnelle Brandausbreitung“ durchgeführt. Alle eingesetzten Brandszenarien (Bemessungsfeuer) werden im folgenden dargestellt und in Abbildung 9.14 zusammengefasst wiedergegeben.

Design Fire 1 „beginnt“ nach ca. 360 s und erreicht nach 650 s die Energiefreisetzungsrate von 1000 kW (siehe auch Abbildung 9.13). Für diese Berechnung steigt die Energiefreisetzungsrate weiter bis 1200 s, bleibt dann bis 2400 s auf gleichem Niveau und fällt danach wieder ab. Sowohl Rauchmelder als auch Sprinkler (RTI 100) sind unter der Decke in 6 m Höhe in einem Abstand von 3 m zur Plume-Achse angebracht. Der Rauchmelder spricht nach ca. 660 s an und öffnet die Hälfte der RWA und die Zuluftflächen. Die andere Hälfte der RWA wird ca. 600 s später von der eingetroffenen Berufsfeuerwehr geöffnet. Die Sprinkler würden nach ca. 770 s ansprechen. Das Szenarium mit Sprinklerwirkung wird durch Design Fire 2 wiedergegeben. Dabei wird das Feuer vom Sprinkler kontrolliert (2500 kW), aber nicht gelöscht.

Mit Design Fire 3 wird eine schnelle Brandausbreitung ohne Zündverzögerung vorgegeben. Die anderen Randbedingungen sind wie bei Design Fire 1. Der Rauchmelder spricht hier bereits nach 160 s an (1333 kW) und steuert die RWA an bei gleichzeitiger Alarmierung der Berufsfeuerwehr. Ein Flashover würde nach dieser Berechnung mit Erreichen einer Rauchgastemperatur von 600°C (Abbildung 9.15) nach ca. 1100 s erfolgen.

Ein Flashover setzt ein, wenn die Wärmestrahlungsflussdichte am Boden 20 kW/m² überschreitet [9-32], und die Temperaturen unter der Raumdecke um 600°C liegen [9-33], nach McCaffrey [9-34] reichen bereits Temperaturen um 500°C. Danach wurde die Berechnung abgebrochen. Die Ansprechzeit des Sprinklers würde ca. 260 s betragen. (ca. 3200 kW). Mit Design Fire 4 wurde ein auf dem Niveau von 3500 kW durch die Sprinkler kontrollierter Brand berechnet, Design Fire 5 berücksichtigt einen gesprinklerten Brand von 5000 kW. Die Tabelle 9.7 gibt eine Kurzübersicht über die verwendeten Design Fire.

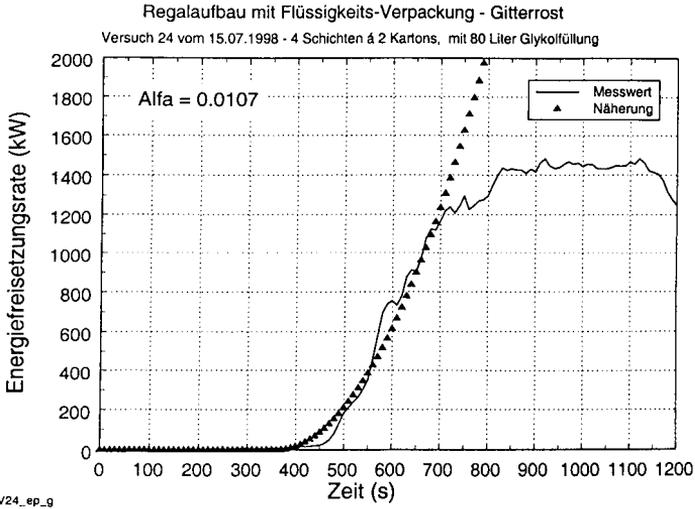


Abbildung 9.13 Brandszenarium (Design Fire) für Regalbrand mit glykolgefüllten Behältern

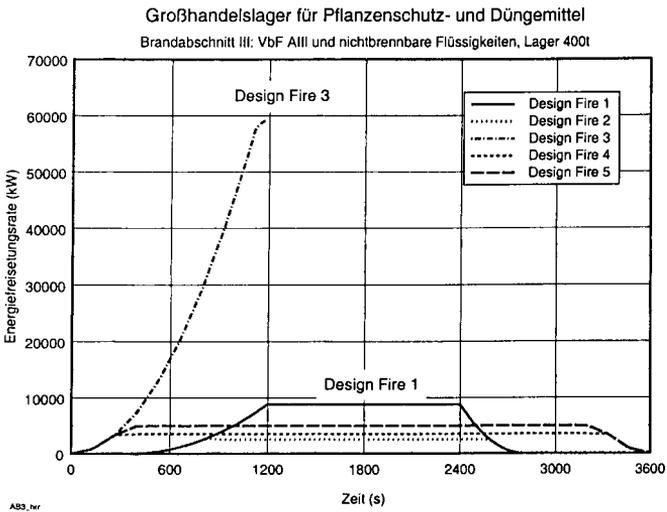


Abbildung 9.14 Brandszenarien (Design Fire 1 bis 5) der durchgeführten Wärmebilanzrechnungen

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

Tabelle 9.7 Definition der Design Fire 1 bis 5

	Brandausbreitung	Sprinkler
Design Fire 1	Langsam	Nein
Design Fire 2	Langsam	ja, kontrollierter Brand bei 2500 kW
Design Fire 3	Schnell	Nein, Berechnung bis zum Flashover
Design Fire 4	Schnell	ja, kontrollierter Brand bei 3500 kW
Design Fire 5	Schnell	ja, kontrollierter Brand bei 5000 kW

Die Auswirkungen werden anhand der berechneten Rauch- oder Rauchgastemperaturen betrachtet (Abbildung 9.15). Nur bei Design Fire 3 kommt es zum Flashover und die Feuerwehr wird versuchen, eine über den betroffenen Brandabschnitt hinausgehende Brandausbreitung zu verhindern. Wenn die eingebauten automatischen Löschanlagen fehlerfrei ansprechen und den Brand kontrollieren, wird eine mittlere Rauchgastemperatur von 200°C im betrachteten Abschnitt nicht überschritten. Zusätzlich ist in diesem Fall durch eine einfache Berechnung der Plume-Temperaturen zu überprüfen, ob lokal wesentliche Bauteile temperaturbedingt versagen können.

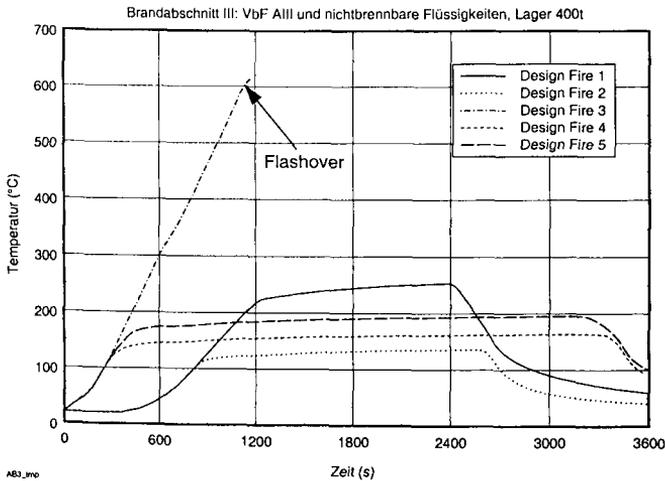


Abbildung 9.15 Berechnete Temperaturen in der Rauchgasschicht auf der Grundlage der fünf betrachteten Design Fire

9.6.4 ENTWICKLUNG DER BRANDWIRKUNGEN IM FALL EINES GESCHLOSSENEN GEBÄUDES

Ausgehend von der Brandentwicklung von Design Fire 3 wurden Berechnungen durchgeführt, bei denen die RWA-Einrichtungen im Dach sowie der Großteil der vertikalen Öffnungsflächen in den Wände geschlossen gehalten wurden. Die Öffnungsfläche beträgt etwa $0,6 \text{ m}^2$, bei einer Grundfläche von ca. 720 m^2 . Das Ergebnis für die berechnete Energiefreisetzungsrate ist in Abbildung 9.16 dargestellt. In den ersten zehn Minuten entwickelt sich der Brand ungehindert wie bei Design Fire 3, ohne dass eine Einschränkung infolge Sauerstoffmangels sichtbar wird. Es wird eine Energiefreisetzungsrate von ca. 18 MW erreicht. Anschließend setzt eine starke Reduzierung des Brandes ein, wobei die Energiefreisetzungsrate fast auf den Wert Null abfällt. Als weiterer Parameter wurde in dieser Berechnung die Aktivierung der RWA-Anlage nach ca. 1000 s simuliert. Innerhalb kürzester Zeit steigt die Energiefreisetzungsrate auf den ursprünglich durch Design Fire 3 vorgegebenen Wert. Dieses schlagartige Durchzünden der im brennenden Bereich vorhandenen, auf Grund des Sauerstoffmangels unverbrannten Pyrolysegase wird als Backdraft [9-35, 9-36] bezeichnet. Die große Gefahr, die bei diesen Situationen vorliegt, ist die explosionsartige Expansion der unverbrannten Rauchgase.

Vorausgesetzt, dass das Gebäude dem sich entwickelnden Brand in den ersten 10 Minuten Stand hält (leichte Dachkonstruktion, Verbindungen zu Nachbarabschnitten, vorhandene Fenster, Türen etc.) und der Luftabschluss erhalten bleibt, und auch nach dem Durchzünden das Gebäude nicht zerstört wird, ergeben sich nach den Berechnungen die in Abbildung 9.17 dargestellten mittleren Temperaturen in der homogenen Heißgasschicht.

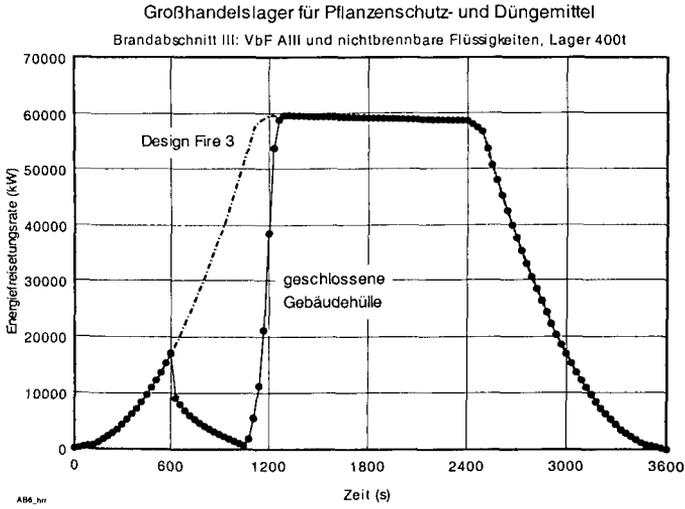


Abbildung 9.16 Energiefreisetzungsrate bei geänderten Randbedingungen – nach 1000 s wird die RWA-Anlage aktiviert

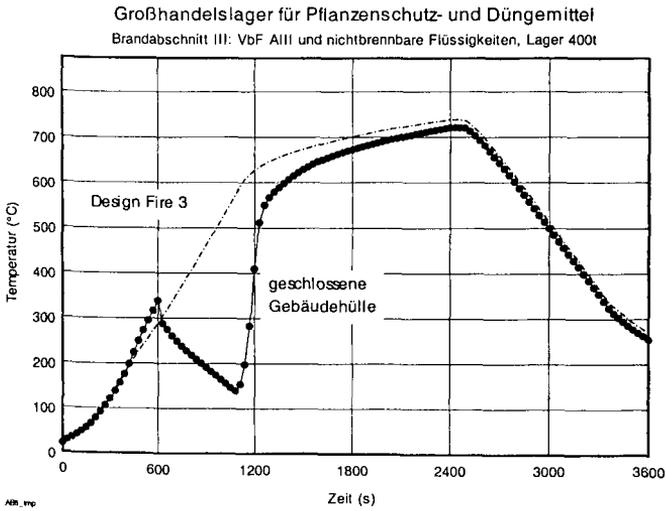


Abbildung 9.17 Entwicklung der Heissgastemperaturen im Brandfall mit variablen Randbedingungen

Abgesehen von der Problematik der Quellterme ergeben sich aber bei der Anwendung der Brandsimulationsrechnung modellspezifische Fehlerbandbreiten, die hinsichtlich der Bewertung der einzelnen Modelle von Interesse sind. Bei den Zonenmodellen beruhen die Einschränkungen im Wesentlichen auf folgenden Punkten:

- Einführung empirischer Beziehungen zur Vereinfachung der grundlegenden Gleichungen,
- eingeschränkte Behandlung der Impulsgleichung,
- eingeschränkte Abbildung realer Geometrien.

Durch die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen in den physikalischen Zusammenhängen müssen sich zwangsläufig Ungenauigkeiten in der Berechnung einstellen. Zur Interpretation der Ergebnisse ist dann Expertenwissen, also das Vorhandensein von Erfahrung, notwendig.

Beispielsweise ist das Vorhandensein einer Schichtung von heißen und kalten Gasen eine Voraussetzung für die Anwendung von Zonenmodellen [9-37]. Diese Schichtung wird zwar in vielen Experimenten beobachtet, es gibt aber auch Ergebnisse die zeigen, dass dies keinesfalls immer vorausgesetzt werden kann. Unter welchen Bedingungen dies geschieht ist mit den Modellgrundlagen des Zonenmodells momentan noch nicht darstellbar. Es können bestenfalls einige qualitative Antworten gegeben werden (z.B. bei großen Öffnungen, wie sie bei umbauten Innenhöfen vorkommen) oder generell im Zusammenhang mit Ventilationsöffnungen, bei denen große Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Ein- und ausströmenden Gasen bestehen.

Daneben existieren aber noch andere Fragestellungen die von einem Zonenmodell nicht oder nicht hinreichend genau beantwortet werden können. Dazu gehört beispielsweise das Verhalten von Rauchgasen in einem Atrium mit einem ausgeprägten Temperaturgradient unterhalb der Decke. Die Brandgase können unter diesen Bedingungen u. U. nicht bis zur Decke aufsteigen. Ein weiteres Problem ergibt sich bei der Rauchgasströmung in langgestreckten Gebäuden, bei denen Hindernisse umströmt werden müssen, da sich die Rauchgase unter diesen Bedingungen auf Dauer nicht in einer begrenzten Schicht aufhalten, sondern sich in einiger Distanz zum Brandherd abkühlen und mit der übrigen Luft vermischen. Bei beiden Problemstellungen ist es äußerst schwierig mit den üblichen Mitteln das Ansprechverhalten von Sprinklern und Detektoren vorherzusagen.

Von wachsender Bedeutung ist auch der Einfluss mechanischer Ventilationsysteme. In vielen Fällen wird zur Erzeugung eines angemessenen Raumklimas Zuluft von oben her in Räume eingeblasen. Dabei können u. U. sehr hohe Eintrittsgeschwindigkeiten erforderlich sein, die je nach Lage der Eintrittsöffnungen die Raumströmung beeinflussen und zu starken Verwirbelungen führt. Unter solchen Umständen ist eine Behinderung der frühzeitigen Auslösung von Sprinklern und Brandmeldern denkbar.

Aus diesen Beispielen lässt sich ableiten, dass die Zonenmodelle nicht nur hinsichtlich ihrer Fehlerbandbreiten, sondern auch hinsichtlich ihrer Anwendungsgrenzen bewertet werden müssen. Grundsätzlich lassen sich die Fehlerbandbreiten komplexer Modelle am besten durch einen Vergleich mit experimentellen Ergebnissen ermitteln. Dazu ist es jedoch erforderlich, Experimente aus einem möglichst breiten Anwendungsspektrum heranzuziehen, da nur auf diese Weise das Leistungsspektrum bestimmt werden kann. Hinsichtlich der Anwendungsgrenzen ist aber zu berücksichtigen, dass die zur Verfügung stehenden Messdaten nicht immer geeignet sind, die Unterschiede zwischen Fehlerbandbreite und Anwendungsgrenze deutlich werden zu lassen. Dies liegt daran, dass hierfür sehr detaillierte Messergebnisse mit relativ hohen Genauigkeitsanforderungen zur Verfügung stehen müssen, die bei Brandexperimenten häufig nur schwer realisierbar sind. Da Feldmodelle im Prinzip keine Einschränkungen in der Anwendungsbreite aufweisen, sind sie für diese Aufgabe geeignet, d. h. mit ihrer Hilfe könnten Zonenmodelle zusätzlich bewertet werden. Dazu ist jedoch der Nachweis erforderlich, dass die Feldmodelle generell genauere Ergebnisse liefern.

9.7 BRANDSIMULATION MIT CFD-MODELLEN

9.7.1 ALLGEMEIN

Bei der CFD-Brandsimulation (CFD = Computational Fluid Dynamics), den Feldmodellen, werden Vereinfachungen, die das Konzept der Zonenmodellen bilden, vermieden. Grundlage für die Berechnung der Temperatur-, Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder sind die fundamentalen Gleichungen für die Massen-, Impuls- und Energieerhaltung. Sie liegen in Form partieller Differentialgleichungen allgemeingültig vor und müssen unter gegebenen Randbedingungen gelöst werden. Die allgemeine Form der Transportgleichung für eine Variable ϕ lautet

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}[\rho\vec{v}\phi - \Gamma_s \text{grad}\phi] = S_s$$

worin ρ die Luftdichte, S_ϕ der Quellterm von ϕ und \vec{v} der Geschwindigkeitsvektor ist, der mit den Komponenten u, v, w im dreidimensionalen Koordinatensystem (x,y,z) ausgedrückt werden kann. Γ_ϕ ist die effektive Diffusionsfunktion der Variablen ϕ . Eine exakte Lösung dieser Gleichungen ist i. a. nicht möglich, was auch hier zur Anwendung numerischer Verfahren führt. Dabei werden die Gleichungen auf einem vorgegebenen Raumgitter diskretisiert und mit entsprechenden Verfahren gelöst.

Die meisten praxisrelevanten Strömungen sind turbulent. Um diese Vorgänge rechnerisch zu erfassen, wäre es notwendig, die numerische Auflösung (räumlich und zeitlich) dem Zeit- und Längenmaß der kleinsten Turbulenzballen anzupassen. Zur Lösung werden aus diesem Grund gemittelte Erhaltungsgleichungen betrachtet, bei denen die Variablen in zeitliche Mittelwerte und stochastische Schwankungen aufgeteilt sind. Das daraus entstehende Gleichungssystem ist nicht mehr geschlossen vorhanden und erzwingt die Einführung empirisch begründeter Turbulenzmodelle. Das am häufigsten verwendete Modell ist das k - ϵ Turbulenzmodell, bei dem zwei zusätzliche Gleichungen für die turbulente kinetische Energie und die Dissipationsrate gelöst werden müssen. Da bei der Anwendung der Gleichungen vorrangig die Lösung der physikalischen Gesetze der Fluid-Strömungen angestrebt wird, sind die CFD-Modelle weitgehend universell einsetzbar.

Heutzutage können bereits auf leistungsfähigen Personal Computern einfachere Brandraumgeometrien mit Feldmodellen berechnet werden. Für ausgedehnte komplexe Geometrien mit realitätsnaher Darstellung sind größere Rechenanlagen, wegen der stark steigenden Rechenzeiten unumgänglich. In welchem Umfang die notwendigen Aussagen vereinfacht ermittelt und welche Einbußen an Realitätsnähe dabei hingenommen werden müssen, soll Gegenstand dieses Vorhabens sein.

Bei der Anwendung der Feldmodelle muss bei speziellen Problemen wie der Brandentwicklung und Brandausbreitung auf bestimmte physikalische oder chemische Sub-Modelle, wie sie in den Zonenmodellen verwendet werden, zurückgegriffen werden. Ein Beispiel hierfür ist die Brandausbreitung oder die Kontrolle des Luftbedarfs bei der Verbrennung. Trotz diesen Einschränkungen können Feldmodelle einen wichtigen Beitrag zur Lösung lokaler brandschutztechnischer Fragen leisten.

Eine grundlegende Einschränkung für die Brandsimulationsrechnung stellen die sogenannten Quellterme dar. Dabei handelt es sich um den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrates und der bei der Verbrennung entstehenden Verbrennungsprodukte. Eine vollständige Behandlung dieser Vorgänge bei komplexen Anordnungen brennbarer Objekte ist zum

9 Schutzkonzepte und Nachweismethoden

gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Deshalb müssen diese Eingangsgrößen für die Simulationsrechnung aufgrund experimenteller Erfahrung vorgegeben werden. Dies trifft sowohl für Feldmodelle als auch für Zonenmodelle zu.

Die Güte der Feldmodellierung wird durch

- die Wahl des Gitters,
- die Wahl der Randbedingungen und
- die Form des untersuchten Gleichungssystems

bestimmt und weiterhin durch die Wahl der unterschiedlichen numerischen Verfahren beeinflusst. Während ein feinmaschiges Gitter zu einer guten Auflösung und genaueren Ergebnissen beiträgt, sind dadurch aber auch lange Rechenzeiten notwendig, die in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Hardware unakzeptabel werden könnten.

Das System von Differentialgleichungen, das zur Berechnung einer Strömung zu lösen ist, stellt ein sogenanntes Randwert- oder Anfangswertproblem dar. Nur bei Vorgabe der erforderlichen Randbedingungen kann die Lösung eindeutig sein. Für die numerische Simulation z. B. elliptischer Strömungen müssen an allen Rechenfeldgrenzen für alle abhängigen Variablen Randbedingungen vorgegeben werden. Dabei kommen häufig folgende Möglichkeiten zur Definition der Randbedingungen in Betracht:

- Die abhängige Variable wird auf dem Rand vorgegeben (Dirichlet-Randbedingung).
- Der zur Berandung normale Fluss der abhängigen Variablen wird vorgegeben (Neumann-Randbedingung).

Dirichlet-Bedingungen werden überall dort eingesetzt, wo die Strömungsgröße selbst gegeben ist, z. B. aus Messungen oder wenn aufgrund prinzipieller Überlegungen oder Erfahrungen die Werte einer Strömungsgröße an einem Rechenfeldrand vorhergesagt werden können (z. B. Haftbedingung an Wänden). Neumann-Bedingungen finden bei Ausströmrändern Anwendung oder wenn an Wänden statt der Temperatur eine Wärmestromdichte vorgegeben wird. Die Gradientenbedingung am Ausströmrand ist häufig deshalb notwendig, weil die strömungsmechanischen Größen am Rand nicht vorliegen. Diese Vorgehensweise ist im Allgemeinen nicht ausreichend, da Rückströmungen auftreten können. Dieses Problem lässt sich nur durch die Vergrößerung des Berechnungsgebietes umgehen. Wie Beispielrechnungen zeigen, können bei der Anwendung gemessener Größen für die Randbedingungen

ausgezeichnete Ergebnisse erzielt werden. Dies hat den Nachteil, dass Messwerte im konkreten Fall in der Regel nicht vorhanden sind. Deshalb müssen bei den Vergleichsrechnungen die Randbedingungen variiert werden, um deren Einfluss auf das Ergebnis festzustellen.

Auch die Form des verwendeten Gleichungssystems kann einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben. Während bei vielen Anwendungen die richtige Wahl des Turbulenzmodells sorgfältig vorgenommen werden muss, erscheinen für die vereinfachte Anwendung Rechenprogramme, die auf eine Turbulenzmodellierung gänzlich verzichten und ebenso die Zähigkeitsterme vernachlässigen.

Eine relativ neue Entwicklung im Bereich sind die Ansätze der Large Eddy Simulation (LES) [9-38]. Die auf der LES-Technik basierenden Modelle benötigen im Teilbereich der hydrodynamischen Submodelle den geringsten Anteil an empirischen Eingangsgrößen. Mit der LES-Technik werden die Differentialgleichungen für die Rauch- und Heißgasbewegung gelöst [9-38, 9-39]. Auch wenn die Formulierung und Lösung der Gleichungen für den Massenaustausch einen sehr bedeutenden Teil eines Gesamtmodelles darstellen, so sind die Informationen sowie die Verarbeitung der Informationen, welche die Ausbreitung eines Brandes und den Löschvorgang beschreiben, ebenso wichtig. Beispielsweise ist es für die Berechnung der mittleren Temperatur der Heißgasschicht mit einem Zonen-Modell ausreichend, die Energiefreisetzung als zeitabhängige Größe vorzugeben. Für die Berechnungen mit Hilfe der CFD wird es notwendig, die Informationsdichte zu erhöhen. Angaben über die thermischen Eigenschaften der Brennstoffe und die flächen- oder volumenspezifische Energiefreisetzungsraten werden benötigt.

Bei dem hier eingesetzten Programm / Modell nach [9-38] wird der Brand durch Lagrange Partikel (thermische Elemente) modelliert, die Wärme freisetzen und verteilen, indem sie durch die thermisch bedingte Bewegung in andere Bereiche transportiert werden. Die Wärmebewegung bestimmt, wo die Wärme abgegeben wird und die Wärmefreisetzung bestimmt die thermische Bewegung. So wird die Kopplung zwischen Brand und Brandgasbewegung hergestellt. Die spezifische Energiefreisetzungsraten muss durch Experimente ermittelt werden. Die Ausbreitung des Feuers kann mit dem Modell durch die thermischen Eigenschaften der potentiellen Brennstoffe und der thermischen Strahlung des Feuers bestimmt werden. Die Ausbreitung der Brandgase (oder auch von Rauch) wird durch die Berechnung des Weges, den die „abgebrannten“ thermischen Elemente zurücklegen, modelliert. Ein zu bestimmender Prozentsatz des umgesetzten Brennstoffes kann als Rauchpartikel definiert werden (Smoke-Yield Y_s). Daraus ergibt sich, dass die Verteilung der

thermischen Elemente gleichbedeutend mit einer spezifischen Rauchdichte oder Rauchkonzentration ist. Weitergehende Beschreibungen des Modells sind [9-38] zu entnehmen.

9.7.2 LAGERBEISPIEL IM RAHMEN DER BRANDSTÖRFALLANALYSE MIT DER CFD-METHODE

Für die Berechnungen, gleichgültig ob mit Zonen- oder Feld-Modellen, wird als erstes ein Modell entworfen, womit ein möglichst reales Abbild der gegebenen Situation erstellt werden soll. Die Berechnungen mit dem Zonenmodell sind im Abschnitt 9.6 wiedergegeben worden. Als Grundlage dient hier der in Abbildung 9.1 skizzierte Abschnitt eines Lagers. Bei der Modellbeschreibung für das Zonenmodell waren die Einbauten, beispielsweise die gefüllten Regale, nicht berücksichtigt worden. Für die Erfassung der geometrischen Randbedingungen bei CFD-Modellen sind diese Einbauten von Bedeutung.

Die Abbildung 9.18 und Abbildung 9.19 zeigen das für die Berechnungen verwendete Modell. Die RWA-Öffnungen im Dach sowie das Zugangstor und die Fenster in den Wänden sind in Abbildung 9.18 zu erkennen. Im vorderen Teil der Abbildung ist die Abteilung mit den Blocklagern zu erkennen, die Regale im hinteren Bereich sind ebenfalls als Blöcke definiert. Der Brandherd befindet sich in Abbildung 9.18 in der hinteren linken Ecke, etwas deutlicher in Abbildung 9.19 zu erkennen. Die Energiefreisetzungsrate wurde gemäß dem Design Fire 5 (Tabelle 9.7) gewählt, so dass die hier berechneten Ergebnisse direkt mit denen der Zonen-Modell Berechnung verglichen werden können.

9.8 DARSTELLUNG UND VERGLEICH DER MIT CFD-METHODEN BERECHNETEN WERTE

Beispielhaft für die Berechnungsergebnisse ist in Abbildung 9.20 ein Schnitt im Bereich der Hallenmitte dargestellt. Hier ist eine gute Schichtung der Temperaturen über der Höhe zu erkennen. Die Temperaturen erstrecken sich von 20°C (Umgebungstemperatur) im Bereich des Bodens bis hin zu ca. 320°C im Deckenbereich.

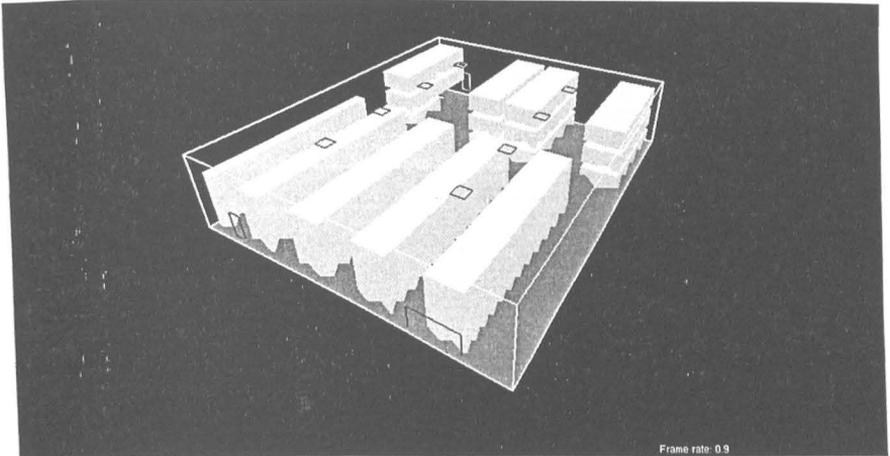


Abbildung 9.18: Modell des Lagerabschnittes für die CFD-Berechnungen

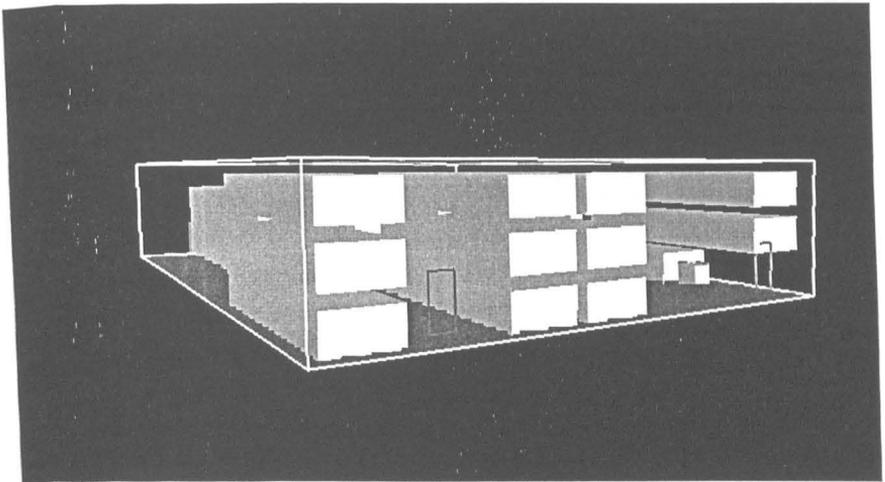


Abbildung 9.19: Modellansicht mit Lage des Brandherdes (Quader unten rechts)

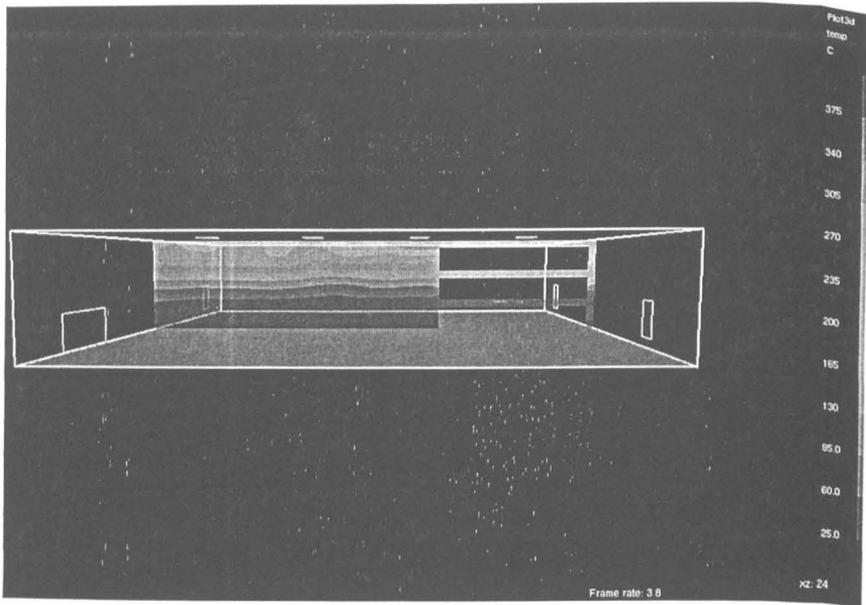


Abbildung 9.20: Berechnete Temperaturen im Bereich der Hallenmitte; Darstellung ohne die „Regale“

In Abbildung 9.21 wurden die mit dem CFD-Modell berechneten Temperaturen der Hallenmitte unterschiedlicher Höhe aufgetragen. Zum Vergleich wurde die mit dem Zonen-Modell berechnete Temperatur der homogenen Heißgasschicht ebenfalls dargestellt (Rauten). Die mit dem Zonen-Modell berechnete Grenzhöhe zwischen Heiß- und Kaltgasschicht liegt bei ca. 4 m. Der entsprechende Temperaturverlauf in 4 m Höhe wird von der gepunkteten Kurve (ca. 175°C) wiedergegeben. Daraus folgt, dass die berechnete Heißgastemperatur einen mittleren Wert zwischen der Höhe von 4 m und der berechneten Temperatur wenig unterhalb der Lagerraumdecke einnimmt. Dies stellt eine sehr gute Näherung für ein Zonen-Modell dar.

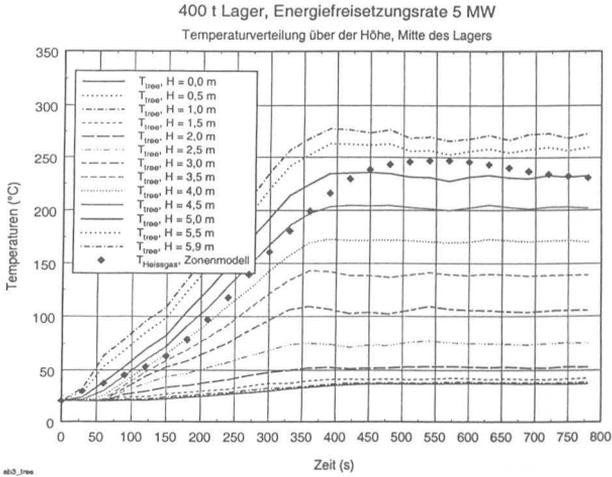


Abbildung 9.21: Berechnete Temperaturen im Vergleich

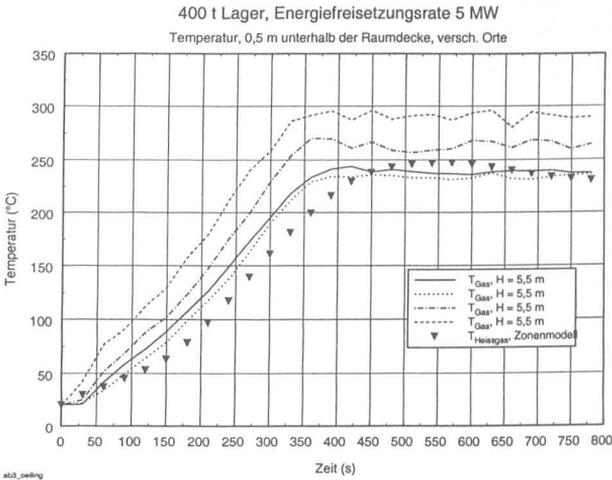


Abbildung 9.22: Berechnete Temperaturen unterhalb der Decke an verschiedenen Orten

Die Abbildung 9.22 zeigt die Verteilung der Temperaturen kurz unterhalb der Lagerraumdecke an unterschiedlichen Orten. Hier liegen die mit dem Zonen-Modell berechneten Temperaturen am unteren Rand der über die CFD-Berechnung ermittelten Temperaturen.

