

Christian Knaust, Christian Kusche

# **Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen**

F 2885

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9151-5

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

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

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

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

# **Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben**

Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der  
Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative  
Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
gefördert (Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7- 11.17 / II 3–F20-10-1-023).  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Projektleiter: Dr. Christian Knaust  
Bearbeiter: Christian Kusche, M. Sc.  
Auftraggeber: Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung,  
BBSR, Deichmannsaue 31-37, 53179 Bonn

Berlin, 26. Juni 2013

**BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung**

**Abteilung Bauwerkssicherheit**

Dr. Christian Knaust | christian.knaust@bam.de

Christian Kusche M. Sc. | christian.kusche@bam.de

Unter den Eichen 87 | 12205 Berlin | www.bam.de

Telefon: +49 30 8104-4190 | Fax: +49 30 8104-1707

**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**

**Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik**

Prof. Ulrich Krause | ulrich.krause@ovgu.de

Universitätsplatz 2 | 39106 Magdeburg | www.iaut.ovgu.de

Telefon: +49 391 67-18832 | Fax: +49 391 67-11128

## Kurzbeschreibung

Die Brandlastberechnung für Industriebauten erfolgt in Deutschland entsprechend der DIN 18230-1. Brandlasten bestehen in den meisten Fällen aus verschiedenen brennbaren Feststoffen und Flüssigkeiten, die in Abhängigkeit ihrer Lagerungsart, ihren stofflichen Eigenschaften und den Ventilationsbedingungen unterschiedliche Wärmeleistungen zur Folge haben. Als Eingangsgröße zur Brandlastberechnung berücksichtigt der sogenannte Abbrandfaktor  $m$  (m-Faktor) das individuelle Abbrandverhalten von Feststoffen und Flüssigkeiten. Der m-Faktor ist ein dimensionsloser Beiwert, der den Temperatur-Zeit-Verlauf in einem Vergleichsbauteil bei Abbrand eines Stoffes oder Stoffgemisches unter Bezug auf sägerauhes Fichtenholz bewertet. Die Bestimmung des m-Faktors erfolgte bis vor einigen Jahren entsprechend der DIN 18230-2 in dem m-Faktor-Ofen. Bis zu der Verschrottung des letzten in Deutschland existierenden m-Faktor-Ofens wurden mehr als 100 m-Faktoren von verschiedenen Stoffen ermittelt. Zurzeit ist es nicht möglich m-Faktoren für Brandlastberechnungen experimentell zu bestimmen.

Da infolge industrieller Entwicklungen zunehmend neu entwickelte Stoffe auf den Markt kommen, deren Abbrandverhalten zu bestimmen ist, ist es notwendig, ein alternatives Verfahren zur Brandlastermittlung zu entwickeln. Dazu werden im Rahmen eines durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) geförderten Forschungsprojektes experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

International wird das Abbrandverhalten von Feststoffen und Flüssigkeiten durch die Verbrennungseffektivität  $\chi$  bestimmt. Die Verbrennungseffektivität ist das Verhältnis der während einer Verbrennung effektiv freigesetzten Wärme (effektive Verbrennungswärme  $\Delta H_{eff}$ ) zu der theoretisch maximalen Wärmefreisetzung (Heizwert  $H_c$ ). Grundlage zur experimentellen Bestimmung der Verbrennungseffektivität ist die Wärmefreisetzungsrates  $HRR$ . Um bisher gemessene m-Faktoren nicht verwerfen zu müssen und das Abbrandverhalten zukünftig mit einer der DIN 18230-1 äquivalenten Methode der Brandlastbestimmung zu ermitteln, ist es das Ziel, einen theoretischen Zusammenhang zwischen m-Faktor und Verbrennungseffektivität herzustellen.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung .....	2
Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung .....	3
2 Forschungsschwerpunkte .....	4
2.1 Grundlagen (AP 1) .....	4
2.1.1 Brandlastberechnung .....	5
2.1.2 Abbrandfaktor m.....	6
2.1.3 Bisherige Erkenntnisse der Forschung.....	10
2.1.4 Verbrennungseffektivität.....	15
2.1.5 Prüfapparaturen .....	17
2.1.5.1 Cone Calorimeter.....	18
2.1.5.2 Single Burning Item Test.....	19
2.1.5.3 Bombenkalorimeter.....	20
2.2 Ermittlung eines theoretischen Zusammenhanges zwischen Abbrandfaktor m und Verbrennungseffektivität (AP 2).....	21
2.2.1 Abbrandfaktor m.....	21
2.2.2 Verbrennungseffektivität.....	24
2.3 Experimentelle Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate und der Verbrennungseffektivität an verschiedenen Baustoffen und n-Heptan (AP 3).....	24
2.3.1 Grundlagen der experimentellen Untersuchung .....	25
2.3.2 Am Cone Calorimeter ermittelte Wärmefreisetzungsrate .....	29
2.3.3 Am Single Burning Item Test ermittelte Wärmefreisetzungsrate ....	35
2.3.4 Ermittlung der Verbrennungseffektivität.....	41
2.4 Erarbeitung einer Methode zur Brandlastberechnung mit der Verbrennungseffektivität (AP 4).....	51
3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	53
Literaturverzeichnis .....	V
Anhang.....	VIII

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Versuchseinrichtung (m-Faktor-Ofen) in der Vorderansicht [4] .....	7
Abbildung 2: Ermittlung der Vergleichsbrandmenge MV aus der Vergleichselementtemperaturerhöhung [4] .....	8
Abbildung 3: Äquivalente Branddauer in Abhängigkeit von der Zulufrate (Zwangsluftzufuhr) [13] .....	10
Abbildung 4: Einfluss der Ventilation auf den Abbrand von Polyethylen (PE)-Granulat in Säcken (159 kg) [13] .....	11
Abbildung 5: Gegenüberstellung der Kalibrierkurven des m-Faktor-Ofens und des 62 m <sup>3</sup> -Brandraums [19] .....	13
Abbildung 6: Kalibrierkurven für unterschiedliche Brandräume [19] .....	14
Abbildung 7: Cone Calorimeter der BAM (bestehend aus konischem Heizelement, Abbrandwaage, Rauchabzugssystem und Analyseeinheit) .....	18
Abbildung 8: Single Burning Item Test (SBI) der BAM .....	19
Abbildung 9: Umrechnung der Brandwirkung eines Naturbrandes auf die Brandwirkung nach DIN 4102-2 nach [19], [27] .....	21
Abbildung 10: Versuchsaufbau im Single Burning Item Test und Modifizierung .....	27
Abbildung 11: Am Cone Calorimeter untersuchte Stoffe .....	29
Abbildung 12: Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz für eine Strahlungsintensität von 50 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	29
Abbildung 13: Wärmefreisetzungsrate der mitteldichten Holzfaserplatte für eine Strahlungsintensität von 75 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	30
Abbildung 14: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B1) für eine Strahlungsintensität von 70 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	31
Abbildung 15: Wärmefreisetzungsrate von normalentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B2) für eine Strahlungsintensität von 70 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	31
Abbildung 16: Wärmefreisetzungsrate von leichtentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B3) für eine Strahlungsintensität von 70 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	32
Abbildung 17: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polystyrol für eine Strahlungsintensität von 50 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	32
Abbildung 18: Wärmefreisetzungsrate von n-Heptan für eine Strahlungsintensität von 0 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	33
Abbildung 19: Wärmefreisetzungsrate der Spanplatte für eine Strahlungsintensität von 50 kW/m <sup>2</sup> (n=3 Versuche) .....	34
Abbildung 20: Am SBI untersuchte Proben .....	35

Abbildung 21: Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche) .....	35
Abbildung 22: Wärmefreisetzungsrate der mitteldichten Holzfaserplatte für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche) .....	36
Abbildung 23: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B1) für eine Brennerleistung von 33 kW (n=2 Versuche).....	37
Abbildung 24: Wärmefreisetzungsrate von normalentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B2) für eine Brennerleistung von 33 kW (n=2 Versuche).....	37
Abbildung 25: Wärmefreisetzungsrate von leichtentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B3) für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche).....	38
Abbildung 26: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polystyrol für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche).....	39
Abbildung 27: Wärmefreisetzungsrate von n-Heptan (n=3 Versuche) .....	39
Abbildung 28: Wärmefreisetzungsrate der Spanplatte für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche).....	40
Abbildung 29: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Fichtenholz und der Spanplatte und Standardabweichung der Versuchsreihe .....	41
Abbildung 30: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Polyurethan-Hartschaum (PUR-B1) und Standardabweichung der Versuchsreihe .....	42
Abbildung 31: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Polyurethan-Hartschaum (PUR-B2) und (PUR-B3) und Standardabweichung der Versuchsreihe .....	43
Abbildung 32: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Polystyrol-B1 und Standardabweichung der Versuchsreihe .....	43
Abbildung 33: Einfluss der Brennerleistung auf die effektive Verbrennungswärme von PUR-B1 und PUR-B2 und Standardabweichung der Versuchsreihe .....	44
Abbildung 34: Am Cone Calorimeter ermittelte Verbrennungseffektivitäten für die in Tabelle 5 aufgeführten Stoffe.....	45
Abbildung 35: Am SBI ermittelte Verbrennungseffektivitäten für die in Tabelle 5 aufgeführten Stoffe .....	46
Abbildung 36: Gegenüberstellung der aus den Messungen am Cone Calorimeter und am SBI ermittelten Verbrennungseffektivitäten und des der DIN 18230-2 entsprechenden m-Faktors .....	47
Abbildung 37: Ergebnisse des FIGRA-Wertes von MDF am Cone Calorimeter (links) und am SBI (rechts) .....	50
Abbildung 38: Ergebnisse der am Cone Calorimeter ermittelten FIGRA-Werte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte .....	51
Abbildung 39: Vorschlag für die Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen.....	52