Im nächsten Schritt wurden die festen Blöcke der Regale durch einzelne Paletten ersetzt (Abbildung 9.23). Jede Palette entwickelt nach Erreichen einer Entzündungstemperatur eine vorgegebene Energiefreisetzungsrate. Der Zündort in diesem Modell bleibt weiterhin rechts unten in Abbildung 9.23.

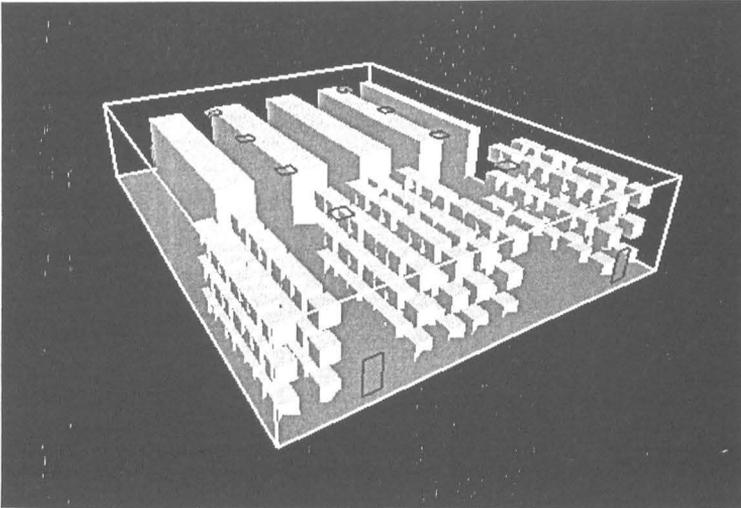


Abbildung 9.23: Modell mit einzelnen Paletten im Bereich der Regallager

Die sich aus dieser Anordnung ergebende Energiefreisetzungsrate ist in Abbildung 9.24 dargestellt. Die Werte für die Energiefreisetzungsrate der einzelnen Paletten wurden [9-40] entnommen. Es handelt sich um Paletten, auf denen acht Kartons aus Wellpappe (Kantenlänge der Kartons: 0,53 m) mit jeweils 125 Trinkbecher aus Kunststoff (Polystyrol, 0,45 l Volumen) aufbewahrt werden. Diese acht Kartons einer Palette inklusive der Holzpalette haben eine Masse von ca. 80 kg. Brandlasten dieser Art werden im internationalen Bereich eingesetzt, weil hierzu Versuchsergebnisse vorliegen. Dadurch ist eine Validierung der eingesetzten Modelle anhand von Versuchsergebnissen möglich.

Für die Brandausbreitung dieser Anordnung ergibt sich, dass sich bereits nach vier Minuten (240 s) eine Energiefreisetzung von annähernd 20 MW entwickelt hat. Die sich daraus ergebenden Temperaturen über der Höhe zeigt die Abbildung 9.25. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf in der Hallenmitte. Rechnerisch werden hier Temperaturen von fast 1400°C ermittelt. Diese Temperaturen werden nur zu dem Zeitpunkt erreicht, wenn sich der Brand (mit den Flammentemperaturen) bis in die Lagermitte ausgebreitet hat.

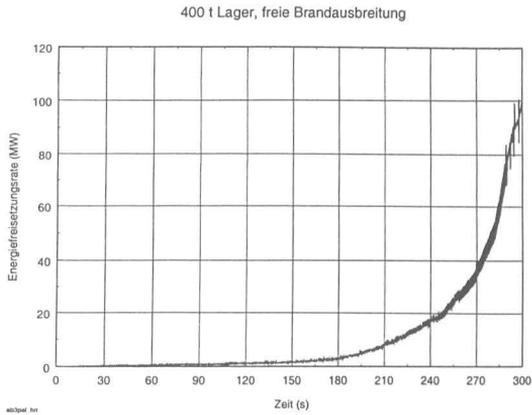


Abbildung 9.24: Energiefreisetzung bei freier Brandausbreitung

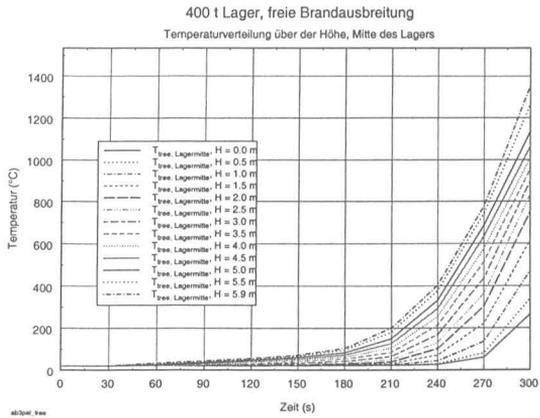


Abbildung 9.25: Temperaturentwicklung in Lagermitte

9.9 GRUNDSÄTZLICHE AUSSAGEN ZUR BRANDENTWICKLUNG UND BRANDBEKÄMPFUNG IN LAGERN

9.9.1 BRANDENTWICKLUNG UND BRANDAUSBREITUNG

- Ausgehend von einer offenen Flamme als Zündquelle entwickeln sich Brände in dreidimensionalen Brandobjekten grundsätzlich in fünf aufeinanderfolgenden Phasen:
- Phase 1 – Aufbereitung des brennbaren Stoffes in unmittelbarer Umgebung der offenen Flamme: Die Ausbreitung erfolgt immer an der äußeren, der Flamme zugänglichen Fläche des dreidimensionalen Objektes. Bei ausreichender Produktion brennbarer Gase und Dämpfe bildet sich ein zündfähiges Gemisch, welches durch die offene Flamme gezündet wird und dieselbe verlängert. Der Zeitraum bis zur Zündung der brennbaren Gase und Dämpfe ist vor allem abhängig von Stoffparametern wie Zündtemperatur, Wärmeübergangszahl, Wärmeleitzahl, Verdampfungs- und Zersetzungsenthalpien u. a., aber auch von der Umgebungstemperatur, von der Größe der Zündflamme und den Strömungsverhältnissen im Raum. Die Zeiten bis zum Zünden der Gase und Dämpfe können zwischen einigen Sekunden bis zu mehreren Minuten variieren.
- Phase 2 – Ausbreiten des Flammenbrandes vorzugsweise in senkrechter Richtung: Die Flammenausbreitung in senkrechter Richtung nimmt exponentiell zu und erreicht Werte bis etwa 6 m/min. Damit wird ein Lagerstapel mit einer Höhe von 6 m innerhalb 1 Minute in senkrechter Richtung vollständig von den Flammen erfasst.
- Phase 3 – Ausbreiten der Flammen über das gesamte dreidimensionale Brandobjekt: Die Flammenausbreitung verläuft von Ort der Zündung aus nacheinander über alle Phasengrenzflächen. Je nach Lage der Phasengrenzfläche werden unterschiedliche Geschwindigkeiten beobachtet. Die Flammenausbreitung auf waagerechten Flächen verläuft am langsamsten und ist über einen längeren Zeitraum näherungsweise linear. Es bilden sich infolge unterschiedlicher Rückstrahlungsverhältnisse örtlich unterschiedliche Flammen mit unterschiedlichen Temperaturen und Energiefreisetzungsraten aus. Der Brand dreidimensionaler Objekte erhält eine innere Struktur, über die keine Detailsagen möglich sind.
- Phase 4 – Ausbilden eines labilen Gleichgewichtszustandes mit konstanten Abbrand- und Wärmefreisetzungswerten: In Brandbereichen, die von den Flammen bereits vollständig erfasst sind, stellen sich entsprechend den Randbedingungen (Phasengrenzfläche, Struktur der Flamme, Brandstoff- und Luftzuführung) konstante Werte für Energie-

freisetzung und Abbrandrate ein. Diese Werte bleiben nur solange erhalten, solange die Randbedingungen nicht verändert werden. Veränderungen der Randbedingungen, wie Art, Lage und Größe der Phasengrenzflächen, Strömungsbedingungen für Luft und Abgas u.ä. bewirken einen anderen Zustand, der wieder ein Gleichgewicht anstrebt. Gleichgewichtszustände können auch beim Einsatz von Löschmitteln erreicht werden, wenn der Löscherfolg ausbleibt.

- Phase 5 – Zusammenfallen der dreidimensionalen Struktur innerhalb des Brandobjektes und Ausbilden einer vorzugsweise ebenen, gewellten Oberfläche mit wenigen einzelnen verdeckten Bränden oder Glutnestern.

9.9.2 BRANDBEKÄMPFUNG

9.9.2.1 STATIONÄRE BRANDBEKÄMPFUNG

- Die Brandbekämpfung durch stationäre Löschanlagen kann je nach Wirksamkeit der Branderkennung bereits in der Phase 1, spätestens jedoch in Phase 3 der Brandentwicklung wirksam werden.
- Bei dreidimensionalen Brandobjekten besitzen gasförmige Löschmittel als Volumenlöschmittel aufgrund ihrer Ausbreitung im gesamten freien Gasraum die besten Chancen, um das Brandobjekt zu löschen. Sie sind in der Lage an allen Stellen, an denen sich Flammen ausbilden können oder an denen Glutbrände durch Zuführung von Sauerstoff an den festen Grenzflächen unterhalten werden, die für einen Löscherfolg erforderlichen Bedingungen zu schaffen. Flüssige und feste Volumenlöschmittel sind infolge ihrer gerichteten Ausbreitung nach dem Austreten aus den Löschdüsen nur dann löschwirksam, wenn die gerichtete Strömung der Löschmittel alle freien Gasräume erfassen kann. Das ist aber nur bei einfachen Objekten und maximal bis zur Brandphase 2 möglich.
- Oberflächenlöschmittel, insbesondere Wasser und Schäume sind umso effizienter je früher sie zum Einsatz kommen. Löschanlagen mit Brandfrüherkennung und Sprinkler mit geringen RTI – Werten können bereits innerhalb der Phase 1 und 2 wirksam werden. Trotzdem kann mit Oberflächenlöschmitteln ein Löscherfolg nicht garantiert werden, weil die Brandausbreitung bereits Grenzflächen erfasst haben kann, die durch das Löschmittel nicht mehr erreicht werden können. Aus diesem Grund können mit Sprinkler-, Sprühwasser- und der Mehrzahl von Schaumlöschanlagen Löscherfolge nicht immer er-

wartet werden, obwohl sie unter günstigen Bedingungen möglich sind. Diese Anlagen sind jedoch in jedem Fall auf das Verhindern der weiteren Brandausbreitung ausgelegt.

9.9.2.2 MOBILE BRANDBEKÄMPFUNG

- Die Bekämpfung von Bränden setzt praktisch erst in der Phase 2 bzw. 3 der Brandentwicklung ein. In einigen Fällen muss der Beginn der Brandbekämpfung erst in der Phase 4 der Brandentwicklung angesetzt werden. Mit zunehmender Zeit zwischen der Zündung durch eine offene Flamme und dem Wirksamwerden der Löschmittel gestaltet sich die Brandbekämpfung schwieriger und die Aussichten auf einen Löscherfolg verringern sich.
- Sind innerhalb des Brandobjektes stationäre Löschanlagen mit Oberflächenlöschmitteln wirksam geworden, beschränkt sich die Brandbekämpfung vorzugsweise auf verdeckte Brände innerhalb des dreidimensionalen Brandobjektes. Verdeckte Brände können nur dann gelöscht werden, wenn die Phasengrenzflächen des brennbaren Stoffe mit dem Löschmittel direkt beaufschlagt werden. Dazu müssen die Wassertropfen und -strahlen gezielt auf die Grenzflächen aufgegeben werden. Können die Grenzflächen nicht erreicht werden, dann bestehen zwei mögliche Varianten:

Variante 1 – Aufbringen des Löschmittels auf der oberen waagerechten Fläche des Brandobjektes mit dem Ziel, dass beim Abfließen des Wassers die Phasengrenzflächen erreicht werden können. Dies kann allerdings durch die Einsatzkräfte nicht mehr beeinflusst werden. Als Hilfsmittel sollten hier gezielt Netzmittel dem Löschwasser zugesetzt werden. Trotz des Zusatzes von Netzmitteln ist die Wirkung des abfließenden Löschwassers zufällig, die Verlustrate hoch und ein Löscherfolg kann nicht garantiert werden.

Variante 2 – Besteht die Möglichkeit nicht erreichbare Grenzflächen dem Löschmittel zugänglich zu machen, kann durch die Kombination von mechanischem Beräumen des Brandobjektes und durch Ablöschen der erreichbaren Grenzflächen ein Löscherfolg erzielt werden. Der Aufwand ist sowohl vom Einsatz an Technik, Löschmittel als auch durch die Absicherung der Kräfte vor Ort sehr hoch.

- Bestehen keine Möglichkeiten diese Varianten anzuwenden, dann kann ein Löscherfolg erst wieder mit Sicherheit erreicht werden, wenn das dreidimensionale Brandobjekt bei fortgeschrittener Branddauer in sich zusammenfällt und die inneren Phasengrenzflächen praktisch nicht mehr zum Tragen kommen (Phase 5). Das Brandobjekt entspricht dann

im wesentlichen einer gewellten ebenen Oberfläche mit nur noch vereinzelt vorhanden verdeckten Bränden oder Glutnestern. Mit dem Löschmittel ist zu diesem Zeitraum der wesentliche Teil der noch vorhandenen Grenzflächen wieder erreichbar und der Löscherfolg ist erzielbar.

9.9.3 SCHADSTOFFENTWICKLUNG

9.9.3.1 SCHADSTOFFE ALS VERBRENNUNGSPRODUKTE

Brennbare Stoffe können bei der Verbrennung toxische Stoffe bilden. Dazu müssen im Molekül dieser Stoffe entsprechende Elemente enthalten sein. Elemente, die durch Verbrennung zu toxischen Stoffen führen sind: Fluor, Chlor, Brom, Jod, Phosphor, Schwefel, Kohlenstoff und mit Abstrichen Stickstoff. Aus den Halogenen werden in der Flamme vorzugsweise die Halogenwasserstoffe gebildet, die stark toxische Reizgase darstellen. Phosphor und Schwefel bilden toxische Oxide, von denen jedoch das Phosphoroxid als fester und nichtschmelzender Stoff nur teilweise in Form von Aerosolen emittiert wird. Der Hauptteil des Phosphoroxides verbleibt in den Verbrennungsrückständen. Kohlenstoff reagiert vorzugsweise zu Kohlendioxid, welches als Gas eine erstickende Wirkung besitzt. Ein Teil des Kohlenstoffes verbrennt nicht vollständig und bildet das toxische Kohlenmonoxid. Zwischen Kohlenmonoxid und Kohlendioxid besteht temperaturabhängig bei jeder Konzentration an Verbrennungsluft ein definiertes Gleichgewicht. Damit wird Kohlenmonoxid bei jeder Verbrennungsreaktion entstehen. Das Konzentrationsverhältnis zwischen Kohlendioxid und Kohlenmonoxid erreicht bei Flammenverbrennungen je nach Luftüberschuss Werte zwischen 0,01 und 0,1. Bei Glutbränden kann das Verhältnis wesentlich über den Wert von 0,1 ansteigen. Stickstoff reagiert vorzugsweise zu molekularem Stickstoff. Bei hohen Temperaturen können teilweise toxische Stickoxide entstehen. Ebenso können bei geringen Temperaturen in Verbindung mit Kohlenstoff giftige Zyanverbindungen freigesetzt werden.

Je nach Anteil der Elemente innerhalb des Brandstoffmoleküls treten die toxischen Verbindung in den zu berechnenden Konzentrationen in den Rauchgasen auf und bestimmen die toxischen Eigenschaften der Rauchgase. Die Berechnung der Konzentration erfolgt über den prozentualen Anteil des Elementes in der Verbindung unter Zugrundelegen einer vollständigen Verbrennung und des jeweiligen geschätzten Luftüberschusses.

Die Brandentwicklung relativiert die grundsätzliche Aussage zusätzlich, weil in den verschiedenen Brandphasen unterschiedliche Brandstoffe die Verbrennung bestimmen.

Innerhalb der Brandphasen 1 und 2 reagieren vorzugsweise Stoffe, die als Verpackungsmaterialien verwendet werden. Diese Verbindungen enthalten in der Regel keine Bestandteile, die zu toxischen Verbindungen reagieren. Die Toxizität der Rauchgase wird vorzugsweise durch das Kohlenmonoxid bestimmt, dessen Konzentration aber aufgrund des hohen Luftüberschusses gering ist.

Ab Phase 3 ist mit dem Eintritt von Lagerprodukten in die Verbrennungsreaktion zu rechnen. Damit steigt in Abhängigkeit vom Masseanteil der Elemente, die toxische Verbindungen hervorbringen, die Konzentration toxischer Gase im Rauchgas. Der Absolutwert der Schadstoffemission ist dann an die verbrennende Gesamtmasse des brennbaren Stoffes gebunden.

9.9.4 REAKTIONSPRODUKTE DER FLAMME ALS SCHADSTOFFE

Organische Reaktionsprodukte mit toxischen Eigenschaften entstehen innerhalb der Flamme durch Nebenreaktionen zwischen Brandstoffradikalen bzw. können als Zersetzungs- oder Pyrolyseprodukte aus den brennbaren Stoffen gebildet werden. Der Anteil am Gesamtumsatz der Verbrennung richtet sich nach dem Luftangebot. Die entstehenden Reaktionsprodukte können ihre toxische Wirkung innerhalb der Rauchgase sofort entfalten (akut toxische Verbindungen). Zu diesen Stoffen gehören die Zyanverbindungen, Phosgen, Aldehyde (Formaldehyd und Acrolein), Isonitrile und Isocyanate, niedere ringförmige Kohlenwasserstoffe. Ein Teil der entstehenden Verbindungen besitzt toxische Eigenschaften, die jedoch infolge der geringen Bioverfügbarkeit der Verbindungen nicht sofort zum tragen kommen, sondern erst über die Nahrungskette für Mensch und Tier ihre toxischen Wirkungen entfalten (permanent toxische Verbindungen). Zu dieser Gruppe von Verbindungen gehören die PAK (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), PCDD (Polychlorierte Dibenzodioxine) und PCDF (Polychlorierte Dibenzofurane). Infolge ihrer stark hydrophoben Eigenschaften werden die permanent toxischen Verbindungen im Brandfall vorzugsweise an Ruß und Flugaschen gebunden und lagern sich mit diesem auf dem Boden ab. Exakte Aussagen über die tatsächlichen Konzentrationsverhältnisse können bei Bränden immer nur durch in situ Messungen getroffen werden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen die zu erwartenden Tendenzen der Bildung von Schadstoffen auf.

- Die Entwicklung von Schadstoffen ist an die Brandentwicklung gebunden und wird sich je nach Vollständigkeit der Verbrennung innerhalb des Brandobjektes verändern.
- Phase 1 – Innerhalb der ersten Phase der Brandentwicklung ist davon auszugehen, dass für die Verbrennung noch ideale Bedingungen herrschen und deshalb der brennende Stoff praktisch vollständig reagieren kann. Entsprechend der sich einstellenden Reaktorstemperatur entstehen auch in dieser Phase bereits Schadstoffe. Die Flammentemperaturen liegen innerhalb der Flammen, stoffabhängig zwischen 700 und 1200 °C.
- Phase 2 – Die Entwicklung des Brandes verläuft auch in Phase 2 noch unter günstigen Randbedingungen, die vor allem durch die sich entwickelnde Auftriebsströmung der Rauchgase günstig beeinflusst werden. In der senkrechten Hauptströmung werden Temperaturen zwischen 1000 und 1200 °C erreicht. In den waagerechten Strömungsbereichen und innerhalb der Bereiche eine beginnenden Ausbildung verdeckter Brände können aber schon Pyrolyseprodukte unverbrannt abgeführt werden und die Temperaturen erreichen Werte zwischen 500 und 700 °C. Als brennbarer Stoff tritt zum Zündmittel im Wesentlichen das Verpackungsmaterial hinzu, welches praktisch keine Elemente innerhalb der Verbindung enthält, die toxische Reaktionsprodukte liefern.
- Phase 3 – Die Entwicklung des Brandes verläuft schrittweise über alle Bereiche, es bilden sich innerhalb des Brandobjektes heiße Zonen mit 1000 – 1200 °C und kältere Bereiche mit 500 - 700 °C aus. Die gesteigerte Produktion von Schadstoffen im Brandobjekt beginnt. Da aber immer noch genügend Luft zur Verfügung steht, erfolgt im Wesentlichen durch Nachverbrennung eine Reduzierung der Schadgase. Der Anteil an organischen Schadstoffen bleibt gering und kann nach Richter [9-41] bei Verbrennungstemperaturen von > 900 °C etwa 1g Gesamtreaktionsprodukt (flüchtig) je Kilogramm Brandstoff angegeben werden. Der Anteil an nichtflüchtigen Reaktionsprodukten, insbesondere PAK liegt bei ca. 1 mg je Kilogramm Brandstoff.
- Phase 4 – Die sich einstellenden labilen Gleichgewichte erbringen je nach Grad der Belüftung unterschiedliche Schadstoffproduktionen hervor, die innerhalb des Brandobjektes ihr Maximum erreichen und bei Emissionen ohne Nachverbrennung diese Schadstoffe an die Umgebung abgeben. Bestimmt die Zufuhr an Luft das labile Gleichgewicht des Brandes, dann ist die Schadstoffentwicklung maximal. Erst bei Zerstörung des Bauwerkes oder nach dem Schaffen von Abluftöffnungen sinkt mit ausreichender Luftzuführung die Schadstoffemission. Die thermische Überhöhung der Rauchgaswolke und die damit verbundene Verdünnung der Rauchgase in größeren Höhen verringert die Toxizität der

Rauchgase zusätzlich. Nach Richter [9-41] ist innerhalb der Räume mit hohen Konzentrationen organischer Verbindungen, insbesondere Pyrolyseprodukten zu rechnen. Die Gesamtkonzentration an Schadstoff unter Voraussetzung einer Flammenverbrennung kann bis auf 100 g Gesamtreaktionsprodukt je Kilogramm Brandstoff ansteigen. Wird das Rauchgas bei Austritt aus dem Brandherd und damit Luftzuführung nochmals gezündet oder bestehen bereits ausreichende Öffnungen im Gebäude, werden die hohen Anteile an Reaktionsprodukten auf Größenordnungen wie sie in Phase 3 beschrieben sind, reduziert.

- Phase 5 – Die ebene Fläche bildet ein relativ stabiles Verbrennungsgleichgewicht aus. Da zum Zeitraum des Zusammenfallens des dreidimensionalen Brandobjektes damit zu rechnen ist, dass den Brand ausreichend Luft zugeführt wird, kann mit einem geringen Schadstoffeintrag bezogen auf die verbrannte Masse an Brandstoff gerechnet werden.

Nach dem Ablöschen des Brandobjektes bewirkt die im Brandstoff verbleibende Energie und die Unterbindung der Verbrennung eine hohe Konzentration an Pyrolyseprodukten. Wenn diese Produkte toxische Wirkung besitzen, besteht nach dem Ablöschen nochmals eine erhöhte Gefahr durch Schadstoff. Unmittelbar nach dem Löschen des Brandes können die Konzentrationen der Pyrolyseprodukte örtlich Größenordnungen erreichen, wie sie in den Verbrennungsphasen auftraten. Die Produktion von Pyrolyseprodukten kann neben der toxischen Wirkung auch noch zu zündfähigen Konzentrationen brennbarer Stoffe führen und örtlich Verpuffungs- bzw. sogar Explosionsgefahren hervorrufen.

9.10 BEWERTUNG DER NACHWEISMETHODEN

Die in diesem Abschnitt behandelten Modelle und Nachweisverfahren können zu unterschiedlichen Zwecken Eingang im Rahmen einer Störfallanalyse finden. Wird der vereinfachte Nachweis zur brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen betrachtet, so kann der Nachweis gemäß DIN 18 230 durchgeführt werden. Hier werden allerdings aufgrund einer möglicherweise hohen rechnerischen Brandlast auch große erforderliche Feuerwiderstandsdauern berechnet. Als Vorgaben sind bei diesem Nachweis die geometrischen Randbedingungen (Gebäudekubatur und Ventilationsbedingungen) sowie Art, Menge und Verteilung der Brandlast erforderlich.

Sollen lokal Temperaturen zur besonderen Bauteilauslegung berechnet werden, können Plume-Modelle eingesetzt werden. Als Eingangsgrößen werden neben den geometrischen

Randbedingungen und Brandlast vor allen Dingen ein Brandszenario nebst Energiefreisetzungsrates benötigt. Außerdem sollte bei länger andauernden Bränden eine Heißgastemperatur und die Dicke einer Heißgasschicht bekannt sein.

Letztere kann mit Hilfe von Zonenmodellen berechnet werden. Als Eingangsdaten werden die gleichen Daten benötigt wie für die Plume-Modelle. Zusätzlich werden Informationen zum Heizwert der Stoffe und Ausbeuten bezüglich der Brandprodukte benötigt. In Abhängigkeit des verwendeten Programmes kann bei entsprechenden Eingabedaten die mittlere Konzentration von CO, CO₂, HCl, Ruß oder anderer Brandprodukte in der Heißgassicht berechnet werden. Weitere Daten sind die Massenströme durch Ventilationsöffnungen. Somit werden die Quellterme an der Schnittstelle Gebäudeöffnung / Umgebung zur Verfügung gestellt. Sowohl die Energiefreisetzungsrates als auch die Ausbeute der Brandprodukte muss vorgegeben werden und kann nicht direkt berechnet werden.

Die Erstellung eines Eingabedatensatzes für ein Zonenmodell ist in einer relativ kurzen Zeitspanne möglich. Die Erstellung des Brandszenarios und die Bereitstellung der notwendigen Stoffdaten wie Heizwert und die Ausbeuten der Brandprodukte ist sorgfältig abzuwägen. Die Berechnungen für ein Szenario sind meist innerhalb einer Stunde beendet. Wenn wegen numerischer Probleme keine Lösung gefunden werden kann, so ist iterativ nach alternativen Eingabedatensätzen zu suchen.

Lokal exakte Vorhersagen über Konzentrationen oder Temperaturen (beispielsweise für die Auslegung von Sprinklern oder Rauchmeldern) können mit einem Zonenmodell nicht direkt durchgeführt werden. Die berechneten Daten können aber wie bereits beschrieben als Grundlage für die Plume-Modelle oder Plume-Formeln eingesetzt werden. Mit deren Hilfe lassen sich genauere Temperaturen in der näheren Umgebung berechnen (Ceiling-Jet).

Sollen lokale Größen berechnet werden, so ist der Einsatz der CFD-Technik (Feldmodelle) nicht zu umgehen. Eine detailliertere Berechnung benötigt naturgemäß auch eine höhere Genauigkeit bei der Beschreibung der Ausgangsgeometrie. Das bedeutet, dass Hindernisse wie Unterzüge oder geometrische Besonderheiten der Gebäudekubatur genau im Modell beschrieben werden müssen. In der Konsequenz entsteht ein weitaus größerer Zeitbedarf bei der Beschreibung der Geometrie des Modelles bei der „richtigen“ Beschreibung des Rechengitters. Entsprechend sind auch Veränderungen der Gebäudestruktur während des simulierten Brandes zu berücksichtigen.

Weiterhin benötigen die Berechnungen auf Basis der CFD-Technik ebenso die Bereitstellung der Quellterme, so dass sich auf diesem Wege Vereinfachungen in den Berechnungen

ergeben. Die Vorgabe der Energiefreisetzungsrates hat bei allen Modellen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnungen. Neben dem absoluten Betrag der Energiefreisetzungsrates inklusive Zeitabhängigkeit ist es auch von Bedeutung, in welcher Höhe sich das Feuer befindet, und wie sich dieser Ort des Feuers mit der Zeit verändert.

Die Feldmodelle sind weiterhin abhängig von den gewählten Submodellen, z. B. die Modellierung der Turbulenz betreffend. Diese sind nicht immer durch den Anwender selber zu wählen. Voraussetzung hierfür ist, dass eine programmierbare Schnittstelle vorhanden und der Anwender in der Lage ist, die entsprechende Programmierung vorzunehmen.

Wenn die vorhandenen Möglichkeiten eines CFD-Modelles genutzt werden können, so besitzen die berechneten Ergebnisse einen hohen Detaillierungsgrad. Dafür müssen aber die zur Verfügung stehenden Eingaben einen entsprechend hohen Genauigkeitsgrad haben. Unter diesen Voraussetzungen erfordern die Berechnungen einen hohen Aufwand an Zeit. Werden die durchgeführten CFD-Berechnungen mit den Zonenmodell-Berechnungen verglichen, so ergeben sich für die Zonenmodell-Berechnungen im Mittel durchaus vergleichbare Ergebnisse. Die nachgerechneten Versuche zeigen ebenfalls befriedigende Übereinstimmungen mit berechneten Werten der Zonenmodelle.

9.11 BEREITSTELLUNG DER AUSBEUTEN VON BRANDPRODUKTEN

Sollen über die Anwendung der Berechnungen mit Zonen-Modellen die Quellterme an den Gebäudeöffnungen bereitgestellt werden, so muss auch hier iterativ vorgegangen werden. Zur Zeit existieren noch keine Zonenmodelle, die auf der Basis des Zuluftverhältnisses die Ausbeuten von Brandprodukten anpassen. Deswegen muss in einem ersten Berechnungsgang überprüft werden, ob sich bei der vorgegebenen Abbrand- bzw. Energiefreisetzungsrates (beispielsweise gemäß Abschnitt 8) ein brandlast- oder ein ventilationsgesteuerter Brand einstellt. Über den aus der Umgebung durch die Ventilationsöffnungen dem Brandabschnitt zugeführten Massenstrom an Luft und der vorhandenen Abbrandrate lässt sich das vorhandene Zuluftverhältnis ZLV (Verhältnis zwischen dem zur Verfügung stehenden Sauerstoff und dem theoretisch benötigten Sauerstoff im stöchiometrischen Fall) zeitabhängig bestimmen. Wie im Abschnitt 5 beschrieben, ist die Ausbeute von Brandprodukten abhängig von dem Parameter ZLV.

Im nächsten Schritt werden zu markanten Zeitpunkten die zu dem aktuellen Zuluftverhältnis gehörenden Ausbeuten als Eingabegröße in die Berechnung eingebracht. In Phasen ausrei-

chender Ventilation ($ZLV > 1$) werden demnach die Ausbeuten von Brandprodukten infolge einer unvollständigen Verbrennung geringer sein, als in unterventilierten Phasen des Brandverlaufes.

Stellt sich für die angegebene Konfiguration ein brandlastgesteuerter Brand ein, so können die Ausbeuten für die Berechnungen gemäß Abschnitt 8 bei einem $ZLV \geq 2$ eingesetzt werden. Versuche, die im Rahmen des CEC Projektes „*Guidelines for Management of Fires in Chemical Warehouses, TOXFIRE*“ (EV5V-CT93-0275) [9-42] durchgeführt wurden, zeigten, dass für das gemessene Zuluftverhältnis bei allen Versuchen der Wert von 1 (Unterventilation) nicht unterschritten wurde. Allerdings lässt sich aus den Ausbeuten selber und aus den gefundenen Brandprodukten vermuten, dass die Vorgänge am eigentlichen Brandherd selber unterventiliert waren und dass die Bestimmung der Ventilationsbedingungen durch den relativ großen Vorrat an Sauerstoff im Brandraum beeinflusst wurde. Oder, die geringere Temperatur, herbeigeführt durch die höhere Abkühlung am Lagergut, hat die Entstehung der Brandprodukte bei vergleichbaren Ventilationsbedingungen bei Untersuchungen im Labormaßstab verändert. Bei den Versuchen in [9-42] wurde ein Brandraum mit der Grundfläche von $6,0 \times 8,9 \text{ m}^2$ und einer lichten Höhe von $4,8 \text{ m}$ eingesetzt. Die Ventilationsöffnung hatte die Abmessungen von $0,8 \text{ m} \times 0,89 \text{ m}$ ($A_v = 0,72 \text{ m}^2$) und ist damit deutlich geringer als bei den hier beschriebenen Versuchen in einer realen Lageranordnung.

Grundsätzlich können die entsprechenden Ausbeuten durch Untersuchungen mit der Cone-Kammer experimentell bereitgestellt werden. In dieser Apparatur gelingt es, die Brandprodukte bei unterschiedlichen Ventilationsverhältnissen (gekennzeichnet durch ZLV) infolge einer Verbrennung mit Flammenbildung zu bestimmen. Die Energiefreisetzung wird über die Sauerstoffverbrauchsmethode bestimmt, und unabhängig davon wird die Abbrandrate des Brandgutes über eine Waage gemessen. Durch eine gesteuerte Zuluftzufuhr und die gemessene Abbrandrate lässt sich ZLV unabhängig von den Brandprodukten berechnen.

Inwiefern die Daten ebenfalls über eine Mikroverbrennungsapparatur ermittelt werden können, bedarf noch einer endgültigen Klärung. Auch hier wird die Apparatur mit einer gesteuerten Zuluft betrieben. Allerdings kann die Abbrandrate nicht über eine Gewichtsmessung ermittelt werden, sondern muss über die Analyse der Brandprodukte (z.B. CO_2) ausgerechnet werden. Bei derartiger Vorgehensweise ist die Wiederfindungsrate des eingesetzten Kohlenstoffes aus dem Brandgut in den Brandgasen von entscheidender Bedeutung für die angegebene Abbrandrate.

Dennoch liegt der Vorteil der Untersuchungen mit einer Mikroverbrennungsapparatur zur Untersuchung der Schadstoffspektren in den geringen Kosten, weil sie mit einem geringen

technischen Aufwand und einer minimalen Umweltbelastung durchgeführt werden können. Das Zuluftverhältnis ZLV ergibt einen aussagekräftigen Parameter zur Beschreibung eines Brandszenarios.

Die Versuche in der Mikroverbrennungsanlage, Teilprojekt II (FKZ 01 RG 9504/4, Prof. Bahadir), haben ergeben, dass die Ausbeute anderer toxischer Brandprodukte analog zu der Ausbeute von Kohlenmonoxid in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis verläuft. Die Ausbeuten unterschiedlicher Chemikalien können dem Bericht des o.a. Teilprojektes entnommen werden.