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die untersuchten Stoffe und ihre Stoffkennwerte sowie der Abbrandfaktor $m$ nach DIN 18230-3 .....	24
Tabelle 2:	Übersicht zu den am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test untersuchten Probenabmessungen .....	25
Tabelle 3:	Übersicht zu den Versuchsbedingungen zur experimentellen Untersuchung des Abbrandverhaltens von verschiedenen Stoffen am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test .....	26
Tabelle 4:	Übersicht zu den Versuchsbedingungen, für die exemplarisch eine grafische Darstellung der Wärmefreisetzungsrate für die am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test untersuchten Stoffe erfolgte .....	28
Tabelle 5:	Wärmestromdichten bzw. die Brennerleistungen für die eine Verbrennungseffektivität bestimmt wurde .....	45
Tabelle 6:	Gegenüberstellung der am Cone Calorimeter ermittelten Werte der Verbrennungseffektivität mit Werten aus der Literatur .....	47
Tabelle 7:	Versuchsergebnissen für den $m$ -Faktor im $8 \text{ m}^3$ -Ofen von PS-B1 (Polystyrol-Hartschaum B1; dicht gestapelt), PUR-B1 (Polyurethan-Hartschaum "Baymer", zwei Blöcke aufeinanderliegend) und PUR-B2 (PIR Polyisocyanurat-Hartschaumplatten; dicht gestapelt) nach [36] .....	48
Tabelle 8:	Ergebnisse für die rechnerische Brandbelastung nach Gleichung (2-8) und nach Gleichung (2-1) sowie der Brandlastdichte nach Gleichung (2-4) mit $AB = 30 \text{ m}^2$ .....	49
Tabelle 9:	Fachvorträge und Beitrag zu einem Tagungsband .....	VIII

# 1 Einleitung

Brandlasten bestehen in den meisten Fällen aus unterschiedlichen brennbaren Feststoffen und Flüssigkeiten und haben in Abhängigkeit ihrer Lagerungsart, ihren stofflichen Eigenschaften und den Ventilationsbedingungen unterschiedliche Wärmeleistungen zur Folge. Aufgrund der Erkenntnisse wurde vor mehr als 40 Jahren nach einer Möglichkeit gesucht, das unterschiedliche Abbrandverhalten von Stoffen für Brandlastberechnungen zu berücksichtigen. Dafür wurde der sogenannte Abbrandfaktor  $m$  eingeführt, der als Eingangsparameter für Brandlastberechnungen verwendet wird. Auf der Grundlage von Brandversuchen sowie der Auswertung von realen Bränden in Schadensfällen wurde ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht, jedem Stoff einen spezifischen  $m$ -Faktor zuzuordnen. Kern des Verfahrens war der  $m$ -Faktor-Ofen, in dem ein in einer speziellen Lagerungsart angeordneter Stoff verbrannt und gleichzeitig der Temperatur-Zeit-Verlauf in einem Vergleichsbauteil aufgezeichnet wurde. Der  $m$ -Faktor ist der Quotient der Wärmepotenziale aus Vergleichs- und Versuchsbrandlast, die in dem Vergleichsbauteil zu der gleichen Vergleichselementtemperaturerhöhung führen. Der  $m$ -Faktor hat einen Wert zwischen  $m = 0,2$  und  $m = 2,0$ , wobei ein Wert von größer  $m = 1,0$  eine größere und ein Wert von kleiner  $m = 1,0$  eine kleinere thermische Einwirkung als der Vergleichsstoff Fichtenholz auf umliegende Bauteile zur Folge hat.

Bis zu der Verschrottung des letzten in Deutschland existierenden  $m$ -Faktor-Ofens wurden mehr als 100  $m$ -Faktoren von verschiedenen Stoffen ermittelt. Seitdem wurden viele neue Stoffe entwickelt, deren Abbrandverhalten bewertet werden muss, um brandschutztechnische Bemessungen von Bauteilen durchführen zu können. Um das Abbrandverhalten zukünftig mit einer der DIN 18230-1 äquivalenten Methode der Brandlastbestimmung zu ermitteln, ist es das Ziel, einen theoretischen Zusammenhang zwischen  $m$ -Faktor, Wärmefreisetzungsrate und Verbrennungseffektivität herzustellen. Die äquivalente Methode soll sich auf die im internationalen Bereich zur Berechnung von Brandlasten angewandte Verbrennungseffektivität stützen.

## 2 Forschungsschwerpunkte

Um bisher gemessene m-Faktoren nicht verwerfen zu müssen und das Abbrandverhalten zukünftig mit einer zur DIN 18230-1 äquivalenten Methode der Brandlastbestimmung zu ermitteln, ist es das Ziel, einen theoretischen Zusammenhang zwischen m-Faktor und Verbrennungseffektivität herzustellen. Dazu wurden, im Rahmen eines durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) geförderten Forschungsprojektes, zunächst für verschiedene Feststoffe (sägeraues Fichtenholz, miteldichte Holzfaserplatte – MDF, Polystyrol – PS-B1, Polyurethan-Hartschaum – PUR-B1, PUR-B2, PUR-B3 und Spanplatte) und einer Flüssigkeit (n-Heptan) experimentelle Untersuchungen zur Wärmefreisetzungsrate am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test (SBI) durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten anhand der folgenden Arbeitspakete:

- AP 1** Literaturrecherche
- AP 2** Ermittlung eines theoretischen Zusammenhanges zwischen Abbrandfaktor m, Wärmefreisetzungsrate (HRR) und Verbrennungseffektivität
- AP 3** Experimentelle Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate (HRR) und der Verbrennungseffektivität
- AP 4** Erarbeitung einer Methode zur Brandlastberechnung mit der Verbrennungseffektivität
- AP 5** Abschlussbericht

### 2.1 Grundlagen (AP 1)

Zu den national und international angewandten Verfahren der Brandlastberechnung wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Während beim internationalen Verfahren zur Bestimmung der Brandlastdichte die Verbrennungseffektivität verwendet wird, wird national zur Ermittlung der rechnerischen Brandbelastung der Abbrandfaktor m verwendet. Sowohl die Verbrennungseffektivität als auch der Abbrandfaktor m bewerten das Abbrandverhalten eines Stoffes. Die experimentelle Ermittlung beider Kenngrößen wird im Folgenden erläutert.

### 2.1.1 Brandlastberechnung

Für komplexe Gebäudegeometrien oder Brandbekämpfungsabschnitte größer 10.000 m<sup>2</sup> wird das in der Praxis erfolgreich angewandte Rechenverfahren nach DIN 18230-1 [1] gemäß Abschnitt 7 der Muster-IndustriebauRL (MIndBauRL) [2] verwendet. Weiterführende Angaben zur Anbindung an die MIndBauRL sowie Erläuterungen und Grundlagen zur DIN 18230-1 sind in [3] zu finden. Im Falle eines Brandes in einem Gebäude ist die Brandbelastung, mit der Bauteile im Schadensfeuer beaufschlagt werden, abhängig von der Menge des brennbaren Stoffes, dem Abbrandverhalten, den Ventilationsbedingungen, der Wärmeverluste über Öffnungen sowie der Wärmeverluste an Umfassungsbauteile. Die Beurteilung der zulässigen Brandbekämpfungsabschnittsflächen sowie die Beurteilung der Anforderung an Baustoffe und Bauteile erfolgt über die äquivalente Branddauer  $t_{\ddot{a}}$  bzw. die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer  $erft_f$ . Zur Berechnung von  $t_{\ddot{a}}$  und  $erft_f$  wird die rechnerische Brandbelastung  $q_R$  herangezogen. Die rechnerische Brandbelastung  $q_R$  beschreibt das Wärmepotential von verschiedenen Brandlasten in einem Brandraum. Hierbei wird zwischen ungeschützten Brandlasten  $q_{R,u}$  und

$$q_{R,u} = \frac{\sum M_i \cdot H_{C_i} \cdot m_i}{A_B} \quad (2-1)$$

geschützten Brandlasten  $q_{R,g}$  unterschieden

$$q_{R,g} = \frac{\sum M_i \cdot H_{C_i} \cdot m_i \cdot \psi_i}{A_B} \quad (2-2)$$