9.12 LITERATURHINWEISE

- [9-1] Gäfke, Axel: Entwicklung eines Informationssystems für die Feuerwehr zur Gefahrenabschätzung und einsatztaktischen Unterstützung bei Brandstörfällen in Chemikalienlagern. Diplomarbeit an der Hochschule Bremerhaven, Transportwesen, 1997
- [9-2] Ingason, Haukur: Experimental and Theoretical Study of Rack Storage Fires. Lund University, Department of Fire Safety Engineering, ISSN 1102-8246, Lund 1996
- [9-3] Atkins, G.: Controlling fires in pesticide warehouses. Draft report of Health and Safety Laboratory, Buxton, 1997
- [9-4] McGrattan, K.; Hamins, A.; Stroup, D.: Sprinkler, Smoke and Heat Vent, Draft Curtain Interaction – Large Scale Experiments and Model Development. NISTIR 6196-1, September 1998
- [9-5] Mawhinney, J.R.: Design of water mist fire suppression systems for shipboard enclosures. In: Proceedings of the international conference on water mist fire suppression systems, Borås 4-5 November 1993.
- [9-6] Arbeitskreis „Rauchabzug im Industriebau“ der Projektgruppe „Brandschutz im Industriebau“: Dokumentationsunterlage zum Rauchabzug im Industriebau unter besonderer Berücksichtigung gesprinklerter Brände, Braunschweig, Juli 1997
- [9-7] Verband der Sachversicherer (VdS): Jahresbericht 1991/92
- [9-8] Bukowski, R.W. (ed.): Balanced Design Workshop, NISTIR 5264, 1993

- [9-9] Morgan, H. P.: Smoke Control Methods in Enclosed Shopping Complexes of one or more Storeys, A Design Summary. BRE, 1979
- [9-10] Theobald, C. R.: The growth and development of fire in industrial buildings. Fire Prevention Science and Technology 1977 (17)
- [9-11] ISO/CD 13388 - Fire safety engineering; Design Fire Scenarios and Design Fires, Draft February 1997
- [9-12] Fire Engineering Guidelines. Fire Code Reform Centre Limited, Sydney NSW 2000, Australia
- [9-13] Hosser, D., Blume, G., Siegfried, W. und Will, J.: Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU-1996-476 ISSN 0724-3316, 1996
- [9-14] Heskestad, G.: Engineering Relations for Fire Plumes. Fire Safety Journal (1984), pp. 25-32
- [9-15] Evans, D.: Ceiling Jet Flows. The SFPE Handbook of Fire protection Engineering, Section 2, Chapter 4, pp 2.32-2.39
- [9-16] Beyler, C.L.: Fire plumes and Ceiling Jets. Fire Safety Journal, 11 (1986), pp. 53-76
- [9-17] Drysdale, D.: The Flashover Phenomenon. Fire Engineers Journal, 11 (1996)
- [9-18] Fire Safety Engineering in Buildings, Part 1: Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles. DD 240: Part 1: 1997, ISBN 0 580 27952 9
- [9-19] Davis, W.D.; Notarianni, K.A.; Tapper, P.Z.: An Algorithm for Estimating the Plume Centerline Temperature and Ceiling Jet Temperature in the Presence of a Hot Upper Layer. NISTIR 6178, National Institute of Standards and Technology, Maryland, USA, 1998
- [9-20] Blume, G.: Vereinfachte Verfahren zur brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung der Verbrennungseffektivität. Diss. TU Braunschweig (in Vorbereitung).

- [9-21] Law, M.: Fire Safety of external building elements – The design approach. AISC Engineering Journal, 1978
- [9-22] Jones, W.W.: Modelling Smoke Movement through Compartment Structures. Journ. of Fire Sciences, Vol. 11 (1993), 172
- [9-23] Cooper, L. Y.: Interaction of an Isolated Sprinkler Spray and a Two-Layer Compartment Fire Environment. NISTIR 4587, 1991
- [9-24] Rockett, J.A.: Using the Harvard/NIST Mark VI Fire Simulation. NISTIR 4464, 1990
- [9-25] Mitler, H. E., Rockett, J.A.: User's Guide to FIRST, NBSIR 87-3595, 1987
- [9-26] Heins, T.: Simulationsmodell zur sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung bei Bränden in ausgedehnten Räumen. Dissertation Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1991
- [9-27] Tanaka, T., Yamana, T.: Smoke Control in Large Scale Spaces; Part 1 + 2. Fire Science and Technology, Vol. 5, No. 1 (1985), 31-54
- [9-28] Chow, W.W., Wong, W.K.: On the Simulation of Atrium Fire Environments in Hong Kong Using Zone Models. Journ. of Fire Sciences, Vol. 11 (1993), 3
- [9-29] Schwanebeck, W., Siegfried, W.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Brandentstehung und -ausbreitung. Braunschweiger Brandschutz-Tage 1991
- [9-30] Rockett, J.A.: Modelling of NBS Mattress Tests with the Harvard Mark V Fire Simulation. NBSIR 81-2440, 1982
- [9-31] Peacock, R. D., Forney, G. P., Reneke, P., Portier, R., Jones, W. W.: CFAST, the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note 1299, Gaithersburg, February 1993
- [9-32] T.E:Waterman: Room Flashover – criteria and synthesis. Fire Technology 4, 25-31 (1968)

- [9-33] B.Haggelund,R.Jansson,B.Onnermark: Fire development in residential rooms after ignition from nuclear explosions. FOA Report C 20016-D6 (A3). Forsvarets Forskningsanstalt. Stockholm
- [9-34] B.J.McCaffrey, J.G.Quintiere, M.F.Harkieroad: Estimating room temperatures and the likelihood of flashover. Fire Technology 17 98-119, 18 122 (1981)
- [9-35] Parkes, A.R.: Under-ventilated compartment fires – a precursor to smoke explosions. Fire Engineering Research Report 96/5, 12/95, School of Engineering, University of Canterbury, Christchurch, Neuseeland
- [9-36] Gottuk, D.T.; Williams, F.W.; Farley, J.P.: The development and mitigation of backdrafts: a full-scale experimental study. Fire Safety Science – Proceedings of the Fith International Symposium, 1997, 935-946
- [9-37] Beard, A.: Limitations of computer models. Fire Safety Journal, 18 (1992), 375-391
- [9-38] McGrattan, K.B.; Baum, H.R.; Rehm, R.G.: Large Eddy Simulation of smoke movement. Fire Safety Journal, 30 (1998), 161-178
- [9-39] Baum, H.R.; McGrattan, K.B.; Rehm, R.G.; Three dimensional simulations of fir plume dynamics. Journal of the Heat Transfer Society of Japan, 45-52, 1997
- [9-40] Hamins, A.; McGrattan, K.B.: Reduced-scale experiments to characterize the the suppression of rack storage commodity fires. Technical report NISTIR 6439, National Institute of Standards and Technology, November 1999
- [9-41] Richter, H.: Brandsimulation durch Mikroverbrennung. Diss. TU Braunschweig, 1999
- [9-42] Lönnermark, A.; Blomqvist, P.; Månsson, M.; Persson, H.: TOXFIRE – Fire Characteristics and Smoke Gas Analyses in Under-ventilated Large-scale Combustion Experiments: Storage Configuration Tests. SP Report 1996:46, ISBN 91-7848-651-3

10 ZUSAMMENFASSUNG

Anlass zur Durchführung des vorliegenden vom Bundesforschungsministerium für Bildung und Forschung geförderten F+E-Projektes sind die erheblichen Gefahren für Mensch und Umwelt, die bei Brandstörfallen in Anlagen, in denen große Mengen an brennbaren Stoffen und/oder Gefahrstoffen gelagert werden, ausgehen. Die dabei möglicherweise freigesetzten Schadstoffe können direkt oder indirekt über den Luft- oder Wasserpfad auf Menschen einwirken. Eine besondere Rolle spielen Zwischenlager für Pflanzenschutzmittel (PSM), Schädlingsbekämpfungsmittel und andere Chemikalien in klein- und mittelständischen Betrieben oder Speditionen. Probleme können auch bei der Brandbekämpfung auftreten, weil durch Löschmittel toxische Stoffe aus dem Brandgut gelöst werden oder durch Wechselwirkung mit dem Brandgut toxische Stoffe entstehen. Daher sind spezielle Löschrategien notwendig, die einen raschen Löscherfolg ermöglichen und die Entstehung zusätzlicher Schadstoffe minimieren.

Die Regelungen zum vorbeugenden Brandschutz bei Anlagen mit gefährlichen Stoffen in Gesetzen, Verordnungen, Technischen Regeln sowie Richtlinien der Industrie sind seit 1987 beständig fortgeschrieben worden (z. B. TRbF 100, TRGS 514, VdS-Richtlinie 2218, LÖRüRL). Trotzdem liegt noch eine Vielzahl offener Fragen vor, die angesichts des großen Risikos zumindest in einem Teilbereich durch diese Forschung geklärt werden.

Diesen Fragen wird in dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Vorhabens in drei Teilprojekten nachgegangen:

- I. Experimentelle Untersuchungen zur Brandausbreitung in typischen Zwischenlagern für Chemikalien
- II. Experimentelle Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Löschrategien bei derartigen Lagern
- III. Entwicklung bzw. Erprobung von Modellansätzen für die Analyse von Brandverläufen und Brandwirkungen; Erarbeitung eines Leitfadens zur Durchführung von Nachweisen für Brandstörfälle und zur Optimierung von Schutzkonzepten für Chemikalienlager.

Die beiden ersten Teilprojekte umfassen im Wesentlichen Brandversuche in unterschiedlichem Maßstab zur Untersuchung der Brandausbreitung in Lageranordnungen (Teilprojekt I, iBMB) und der Wirksamkeit verschiedener Löschrmaßnahmen (Teilprojekt II, IdF, Minimax AG, IÖC). Hierbei sollen die notwendigen experimentellen Daten und Beurteilungs-

kriterien für die Analysemethoden des dritten Teilprojektes bereitgestellt werden. Weiterhin soll geklärt werden, welche Methoden und Ansätze sich zur Analyse des Brandverlaufs und der dabei entstehenden Wirkungen auf Gebäude und Umwelt eignen. Die Verfügbarkeit derartiger Methoden in praxisgerechter Aufbereitung ist notwendige Voraussetzung für die Erarbeitung oder Bewertung von Schutzkonzepten für Lagergebäude. Als praxisgerechte Hilfsmittel für die Nachweisführung und für die Festlegung geeigneter Schutzmaßnahmen soll ein Leitfaden erarbeitet werden, der mittelfristig in das o. g. Vorschriftenwerk (z. B. TRGS 514) einfließen könnte.

Die experimentellen Untersuchungen des Teilprojektes I wurden vom iMBM in vier Größenstufen durchgeführt. Bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Mikroverbrennungsversuchen stellt sich die Frage der Übertragbarkeit der mit diesen Experimenten gewonnenen Resultate auf reale Anordnungen. Mit der Verkleinerung des Maßstabes wächst die Komplexität der Parametereinflüsse. Nur unter Berücksichtigung des Einflusses der jeweiligen Versuchsanordnung ist eine abschließende Bewertung der Übertragbarkeit von Ergebnissen möglich. Unter diesen Gesichtspunkten wurden - in Abänderung des ursprünglichen Versuchskonzeptes - eigenständige chemische Analysen des iMBM geplant und durchgeführt, um erkannte Lücken in andererseits untersuchten Parameterspektren zu schließen.

Es wurden bei diesen Untersuchungen Resultate zur Parameterabhängigkeit der CO/CO₂-Bildung bei Verbrennung unter Beteiligung ausgewählter Pflanzenschutzmittel sowie zur Freisetzung des Atemgiftes HCN bei der thermischen Zersetzung stickstoffhaltiger Substanzen gefunden. Von den im Brandfall entstehenden Schadstoffen sind die Brandgase CO und HCN bekanntermaßen aufgrund ihrer akuten Toxizität von besonderer Relevanz.

Ausgewählt wurden jeweils eine technische Verbindung und eine Modellverbindung aus der Gruppe der Harnstoff- und Morpholinderivate (N-Ethylmorpholin), 1,2,4-Triazinone und cyclische Carbamate (2-Oxazolidinon). Da bei Bränden in Chemikalienlagern zusätzlich zu den Lagergütern auch weitere stickstofftragende Materialien beteiligt sein können, wurden die Untersuchungen auch in Form von Verpackungen oder als Baustoffe anzutreffende Polymerwerkstofftypen wie Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisate (ABS), Polyurethane (PUR) und Melamin-Formaldehyd-Harze (MF) ausgeweitet. In den Experimenten wurden in unserem Fall technische Produkte verwendet, deren Stickstoffgehalt ebenso wie bei den technischen Pflanzenschutzmitteln mittels Elementaranalyse bestimmt wurde. Die verwendete Mikroverbrennungsapparatur besteht aus einem speziellen Infrarot-Rohröfen, welcher Temperaturen über 1000°C bei Aufheizraten von >10 K/s zulässt.

Für die Charakterisierung des von Baustoffen und Lagergütern ausgehenden Risikos der Entzündung, Brandausbreitung und Brandwirkung sind Kenntnisse 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 finanziellem - Aufwand verbunden. Andererseits können die Randbedingungen einer großmaßstäblichen Untersuchung nur im begrenztem Rahmen kontrolliert und gesteuert werden. Dagegen lassen sich Kleinversuche bei verbesserter Kontrolle der Randbedingungen in größerer Anzahl durchführen. Im Rahmen dieses F+E-Vorhabens wurde daher besonderer Wert auf die Entwicklung und Erprobung einer Versuchstechnik zur Durchführung von kleinmaßstäblichen Brandversuchen unter kontrollierten Randbedingungen gelegt.

Das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 ist eine geeignete Grundlage für einen derartigen Versuchsaufbau, bei dem ein kegelförmiger, elektrisch beheizter Strahler (engl. Cone-Heater) in der Ebene der maximal 100 cm² großen Materialoberfläche eine homogene Strahlungsflussdichte erzeugt, wodurch die zu untersuchende Substanz erwärmt wird. Die Strahlungsflussdichte kann im Bereich 0 - 100 kW/m² eingestellt werden. Ein zusätzlicher, periodisch erzeugter Zündfunke in unmittelbare Nähe dient zur Entzündung der infolge der Erwärmung und Zersetzung austretenden Pyrolyseprodukte. Nach der Entzündung verbrennen die Zersetzungsprodukte in einer Diffusionsflamme, die Höhen bis zu 40 cm erreichen kann.

Um das Abbrandverhalten bei Variation der Ventilationsbedingungen untersuchen zu können, musste der Versuchsaufbau grundsätzlich geändert und eine geschlossene Kammer für das Cone-Calorimeter konstruiert werden. Dabei wird der gesamte Aufbau in die Kammer umgesetzt und auch das Abzugssystem nicht mehr benutzt. Dafür ist auf der Oberseite der ansonsten geschlossenen Kammer ein Rohr mit zwei Blenden und den Entnahmesonden montiert. Die Analyse der Rauchgaszusammensetzung erfolgt in einer Gasanalysestrecke. Die vorgemischte Zuluft wird von unten kontrolliert in die Kammer eingeblasen. Die Rauchgase strömen durch das vertikale Rohr an den Entnahmesonden vorbei, treten aus und werden vom Absaugsystem übernommen.

Zur Charakterisierung des Brandverlaufs und des Abbrandverhaltens sowie der Untersuchung von Einflüssen der Luftzufuhr auf das Abbrandverhalten im mittleren bis großen Maßstab, wurden ausgewählte Stoffe bei unterschiedlichen Ventilationsverhältnissen verbrannt. Die Versuche zur Ermittlung der Ventilationsabhängigkeit wurden in einem Versuchsstand nach ISO 9705 „Room-Corner-Test RCT“ durchgeführt (Höhe 2.4 m, Volumen: 21 m³).

Zur Durchführung von Versuchen in realen Lageranordnungen wurde ein Brandofen mit einer lichten Höhe von 5.6 m bei einer quadratischen Grundfläche verwendet. Dieser Ofen besitzt mit ca. 72 m³ gut das dreifache Volumen wie der Room-Corner-Test. Zur Anbindung an die Versuche im RCT wurden Poolbrände mit PE-Granulat und Glykol durchgeführt. Anschließend wurden Versuche in Regal- und Blocklagerung mit Verpackungsmaterial für feste und flüssige Pflanzenschutzmittel (PSM) durchgeführt. Der dritte Schritt erlaubte dann die Durchführung von Versuchen, bei denen die Verpackungsmaterialien mit Ersatzstoffen für die Pflanzenschutzmittel gefüllt waren.

Eine Anbindung der Großbrandversuche bezüglich der Schadstoffentstehung an die Mikroverbrennungsversuche und die Versuche im modifizierten Cone-Calorimeter soll über das Zuluftverhältnis ZLV geschaffen werden. Das Verhältnis ZLV gibt an, unter welchen Bedingungen die Verbrennung stattgefunden hat

Der Parameter ZLV wird in der Literatur immer öfter benutzt, um die Ventilationsbedingungen während einer Verbrennung zu charakterisieren. In der englisch sprachigen Literatur wird größtenteils der Kehrwert benutzt. Dieser Parameter wird dann mit „Φ“, dem Global Equivalence Ratio (GER) bezeichnet.

Als Ergebnis werden Daten geliefert, mit der die Entstehungsraten von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, die effektiven Verbrennungswärme sowie die Abbrandrate berechnet werden können. Durch die Steuerungsmöglichkeit der Zuluftmenge beim modifizierten Cone-Calorimeter kann das Zuluftverhältnis ZLV leicht berechnet werden. Für die instationären Verbrennungsvorgänge im großen Maßstab werden mittlere Werte für die o.g. Entstehungsraten, Verbrennungswärme und Abbrandrate gebildet. Die Zeiträume für die Mittelwertbildung werden so gewählt, dass eine möglichst stationäre Phase erfasst wird.

Bei Pool-Bränden mit Polyethylen zeigt sich, dass sich die Abbrandrate proportional zu der verdoppelten Pool-Fläche verhält. Das Zuluftverhältnis verringert sich unwesentlich von 7,5 auf 5,7, es ist demnach genügend Luft zur vollständigen Verbrennung vorhanden. Dies spiegelt sich auch in der unveränderten Entstehungsrate für CO wieder.

Bei Pool-Bränden mit Glykol ist die Steigerung der Abbrandrate etwas unterproportional zur Flächenvergrößerung in Relation zum 1 m² Pool. Die Stufe von 4,5 m² nach 9 m² ist dagegen wieder proportional. Eine ähnliche Tendenz gibt es beim Zuluftverhältnis. Die effektive Verbrennungswärme und die Entstehungsrate für Kohlendioxid sinken mit abnehmenden Zuluftverhältnis. Auch hier ist bei der effektiven Verbrennungswärme eine deutliche Stufe

von $ZLV = 12$ auf $ZLV = 4$ zu erkennen. Die Entstehungsrate für Kohlenmonoxid bleibt auch hier nahezu konstant.

Außer bei den Abbrandraten ergeben sich für den Naturbrand in großem Maßstab Verhältnisse, die mit den Zuluftverhältnissen im modifizierten Cone-Calorimeter zwischen 0,5 und 2 liegen. D. h., die Entstehungsraten für Schadstoffe müssen für diese Zuluftverhältnisse mit dem modifizierten Cone-Calorimeter oder der Mikroverbrennungsapparatur ermittelt werden.

Bei den Versuchen in Lageranordnung stellt sich heraus, dass die Brandausbreitung in den ersten fünf Minuten nach Aktivierung der Zündquelle über die als Verpackung eingesetzten Kartonagen erfolgt. Erst ab diesem Zeitpunkt beginnt die in 1-Liter Flaschen abgefüllte brennbare Flüssigkeit auszulaufen. Bei den Versuchen im Rahmen von Teilprojekt II ergeben sich schnellere Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, bei denen zusätzlich zu einem früheren Zeitpunkt die eingelagerte Flüssigkeit ausläuft und zum Brandgeschehen beiträgt. Die Analysen ergeben, dass grundsätzlich mit einem quadratischen Modell zur Brandausbreitung gearbeitet werden kann, wobei der den Anstieg der Energiefreisetzungsrates bestimmende Parameter α mit der Höhe des untersuchten Lageraufbaues ansteigt. Können sich die Flammen ungehindert nach oben durch die einzelnen Ebenen des Lagergutes ausbreiten, so erreichen die Flammen innerhalb von 2 Minuten die Oberkante des Lageraufbaues. Weiterhin hat das Brandverhalten der ausgelaufenen Flüssigkeit erheblichen Einfluss auf die Brandentwicklung. Die bei den Brandversuchen in Lageranordnung verwendete Flüssigkeit (Glykol) ist eher als „gutmütig“ einzustufen.

Daraus ergibt sich die Forderung, dass bereits innerhalb der ersten fünf Minuten mit einer aktiven Brandbekämpfung zu beginnen ist, weil sich sonst der Brand bereits auf einen zu großen Bereich ausgeweitet hat. Bei Einsatz einer automatischen Feuerlöschanlage mit Löschmittel auf Wasserbasis reicht es aus, eine Rauch- und Wärmeabfuhr kurz nach Aktivierung der Löschanlage einzuschalten, wenn dies das Gefahrenpotential der gelagerten Stoffe im Hinblick auf die Umgebungsbebauung zulässt. Bei der Verwendung von Gaslöschanlagen wird naturgemäß auf eine Entrauchung während der Löschphase verzichtet. Im Rahmen einer variablen Lageranordnung ist ein Einbau einer RWA allerdings zu prüfen.

Die eingesetzten Nachweismethoden sind durchaus geeignet, die Brandwirkungen bei einem Lagerbrand zu berechnen. Vornehmlich sind hier die Brandwirkungen wie Temperaturentwicklung, Lage der Rauchgasgrenzschicht sowie die Massenströme der dem Brandbereich zuströmenden Umgebungsluft und der abströmenden Rauchgase zu sehen. Mit Hilfe der sich einstellenden Abbrandrate und der Ausbeuten der Brandprodukte lassen sich die

Quelltherme in die Umgebung abschätzen. Voraussetzung ist die Bereitstellung realistischer Brandszenarien mit der entsprechenden Brandausbreitung.

Zur Bestimmung der Ausbeuten von Brandprodukten unterschiedlicher Brennstoffe wird mit der modifizierten Cone-Kammer ein Verfahren entwickelt, mit dem im Labormaßstab die Lagerstoffe untersucht werden können. Bei diesem Verfahren besteht nicht die Gefährdung der Umwelt und die Richtlinien des Arbeitsschutzes können – im Gegensatz zu Raumbrandversuchen – bei geringem Kostenaufwand eingehalten werden.

Die Anbindung dieses Verfahrens an Brände im 1:1 Maßstab erfolgt über das Zuluftverhältnis, eine Größe, die bei den experimentellen Untersuchungen durch die Regelung des Zuluftstromes eingestellt werden kann. Weiterer Vorteile dieses Verfahrens sind, dass die Probeneinwaage im 100 g Bereich liegt, die Umgebungsbedingung bezüglich der Wärmebeaufschlagung über einen kegelförmigen Heizer (gleichmäßige Bestrahlung der gesamten Probenoberfläche) variiert werden kann und – ein wesentlicher Vorteil gegenüber den Mikroverbrennungsapparaturen – die Abbrandrate direkt gemessen werden kann. Mit diesem Verfahren können sukzessive die Lagergüter im Rahmen einer Materialprüfung charakterisiert werden. Die Ergebnisse wie Ausbeuten, flächenspezifische Abbrandraten, Rauchentstehung oder effektive Verbrennungswärme können direkt als Informationen in die Sicherheitsdatenblätter übertragen werden.

Einer weiteren Entwicklungsphase bedarf noch die Beprobung über Sorptionsröhrchen. Hier ist bereits ein Apparat zur Absaugung finiter Mengen aus den Verbrennungsgasen entwickelt worden. Allerdings muss der Ort und der Zeitpunkt sowie die Art, wie eine isokinische Absaugung gesteuert werden kann, durch Versuchsreihen in einem Forschungsvorhaben ermittelt werden. Sollte dies ermöglicht werden, so steht einer weitergehenden Untersuchung von Lagergütern zwecks realistischer Schadstoffemission im Brandfall das Grundwissen zur Verfügung.

Anhang A

zum Abschlussbericht

BMBF – Projekt FKZ 01RG9503/1

Auswertungsgrundlagen

A AUSWERTUNGSGRUNDLAGEN

A.1 DATENERFASSUNG UND UMRECHNUNG

Bei den experimentellen Untersuchungen wurden NiCr-Ni-Thermoelemente (Typ K), Druckaufnehmer, Gasanalysatoren, Wärmestromdichtesonde, Massenstrommesser bzw. -regler und Wiegezellen bzw. eine Abbrandwaage verwendet. Die Thermoelemente wurden direkt und bei den anderen Messaufnehmern wurden die analogen elektrischen Signalen auf eine Mehrkanal-Datenerfassungsanlage aufgeschaltet. In vorgegebenen Zeitintervallen wurden die Messwerte digitalisiert und zur Sicherung auf einen Personalcomputer übertragen. Die weitere Bearbeitung dieser Daten und die Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogrammen (Microsoft Excel, STATISTICA, AXUM).

Die Temperaturaufzeichnung erfolgte in der Einheit Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$). In den Fällen, in denen die Temperatur eines Gases für die Massen- bzw. Volumenstrommessung verwendet werden sollte, wurde bereits in der Datenaufzeichnungsanlage in Kelvin (K) umgerechnet.

$$T_{\text{K}} = T_{\text{C}} + 273,15 \text{ K}$$

T_{K} : Temperatur [K] (Gl. A.1)

T_{C} : Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Für die Druckaufnehmer, Wärmestromdichtesonden und Massenstrommesser bzw. -regler wurde vor den Versuchen die Offsetspannung U_0 (0-Punktabweichung) ermittelt. Für diese Messaufnehmer war der Umrechnungsfaktor a_Y durch Kalibrierung vor Beginn der Versuchsserie ermittelt worden. Der Messwert berechnet sich aus dem elektrischen Ausgangssignal, der ermittelten Offsetspannung und dem Umrechnungsfaktor.

$$Y(t) = (U(t) - U_0) \cdot a_Y$$

$U(t)$: Ausgangssignal [V]

U_0 : Offsetspannung [V] (Gl. A.2)

a_Y : Umrechnungsfaktor [Einheit V^{-1}]

$Y(t)$: Messwert [Einheit]

Für die eingesetzten Gasanalysatoren wurde täglich eine Kalibrierung durchgeführt. Hierfür wurde zum einem die Offsetspannung U_0 mit Hilfe von reinem Stickstoffgas N_2 ermittelt, zum anderen wurde zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors a_X ein Kalibriergas, das den Anteil X_K des zu messenden Gases enthielt, dem Gasanalysator zugeleitet und die elektrische Spannung U_K bestimmt. Mit der Offsetspannung U_0 und dem Umrechnungsfaktor a_X konnte

dann der Gasanteil $X(t)$ während der Versuche aus der Ausgangsspannung $U(t)$ berechnet werden.

$$X(t) = (U(t) - U_0) \cdot a_x \quad \text{mit} \quad a_x = \frac{X_K}{U_K - U_0}$$

X_K : Anteil der Komponente im Kalibrierogas [1]

U_K : Spannung für Anteil X_K [V]

U_0 : Offsetspannung, Messung mit 0 - Gas [V]

(Gl. A.3)

a_x : Umrechnungsfaktor [V^{-1}]

$U(t)$: Spannung [V]

$X(t)$: Anteil der Komponente [1]

Die genannten Umrechnungen der gemessenen Werte erfolgten nicht direkt während eines Experiments, sondern erst im Rahmen der Datenaufbereitung.

Bei den Versuchen im modifizierten Cone-Calorimeter wurden die Messwerte im Takt von 0,5 s aufgezeichnet. Die endgültige Auswertung erfolgte aber für größere Zeitintervalle (im allgemeinen 5 s). Daher wurden die ursprüngliche aufgezeichneten Messwerte (z. B. Spannung) vor Umrechnung in die physikalische Größe (Gl. A.3) geglättet, d. h. es wurde der endgültige Wert der Größe als Resultat einer fortlaufenden linearen Regression über die ursprünglichen Messwerte im festgelegten Zeitintervall um den Berechnungszeitpunkt bestimmt. Somit konnte auch für einen Zeitpunkt, an dem die Messwertgeber nicht abgefragt wurden ein Wert bestimmt werden. Dadurch wurde auch die zeitliche Verzögerung in der Messung (Ansprechzeit) bei Gasanalysatoren berücksichtigt, die durch die Zuführung des Gasgemischs vom Brandort über die Gasentnahmesonde und die Gasaufbereitung (Filter) auftritt.

$$n = i_{\text{Ende}} + i_{\text{Start}} + 1 \quad \bar{t} = \frac{1}{i_{\text{Ende}} + i_{\text{Start}} + 1} \cdot \sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} t_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} y_i$$

$$r = \frac{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (t_i - \bar{t}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (y_i - \bar{y})^2}} \quad y(t) = r \cdot \frac{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (t_i - \bar{t})^2} \cdot (t - \bar{t}) + \bar{y}$$

(Gl. A.4)

$i_{\text{Start}}, i_{\text{Ende}}$: Index des ersten bzw. letzten Datensatzes

n : Anzahl der Datensätze

t_i : Zeit, i - te Messung [s]

\bar{t} : Mittelwert der Zeit [s]

y_i : Messwert, i - te Messung [Einheit]

\bar{y} : Mittelwert des Messwerts [Einheit]

r : empirischer Korrelationskoeffizient [s]

$y(t)$: gemittelter Wert zum Zeitpunkt t [Einheit]

Es wurde die „Regressionsgerade für bestmögliche Voraussage von Y bei gegebenen Wert von X“ gewählt. Die „Regressionsgrade für bestmögliche Voraussage von X bei gegebenen Wert von Y“ wäre unsinnig, da ja gerade der Zeitpunkt (X-Wert) vorgegeben wird, um einen Y-Wert zu berechnen. Es hat sich als günstig erwiesen, die Messwertgeber mit hoher Frequenz abzufragen und die Daten nachträglich zu reduzieren. Bei einer Abfrage mit niedriger Frequenz (großen Pausen) könnten keinen Aussagen über Streuung bzw. Rauschen der Signale gemacht werden. Im Vorfeld wurde außerdem geprüft, ob es ausreicht, den abschließenden Wert allein durch eine einfache Mittelwertbildung zu bestimmen. Die gewählte Vorgehensweise mit der fortlaufenden linearen Regression ist aber der einfachen Mittelwertbildung überlegen, da auch zeitliche Änderungen des Signals besser dargestellt werden. Mit der „fortlaufenden linearen Regression“ wurden auch die im Weiteren zu zeigenden Werte bei „geglätteten“ zeitlichen Verläufen (Differenzdruck, Abbrandrate, effektive Verbrennungswärme, CO₂- und CO-Ausbeute) ermittelt. Die im Zusammenhang mit der „Glättung“ genannte „Anzahl der Nachbarn“ N besagt, dass N zeitlich vorherliegende Werte, der Wert selbst und N folgende Werte, also $2 \times N + 1$ Werte benutzt wurden.

A.2 BERECHNUNG DER ENERGIEFREISETZUNGSRATE

Die Energiefreisetzungsrate wurde nach den Grundsätzen der Sauerstoffkalorimetrie berechnet. Bei den Raumbrandversuchen wurde die Berechnungsformel aus ISO 9705 [0-1] angesetzt. Der normierte Volumenstrom im Abzugskanal berechnet danach aus dem Differenzdruck am „Bidi“ und der Ablufttemperatur.

$$\dot{V}_{298}^s(t) = A_{\text{Stack}} \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p(t)}{T_s(t)}}$$

A_{Stack} : Querschnitt des Abzugkanals [m²]

k_t : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils [1]

k_p : Reynolds - Zahl - Korrektur für das "Bidi" [1], = 1,08

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

(Gl. A.5)

ρ_0 : Dichte der Luft unter Normalbedingungen [kg m⁻³], = 1,293 kg m⁻³

$\Delta p(t)$: Druckdifferenz am "Bidi" [Pa]

$T_s(t)$: Temperatur der Abluft [K]

$\dot{V}_{298}^s(t)$: Abluftvolumenstrom [m³ s⁻¹], normiert auf 25 °C

Zusammen mit dem genannten Volumenstrom ergibt sich die Energiefreisetzungsrate bei Wasserdampf-Trapping vor den Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidanalysatoren und zusätzlichem Kohlendioxid-Trapping vor dem Sauerstoffanalysator wie folgt:

$$\dot{q}(t) = E^V \cdot \dot{V}_{298}^s(t) \cdot X_{O_2}^0 \cdot \frac{-\phi(t)}{\phi(t) \cdot (\alpha - 1) + 1} \quad \text{mit} \quad \phi(t) = 1 - \frac{X_{O_2}^{t,s}(t)}{X_{O_2}^{t,0}} \cdot \frac{1 - X_{O_2}^{Pa,0} - \frac{X_{CO}^{t,0}}{1 - X_{CO_2}^{t,0}}}{1 - X_{O_2}^{Pa,s}(t) - \frac{X_{CO}^{t,s}(t)}{1 - X_{CO_2}^{t,s}(t)}}$$

$X(t)$: Volumenanteil einer Komponente [1]

$^0, ^s$: in der Zuluft, in der Abluft

$^t, ^{Pa}$: nach H_2O - Trapping, nach zusätzlichem CO_2 - Trapping

(Gl. A.6)

$_{O_2}, _{CO_2}, _{CO}$: von Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid

$\phi(t)$: "oxygen depletion factor", Sauerstoffabnahmefaktor [1]

α : "expansion factor", Expansionsfaktor [1]

E^V : Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchten Sauerstoff [$kJ m_{O_2}^{-3}$]

$\dot{V}_{298}^s(t)$: Abluftvolumenstrom [$m^3 s^{-1}$], normiert auf 25 °C

$\dot{q}(t)$: Energiefreisetzungsrate, Brandleistung [kW]

Hierbei wurde eine eventuelle Reduktion der Energiefreisetzung durch unvollständige Verbrennung mit Kohlenmonoxidbildung nicht berücksichtigt. Wurden die Stoffe ohne Verpackung verbrannt, so wurde auch für die Berechnung der Energiefreisetzungsrate der Proportionalitätsfaktor E^V und der Expansionsfaktor α individuell für die eingesetzte Brandlast gewählt. Bei der Untersuchung von realen Lageranordnungen, bei denen die Brandlast aus Glysantin bzw. Lupolen in einer Verpackung aus Pappschachteln bzw. PE-Flaschen und zusätzlichen Umverpackungen aus Pappe, bei Palettenanordnung sogar noch zusätzliche Kunststofffolie, wurde der allgemein anerkannte Mittelwert des Proportionalitätsfaktor E^V von 17200 kJ m^{-3} (13100 kJ kg^{-1}) und der Wert 1,105 für den Expansionsfaktor α benutzt.