Die rechnerische Brandbelastung ergibt sich aus der Summe von  $q_{R,u}$  und  $q_{R,g}$  wie folgt:

$$q_R = q_{R,u} + q_{R,g} \quad (2-3)$$

$q_R$	rechnerische Brandbelastung in kWh/m <sup>2</sup>
$q_{R,u}$	ungeschützte rechnerische Brandbelastung in kWh/m <sup>2</sup>
$q_{R,g}$	geschützte rechnerische Brandbelastung in kWh/m <sup>2</sup>
$M_i$	Brandmenge des einzelnen ungeschützten oder geschützten Stoffes in kg
$H_{C_i}$	Heizwert des einzelnen Stoffes in kWh/kg
$m_i$	m-Faktor des einzelnen brennbaren Stoffes
$\psi_i$	Kombinationsbeiwert
$A_B$	Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes in m <sup>2</sup>

Zur Berechnung der rechnerischen Brandbelastung nach DIN 18230-1 [1] ist der Abbrandfaktor  $m$  erforderlich. Sowohl in Gleichung (2-1) als auch in Gleichung (2-2) wird der Abbrandfaktor  $m$  (m-Faktor) berücksichtigt. Die experimentelle Ermittlung des Abbrandfaktors  $m$  erfolgt nach DIN 18230-2 [4]. Der Abbrandfaktor  $m$  bewertet das Abbrandverhalten von Stoffen bei bestimmter Form, Verteilung, Lagerungsdichte und Feuchte.

Auf europäischer Ebene wird im Eurocode 1 Teil 1-2 NA [5] als Eingangsdaten für die Anwendung von Naturbrandmodellen zur Bestimmung der Brandlastdichte in Gebäuden die Verbrennungseffektivität verwendet. Die Berechnung der sogenannten Brandlastdichte (Fire Load Density) erfolgt nach [6]:

$$Q'' = \frac{\sum M_i H_{C_i} \chi_i}{A} \quad (2-4)$$

$Q''$	Brandlastdichte (Fire load density) in MJ/m <sup>2</sup>
$M_i$	Masse des einzelnen Stoffes in kg
$A$	Fläche in m <sup>2</sup>
$H_{C_i}$	Heizwert des einzelnen Stoffes in kWh/kg
$\chi_i$	Verbrennungseffektivität des einzelnen Stoffes

### 2.1.2 Abbrandfaktor $m$

Der Abbrandfaktor  $m$  bewertet das Abbrandverhalten eines Stoffes unter Berücksichtigung von Form, Verteilung, Lagerungsdichte und Feuchte. So zeichnen sich zwei Stoffe mit verschiedenen Heizwerten auch dann durch ein unterschiedliches Abbrandverhalten aus, wenn sie mengenmäßig derart ausgewählt sind, dass ihre dem Raum geführte Energie gleich ist [7]. Ursache dafür sind die unterschiedlichen Abbrandgeschwindigkeiten als Folge der Pyrolyse oder Verdampfung. Nach [1] ist der Abbrandfaktor  $m$  wie folgt definiert: „Dimensionsloser Beiwert, mit dem die Brandlast aus einem Stoff oder Stoffgemisch zur Berücksichtigung ihres Brandverhaltens in bestimmter Form, Verteilung, Lagerungsdichte und Feuchte bei der Rechnung nach DIN 18230-1 zu multiplizieren ist.“

Das Versuchs- und Auswerteverfahren des Abbrandfaktors  $m$  erfolgt nach DIN 18230-2 [4]. Nachdem der Weißdruck dieser Norm im Jahre 1987 fertiggestellt wurde, wurden mehr als 100 m-Faktoren bestimmt, die in der DIN 18230-3 [8] tabellarisch aufgelistet sind. Bei diesen m-Faktoren handelt es sich jedoch nicht ausschließlich um m-Faktoren für verschiedene Stoffe, sondern auch um mehrere m-Faktoren eines Stoffes bei unterschiedlicher Lageranordnung.

Seit einigen Jahren ist die Bestimmung von m-Faktoren nicht mehr möglich, da die entsprechende Versuchseinrichtung nicht mehr existiert. Dieser Brandraum, der sogenannte m-Faktor-Ofen, hatte ein Innenmaße von 2 m x 2 m x 2 m ( $\cong 8 \text{ m}^3$ ). Die Abbildung 1 zeigt den m-Faktor-Ofen in der Vorderansicht.

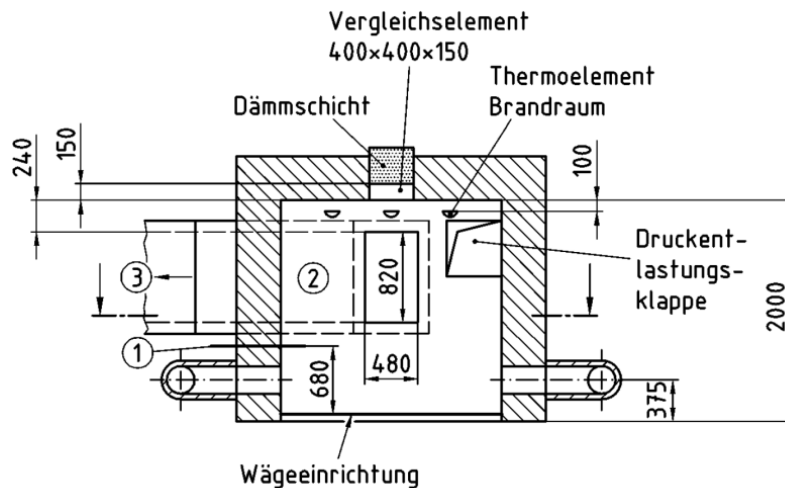


Abbildung 1: Darstellung der Versuchseinrichtung (m-Faktor-Ofen) in der Vorderansicht [4]

Während des Abbrandes des zu untersuchenden Stoffes, wurde der Temperaturanstieg in dem Vergleichsbau teil (Vergleichselementtemperaturerhöhung [4]) an der Decke gemessen sowie die Zeit bis zum Erreichen des Maximalwertes der Temperatur. Das Vergleichsbau teil bestand aus V2A-Stahl, hatte eine Abmessung von 0,4 m x 0,4 m x 0,15 m und schloss bündig mit der Ofendecke ab. Der zur experimentellen Ermittlung des Abbrandfaktors m relevante Temperatursensor befand sich in einer Höhe von 0,05 m oberhalb der Unterseite des Vergleichsbau teils. Zusätzlich zur Vergleichselementtemperaturerhöhung wurde der Massenverlust der Probe über der Zeit mittels einer Wägeeinrichtung aufgezeichnet. Die Luftsauerstoffzufuhr mit einem Luftvolumenstrom von 500 m<sup>3</sup>/h wurde über eine Zuluftöffnung im unteren Bereich des Ofens gewährleistet. Über eine Abluftöffnung konnte ein natürlicher Rauchabzug erfolgen. Gemessen wurden neben dem Temperaturanstieg im Vergleichsbau teil der Kohlenstoffdioxid-, Kohlenstoffmonoxid- und Sauerstoffanteil im Rauchgas. Mittels Drucksensoren und einer Anstellklappe konnte der Abluftvolumenstrom derart geregelt werden, dass durch einen kontinuierlichen Überdruck keine Fremdluft in den Brandraum gelangen konnte.

Die Berechnung des dimensionslosen Abbrandfaktors  $m$  erfolgt entsprechend der DIN 18230-2 [4] nach:

$$m_i = \frac{M_V}{M_i} \cdot \frac{H_{C_V}}{H_{C_i}} \cdot k_t \quad (2-5)$$

- $m_i$  m-Faktor des einzelnen Stoffes
- $M_V$  Brandmenge der Vergleichsbrandlast in kg
- $M_i$  Brandmenge des zu bewertenden Stoffes in kg
- $H_{C_V}$  Heizwert der Vergleichsbrandlast in kWh/kg
- $H_{C_i}$  Heizwert des zu bewertenden Stoffes in kWh/kg
- $k_t$  Zeitfaktor,  $k_t$ -Wert