Bei den Versuchen im geschlossenen System des modifizierten Cone-Calorimeters wurde der in [A-2] dargestellte Ansatz gewählt, der auch die Verringerung der Energiefreisetzungsrate bei der Kohlenmonoxidentstehung berücksichtigt. Wie bei den Raumbrandversuchen wird das Messgas durch Wasserdampf-Trapping und Kohlendioxid-Trapping aufbereitet.

$$\dot{q} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot E^V \cdot \left(1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} + \frac{E^V - E_{CO}^V}{2 \cdot E^V} \cdot \left(Z_{CO/O_2}^S \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{CO/O_2}^0 \right) \right)$$

mit
$$\frac{Z_{O_2/N_2}^S(t)}{Z_{O_2/N_2}^0} = \frac{X_{O_2}^{Pa,s}(t)}{X_{O_2}^{Pa,0}} \cdot \frac{1 - X_{O_2}^{Pa,0} - \frac{X_{CO}^{1,0}}{1 - X_{CO_2}^{1,0}}}{1 - X_{O_2}^{Pa,s}(t) - \frac{X_{CO}^{1,s}(t)}{1 - X_{CO_2}^{1,s}(t)}}$$
,

$$Z_{CO/O_2}^0 = \frac{X_{CO}^{1,0}}{(1 - X_{CO_2}^{1,0}) \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}, \quad Z_{CO/O_2}^S(t) = \frac{X_{CO}^{1,s}(t)}{(1 - X_{CO_2}^{1,s}(t)) \cdot X_{O_2}^{Pa,s}(t)}$$

$X(t)$: Volumenanteil einer Komponente [1]

⁰, ^s: in der Zuluft, in der Abluft

¹, ^{Pa}: nach H₂O - Trapping, nach zusätzlichem CO₂ - Trapping

(Gl. A.7)

O_2 , CO_2 , CO : von Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid

E^V : Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchten Sauerstoff [kJ m_{O₂}⁻³]

E_{CO}^V : für die Umwandlung von CO [kJ m_{O₂}⁻³], = 23100 kJ m_{O₂}⁻³

$\dot{V}_{298}^0(t)$: Zuluftvolumenstrom [m³ s⁻¹], normiert auf 25 °C

$\dot{q}(t)$: Energiefreisetzungsrate, Brandleistung [kW]

Zur Bestimmung von Mittelwerten über bestimmte Zeitintervalle wurde vorbereitend die Energiefreisetzungsrate gemäß Trapezregel aufsummiert und die Gesamtenergiefreisetzungsrate gebildet:

$$Q_{total}(t_k) = \sum_{i=2}^k \frac{\dot{q}(t_{i-1}) + \dot{q}(t_i)}{2} \cdot (t_i - t_{i-1})$$

i, k : Index des Zeitpunktes

t_i : Zeit für i - ten Datensatz [s]

(Gl. A.8)

$\dot{q}(t_i)$: Energiefreisetzungsrate [kW]

$Q_{total}(t_k)$: Gesamtenergiefreisetzungsrate [kJ]

Die mittlere Energiefreisetzungsrate über bestimmte Zeitintervalle ergibt sich damit aus:

$$\overline{\dot{q}(t_i, t_j)} = \frac{Q_{total}(t_j) - Q_{total}(t_i)}{t_j - t_i}$$

i, j : Index des Zeitpunktes

t_i : Zeit für i - ten Datensatz [s]

(Gl. A.9)

$Q_{total}(t_i)$: Gesamtenergiefreisetzungsrate [kJ]

$\overline{\dot{q}(t_i, t_j)}$: mittlere Energiefreisetzungsrate [kW]

Die für die Versuche im modifizierten Cone-Calorimeter berechnete relative Energiefreisetzungsrate ergibt sich als Quotient aus der Energiefreisetzungsrate und der Probenfläche bzw. der Fläche der Probenpfanne:

$$\dot{q}^*(t) = \frac{\dot{q}(t)}{A}$$

A : Oberfläche des Brandes [m²]

(Gl. A.10)

$\dot{q}(t)$: Energiefreisetzungsrate [kW]

$\dot{q}^*(t)$: relative Energiefreisetzungsrate [kW m⁻²]

A.3 BERECHNUNG DER ABBRANDRATE

Die Abbrandrate für die Versuche im modifizierten Cone-Calorimeter wird gemäß ISO 5660 [A-3] mit Hilfe einer numerischen Differentiation bestimmt.

Für „einfache Schrittweite“ lauten die Gleichungen für die numerische Differentiation:

$$-\dot{m}(t_1) = \frac{25 \cdot m(t_1) - 48 \cdot m(t_2) + 36 \cdot m(t_3) - 16 \cdot m(t_4) + 3 \cdot m(t_5)}{3 \cdot (t_5 - t_1)}$$

$$-\dot{m}(t_2) = \frac{10 \cdot m(t_1) + 3 \cdot m(t_2) - 18 \cdot m(t_3) + 6 \cdot m(t_4) - m(t_5)}{3 \cdot (t_5 - t_1)}$$

$$-\dot{m}(t_{3 \leq i \leq n-2}) = \frac{-m(t_{i-2}) + 8 \cdot m(t_{i-1}) - 8 \cdot m(t_i) + m(t_{i+2})}{3 \cdot (t_{i+2} - t_{i-2})}$$

$$-\dot{m}(t_{i=n-1}) = \frac{-10 \cdot m(t_n) - 3 \cdot m(t_{n-1}) + 18 \cdot m(t_{n-2}) - 6 \cdot m(t_{n-3}) + m(t_{n-4})}{3 \cdot (t_{n-4} - t_n)}$$

(Gl. A.11)

$$-\dot{m}(t_{i=n}) = \frac{-25 \cdot m(t_n) + 48 \cdot m(t_{n-1}) - 36 \cdot m(t_{n-2}) + 16 \cdot m(t_{n-3}) - 3 \cdot m(t_{n-4})}{3 \cdot (t_{n-4} - t_n)}$$

i : Index des Zeitpunktes

n : Anzahl der Messzyklen, Index des letzten Messzyklus

t_i : Zeit für i - ten Datensatz [s]

m(t_i) : Masse [g]

$-\dot{m}(t_i)$: Abbrandrate [g s⁻¹]

In der Form mit „einfacher Schrittweite“ wurde die Abbrandrate für alle Versuche im modifizierten Cone-Calorimeter verwendet. Auch wurde diese Form anfangs für die Auswertung der Raumbrandversuche eingesetzt. Da bei den Raumbrandversuchen die Massenänderungen innerhalb eines Messintervalls im Vergleich zum Messbereich der eingesetzten Wiegeeinrichtungen sehr gering waren, wurde die ursprüngliche Form so umgewandelt, dass nur jeder vierte Wert bei der Differentiation vor und nach dem Zeitpunkt herangezogen wurde. Für diese Differentiation mit „vierfacher Schrittweite“ lauten die Gleichungen:

$$\begin{aligned}
-\dot{m}(t_1) &= \frac{25 \cdot m(t_1) - 48 \cdot m(t_2) + 36 \cdot m(t_3) - 16 \cdot m(t_4) + 3 \cdot m(t_5)}{3 \cdot (t_5 - t_1)} \\
-\dot{m}(t_2) &= \frac{10 \cdot m(t_1) + 3 \cdot m(t_2) - 18 \cdot m(t_3) + 6 \cdot m(t_4) - m(t_5)}{3 \cdot (t_5 - t_1)} \\
-\dot{m}(t_{3 \leq i \leq 4}) &= \frac{-m(t_{i-2}) + 8 \cdot m(t_{i-1}) - 8 \cdot m(t_{i+1}) + m(t_{i+2})}{3 \cdot (t_{i-2} - t_{i+2})} \\
-\dot{m}(t_{5 \leq i \leq 8}) &= \frac{-m(t_{i-4}) + 8 \cdot m(t_{i-2}) - 8 \cdot m(t_{i+2}) + m(t_{i+4})}{3 \cdot (t_{i-4} - t_{i+4})} \\
-\dot{m}(t_{9 \leq i \leq n-8}) &= \frac{-m(t_{i-8}) + 8 \cdot m(t_{i-4}) - 8 \cdot m(t_{i+4}) + m(t_{i+8})}{3 \cdot (t_{i-8} - t_{i+8})} \\
-\dot{m}(t_{n-7 \leq i \leq n-4}) &= \frac{-m(t_{i-4}) + 8 \cdot m(t_{i-2}) - 8 \cdot m(t_{i+2}) + m(t_{i+4})}{3 \cdot (t_{i-4} - t_{i+4})} \\
-\dot{m}(t_{n-3 \leq i \leq n-2}) &= \frac{-m(t_{i-2}) + 8 \cdot m(t_{i-1}) - 8 \cdot m(t_{i+1}) + m(t_{i+2})}{3 \cdot (t_{i-2} - t_{i+2})} \\
-\dot{m}(t_{n-1}) &= \frac{-10 \cdot m(t_n) - 3 \cdot m(t_{n-1}) + 18 \cdot m(t_{n-2}) - 6 \cdot m(t_{n-3}) + m(t_{n-4})}{3 \cdot (t_{n-4} - t_n)} \\
-\dot{m}(t_n) &= \frac{-25 \cdot m(t_n) + 48 \cdot m(t_{n-1}) - 36 \cdot m(t_{n-2}) + 16 \cdot m(t_{n-3}) - 3 \cdot m(t_{n-4})}{3 \cdot (t_{n-4} - t_n)}
\end{aligned}$$

i : Index des Zeitpunktes

n : Anzahl der Messzyklen, Index des letzten Messzyklus

(Gl. A.12)

t_i : Zeit für i -ten Datensatz [s]

$m(t_i)$: Masse [g]

$-\dot{m}(t_i)$: Abbrandrate [g s^{-1}]

Bei der Darstellung der Abbrandrate für die Untersuchungen im modifizierten Cone-Calorimeter wurde im Gegensatz zu den Raumbrandversuchen die Glättung gemäß Gl. A.4 mit unterschiedlicher Anzahl von Nachbarn auf die gemäß Gl. A.11 berechnete Abbrandrate angewendet.

Die mittlere Abbrandrate für ein vorgegebenes Zeitintervall wird aber nicht aus der o. g. Abbrandrate, sondern direkt aus Masse berechnet:

$$-\overline{\dot{m}(t_i, t_j)} = \frac{m(t_i) - m(t_j)}{t_j - t_i}$$

i : Index des Zeitpunktes

t_i : Zeit für i -ten Datensatz [s]

(Gl. A.13)

$m(t_i)$: Masse t_i [g]

$-\overline{\dot{m}(t_i, t_j)}$: mittlere Abbrandrate [g s^{-1}]

Die relative Abbrandrate berechnet sich analog zur relativen Energiefreisetzungsrate aus der Abbrandrate und der brennenden Oberfläche:

$$-\dot{m}^*(t) = \frac{-\dot{m}(t)}{A}$$

A : Oberfläche des Brandes [m²] (Gl. A.14)

– $\dot{m}(t)$: Abbrandrate [g s⁻¹]

– $\dot{m}^*(t)$: relative Abbrandrate [g s⁻¹ m⁻²]

A.4 EFFEKTIVE VERBRENNUNGSWÄRME, VERBRENNUNGSEFFEKTIVITÄT, KOHLENDIOXID- UND KOHLENMONOXIDAUSBEUTE

Die effektive Verbrennungswärme berechnet sich aus dem Quotienten von Energiefreisetzungsrate und Abbrandrate.

$$\Delta h_{c,eff}(t) = \frac{\dot{q}(t)}{-\dot{m}(t)}$$

$\dot{q}(t)$: Energiefreisetzungsrate [kW] (Gl. A.15)

– $\dot{m}(t)$: Abbrandrate [g s⁻¹]

$\Delta h_{c,eff}(t)$: effektive Verbrennungswärme [kJ g⁻¹]

Zur Glättung dieser Werte wurde die fortlaufende lineare Regression gemäß Gl. A.4 angewandt. Aus der Gesamtenergiefreisetzung und der Masse ergibt sich der Mittelwert der effektiven Verbrennungswärme vom Zeitpunkt t_i bis zu Zeitpunkt t_j aus:

$$\overline{\Delta h_{c,eff}(t_i, t_j)} = \frac{Q_{total}(t_j) - Q_{total}(t_i)}{m(t_i) - m(t_j)}$$

i : Index des Zeitpunktes

t_i : Zeit für i - ten Datensatz [s]

$Q_{total}(t_i)$: Gesamtenergiefreisetzung [kJ]

$m(t_i)$: Masse [g]

$\overline{\Delta h_{c,eff}(t_i, t_j)}$: mittlere effektive Verbrennungswärme [kJ g⁻¹]

Für die vergleichende Betrachtung kann auch die Verbrennungseffektivität herangezogen werden:

$$\chi = \frac{\Delta h_{c,eff}}{H_u}$$

χ : Verbrennungseffektivität [1]

(Gl. A.17)

$\Delta h_{c,eff}$: effektive Verbrennungswärme [kJ g⁻¹]

H_u : unterer Heizwert [kJ g⁻¹]

Zur Berechnung der Ausbeute von Kohlendioxid oder Kohlenmonoxid muss zuerst die Entstehungsrate berechnet werden. Für das modifizierte Cone-Calorimeter geschieht dies mit Hilfe des Zuluftvolumenstroms.

$$\Delta \dot{V}_{298,CO_2}(t) = \dot{V}_{298}^0(t) \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(Z_{CO_2/O_2}^S(t) \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^S(t)}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{CO_2/O_2}^0 \right)$$

$$\Delta \dot{V}_{298,CO}(t) = \dot{V}_{298}^0(t) \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(Z_{CO/O_2}^S(t) \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^S(t)}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{CO/O_2}^0 \right)$$

mit
$$\frac{Z_{O_2/N_2}^S(t)}{Z_{O_2/N_2}^0} = \frac{X_{O_2}^{Pa,S}(t)}{X_{O_2}^{Pa,0}} \cdot \frac{1 - X_{O_2}^{Pa,0} - \frac{X_{CO}^{1,0}}{1 - X_{CO_2}^{1,0}}}{1 - X_{O_2}^{Pa,S}(t) - \frac{X_{CO}^{1,S}(t)}{1 - X_{CO_2}^{1,S}(t)}}$$

$$Z_{CO_2/O_2}^0 = \frac{X_{CO_2}^{1,0}}{(1 - X_{CO_2}^{1,0}) \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}, \quad Z_{CO_2/O_2}^S(t) = \frac{X_{CO_2}^{1,S}(t)}{(1 - X_{CO_2}^{1,S}(t)) \cdot X_{O_2}^{Pa,S}(t)}$$

$$Z_{CO/O_2}^0 = \frac{X_{CO}^{1,0}}{(1 - X_{CO_2}^{1,0}) \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}, \quad Z_{CO/O_2}^S(t) = \frac{X_{CO}^{1,S}(t)}{(1 - X_{CO_2}^{1,S}(t)) \cdot X_{O_2}^{Pa,S}(t)}$$

$X(t)$: Volumenanteil einer Komponente [1]

⁰, ^s: in der Zuluft, in der Abluft

¹, ^{Pa}: nach H₂O - Trapping, nach zusätzlichem CO₂ - Trapping

o_2 , co_2 , co : von Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid

$\dot{V}_{298}^0(t)$: Zuluftvolumenstrom [m³ s⁻¹], normiert auf 25 °C

(Gl. A.18)

$\Delta \dot{V}_{298,CO_2}(t)$: Änderung des Volumenstroms CO₂ [m³ s⁻¹], normiert auf 25 °C

$\Delta \dot{V}_{298,CO}(t)$: Änderung des Volumenstroms CO [m³ s⁻¹], normiert auf 25 °C

Bei den Raumbrandversuchen wird der Abluftvolumenstrom ermittelt. Daher lautet die Gleichung zur Bestimmung der Kohlendioxid- bzw. Kohlenmonoxidentstehungsrate wie folgt:

$$\Delta \dot{V}_{298,CO_2}(t) = \dot{V}_{298}^s(t) \cdot X_{O_2}^0 \cdot \frac{1}{1 + (\alpha - 1) \cdot \phi(t)} \cdot \left(Z_{CO_2/O_2}^s(t) \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^s(t)}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{CO_2/O_2}^0 \right)$$

$$\Delta \dot{V}_{298,CO}(t) = \dot{V}_{298}^s(t) \cdot X_{O_2}^0 \cdot \frac{1}{1 + (\alpha - 1) \cdot \phi(t)} \cdot \left(Z_{CO/O_2}^s(t) \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^s(t)}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{CO/O_2}^0 \right)$$

mit
$$\frac{Z_{O_2/N_2}^s(t)}{Z_{O_2/N_2}^0} = \frac{X_{O_2}^{Pa,s}(t)}{X_{O_2}^{Pa,0}} \cdot \frac{1 - X_{O_2}^{Pa,0} - \frac{X_{CO}^{l,0}}{1 - X_{CO_2}^{l,0}}}{1 - X_{O_2}^{Pa,s}(t) - \frac{X_{CO}^{l,s}(t)}{1 - X_{CO_2}^{l,s}(t)}}$$
,

$$Z_{CO_2/O_2}^0 = \frac{X_{CO_2}^{l,0}}{(1 - X_{CO_2}^{l,0}) \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}, \quad Z_{CO_2/O_2}^s(t) = \frac{X_{CO_2}^{l,s}(t)}{(1 - X_{CO_2}^{l,s}(t)) \cdot X_{O_2}^{Pa,s}(t)}$$

$$Z_{CO/O_2}^0 = \frac{X_{CO}^{l,0}}{(1 - X_{CO_2}^{l,0}) \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}, \quad Z_{CO/O_2}^s(t) = \frac{X_{CO}^{l,s}(t)}{(1 - X_{CO_2}^{l,s}(t)) \cdot X_{O_2}^{Pa,s}(t)}$$

$$\phi(t) = 1 - \frac{X_{O_2}^{l,s}(t)}{X_{O_2}^{l,0}} \cdot \frac{1 - X_{O_2}^{Pa,0} - \frac{X_{CO}^{l,0}}{1 - X_{CO_2}^{l,0}}}{1 - X_{O_2}^{Pa,s}(t) - \frac{X_{CO}^{l,s}(t)}{1 - X_{CO_2}^{l,s}(t)}}$$

$X(t)$: Volumenanteil einer Komponente [1]

⁰, ^s: in der Zuluft, in der Abluft

^l, ^{Pa}: nach H₂O - Trapping, nach zusätzlichem CO₂ - Trapping

O₂, CO₂, CO: von Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid

$\phi(t)$: "oxygen depletion factor", Sauerstoffabnahmefaktor [1]

α : "expansion factor", Expansionsfaktor [1]

$\dot{V}_{298}^s(t)$: Abluftvolumenstrom [m³ s⁻¹], normiert auf 25 °C

$\Delta \dot{V}_{298,CO_2}(t)$: Änderung des Volumenstroms CO₂ [m³_{CO₂} s⁻¹], normiert auf 25 °C

$\Delta \dot{V}_{298,CO}(t)$: Änderung des Volumenstroms CO [m³_{CO} s⁻¹], normiert auf 25 °C (Gl. A.19)

Zur Bestimmung von Mittelwerten über bestimmt Zeitintervalle wurde vorbereitend, wie bei der Energiefreisetzungsrate, gemäß Trapezregel aufsummiert und die Gesamtfreisetzungsrate gebildet:

$$V_{\text{CO}_2, \text{total}}(t_k) = \sum_{i=2}^k \frac{\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2}(t_{i-1}) + \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2}(t_i)}{2} \cdot (t_i - t_{i-1})$$

$$V_{\text{CO}, \text{total}}(t_k) = \sum_{i=2}^k \frac{\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}}(t_{i-1}) + \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}}(t_i)}{2} \cdot (t_i - t_{i-1})$$

i, k : Index des Zeitpunktes

t_i : Zeit für i - ten Datensatz [s]

(Gl. A.20)

$\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2}(t_i)$: Änderung Volumenstrom CO_2 [$\text{m}^3_{\text{CO}_2} \text{s}^{-1}$], normiert auf 25°C

$\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}}(t_i)$: Änderung Volumenstrom CO [$\text{m}^3_{\text{CO}} \text{s}^{-1}$], normiert auf 25°C

$V_{\text{CO}_2, \text{total}}(t_k)$: Gesamtfreisetzung CO_2 [$\text{m}^3_{\text{CO}_2}$], normiert auf 25°C

$V_{\text{CO}, \text{total}}(t_k)$: Gesamtfreisetzung CO [m^3_{CO}], normiert auf 25°C

Die Gleichung zur Bestimmung der Ausbeute lautet:

$$Y_{\text{CO}_2}(t) = \frac{\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2}(t)}{-\dot{m}(t)} \cdot \frac{1}{\rho_{0, \text{CO}_2}} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}}$$

$$Y_{\text{CO}}(t) = \frac{\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}}(t)}{-\dot{m}(t)} \cdot \frac{1}{\rho_{0, \text{CO}}} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}}$$

$\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2}(t_i)$: Änderung Volumenstrom CO_2 [$\text{m}^3_{\text{CO}_2} \text{s}^{-1}$], normiert auf 25°C

$\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}}(t_i)$: Änderung Volumenstrom CO [$\text{m}^3_{\text{CO}} \text{s}^{-1}$], normiert auf 25°C

$-\dot{m}(t)$: Abbrandrate [g s^{-1}]

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

ρ_{0, CO_2} : Dichte von CO_2 unter Normalbedingungen [g m^{-3}], = 1967,96 g m^{-3}

$\rho_{0, \text{CO}}$: Dichte von CO unter Normalbedingungen [g m^{-3}], = 1254,15 g m^{-3}

$Y_{\text{CO}_2}(t)$: CO_2 – Ausbeute [$\text{g}_{\text{CO}_2} \text{g}_{\text{Brennstoff}}^{-1}$]

$Y_{\text{CO}}(t)$: CO – Ausbeute [$\text{g}_{\text{CO}} \text{g}_{\text{Brennstoff}}^{-1}$]

(Gl. A.21)

Zur Berechnung von Mittelwerten für die Kohlendioxid- oder Kohlenmonoxidausbeute in einem Zeitabschnitt vom Zeitpunkt t_i bis zu Zeitpunkt t_j nimmt man folgende Form:

$$\overline{Y_{CO_2}(t_i, t_j)} = \frac{V_{CO_2, total}(t_j) - V_{CO_2, total}(t_i)}{m(t_j) - m(t_i)} \cdot \frac{1}{\rho_{0, CO_2}} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}}$$

$$\overline{Y_{CO}(t_i, t_j)} = \frac{V_{CO, total}(t_j) - V_{CO, total}(t_i)}{m(t_j) - m(t_i)} \cdot \frac{1}{\rho_{0, CO}} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}}$$

$V_{CO_2, total}(t_i)$: Gesamtfreisetzung CO_2 [$m^3_{CO_2}$], normiert auf 25 °C

$V_{CO, total}(t_i)$: Gesamtfreisetzung CO [m^3_{CO}], normiert auf 25 °C

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

ρ_{0, CO_2} : Dichte von CO_2 unter Normalbedingungen [$g \text{ m}^{-3}$], = 1967,96 $g \text{ m}^{-3}$

$\rho_{0, CO}$: Dichte von CO unter Normalbedingungen [$g \text{ m}^{-3}$], = 1254,15 $g \text{ m}^{-3}$

$m(t_i)$: Masse [g]

$\overline{Y_{CO_2}(t_i, t_j)}$: mittlere CO_2 - Ausbeute [$g_{CO_2} \text{ g}_{Brennstoff}^{-1}$]

$\overline{Y_{CO}(t_i, t_j)}$: mittlere CO - Ausbeute [$g_{CO} \text{ g}_{Brennstoff}^{-1}$]

(Gl. A.22)

A.5 CHARAKTERISIERUNG DER RAUCHENTWICKLUNG

Zusätzlich zur Bestimmung der Gaszusammensetzung wurde bei den Raumbrandversuchen auch die Schwächung des Lichtes im Rauchgas gemessen. Für die Messung wurde ein MAURER-Lichtmessgerät benutzt. Der Aufbau der Rauchdichtemessung erfolgte gemäß DIN 50 055 [A-4], die Lichtmessstrecke war in Anlehnung an ISO 9705 [A-1] am Rauchgasrohr positioniert. Die Intensität I_0 des ungetrübten Gases wird jeweils vor einem Versuch nach ausreichender Betriebsdauer bestimmt. Damit ergibt sich der Extinktionskoeffizient:

$$k(t) = \frac{1}{L} \cdot \ln \left(\frac{I_0}{I(t)} \right)$$

I_0 : relative Lichtintensität ohne Extinktion [1]

L : Länge der optischen Messstrecke, Durchmesser des Abzugrohrs [m]

$I(t)$: relative Lichtintensität mit Extinktion [1]

$k(t)$: Extinktionskoeffizient [m^{-1}]

(Gl. A.23)

Mit Hilfe des Extinktionskoeffizienten wird gemäß ISO 9705 die „instantaneous rate of light-obscuring smoke“ berechnet:

$$R_{\text{inst}}(t) = k(t) \cdot V_{298}^s(t) \cdot \frac{T_s(t)}{T_0 + 25 \text{ K}}$$

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

$T_s(t)$: Temperatur der Abluft [K]

(Gl. A.24)

$\dot{V}_{298}^s(t)$: Abluftvolumenstrom [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$], normiert auf 25 °C

$k(t)$: Extinktionskoeffizient [m^{-1}]

$R_{\text{inst}}(t)$: "instantaneous rate of light - obscuring smoke" [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]

Um eine stoffspezifische Größe zu erhalten wird die „instantaneous rate of light-obscuring smoke“ durch die Abbrandrate geteilt und man erhält die spezifische Rauchentwicklung (engl.: specific extinction area):

$$\sigma_f(t) = \frac{R_{\text{inst}}(t)}{-\dot{m}(t)}$$

$R_{\text{inst}}(t)$: "instantaneous rate of light - obscuring smoke" [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]

(Gl. A.25)

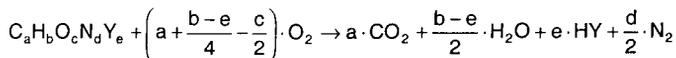
$-\dot{m}(t)$: Abbrandrate [g s^{-1}]

$\sigma_f(t)$: spezifische Rauchentwicklung [$\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$]

Es könnte durch Integration der „instantaneous rate of light-obscuring smoke“, vergleichbar mit der Integration der Energiefreisetzungsrates gemäß Gl. A.8, die totale Rauchentwicklung definiert werden. Bildet man für ein bestimmtes Zeitintervall die Differenz der totalen Rauchentwicklung und dividiert diese durch die Massendifferenz, so erhielte man analog zur mittleren effektiven Verbrennungswärme (Gl. A.16) eine mittlere spezifische Rauchentwicklung für den betrachteten Zeitraum.

A.6 ZULUFTBEDARF

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



- | | | |
|--|--|------------|
| C : Kohlenstoff | O ₂ : molekularer Sauerstoff | |
| H : Wasserstoff | CO ₂ : Kohlendioxid | |
| O : Sauerstoff | CO : Kohlenmonoxid | |
| N : Stickstoff | N ₂ : molekularer Stickstoff | (Gl. A.26) |
| Y : Halogen | HY : (z. B. Salzsäuregas HCl) | |
| a : molarer Kohlenstoffanteil [mol ⁻¹] | b : molarer Wasserstoffanteil [mol ⁻¹] | |
| c : molarer Sauerstoffanteil [mol ⁻¹] | d : molarer Stickstoffanteil [mol ⁻¹] | |
| e : molarer Halogenanteil [mol ⁻¹] | | |

Sind anstelle der stöchiometrischen Brennstoffzusammensetzung die Massenanteile durch chemische Analyse bestimmt worden, so lassen sich daraus die molaren Anteile der einzelnen Elemente berechnen:

$$a = 1 \quad b = \frac{b_m}{M_H} \cdot \frac{M_C}{a_m} \quad c = \frac{c_m}{M_O} \cdot \frac{M_C}{a_m} \quad d = \frac{d_m}{M_N} \cdot \frac{M_C}{a_m} \quad e = \frac{e_m}{M_Y} \cdot \frac{M_C}{a_m}$$

a _m : Kohlenstoffmassenanteil [1]	a : molarer Kohlenstoffanteil [mol ⁻¹]	
b _m : Wasserstoffmassenanteil [1]	b : molarer Wasserstoffanteil [mol ⁻¹]	
c _m : Sauerstoffmassenanteil [1]	c : molarer Sauerstoffanteil [mol ⁻¹]	
d _m : Stickstoffmassenanteil [1]	d : molarer Stickstoffanteil [mol ⁻¹]	(Gl. A.27)
e _m : Halogenmassenanteil [1]	e : molarer Halogenanteil [mol ⁻¹]	
M _C : Molmasse Kohlenstoff [g mol ⁻¹]	M _H : Molmasse Wasserstoff [g mol ⁻¹]	
M _O : Molmasse Sauerstoff [g mol ⁻¹]	M _N : Molmasse Stickstoff [g mol ⁻¹]	
M _Y : Molmasse Halogen [g mol ⁻¹]		

Vorher soll die Bestimmung des Proportionalitätsfaktors E^V und des Expansionsfaktors α vorgestellt werden. Dazu muss zuerst die Molmasse des Brennstoffs bestimmt werden:

$$M_{\text{Brennstoff}} = a \cdot M_C + b \cdot M_H + c \cdot M_O + d \cdot M_N + e \cdot M_Y$$

a : molarer Kohlenstoffanteil [mol ⁻¹]	M _C : Molmasse Kohlenstoff [g mol ⁻¹]	
b : molarer Wasserstoffanteil [mol ⁻¹]	M _H : Molmasse Wasserstoff [g mol ⁻¹]	
c : molarer Sauerstoffanteil [mol ⁻¹]	M _O : Molmasse Sauerstoff [g mol ⁻¹]	(Gl. A.28)
d : molarer Stickstoffanteil [mol ⁻¹]	M _N : Molmasse Stickstoff [g mol ⁻¹]	
e : molarer Halogenanteil [mol ⁻¹]	M _Y : Molmasse Halogen [g mol ⁻¹]	
M _{Brennstoff} : Molmasse Brennstoff [g mol ⁻¹]		

Zusammen mit dem Heizwert lässt sich dann der Proportionalitätsfaktor berechnen:

$$E^V = \frac{H_U \cdot M_{\text{Brennstoff}}}{a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2}} \cdot \frac{1}{V_{\text{mo}}} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}}$$

a : molarer Kohlenstoffanteil [mol⁻¹] b : molarer Wasserstoffanteil [mol⁻¹]

c : molarer Sauerstoffanteil [mol⁻¹] e : molarer Halogenanteil [mol⁻¹]

$M_{\text{Brennstoff}}$: Molmasse Brennstoff [g mol⁻¹]

(Gl. A.29)

H_U : unterer Heizwert [kJ g⁻¹]

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

V_{mo} : molares Normvolumen [m³ mol⁻¹], = 0,0224136 m³ mol⁻¹

E^V : Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchten Sauerstoff [kJ m_{O₂}⁻³]

Zur Berechnung der Energiefreisetzungsrates bei bekanntem Abluftvolumenstrom muss außerdem der Expansionsfaktor vorgegeben werden:

$$\alpha = 1 + X_{\text{O}_2}^0 \cdot \left(\frac{4 \cdot a + 2 \cdot b + 2 \cdot e + 2 \cdot d}{4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e} - 1 \right)$$

a : molarer Kohlenstoffanteil [mol⁻¹] b : molarer Wasserstoffanteil [mol⁻¹]

c : molarer Sauerstoffanteil [mol⁻¹] d : molarer Stickstoffanteil [mol⁻¹]

(Gl. A.30)

e : molarer Halogenanteil [mol⁻¹]

$X_{\text{O}_2}^0$: Sauerstoffanteil in der Zuluft [1]

α : Expansionsfaktor [1]

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

$$r = \frac{a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2}}{M_{\text{Brennstoff}}} \cdot V_{\text{mo}} \cdot \frac{1}{X_{\text{O}_2}^0} \cdot \rho_0$$

a : molarer Kohlenstoffanteil [mol⁻¹] b : molarer Wasserstoffanteil [mol⁻¹]

c : molarer Sauerstoffanteil [mol⁻¹] e : molarer Halogenanteil [mol⁻¹]

(Gl. A.31)

$M_{\text{Brennstoff}}$: Molmasse Brennstoff [g mol⁻¹]

$X_{\text{O}_2}^0$: Sauerstoffanteil in der Zuluft [1]

V_{mo} : molares Normvolumen [m³ mol⁻¹], = 0,0224136 m³/mol

ρ_0 : Dichte der Luft unter Normalbedingungen [g m⁻³], = 1293 g/m³

r : stöchiometrischer Luftbedarf [g_{Luft} g_{Brennstoff}⁻¹]

Der stöchiometrische Luftbedarf kann auch unter Zuhilfenahme von Gl. A.28 mit dem Proportionalitätsfaktor bei bekanntem Heizwert dargestellt werden:

$$r = \frac{H_u}{E^V} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}} \cdot \frac{1}{X_{\text{O}_2}^0} \cdot \rho_0$$

H_u : unterer Heizwert [kJ g⁻¹]

E^V : Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchten Sauerstoff [kJ m_{O₂}⁻³]

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

(Gl. A.32)

$X_{\text{O}_2}^0$: Sauerstoffanteil in der Zuluft [1]

ρ_0 : Dichte der Luft unter Normalbedingungen [g m⁻³], = 1293 g/m³

r : stöchiometrischer Luftbedarf [g_{Luft} g_{Brennstoff}⁻¹]

Damit ergibt sich bei bekannter Brennstoffzusammensetzung und vorgegebener Abbrandrate für eine stöchiometrische Verbrennung der Luftbedarf:

$$\dot{m}_{\text{Zuluft,min}}(t) = -\dot{m}(t) \cdot r$$

$$\dot{V}_{298,\text{min}}^0(t) = -\dot{m}(t) \cdot r \cdot \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} = -\dot{m}(t) \cdot \frac{H_u}{E^V} \cdot \frac{1}{X_{\text{O}_2}^0}$$

r : stöchiometrischer Luftbedarf [g_{Luft} g_{Brennstoff}⁻¹]

$-\dot{m}(t)$: Abbrandrate [g s⁻¹]

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

ρ_0 : Dichte der Luft unter Normalbedingungen [g m⁻³], = 1293 g/m³

(Gl. A.33)

H_u : unterer Heizwert [kJ g⁻¹]

E^V : Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchten Sauerstoff [kJ m_{O₂}⁻³]

$X_{\text{O}_2}^0$: Sauerstoffanteil in der Zuluft [1]

$\dot{m}_{\text{Zuluft,min}}(t)$: notwendiger Zuluftmassenstrom [g s⁻¹]

$\dot{V}_{298,\text{min}}^0(t)$: notwendiger Zuluftvolumenstrom [m³ s⁻¹], normiert auf 25 °C

Zur Charakterisierung der Ventilationsbedingungen wird das Äquivalenzverhältnis GER (global equivalence ratio) gerne herangezogen. Es stellt das Verhältnis von notwendiger Zuluftmenge zu tatsächlicher Zuluftmenge dar. Somit liegt für GER < 1 Luft- bzw. Sauerstoffüberschuss, für GER > 1 Luft- bzw. Sauerstoffmangel vor. Sehr anschaulich ist auch das im weiteren benutzte Zuluftverhältnis ZLV, das dem Verhältnis von tatsächlicher Zuluftmenge zu notwendiger Zuluftmenge, also den Kehrwert des GER entspricht. Das ZLV gibt direkt das Maß für den Luft- bzw. Sauerstoffüberschuss an.

$$\text{ZLV}(t) = \frac{1}{\text{GER}(t)} = \frac{\dot{m}_{\text{Zuluft}}(t)}{\dot{m}_{\text{Zuluft,min}}(t)} = \frac{\dot{V}_{298}^0(t)}{\dot{V}_{298,min}^0(t)}$$

$$\dot{m}_{\text{Zuluft,min}}(t) = -\dot{m}(t) \cdot r$$

$$\dot{V}_{298,min}^0(t) = -\dot{m}(t) \cdot r \cdot \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0}$$

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

$\dot{m}_{\text{Zuluft}}(t)$: tatsächlicher Zuluftmassenstrom [g s^{-1}]

(Gl. A.34)

$\dot{V}_{298,min}^0(t)$: notwendiger Zuluftvolumenstrom [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], normiert auf 25 °C

$\dot{V}_{298}^0(t)$: tatsächlicher Zuluftvolumenstrom [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], normiert auf 25 °C

ρ_0 : Dichte der Luft unter Normalbedingungen [g m^{-3}], = 1293 g/m^3

T_0 : Nullpunkt der Celsiusskala [K], = 273,15 K

r : stöchiometrischer Luftbedarf [$\text{g}_{\text{Luft}} \text{g}_{\text{Brennstoff}}^{-1}$]

GER(t) : Äquivalenzverhältnis [1]

ZLV(t) : Zuluftverhältnis [1]

Da bei den Versuchen im modifizierten Cone-Calorimeter die Zuluftmenge elektronisch gesteuert wurde und damit nur geringfügig schwankte (0,1 %) konnte ein mittleres ZLV aus der vorgegebenen Zuluftmenge und der gemäß Gl. A.13 berechneten mittleren Abbrandrate bestimmt werden. Für die Raumbrandversuche wurde das ZLV(t) zu jedem Zeitschritt aus dem Zuluftvolumenstrom und der Abbrandrate berechnet. Das mittlere ZLV wurde als Mittelwert des zeitabhängigen ZLV(t) bestimmt.