Der Abbrandfaktor  $m$  ist der Quotient der Wärmepotenziale aus Vergleichs- und Versuchsbrandlast, die in dem Vergleichsbauteil zu der gleichen Vergleichselementtemperaturerhöhung führen. Der Vergleichsstoff ist sägeraues Fichtenholz (Rohdichte:  $450 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ ) mit einem  $m$ -Faktor von  $m = 1,0$ . Somit haben Werte des  $m$ -Faktors von  $m > 1,0$  eine höhere Brandeinwirkung auf Bauteile als der Vergleichsstoff nach DIN 18230-2. Die Masse  $M_i$  der Versuchsbrandlast entspricht derjenigen, die für den Versuch in den Brandraum eingebracht wurde. Der Heizwert der Vergleichsbrandlast  $H_{C_V}$  sowie der Heizwert der Versuchsbrandlast  $H_{C_i}$  sind entweder der Fachliteratur [3], [9], [8] zu entnehmen oder mittels Bombenkalorimeter nach DIN EN ISO 1716 [10] zu bestimmen. Die Masse der Vergleichsbrandlast  $M_V$  wird unter Anwendung nachfolgender Kalibrierkurven bestimmt (Abbildung 2).

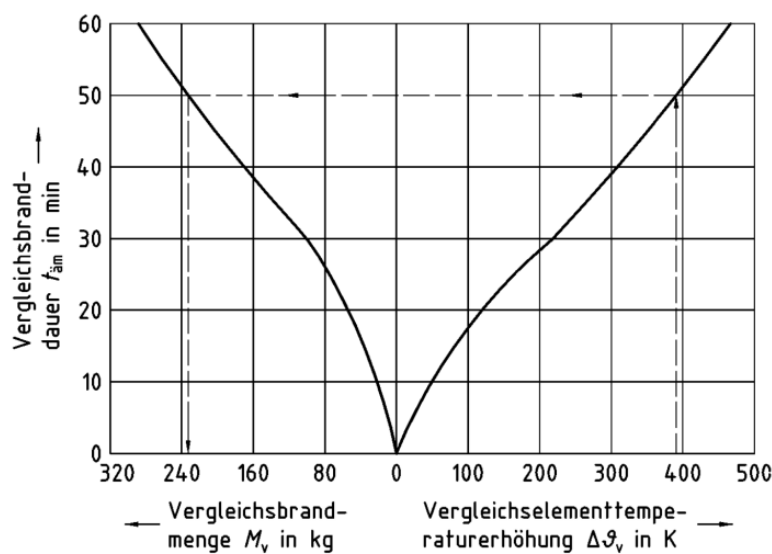


Abbildung 2: Ermittlung der Vergleichsbrandmenge  $M_V$  aus der Vergleichselementtemperaturerhöhung [4]

Die Kurve auf der rechten Seite zeigt die Vergleichsbranddauer  $t_{\dot{a}m}$  in Abhängigkeit der Vergleichselementtemperaturerhöhung  $\Delta\vartheta_V$  bei Kalibrierung des Vergleichsbauteils mittels Ölbrenner nach der Einheits-Temperatur-Zeitkurve (ETK) [11], [12]. Die Kurve auf der linken Seite zeigt die Vergleichsbranddauer  $t_{\dot{a}m}$  in Abhängigkeit von der Vergleichsbrandmenge  $M_V$  bei der Kalibrierung der Versuchseinrichtung mit dem Vergleichsstoff (Fichtenholz). Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch, dass eine Vergleichselementtemperaturerhöhung von  $\Delta\vartheta_V = 390 \text{ K}$  für einen Versuchsstoff  $i$ , mit der Masse  $M_i$  einer Vergleichsbrandmenge von  $M_V = 230 \text{ kg}$  entspricht.

Der in der Gleichung (2-5) enthaltene  $k_t$ -Wert berücksichtigt den zeitlichen Verlauf bis zum Erreichen der maximalen Temperatur im Bauteil und berechnet sich entsprechend [4] nach:

$$k_t = \exp\left[-0,4\left(\frac{t}{t_V} - 1\right)\right] \quad (2-6)$$

$t$  Branddauer in Minuten, bis zum Erreichen des Temperaturmaximums bei dem Abbrand der Vergleichsbrandmenge  $M_V$

$t_V$  Branddauer in Minuten, bis zum Erreichen des Temperaturmaximums bei dem Abbrand der Brandmenge  $M_i$

Bewirkt der zu untersuchende Stoff ein Temperaturmaximum im Vergleichsbauteil nach einer kürzeren Zeit als der Vergleichsstoff, ergibt sich für den zu untersuchenden Stoff ein höherer  $k_t$ -Wert. Entsprechend der Gleichung (2-5) hat dies einen höheren m-Faktor zur Folge. Aus den ermittelten Werten für Heizwert und Masse und dem  $k_t$ -Wert aus Gleichung (2-6) lässt sich der m-Faktor nach Gleichung (2-5) berechnen.