Tabelle A.1 Zusammenstellung der Materialparameter

Material	Lupolen 5021 D Granulat		Glystantin G 48	
Kurzbezeichnung	PE-Granulat		Glykol	
H_u [kJ g ⁻¹]	43,19		16,6	
	theoretisch	analytisch	Theoretisch	analytisch
Summenformel	CH ₂		CH ₃ O	
a_m [gC gBrennstoff ⁻¹]	(0,856277)	0,857	(0,387027)	0,378
b_m [gH gBrennstoff ⁻¹]	(0,143723)	0,141	(0,097442)	0,095
c_m [gO gBrennstoff ⁻¹]	(0,000000)	0,000	(0,515531)	0,520
a	1	1	1	1
b	2	1,96	3	2,99
c	0	0	1	1,03
$M_{\text{Brennstoff}}$ [g mol ⁻¹]	14,027	13,987	31,034	31,504
α	1,0698	1,0689	1,2095	1,2146
E^V [kJ m ⁻³]	16509	16572	16846	17344
r [g _{Luft} g _{Brennstoff} ⁻¹]	14,8355	14,7366	5,5718	5,4119

Die in o. g. Materialparameter für die Brandlasten der Raumbrandversuche wurden mit den vorherigen Gleichungen berechnet. Dabei wurden die Bestimmung des Heizwertes und die chemische Analyse vom Hersteller der beiden Materialien, der BASF AG, durchgeführt.

A.7 INTERVALLE FÜR DIE MITTELWERTBILDUNG

Die Grenzen eines Zeitintervalls für die Mittelwertbildung können nicht willkürlich festgesetzt werden. Vielmehr ist es notwendig, ein Verfahren für diese Festsetzung zu definieren, das unabhängig von den Versuchsrandbedingungen angewendet werden kann. Am besten wäre es, wenn dieses Verfahren auch für verschiedene Versuchsaufbauten genutzt werden könnte.

Im Vorfeld zu den Versuchen in der Cone-Kammer musste bezüglich der Auswertung und der Berechnung von Mittelwerten für die relative Energiefreisetzungsrate, die relative Abbrandrate, die effektive Verbrennungswärme und die Ausbeuten von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid eine Verfahrensweise festgelegt werden. Analog zur Beurteilung des Brandverhaltens von Baustoffen gemäß ISO 5660 wurde vier Intervalle mit Begrenzung durch Zeitkriterien übernommen:

- „insgesamt“: untere Grenze = Versuchsbeginn, obere Grenze = Versuchsende. Es wird über die gesamte Versuchsdauer gemittelt. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Versuch beendet wird, wenn der Sauerstoffgehalt der Abluft / des Rauchgases annähernd auf den ursprüngliche Wert (ohne Verbrennung) zurückgegangen ist, eine Verbrennung also nicht mehr nachweisbar ist.
- „ab Entzündung“: untere Grenze = Zündzeitpunkt, obere Grenze = Versuchsende. Es wird über die Dauer der Verbrennung mit offener Flamme gemittelt. Daher beginnt das Intervall mit der Entzündung. Für das Versuchsende gelten die o. g. Voraussetzungen.
- „180 s“: untere Grenze = Zündzeitpunkt, obere Grenze = Zündzeitpunkt + 180 s. Die ersten drei Minuten der Verbrennung, beginnend mit der Entzündung sind für die Mittelwertbestimmung ausschlaggebend.
- „300 s“: untere Grenze = Zündzeitpunkt, obere Grenze = Zündzeitpunkt + 300 s. Die ersten fünf Minuten der Verbrennung, beginnend mit der Entzündung sind für die Mittelwertbestimmung ausschlaggebend.

Zusätzlich wurde eine Verfahrensweise zur Festsetzung der Intervallgrenzen neu definiert, die auf dem Verlauf der Energiefreisetzungsrate beruht:

- „x %-Kriterium“ untere Grenze = frühester Zeitpunkt, an dem die Energiefreisetzungsrate gleich x % der maximalen Energiefreisetzungsrate ist, obere Grenze = spätestester Zeitpunkt, an dem die Energiefreisetzungsrate gleich x % der maximalen Energiefreisetzungsrate ist. Es wurden die Grenzwerte von 0 %, 5 %, 10 %, 25 % und 50 % vorgegeben.

Abschließend wurde eine Verfahrensweise auf Basis des Massenverlustes aus der ISO 5660 für die Cone-Kammer Versuche übernommen bzw. für die Raumbrandversuche in abgewandelter Form definiert:

- „MLR 10-90 %“: untere Grenze = Zeitpunkt, zu dem 10 % der insgesamt verbrannten Brennstoffmasse umgesetzt sind, obere Grenze = Zeitpunkt, zu dem 90 % der insgesamt verbrannten Brennstoffmasse umgesetzt sind. In dieser Form wurde für die Cone-Kammer ein Zeitintervall über den Massenverlust festgelegt.

„MLR“: untere Grenze = Zeitpunkt, zu dem 90 % der insgesamt verbrannten Brennstoffmasse noch vorhanden sind, obere Grenze = Zeitpunkt, zu dem 20 % der insgesamt verbrannten Brennstoffmasse vorhanden sind. Das Kriterium wurde für die Versuche im Room-Corner-Test den speziellen Gegebenheiten von Naturbränden angepasst.

In Abbildung A.1 ist die Lage der Intervalle „180 s“ und „300 s“ als Beispiele für Zeitkriterien und „10 %“, „25 %“ und „50 %“ als Beispiele für die Festlegung über den Verlauf der Energiefreisetzungsrates dargestellt. Für die Festlegung der Intervallgrenzen für „MLR 10-90 %“ muss die Restmasse während der Verbrennung betrachtet werden (Abbildung A.2).

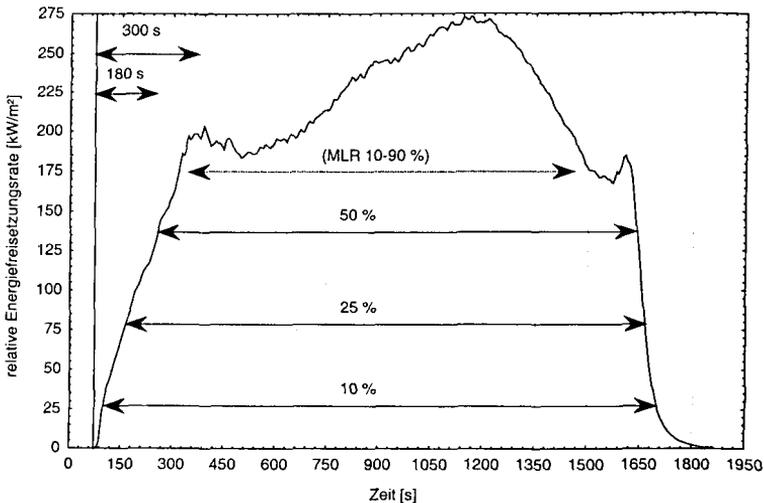


Abbildung A.1 Festlegung der Zeitintervalle für die Mittelwertbildung über den Verlauf der Energiefreisetzungsrates

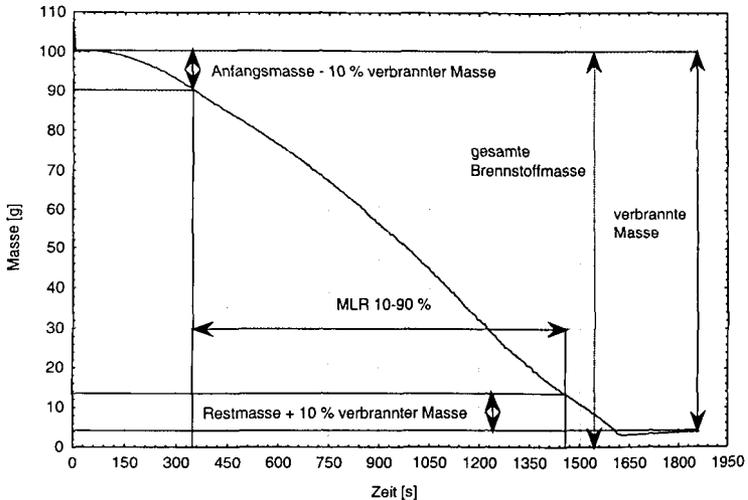


Abbildung A.2 Festlegung der Zeitintervalle für die Mittelwertbildung über den Massenverlust

A.8 LITERATURHINWEISE

- [A-1] ISO 9705 Fire tests - Full-scale room test for surface products. 1996.
- [A-2] Parker, W. J.: Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 2, September/October 1984, p. 381 - 395
- [A-3] ISO 5660 Fire tests - Reaction to fire; part 1: Rate of heat release from building products (Cone Calorimeter Method). 1999
- [A-4] DIN 50 055: Lichtmeßstrecke für Rauchentwicklungsprüfungen, 03/1989

Anhang B

zum Abschlussbericht

BMBF – Projekt FKZ 01RG9503/1

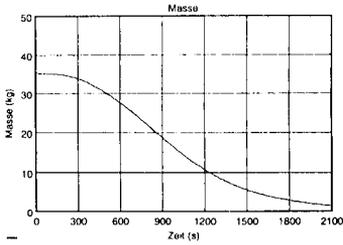
Versuche im Room - Corner - Test

B VERSUCHE IM ROOM-CORNER-TEST

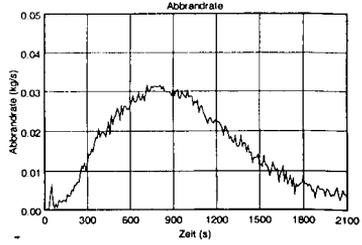
Seite	Vers.-Nr.:		vom:
B-3	12	35 kg Holzkrippe, Vent. 2.0m x 0.04m	28.02.1997
B-4	10	35 kg Holzkrippe, Vent. 2.0m x 0.1m	24.02.1997
B-5	9	35 kg Holzkrippe, Vent. 2.0m x 0.2m	21.02.1997
B-6	8	35 kg Holzkrippe, Vent. 2.0m x 0.8m	14.02.1997
B-7	7	50 kg Holzkrippe, Vent. 2.0m x 0.8m	12.02.1997
B-8	25	22.5 kg Glykol (Pool 1.00m ²), Vent. 2.0m x 0.04m	26.03.1997
B-9	20	22.5 kg Glykol (Pool 1.00m ²), Vent. 2.0m x 0.1m	18.03.1997
B-10	19	22.5 kg Glykol (Pool 1.00m ²), Vent. 2.0m x 0.2m	17.03.1997
B-11	18	22.5 kg Glykol (Pool 1.00m ²), Vent. 2.0m x 0.4m	14.03.1997
B-12	16	25 kg Polyethylen-Granulat (Pool 0.50m ²), Vent. 2.0m x 0.2m	12.03.1997
B-13	15	25 kg Polyethylen-Granulat (Pool 0.50m ²), Vent. 2.0m x 0.4m	10.03.1997
B-14	17	25 kg Polyethylen-Granulat (Pool 0.50m ²), Vent. 2.0m x 0.8m	13.03.1997
B-15	21	17 kg Mobil DTE Medium (Pool 0.50m ²), Vent. 2.0m x 0.2m	19.03.1997
B-16	22	17 kg Mobil DTE Medium (Pool 0.50m ²), Vent. 2.0m x 0.4m	21.03.1997
B-17	23	17 kg Mobil DTE Medium (Pool 0.50m ²), Vent. 2.0m x 0.8m	24.03.1997
B-18	14	22.5 kg Glykol (Pool 0.50m ²), Vent. 2.0m x 0.4m	07.03.1997
B-19	24	45.0 kg Glykol (Pool 1.00m ²), Vent. 2.0m x 0.2m	25.03.1997

VERSUCH NR.12 VOM 28.02.1997

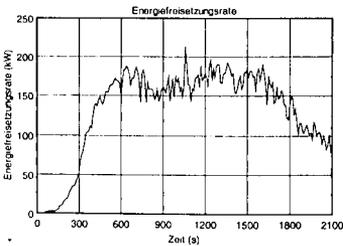
Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m



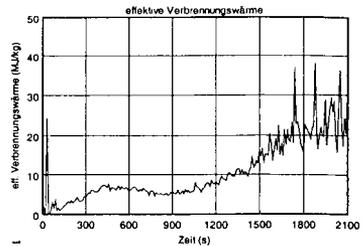
Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m



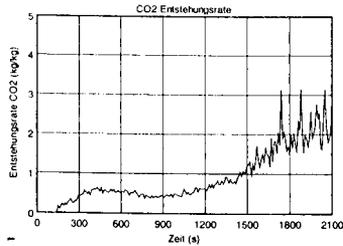
Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m



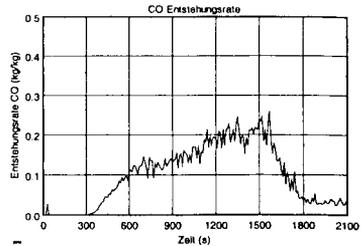
Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m



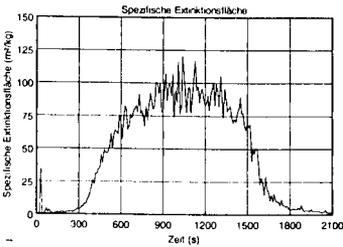
Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m



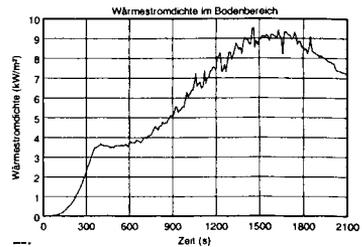
Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m



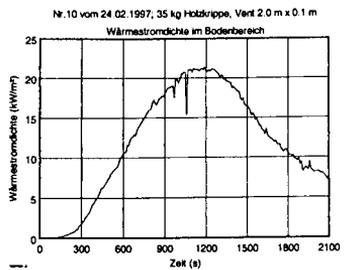
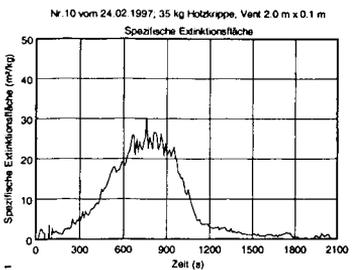
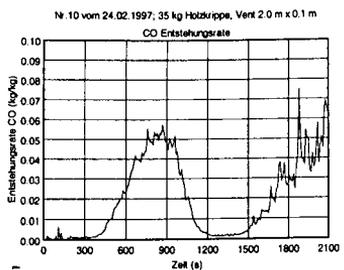
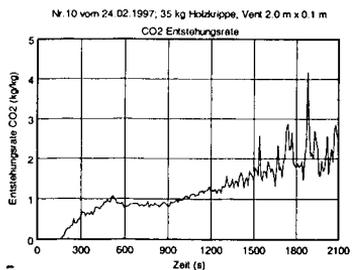
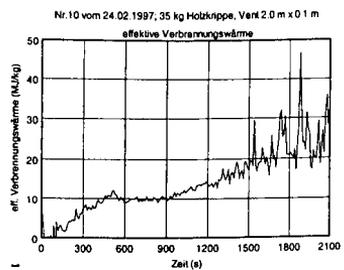
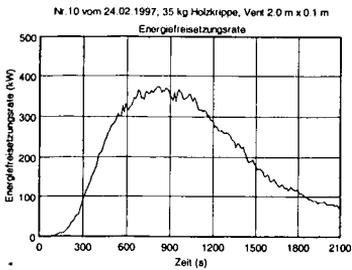
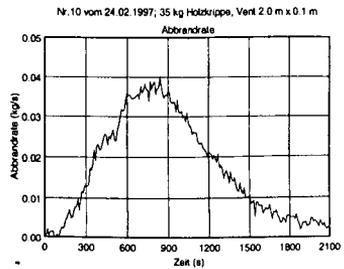
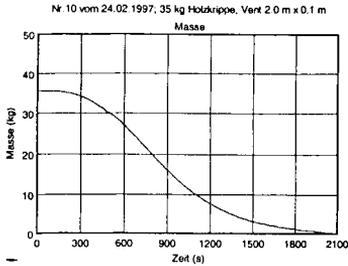
Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m



Nr 12 vom 28.02.1997, 35 kg Holzrippe, Vent 2.0 m x 0.04 m

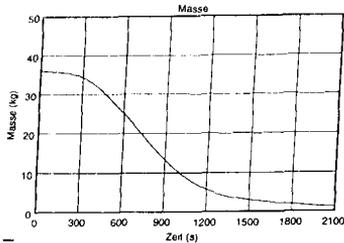


VERSUCH NR.10 VOM 24.02.1997

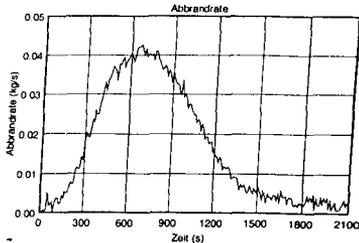


VERSUCH NR.9 VOM 21.02.1997

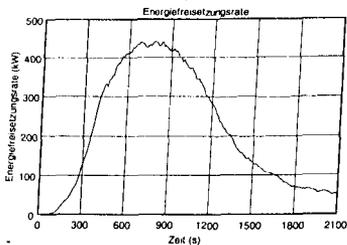
Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m



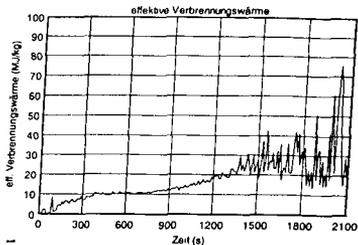
Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m



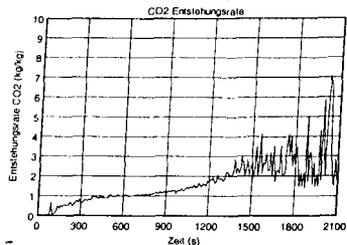
Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m



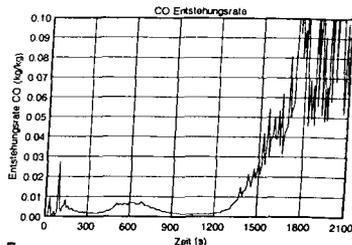
Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m



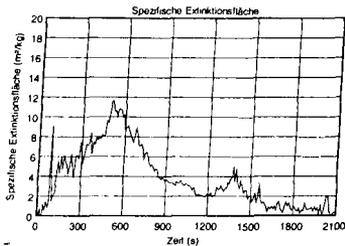
Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m



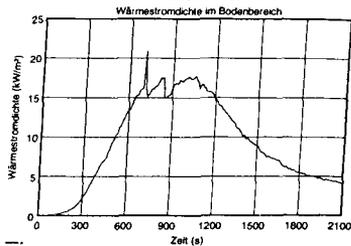
Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m



Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m

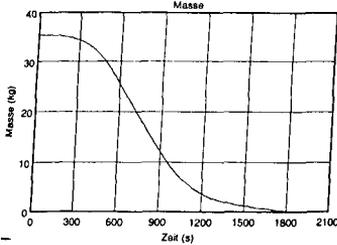


Nr.9 vom 21.02.1997, 50 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.2 m

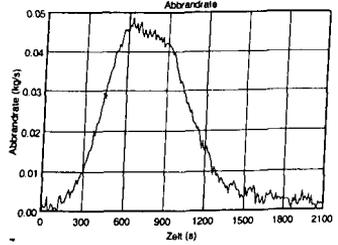


VERSUCH NR.8 VOM 14.02.1997

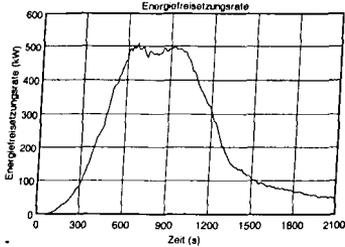
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



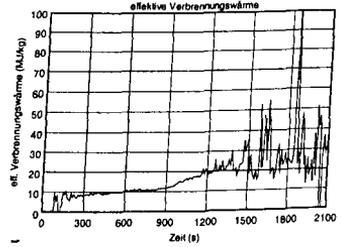
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



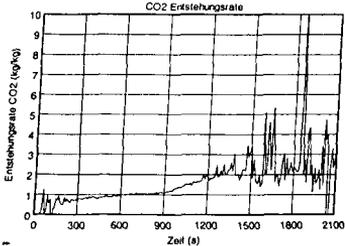
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



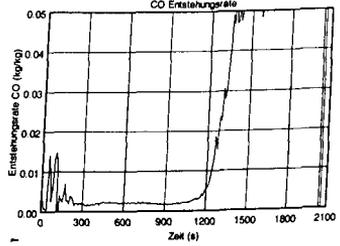
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



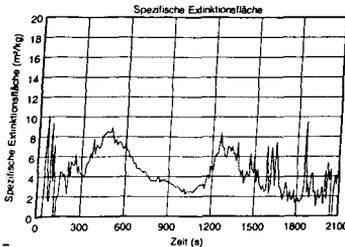
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



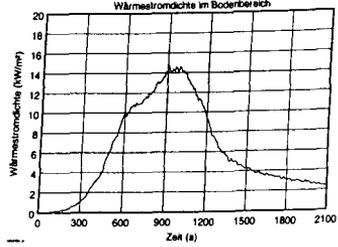
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



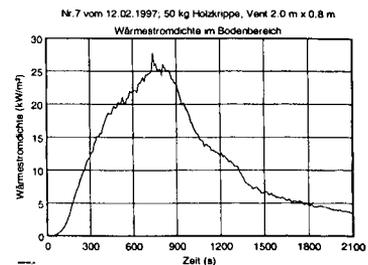
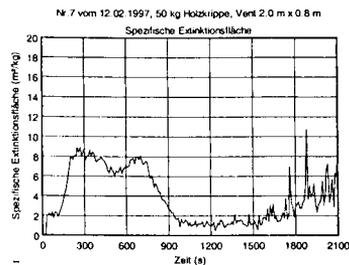
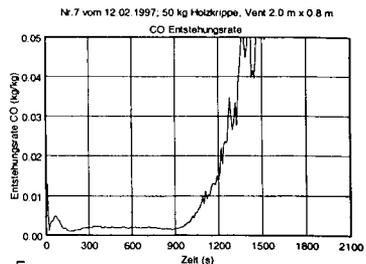
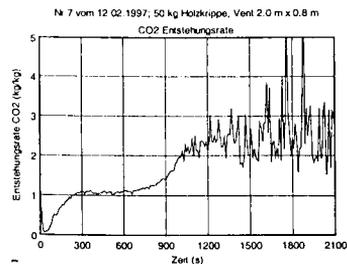
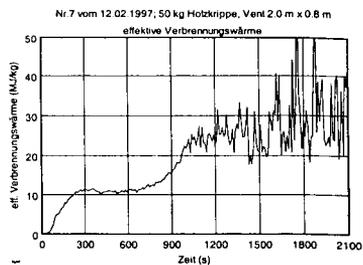
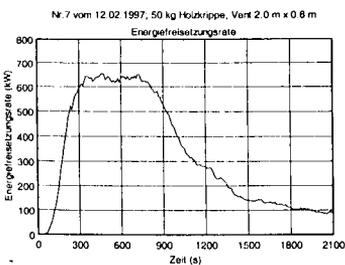
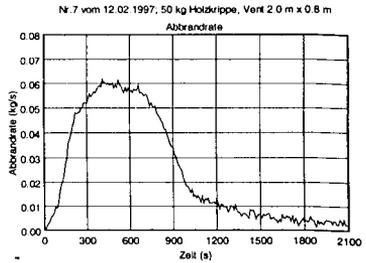
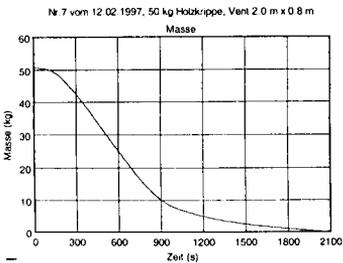
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



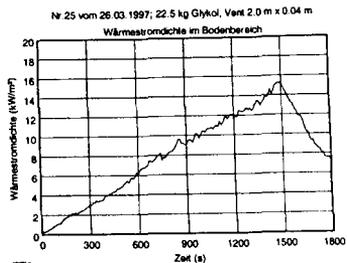
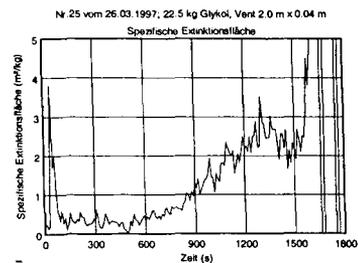
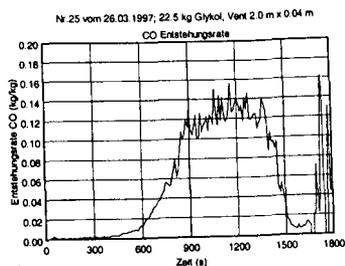
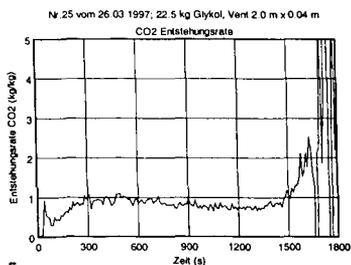
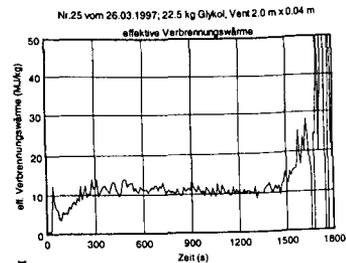
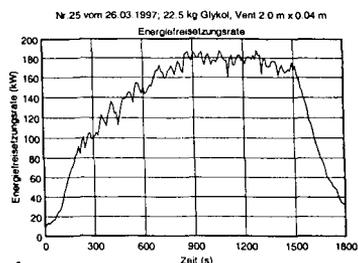
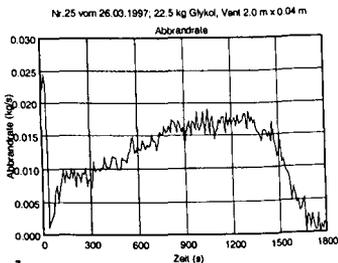
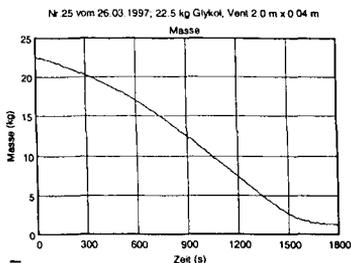
Nr.8 vom 14.02.1997; 35 kg Holzkruppe, Vent 2.0 m x 0.8 m



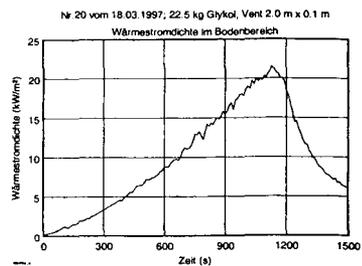
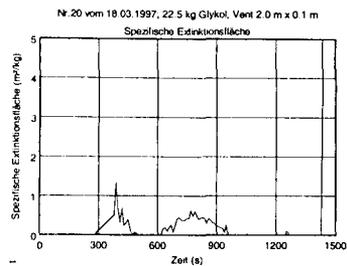
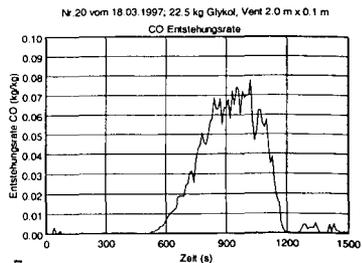
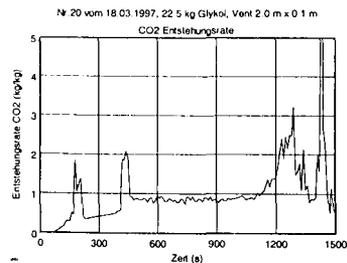
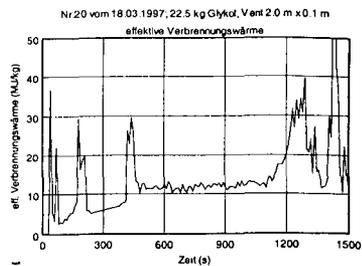
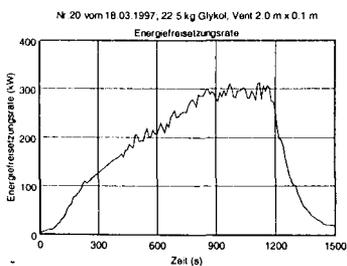
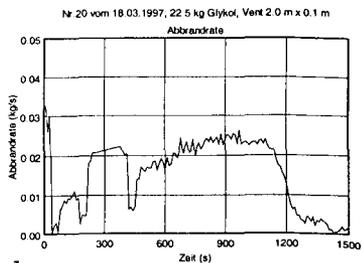
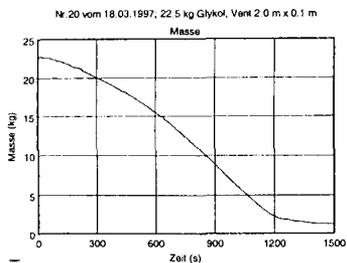
VERSUCH NR.7 VOM 12.02.1997



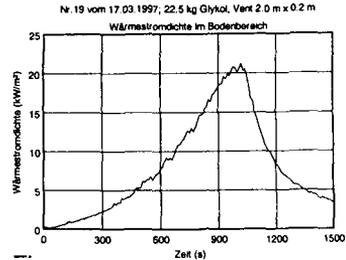
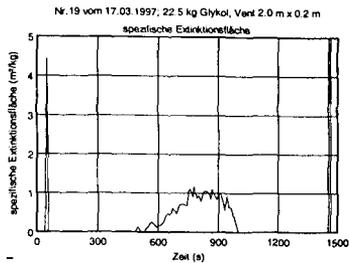
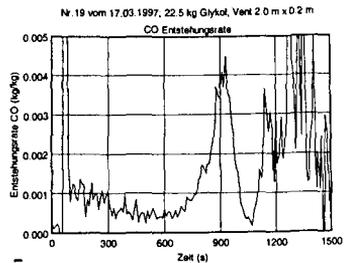
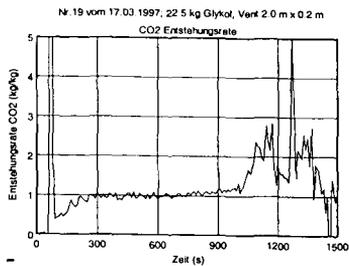
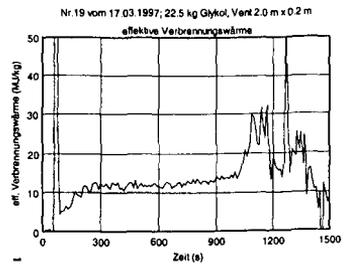
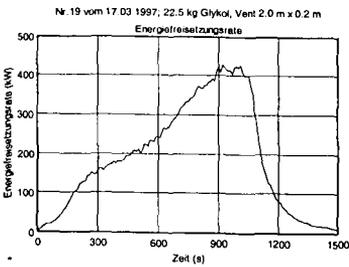
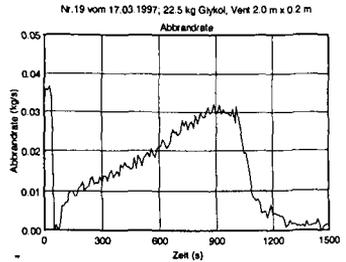
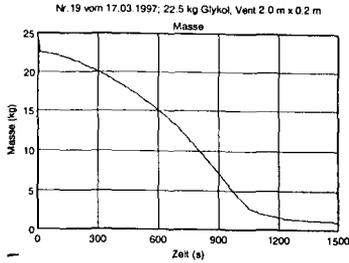
VERSUCH NR.25 VOM 26.03.1997 (POOL 1.00M²)



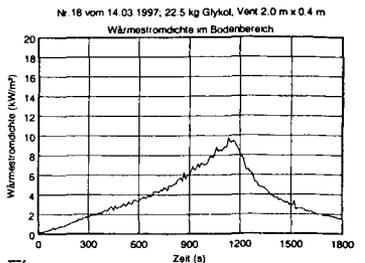
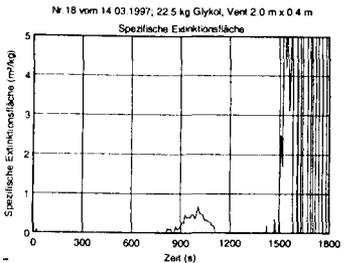
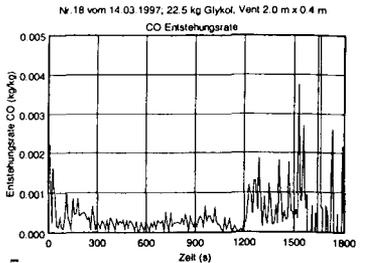
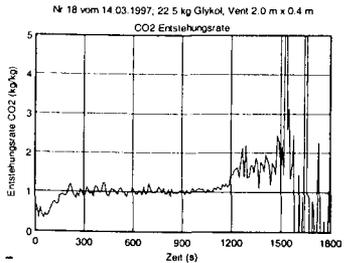
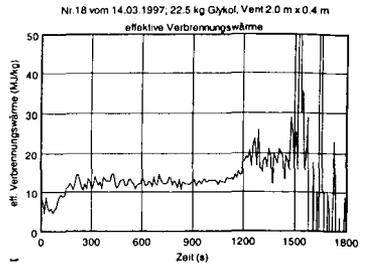
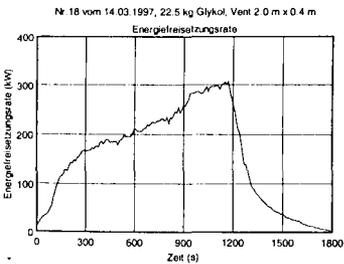
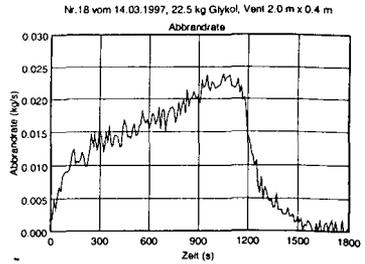
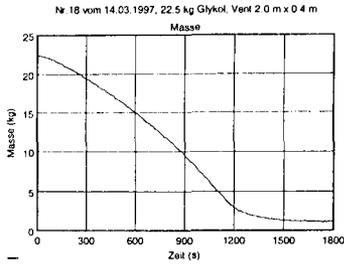
VERSUCH NR.20 VOM 18.03.1997 (POOL 1.00M²)



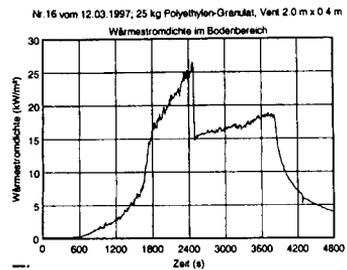
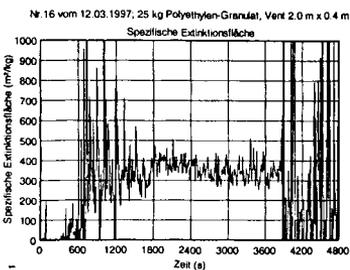
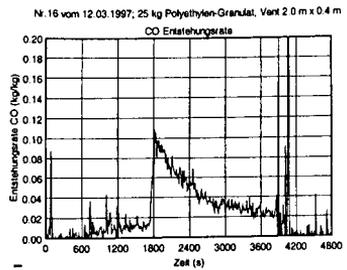
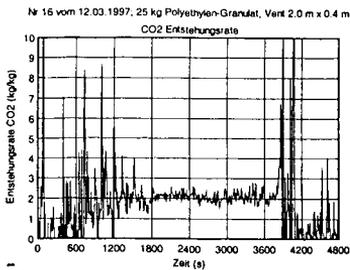
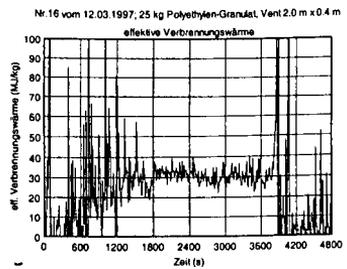
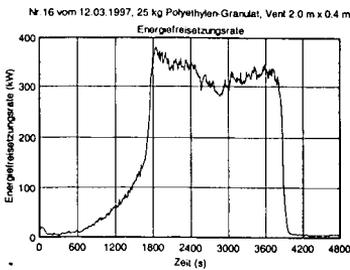
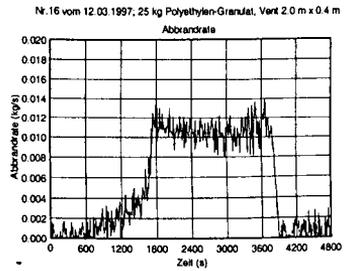
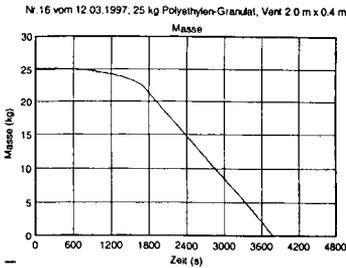
VERSUCH NR.19 VOM 17.03.1997 (POOL 1.00M²)



VERSUCH NR.18 VOM 14.03.1997 (POOL 1.00M²)

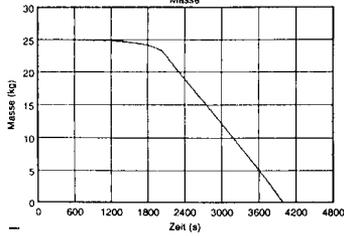


VERSUCH NR.16 VOM 12.03.1997 (POOL 0.50M²)

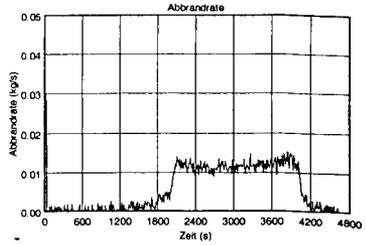


VERSUCH NR.15 VOM 10.03.1997 (POOL 0.50M²)

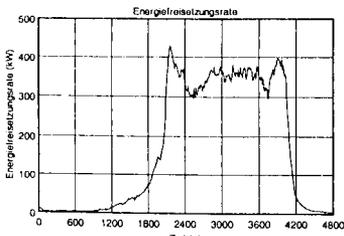
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



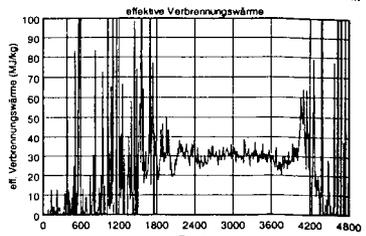
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



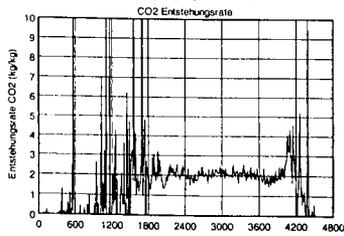
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



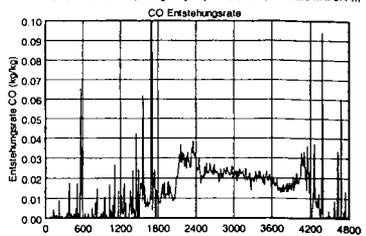
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



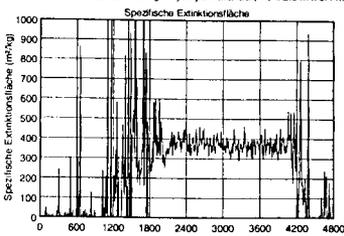
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



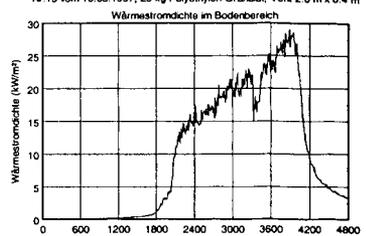
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



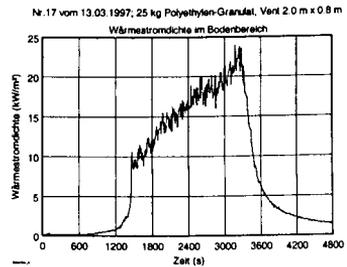
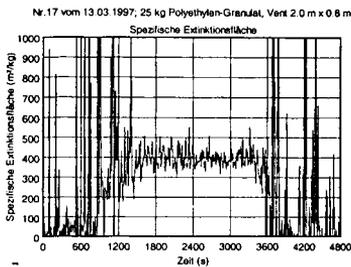
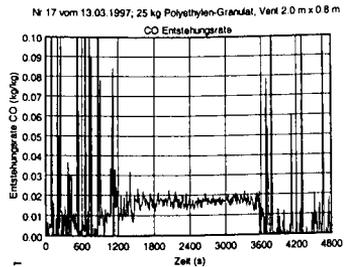
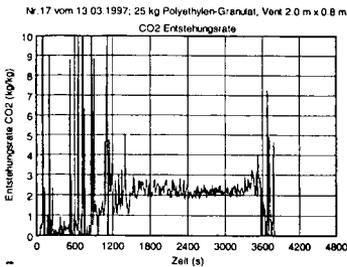
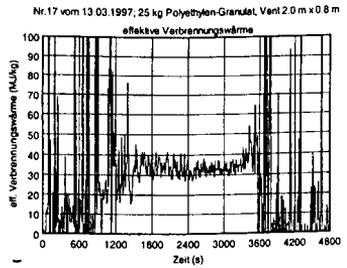
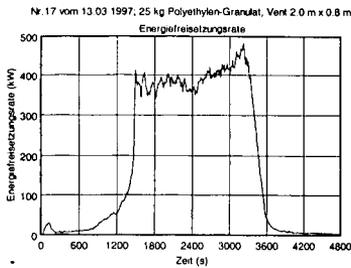
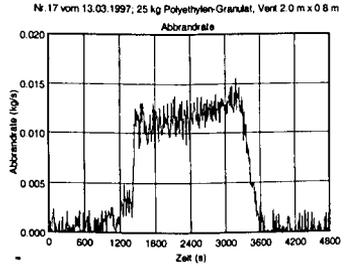
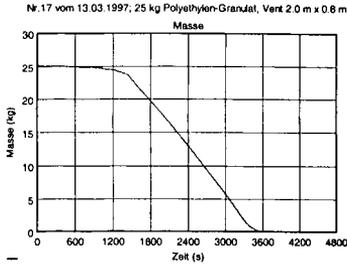
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



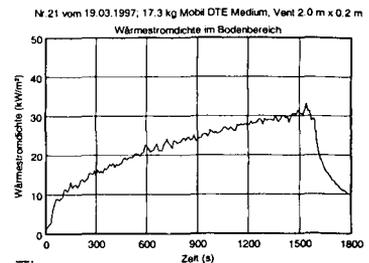
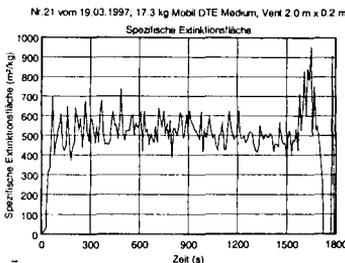
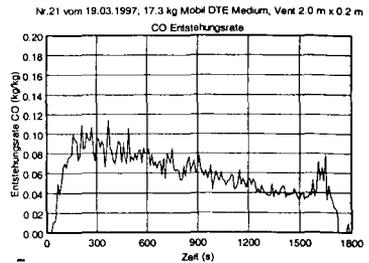
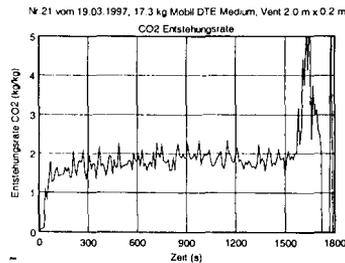
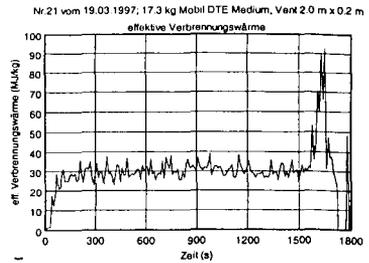
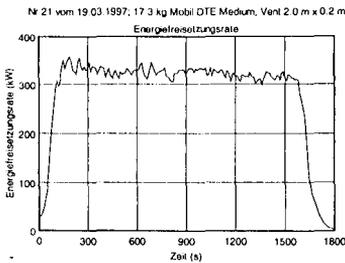
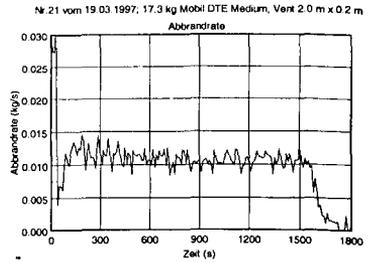
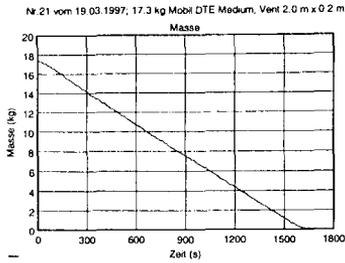
Nr. 15 vom 10.03.1997, 25 kg Polyethylen-Granulat, Vent 2.0 m x 0.4 m



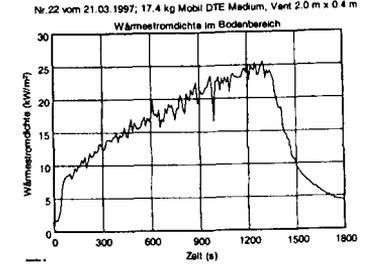
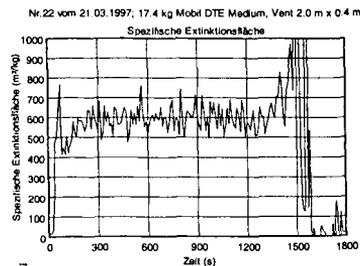
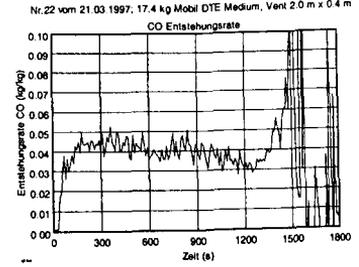
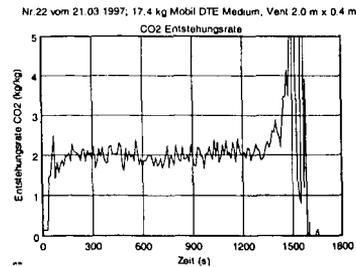
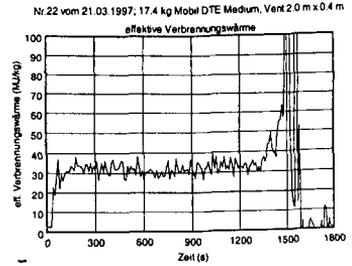
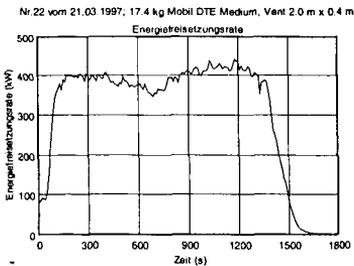
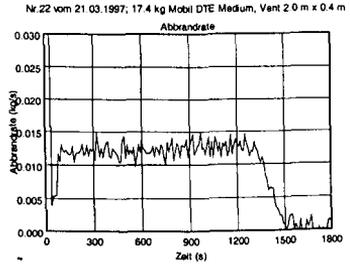
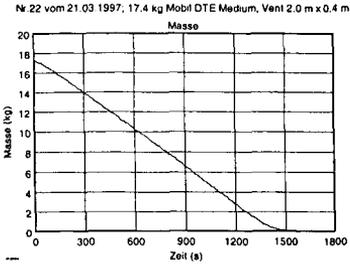
VERSUCH NR.17 VOM 13.03.1997 (POOL 0.50M²)



VERSUCH NR.21 VOM 19.03.1997 (POOL 0.50M²)

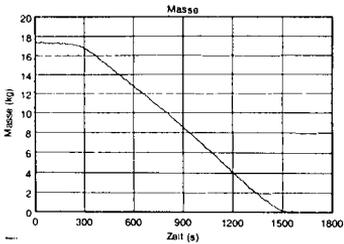


VERSUCH NR.22 VOM 21.03.1997 (POOL 0.50M²)

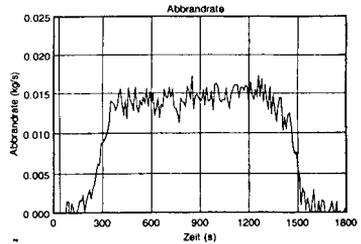


VERSUCH NR.23 VOM 24.03.1997 (POOL 0.50M²)

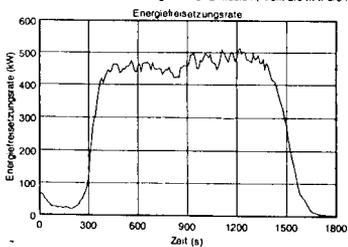
Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m



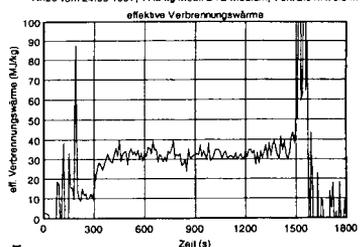
Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m



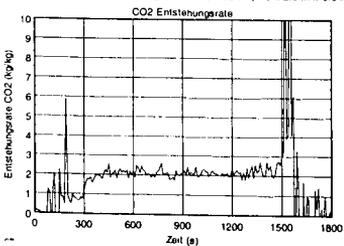
Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m



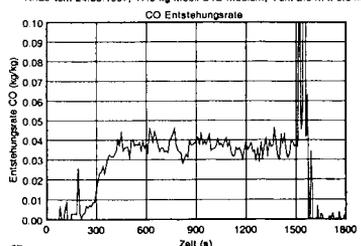
Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m



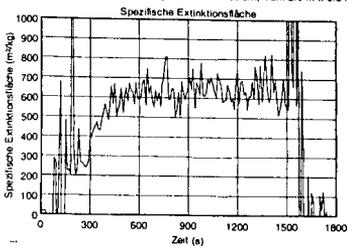
Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m



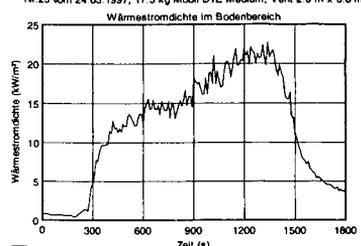
Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m



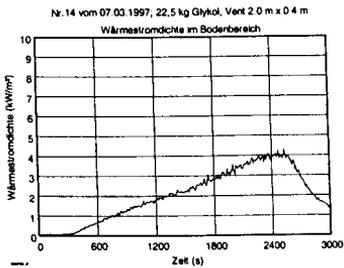
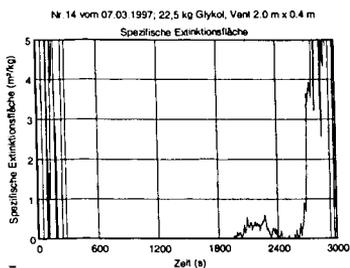
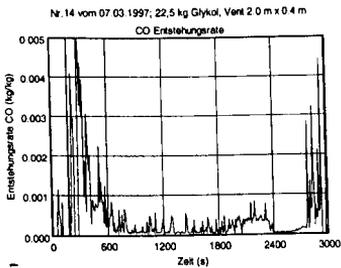
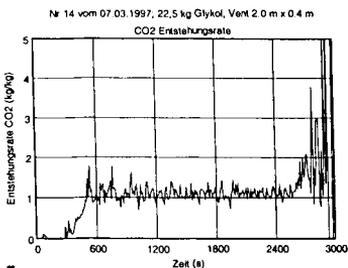
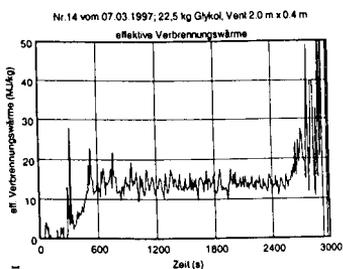
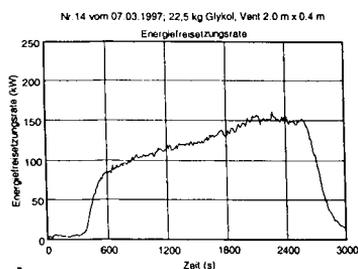
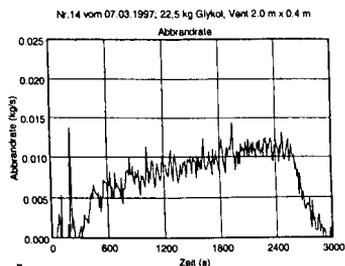
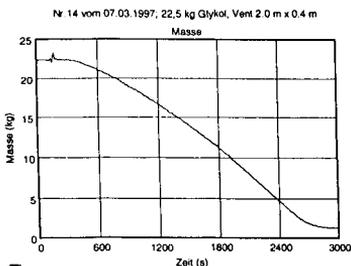
Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m



Nr.23 vom 24.03.1997, 17.3 kg Mobil DTE Medium, Vent 2.0 m x 0.8 m

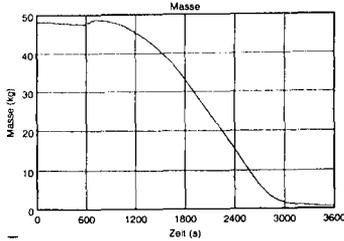


VERSUCH NR.14 VOM 07.03.1997 (POOL 0.50M²)

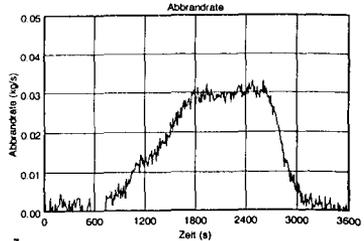


VERSUCH NR.24 VOM 25.03.1997 (POOL 1.00M²)

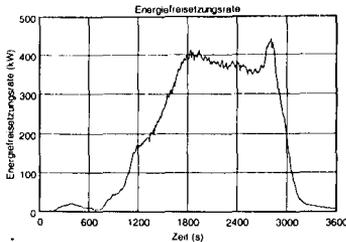
Nr 24 vom 25.03.1997, 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



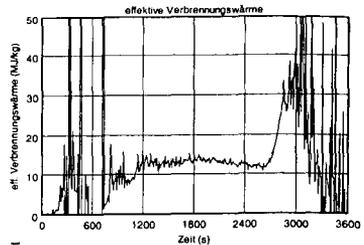
Nr 24 vom 25.03.1997; 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



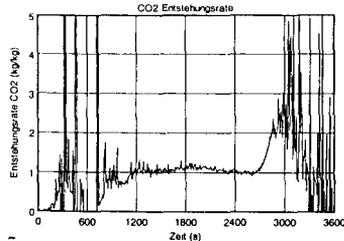
Nr 24 vom 25.03.1997, 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



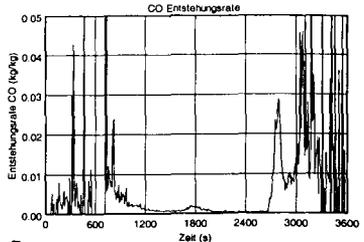
Nr 24 vom 25.03.1997; 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



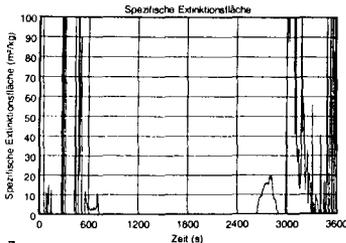
Nr 24 vom 25.03.1997, 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



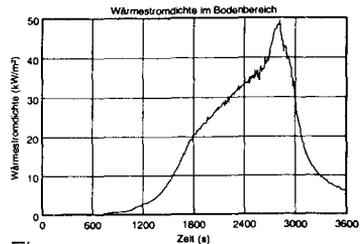
Nr 24 vom 25.03.1997; 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



Nr 24 vom 25.03.1997, 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



Nr 24 vom 25.03.1997; 47.2 kg Glykol, Vent 2.0 m x 0.2 m



Anhang C

zum Abschlussbericht

BMBF – Projekt FKZ 01RG9503/1

Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

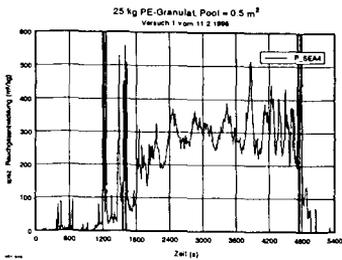
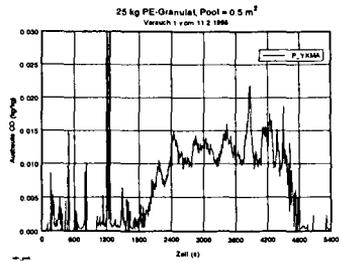
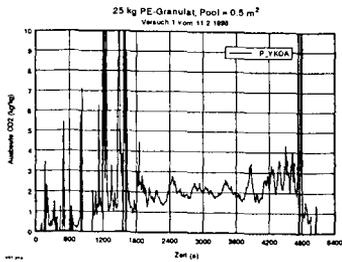
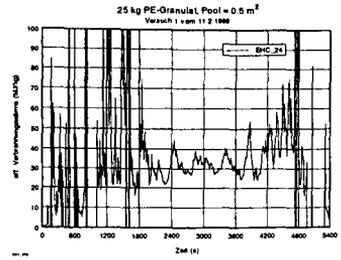
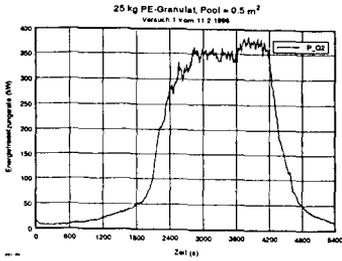
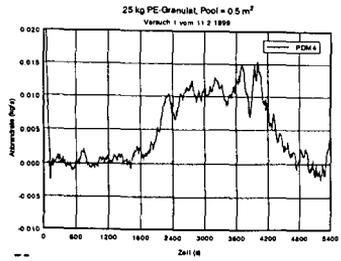
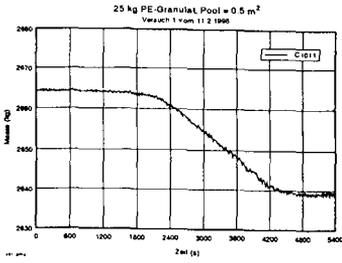
C RAUMBRANDVERSUCHE MIT REALEN LAGERANORDNUNGEN

Vers.-Nr.:		Durchgeführt am:
01	25 kg PE-Granulat, Pool = 0.5 m ²	11.02.1998
02	50 kg PE-Granulat, Pool = 1.0 m ²	12.02.1998
03	45 kg Glysantin G 48-24, Pool = 1 m ²	16.02.1998
04	90 kg Glysantin G 48-24, Pool = 4.5 m ²	18.02.1998
05	157 kg Glysantin G 48-24, 2 Pools mit je 4.5 m ²	19.02.1998
06	Kalibrierung der Energiefreisetzungsrate mit dem Gasbrenner	24.02.1998
07	Zwei Blöcke mit Feststoff-Verpackung, 2 Schichten	26.02.1998
08	Zwei Blöcke mit Feststoff-Verpackung, 2 Schichten mit Zugabe von ca. 38 kg PE-Granulat	27.02.1998
09	Zwei Blöcke mit Feststoff-Verpackung, 4 Schichten	03.03.1998
10	ETK-Versuch zur Kalibrierung	06.03.1998
11	Zwei Paletten mit Feststoff-Verpackung, 6 Schichten	20.04.1998
12	2 Blöcke Flüssigkeits-Verpackung - 2 Schichten á 3 Kartons, mit Glykolfüllung	22.04.1998
13	2 Blöcke Flüssigkeits-Verpackung - 2 Schichten á 3 Kartons, leer	24.04.1998
14	2 Blöcke Feststoff-Verpackung - 6 Schichten á 4 Kartons, leer	27.04.1998
15	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - 5 Schichten á 2 Kartons, mit 40 Liter Glykolfüllung	29.04.1998
16	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - 2 Schichten á 3 Kartons, leer	04.05.1998
17	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - Gitterrost - 5 Schichten á 2 Kartons, mit 40 Liter Glykolfüllung	05.05.1998
18	Brandversuch mit 30 x 30 cm Kiesbettbrenner zur Kalibrierung im OSKAR	25.06.1998
19	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - 2 Schichten á 2 Kartons, mit 40 Liter Glykolfüllung	29.06.1998
20	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - 5 Schichten á 2 Kartons, mit 100 Liter Glykolfüllung	01.07.1998
21	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - Gitterrost - 4 Schichten á 2 Kartons, mit 80 Liter Glykolfüllung	06.07.1998
22	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - Gitterrost - 4 Schichten á 3 Kartons, mit 120 Liter Glykolfüllung	08.07.1998
23	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - 2 Blöcke mit je 4 Schichten á 3 Kartons, mit 240 Liter Glykolfüllung	13.07.1998
24	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - Gitterrost - 4 Schichten á 2 Kartons, mit 80 Liter Glykolfüllung	15.07.1998
25	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - Gitterrost - 2 Schichten á 2 Kartons, mit 40 Liter Glykolfüllung	17.07.1998
26	Regalaufbau mit Feststoff-Verpackung - Gitterrost - 3 Schichten á 2 Kartons, mit PE Füllung	20.07.1998
27	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - Gitterrost - 2 Regale mit je 8 Kartons, mit 160 Liter Glykolfüllung	23.07.1998
28	Versuch mit Holzkrippen - 50 kg Holzkrippen in der hinteren Wanne	22.09.1998

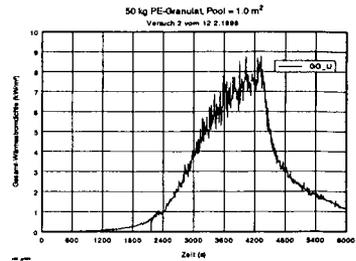
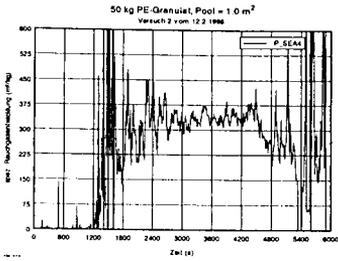
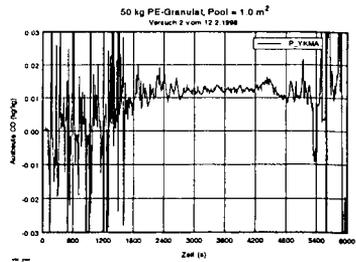
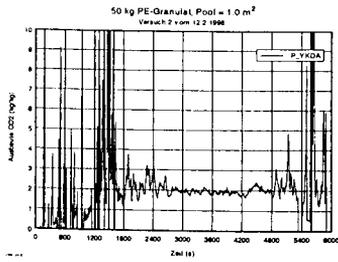
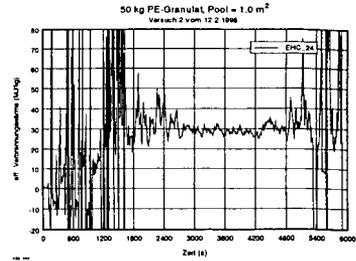
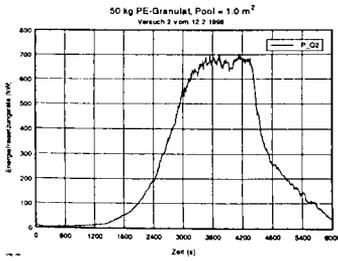
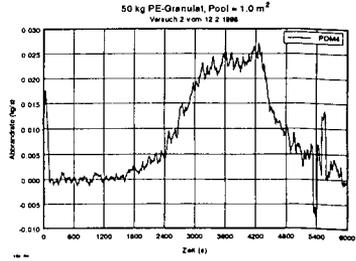
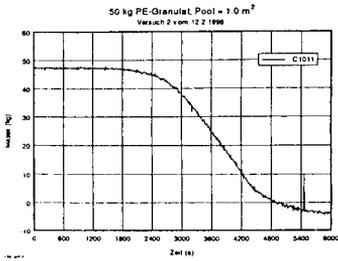
Anhang C Raumbrandversuche mit realen Lageranordnungen

Vers.-Nr.:		Durchgeführt am:
29	Versuch mit Holzkrippen - 99 kg Holzkrippen in der hinteren Wanne	25.09.1998
30	Versuch mit Holzkrippen - 207 kg Holzkrippen in der hinteren Wanne	28.09.1998
31	Regalaufbau mit Flüssigkeits-Verpackung - Gitterrost - 2 GITTER-Regale mit je 2 Schichten á 2 Kartons mit 80 l Glykol	01.10.1998
32	Versuch mit Verpackungsmaterial für Flüssigkeiten - 2 Blöcke mit je 4 Schichten á 3 Kartons LEER	05.10.1998
33	Versuch mit Verpackungsmaterial für Feststoffe - 2 Blöcke mit je 3 Schichten á 4 Kartons mit PE-Granulat	07.10.1998
34	ETK-Brandversuch zur Kalibrierung der m-Faktor Platte im Oskar	09.10.1998

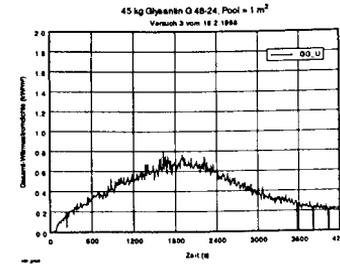
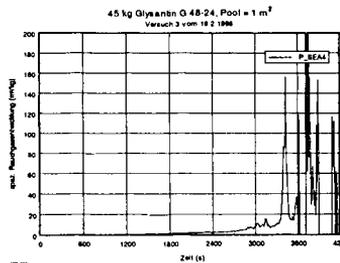
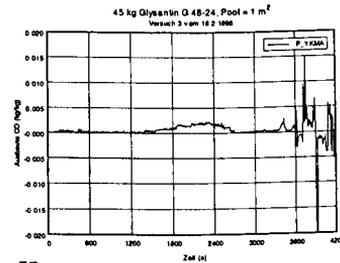
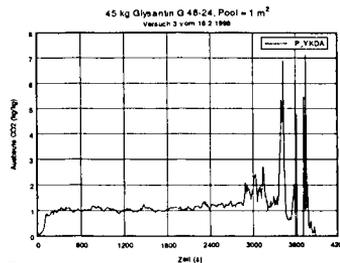
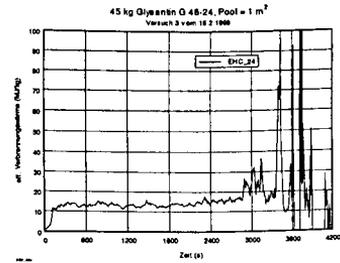
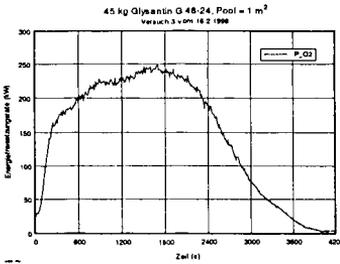
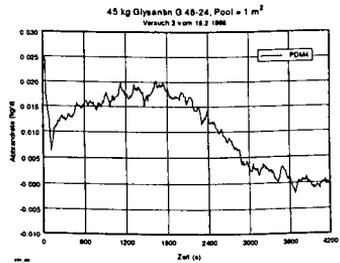
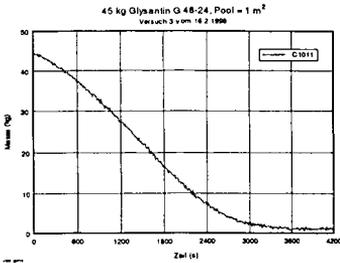
VERSUCH NR.1 VOM 11.02.1998



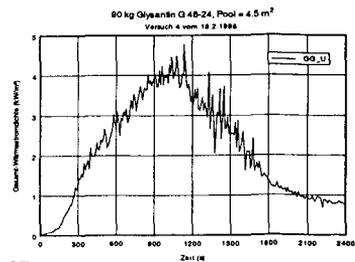
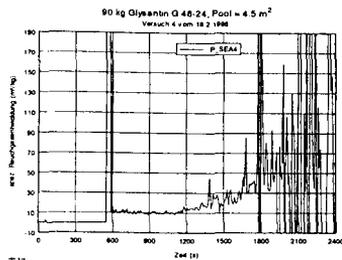
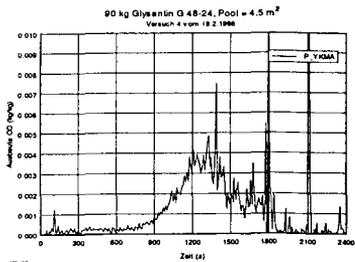
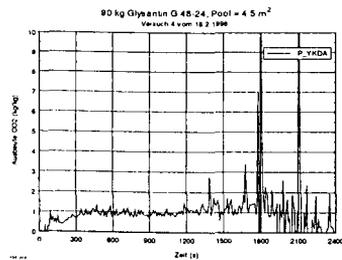
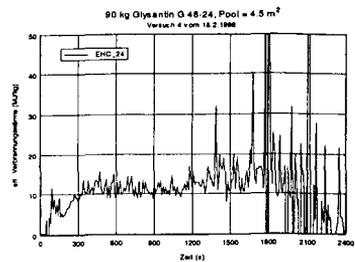
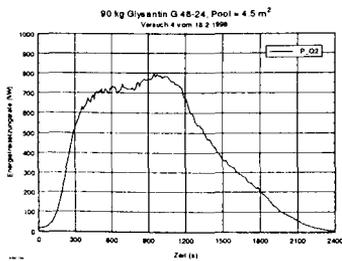
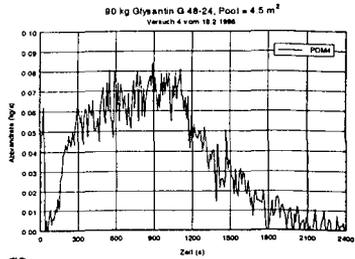
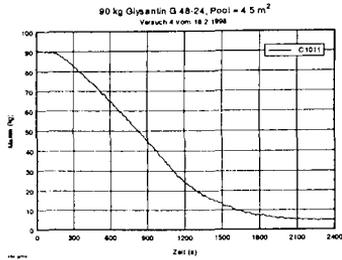
VERSUCH NR.2 VOM 12.02.1998



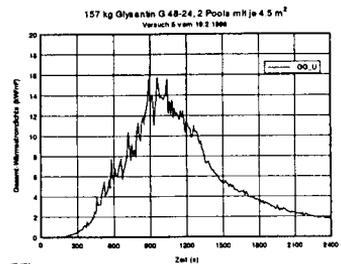
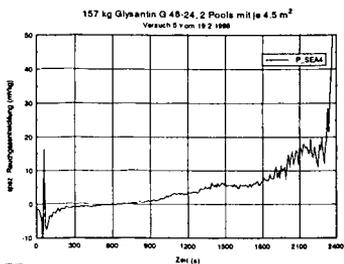
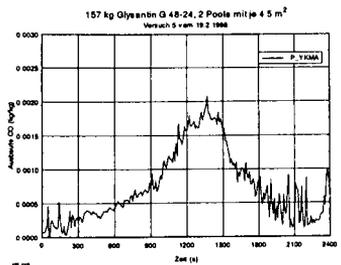
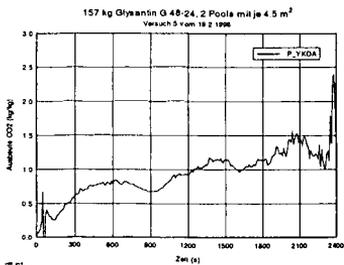
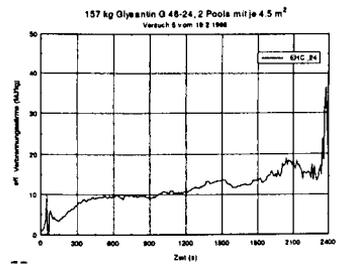
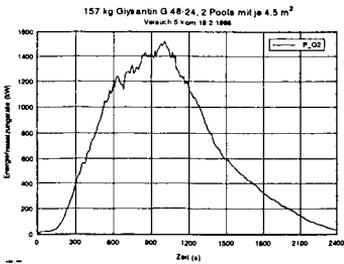
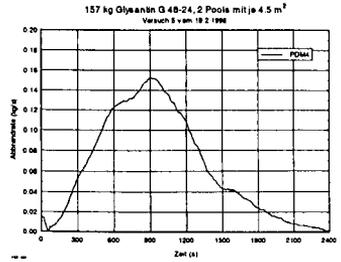
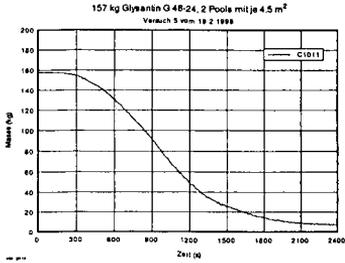
VERSUCH NR.3 VOM 16.02.1998



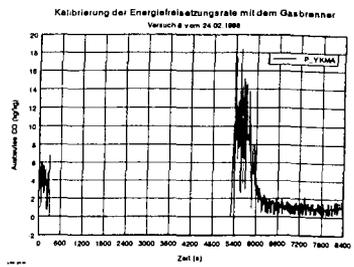
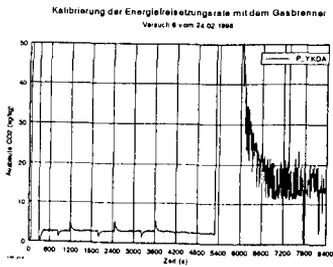
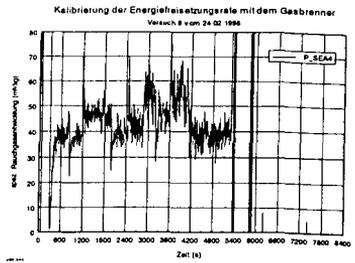
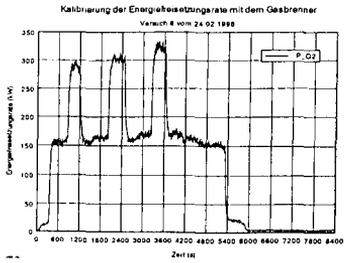
VERSUCH NR.4 VOM 18.02.1998



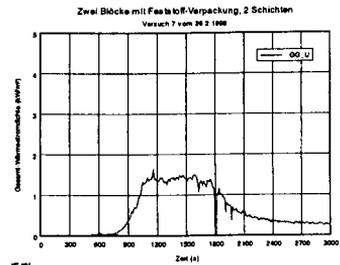
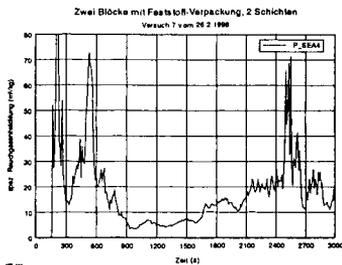
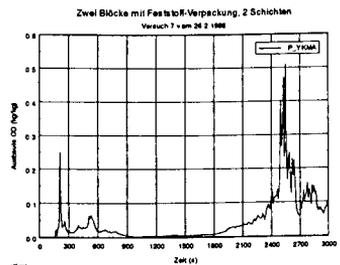
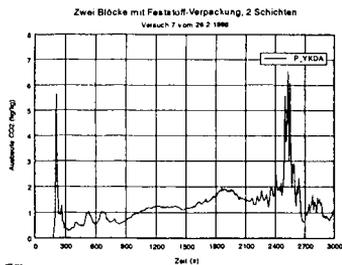
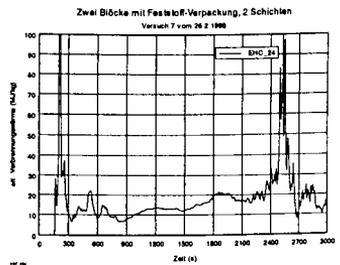
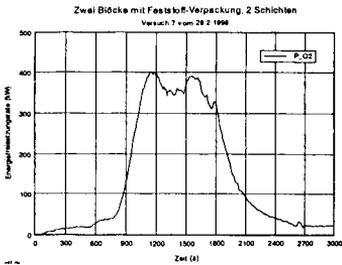
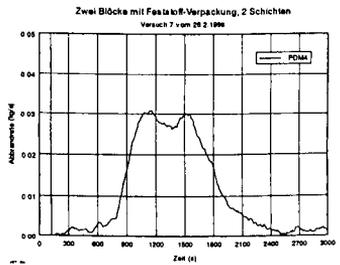
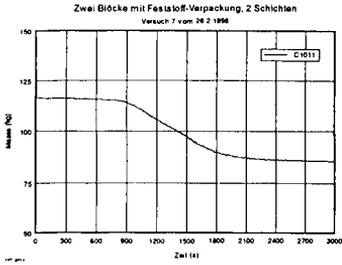
VERSUCH NR.5 VOM 19.02.1998



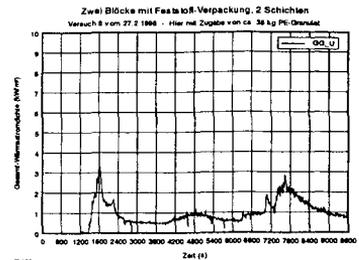
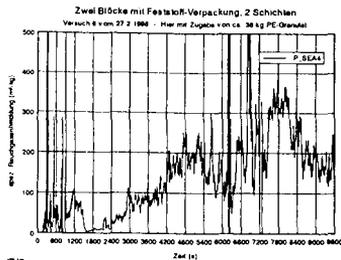
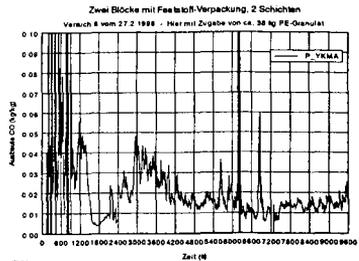
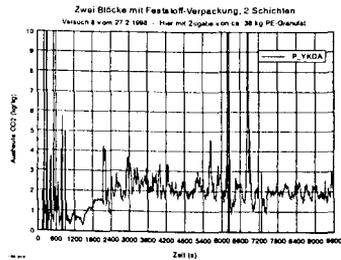
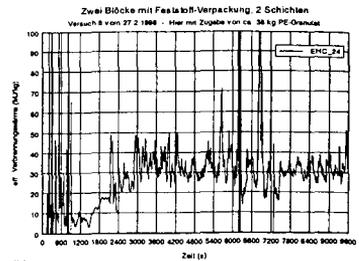
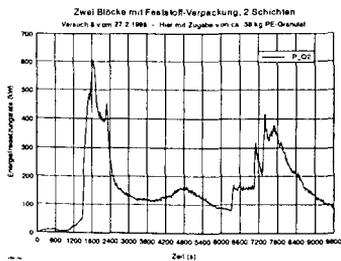
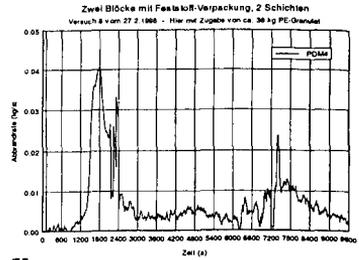
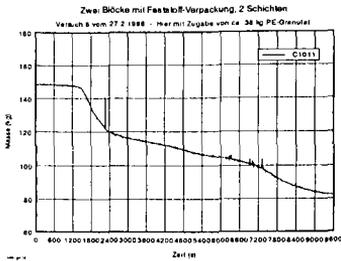
VERSUCH NR.6 VOM 24.02.1998



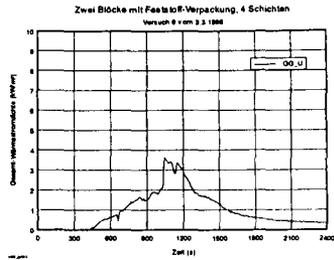
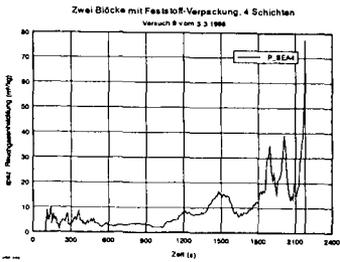
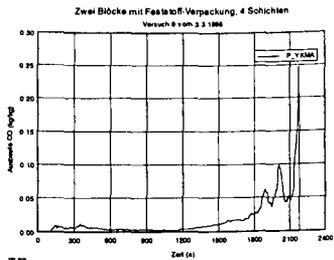
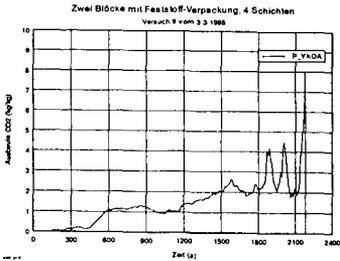
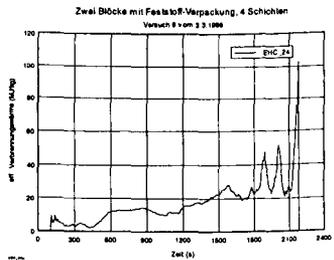
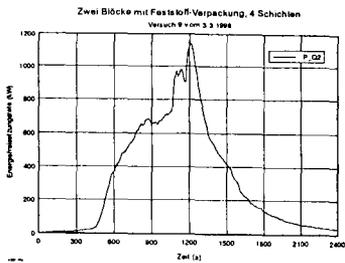
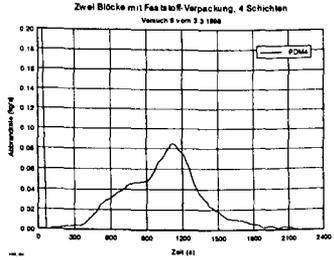
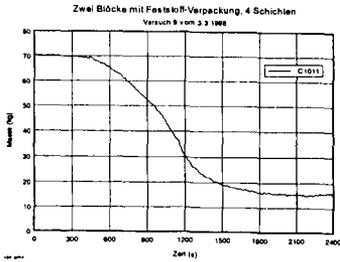
VERSUCH NR.7 VOM 26.02.1998



VERSUCH NR.8 VOM 27.02.1998



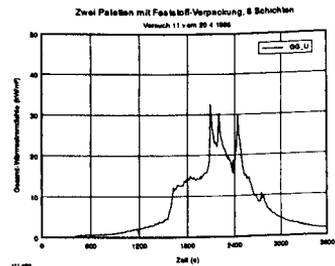
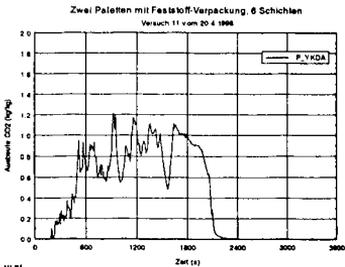
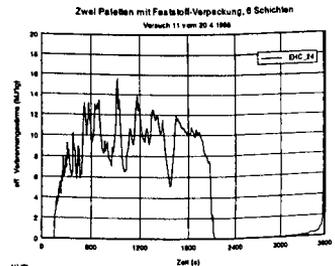
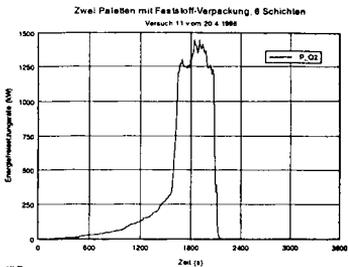
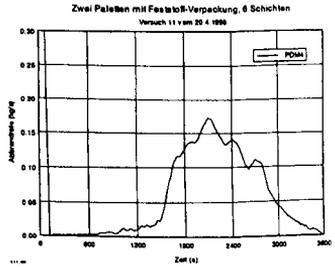
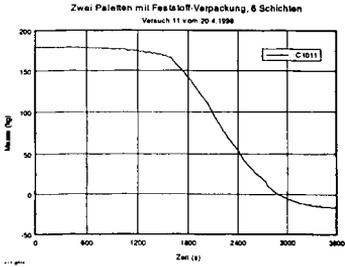
VERSUCH NR.9 VOM 03.03.1998



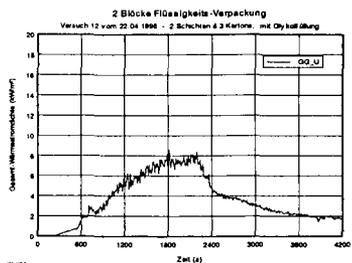
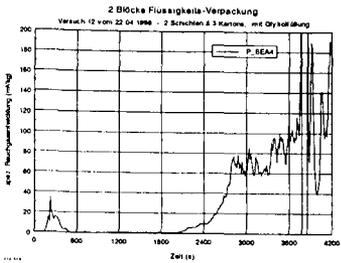
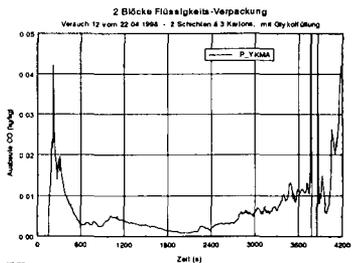
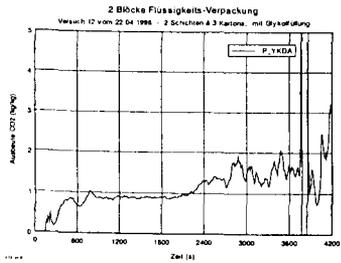
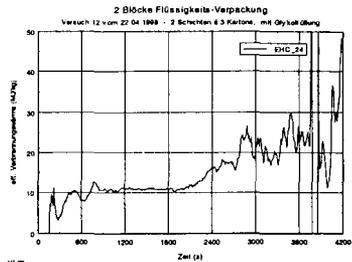
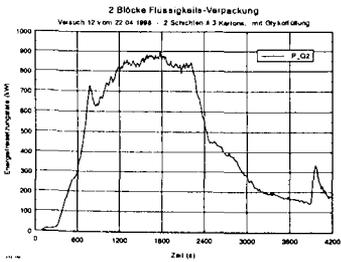
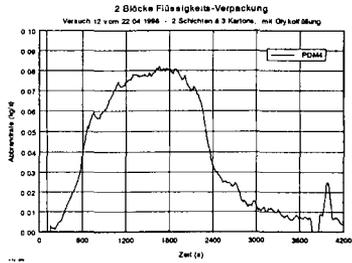
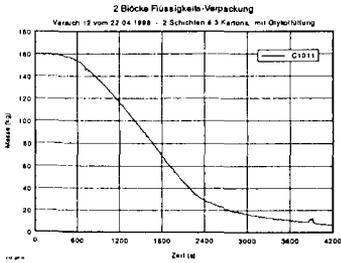
VERSUCH NR.10 VOM 06.03.1998

ETK-Versuch zur Kalibrierung – keine Messung

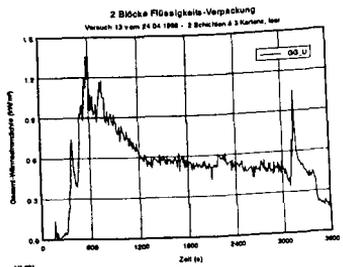
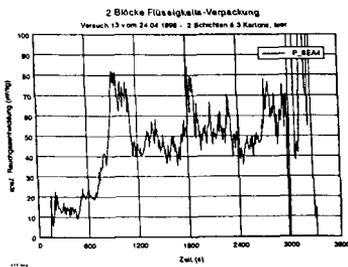
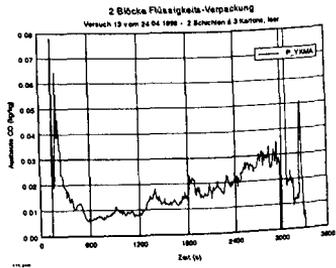
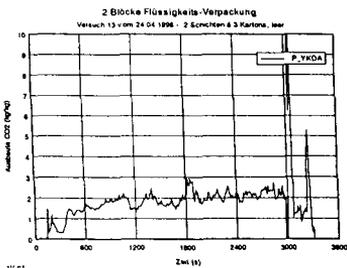
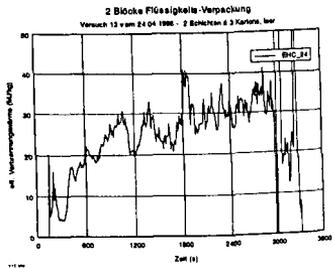
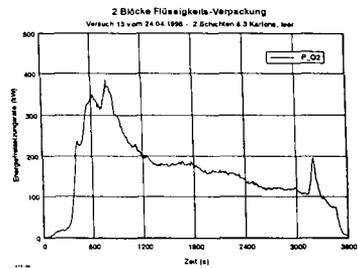
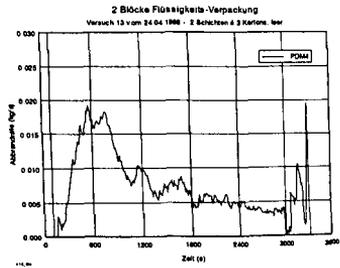
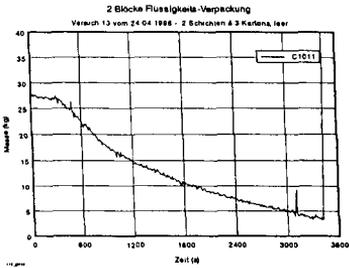
VERSUCH NR.11 VOM 20.04.1998



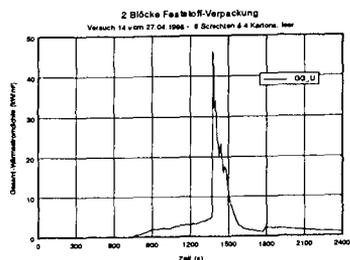
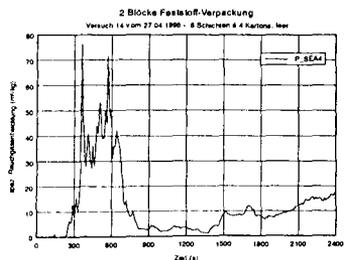
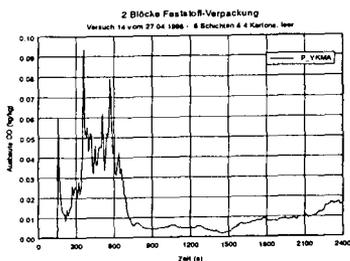
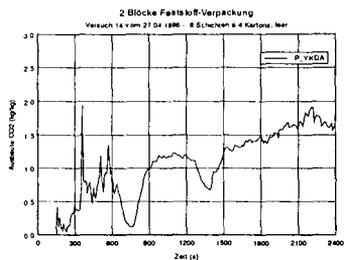
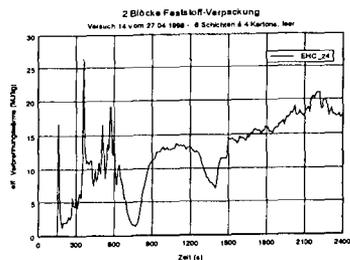
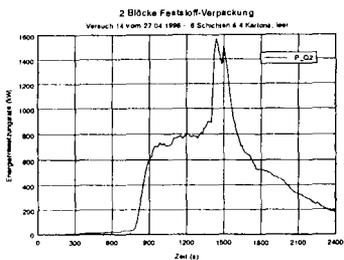
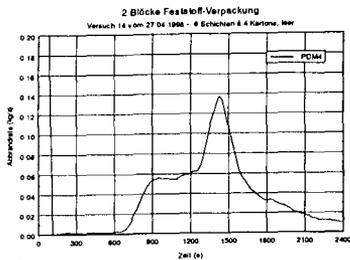
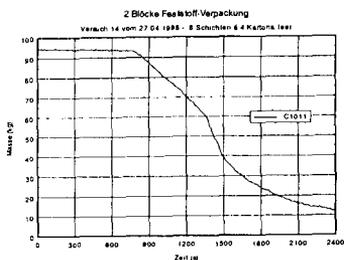
VERSUCH NR.12 VOM 22.04.1998



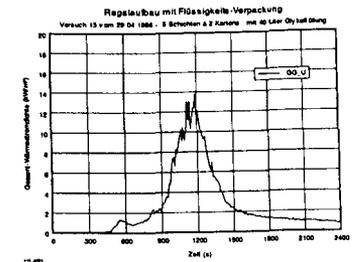
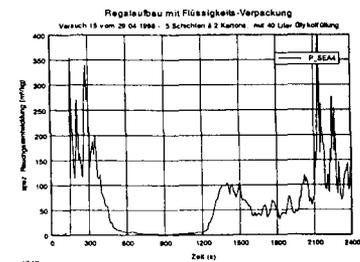
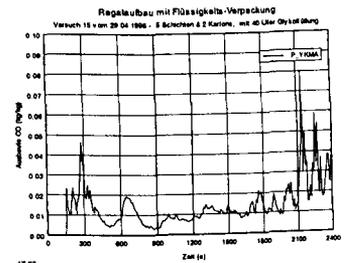
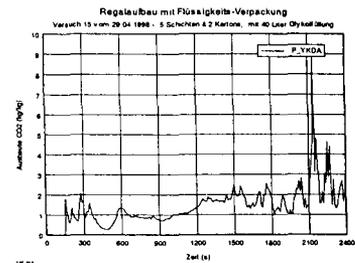
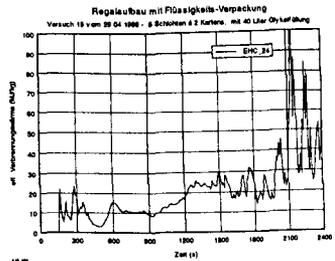
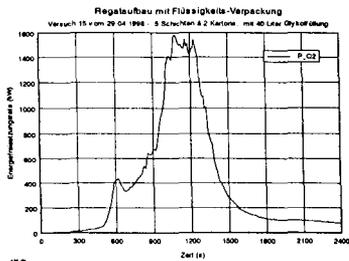
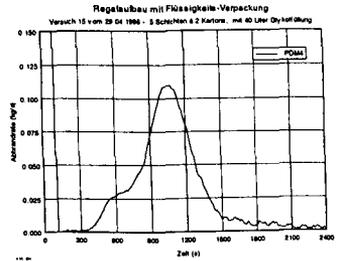
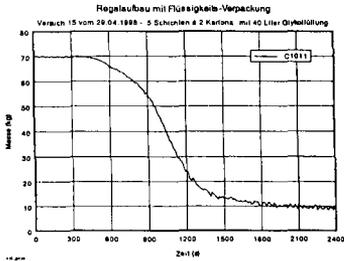
VERSUCH NR.13 VOM 24.04.1998



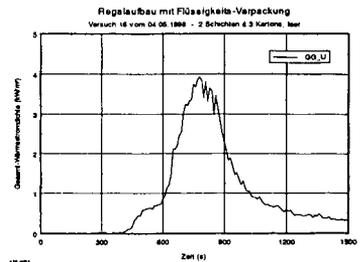
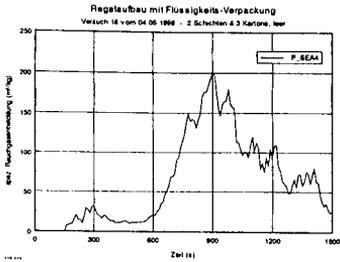
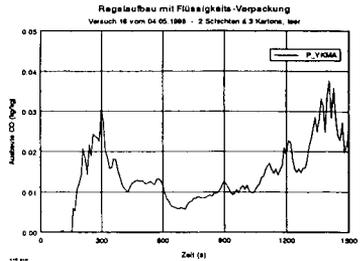
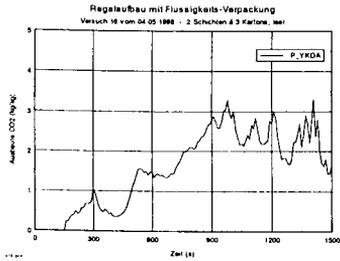
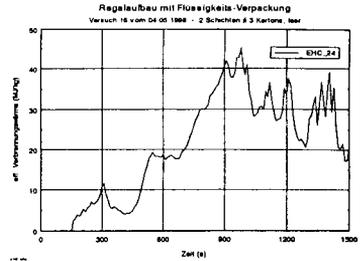
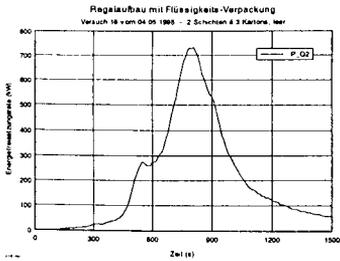
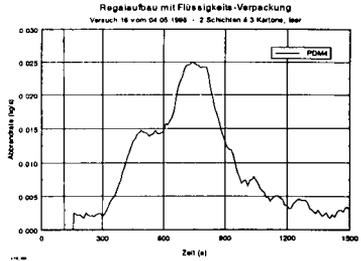
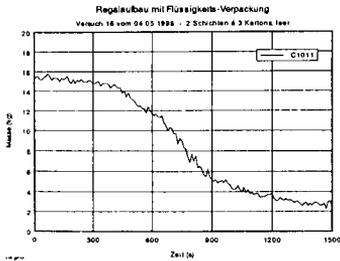
VERSUCH NR.14 VOM 27.04.1998



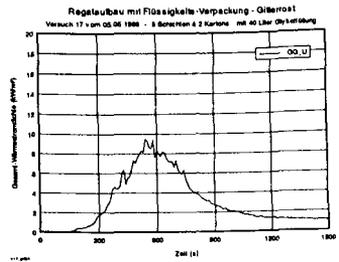
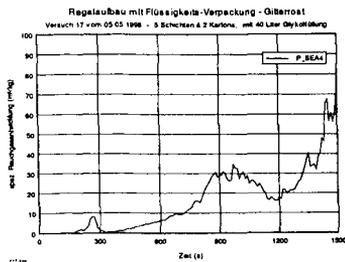
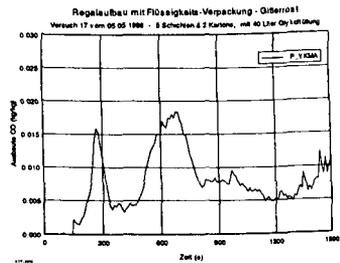
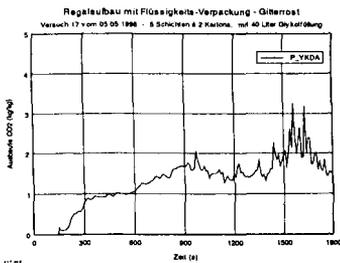
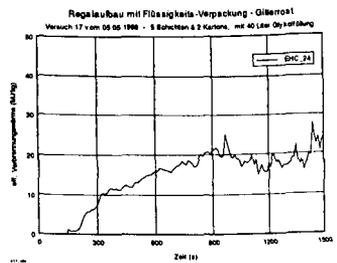
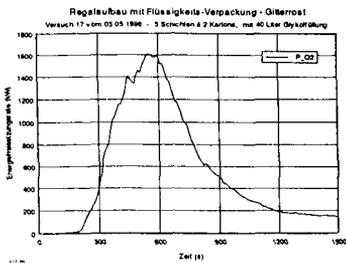
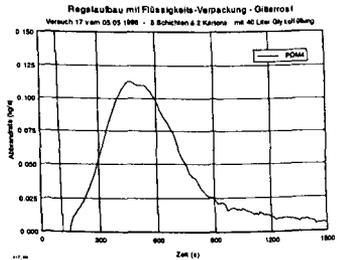
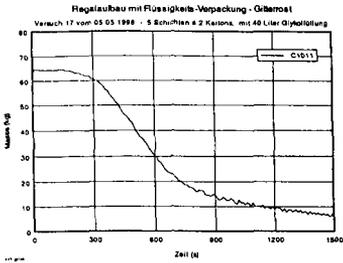
VERSUCH NR.15 VOM 29.04.1998



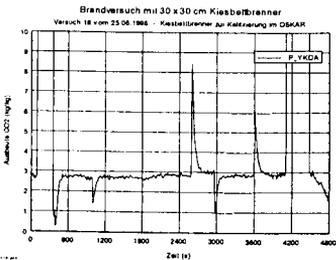
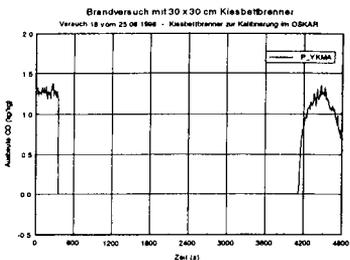
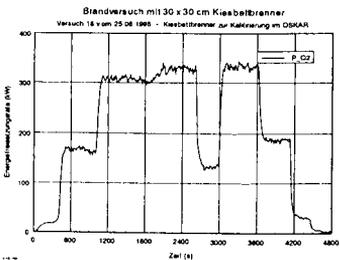
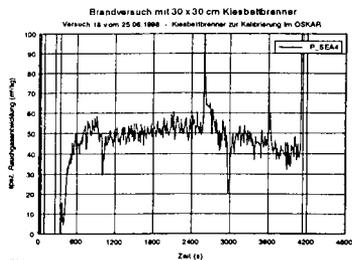
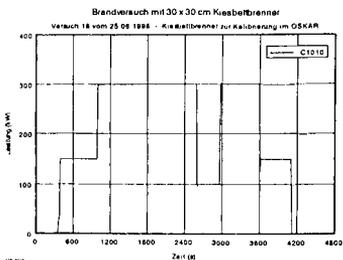
VERSUCH NR.16 VOM 04.05.1998



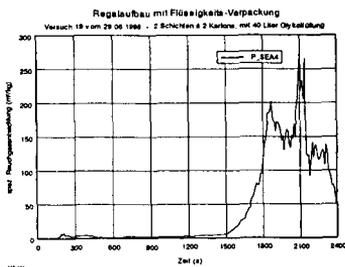
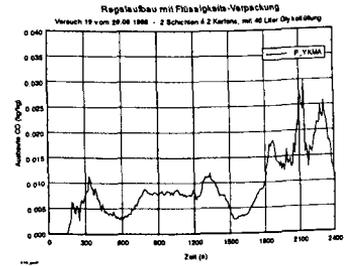
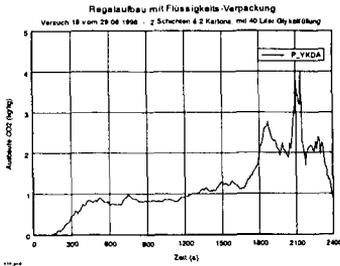
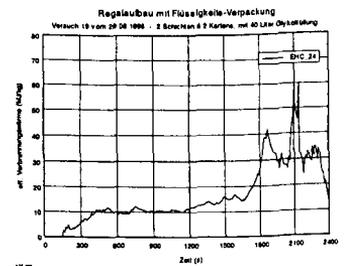
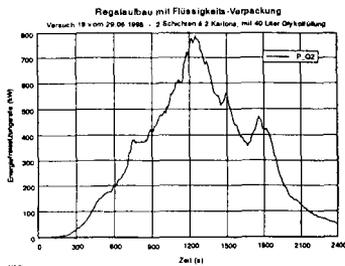
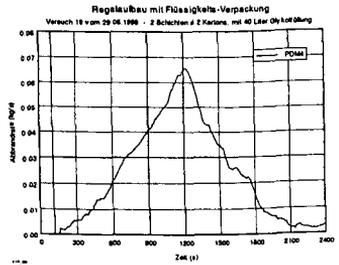
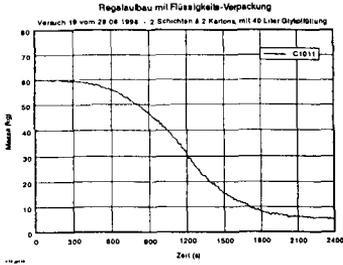
VERSUCH NR.17 VOM 05.05.1998



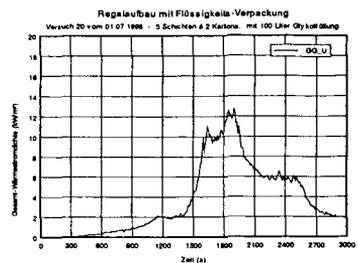
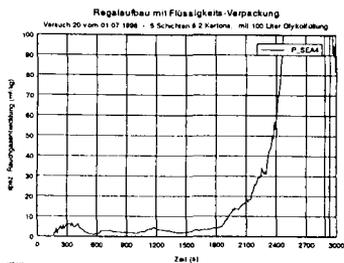
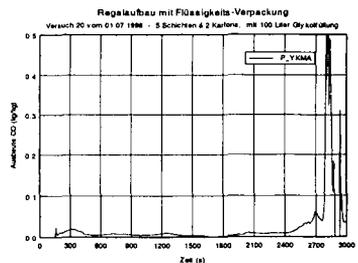
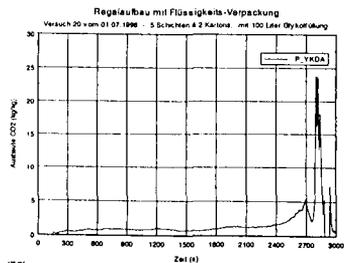
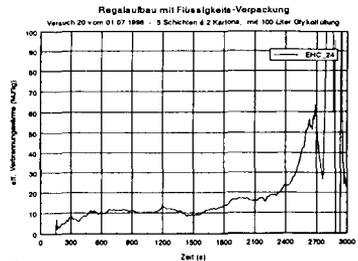
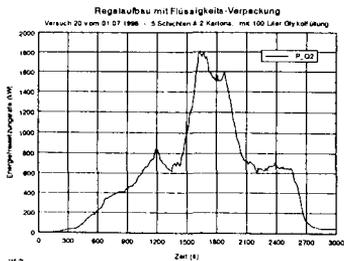
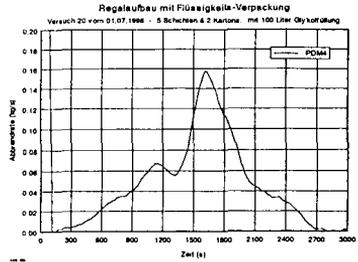
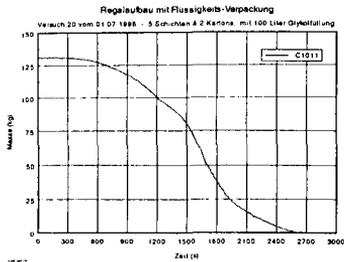
VERSUCH NR.18 VOM 25.06.1998



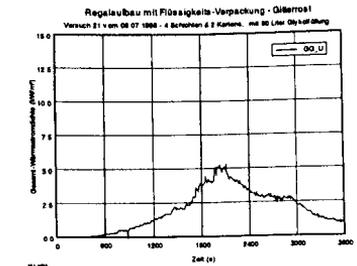
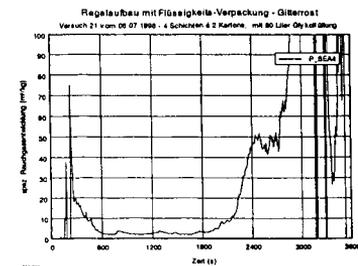
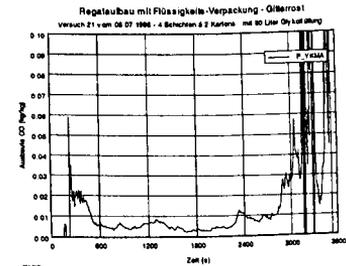
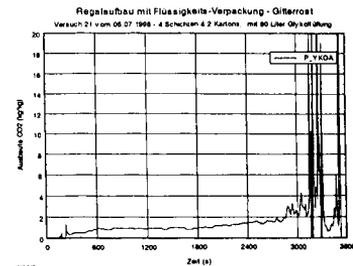
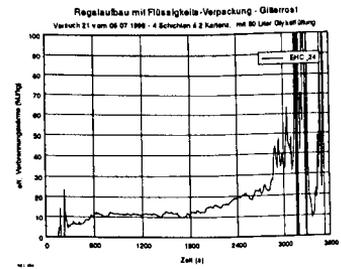
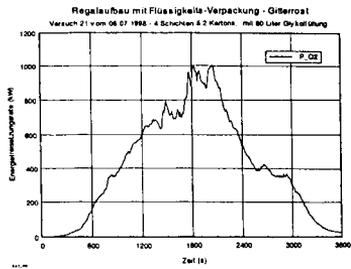
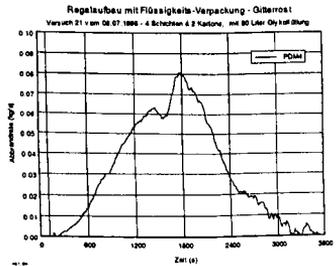
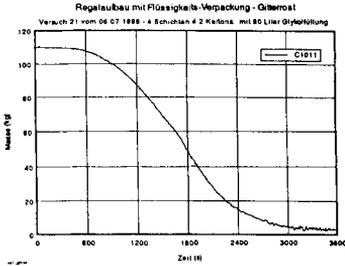
VERSUCH NR.19 VOM 29.06.1998



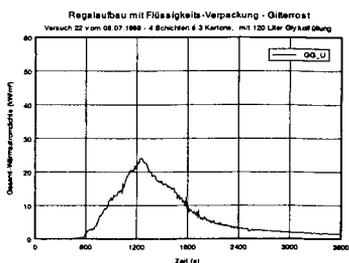
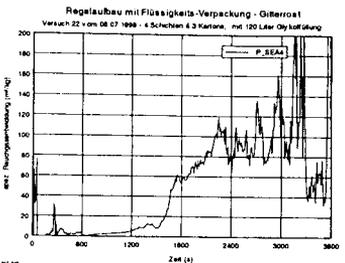
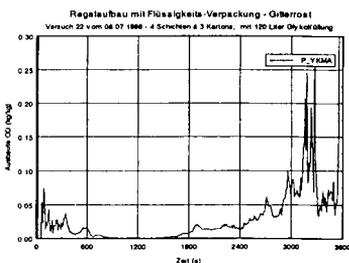
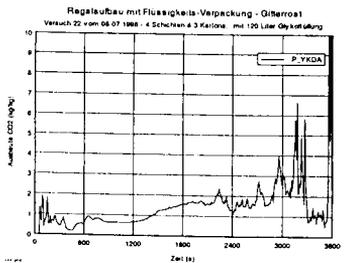
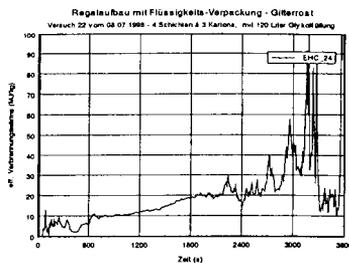
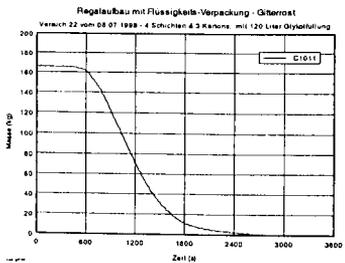
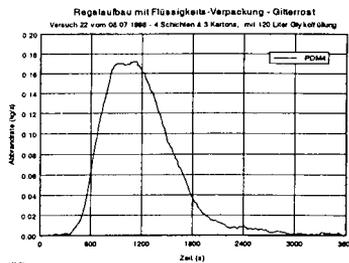
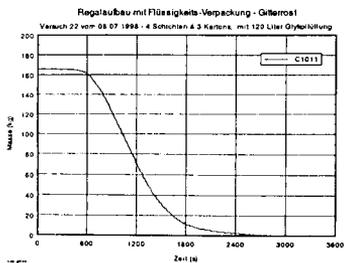
VERSUCH NR.20 VOM 01.07.1998



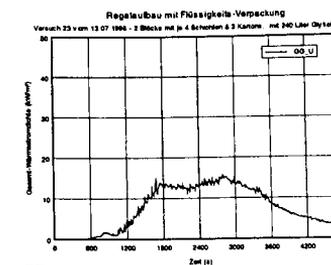
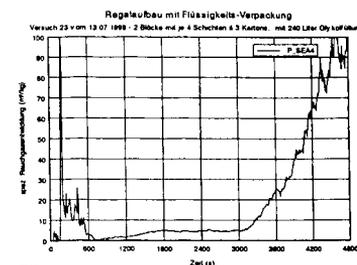
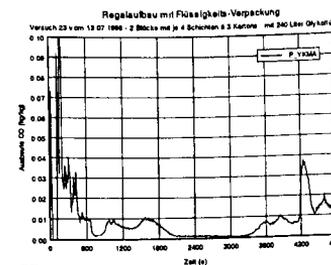
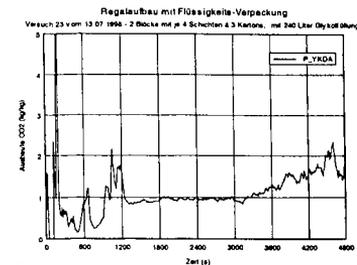
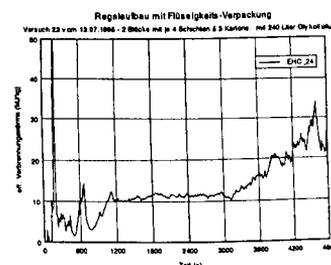
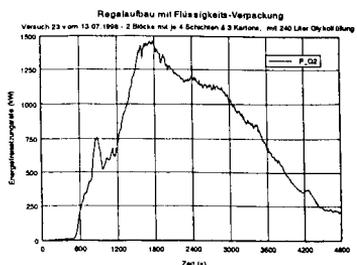
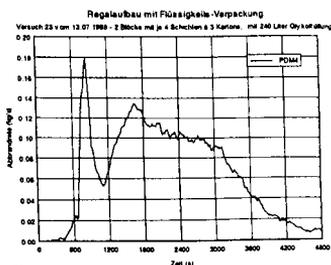
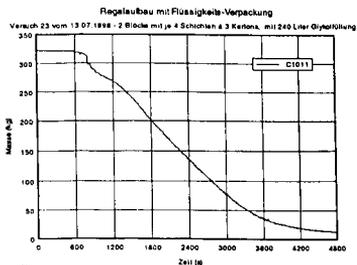
VERSUCH NR.21 VOM 06.07.1998



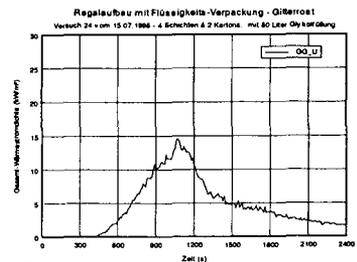
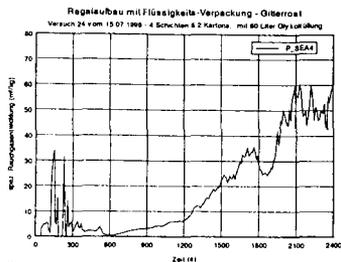
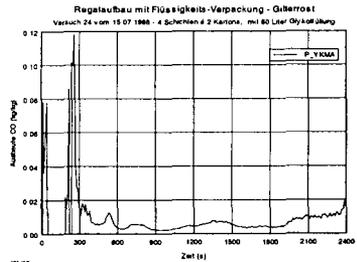
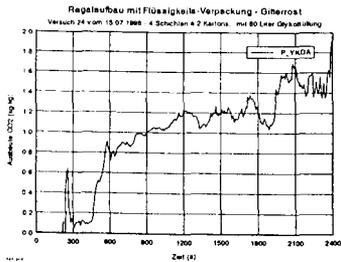
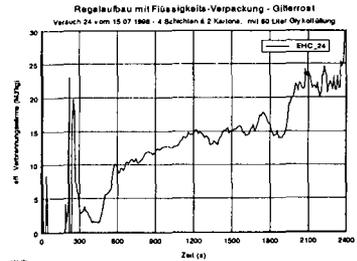
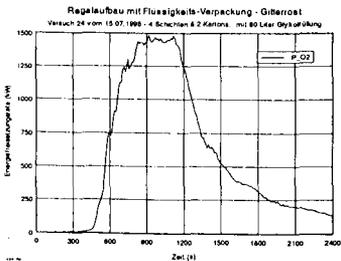
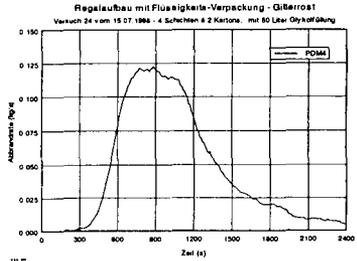
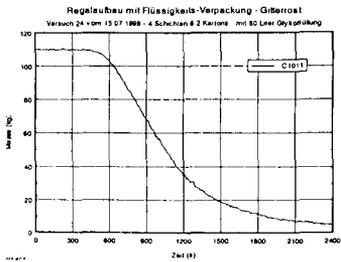
VERSUCH NR.22 VOM 08.07.1998



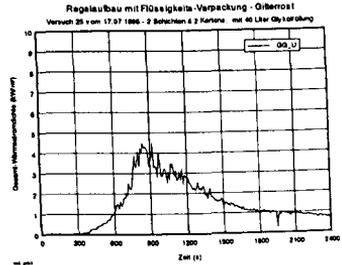
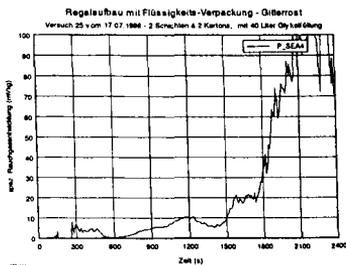
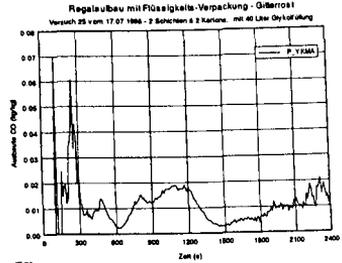
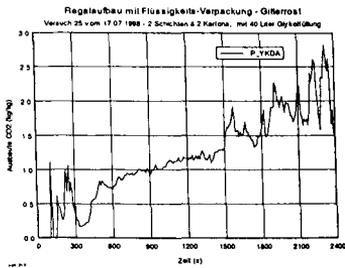
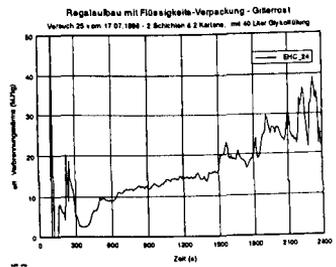
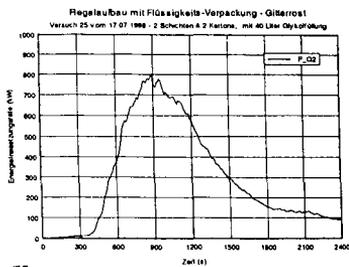
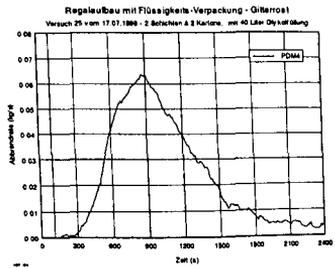
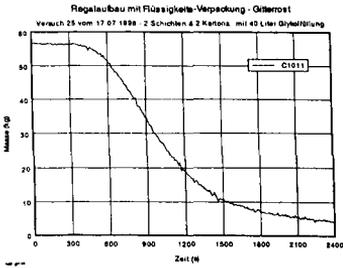
VERSUCH NR.23 VOM 13.07.1998



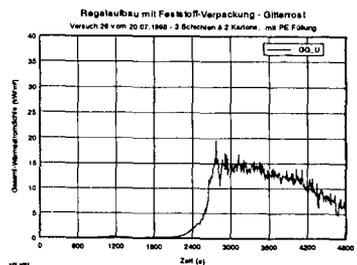
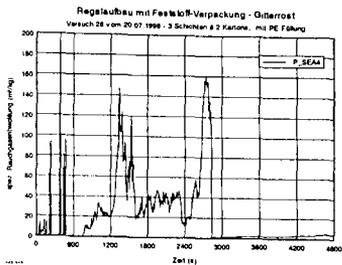
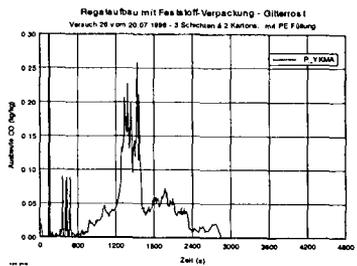
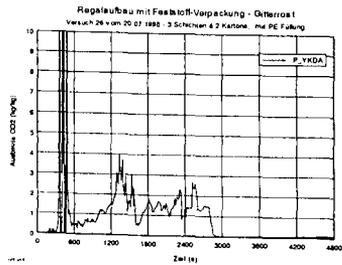
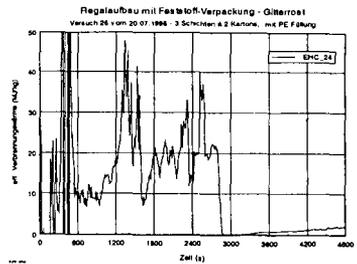
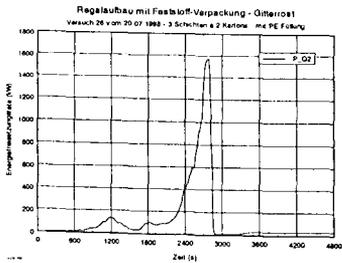
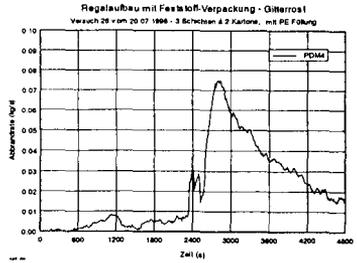
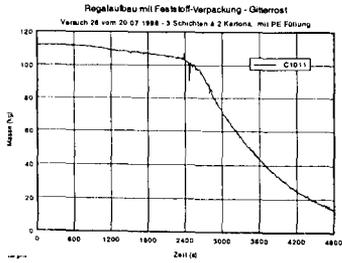
VERSUCH NR.24 VOM 15.07.1998



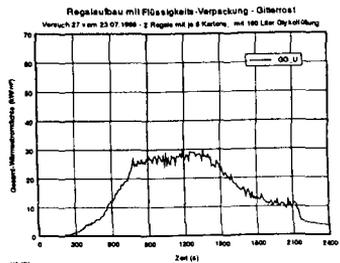
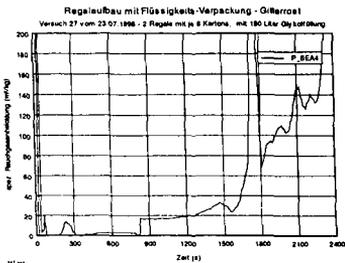
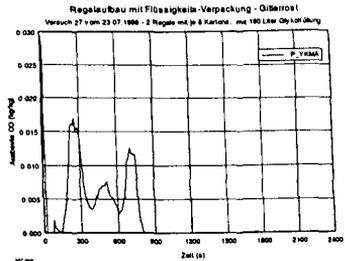
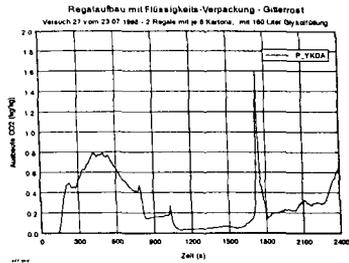
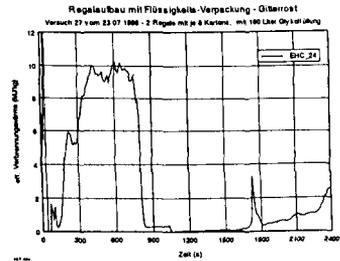
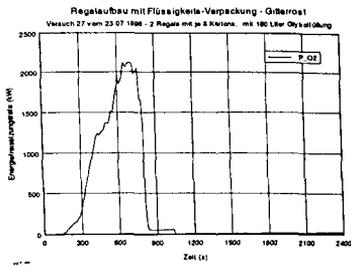
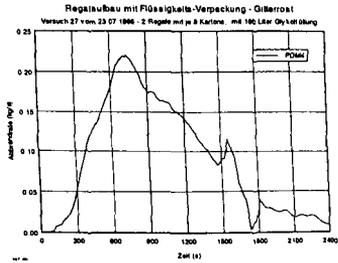
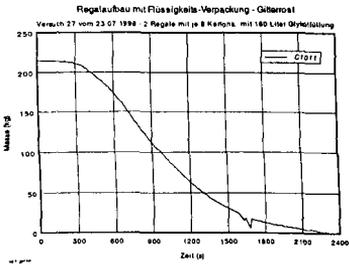
VERSUCH NR.25 VOM 17.07.1998



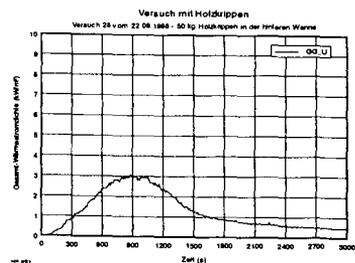
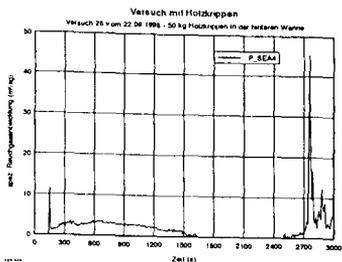
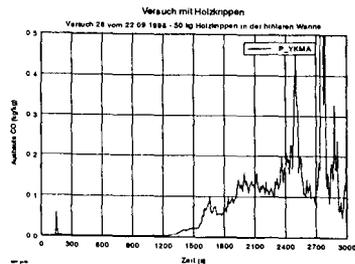
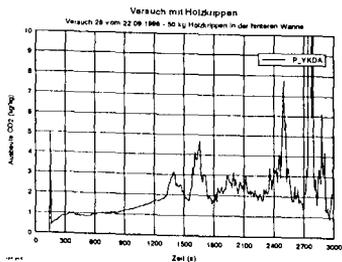
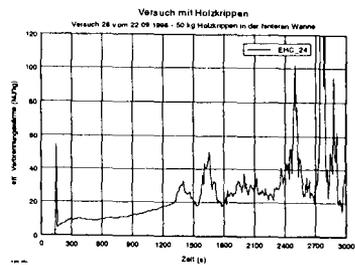
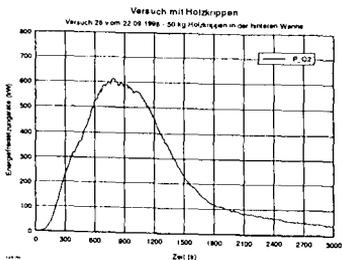
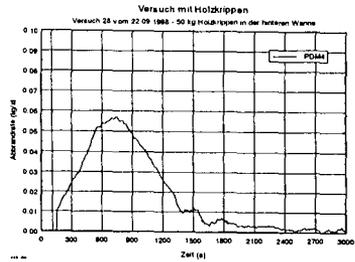
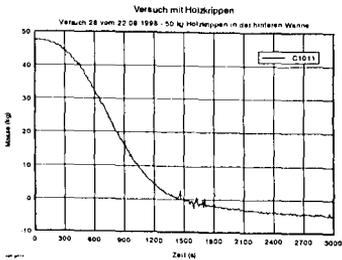
VERSUCH NR.26 VOM 20.07.1998



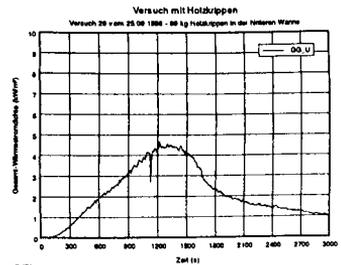
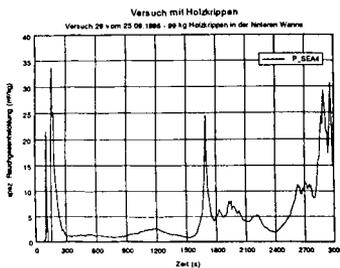
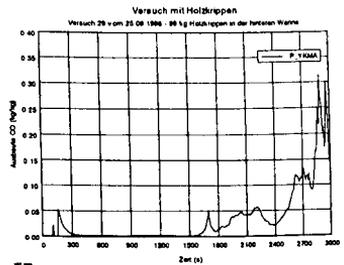
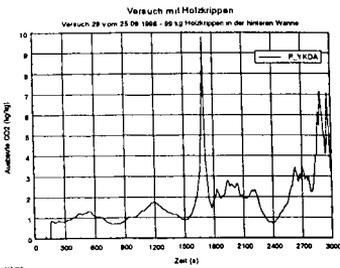
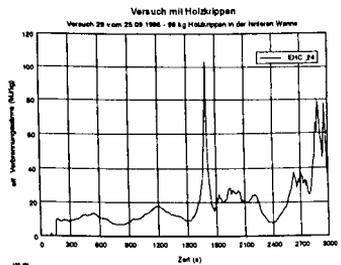
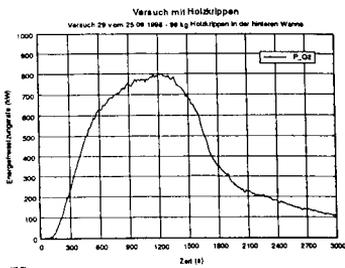
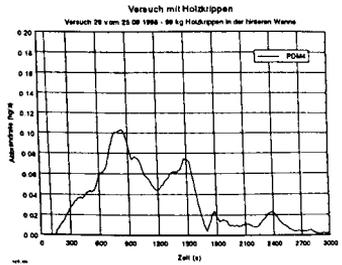
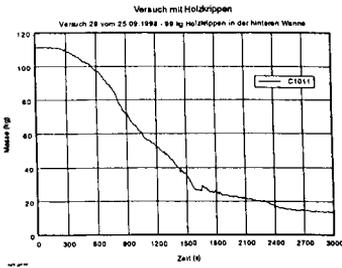
VERSUCH NR.27 VOM 23.07.1998



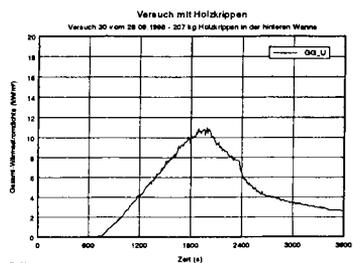
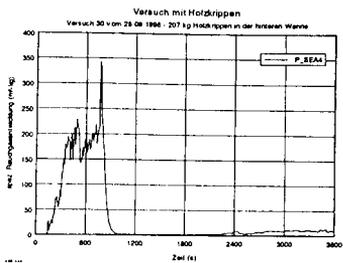
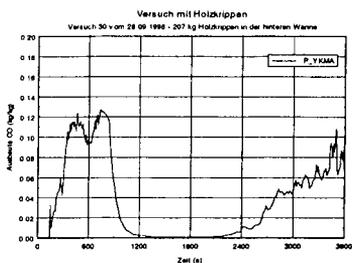
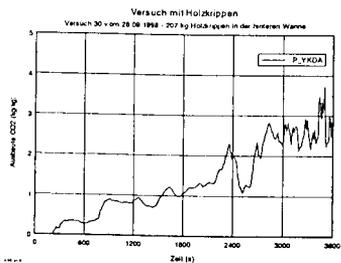
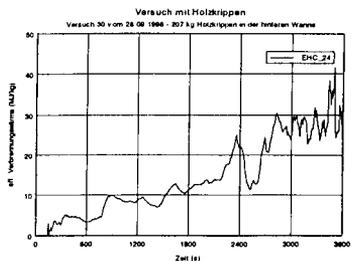
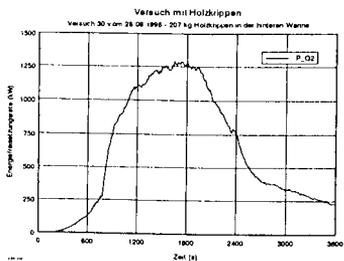
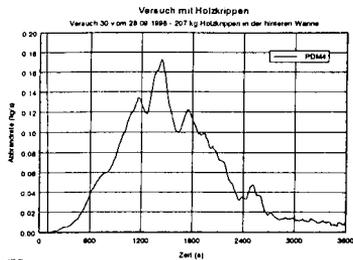
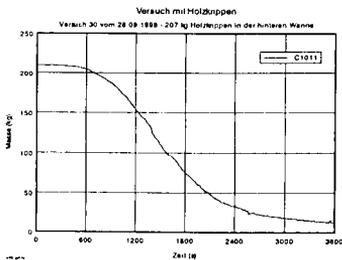
VERSUCH NR.28 VOM 22.07.1998



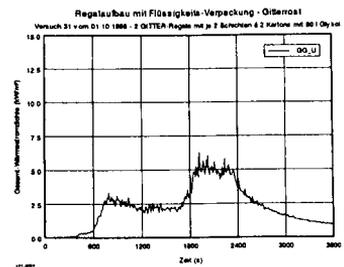
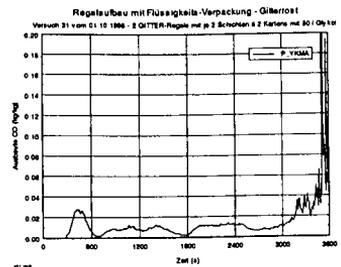
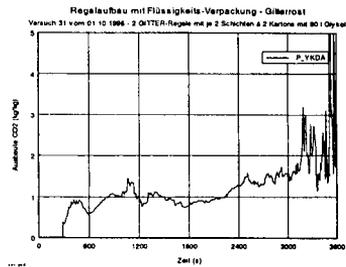
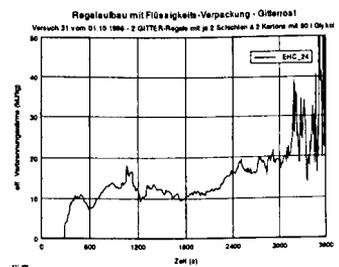
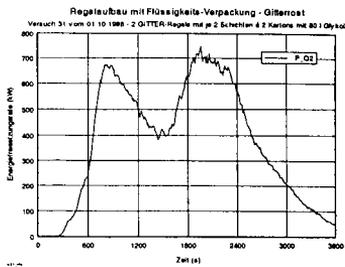
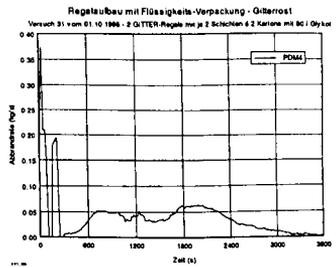
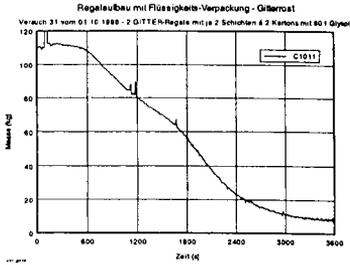
VERSUCH NR.29 VOM 25.09.1998



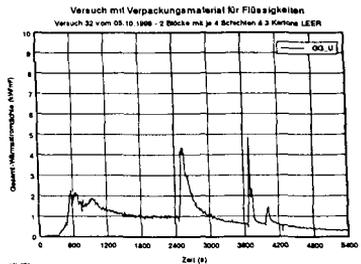
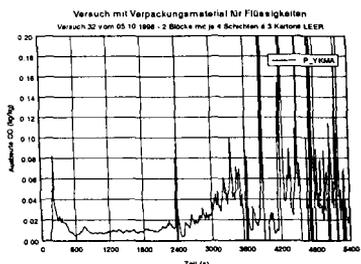
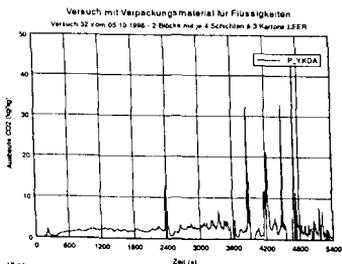
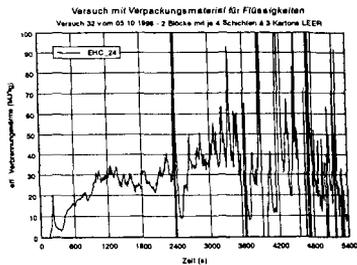
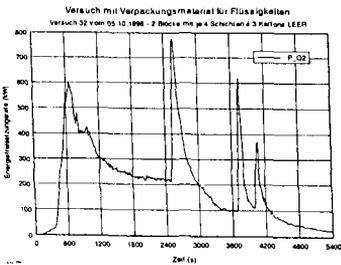
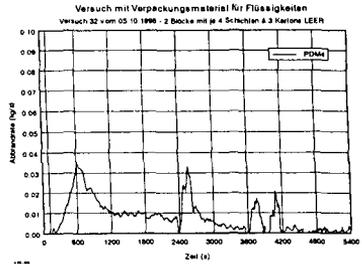
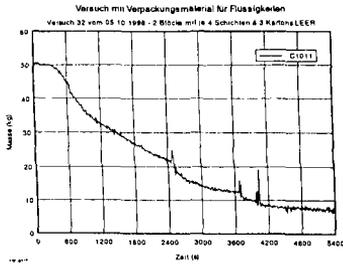
VERSUCH NR.30 VOM 29.09.1998



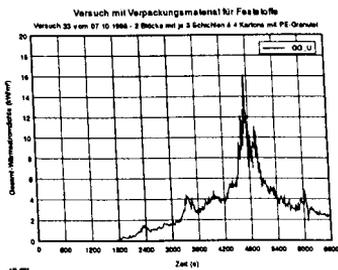
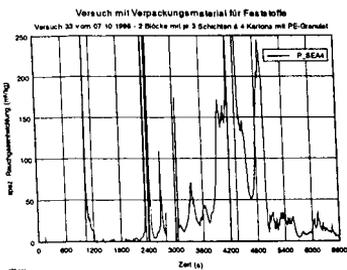
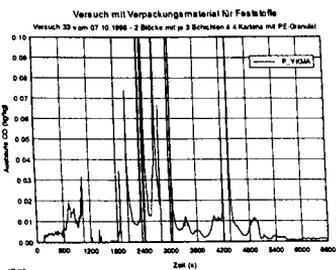
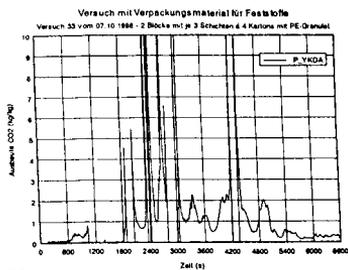
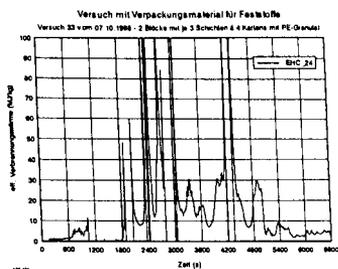
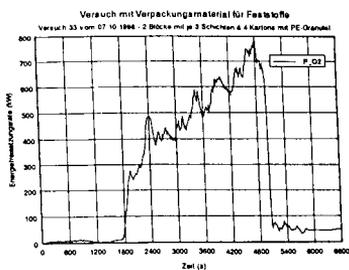
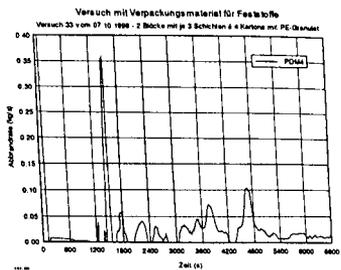
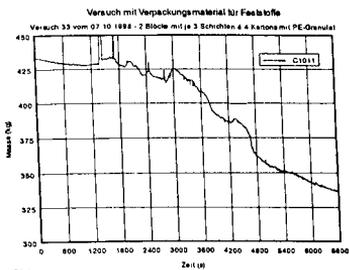
VERSUCH NR.31 VOM 01.10.1998



VERSUCH NR.32 VOM 05.10.1998



VERSUCH NR.33 VOM 07.10.1998



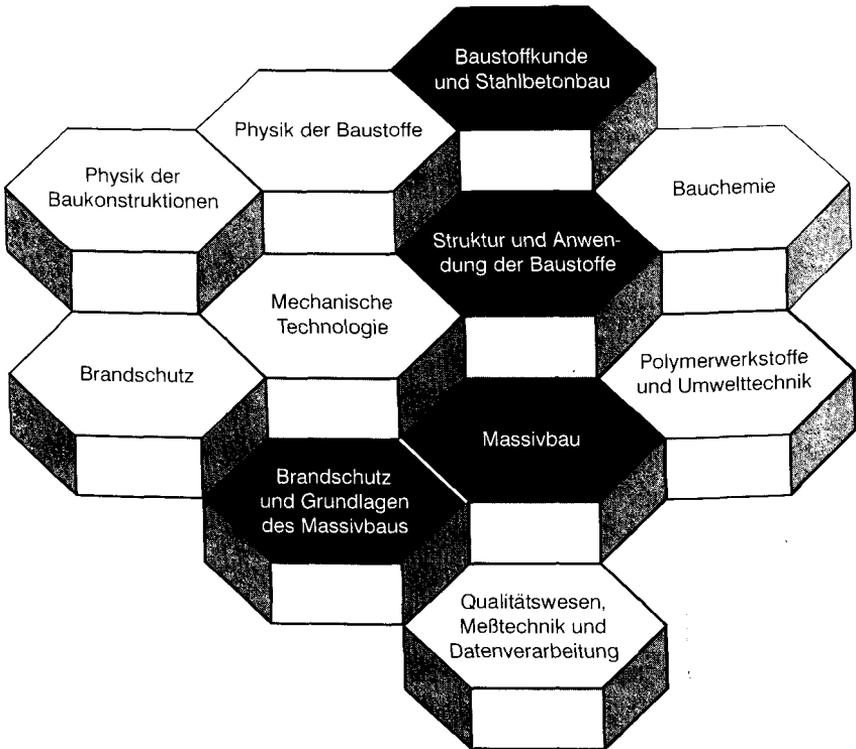
VERSUCH NR.34 VOM 09.10.1998

ETK-Versuch zur Kalibrierung – keine Messung

Schmidt Buchbinderei & Druckerei
Hamburger Straße 267
38114 Braunschweig
Telefon 0531/ 33 75 89
Telefax 0531/ 34 44 49
e-mail Schmidt.Druck.BS@t-online.de

Druck auf chlorfrei gebleichtem Papier

FACHGEBIETE UND ABTEILUNGEN



ISBN 3-89288-130-8

ISSN 1439-3875