### 2.1.3 Bisherige Erkenntnisse der Forschung

Mit der Einführung des Abbrandfaktors  $m$  in die Normenreihe DIN 18230 wurde in verschiedenen wissenschaftlichen Berichten [13], [14], [15], [16], [17] das Versuchs- und Auswerteverfahren des  $m$ -Faktors kritisiert. Beanstandet wurde u.a. die Zwangsbelüftung des  $m$ -Faktor-Ofens, die während des Versuches eine konstante Zulufrate von  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  lieferte. Diese Zulufrate stellte für bestimmte Stoffe oder Stoffmengen eine zu geringe Luftsauerstoffzufuhr dar, sodass der Abbrand für diese Stoffe oder Stoffmengen stark unterstöchiometrisch verlief.

Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt den Einfluss der Zulufrate auf das Abbrandverhalten von Fichtenholz. Das Abbrandverhalten hat eine thermische Brandwirkung auf ein Bauteil zur Folge und wird durch die äquivalente Branddauer  $t_a$  gekennzeichnet.

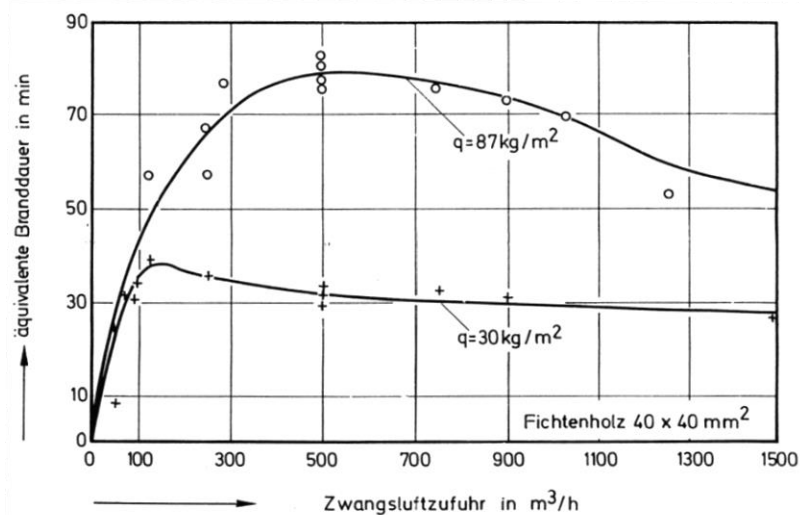


Abbildung 3: Äquivalente Branddauer in Abhängigkeit von der Zulufrate (Zwangsluftzufuhr) [13]

Die Abbildung 3 zeigt die äquivalente Branddauer von Fichtenholz bei den Brandlastmengen  $30 \text{ kg/m}^2$  und  $87 \text{ kg/m}^2$ . Grundsätzlich ist anhand beider Kurven erkennbar, dass die Zulufrate (Zwangsluftzufuhr) eine Auswirkung auf die äquivalente Branddauer hat. Darüber hinaus zeigt die Darstellung, dass die äquivalente Branddauer stark von der Brandlastmenge abhängt. Der Verlauf beider Kurven ist bis zu einer Zulufrate von ca.  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  nahezu identisch und weist ab einem Wert von  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  starke Unterschiede auf. Der Grund hierfür liegt zunächst in dem für die jeweilige Brandlastmenge unterschiedlichen Sauerstoffbedarf. Eine Zulufrate von  $110 \text{ m}^3/\text{h}$  stellt bei der Brandlastmenge von  $30 \text{ kg/m}^2$  einen ausreichend Luftsauerstoff bereit, um die maximale äquivalente Branddauer zu erreichen. Allerdings führt für eine Brandlastmenge von  $87 \text{ kg/m}^2$  erst eine Zulufrate von  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  zu einer maximalen äquivalenten Branddauer.

In Ergänzung zur Abbildung 3 zeigt die Abbildung 4 den Einfluss der Zulufrate (Ventilation) auf die äquivalente Branddauer bei Polyethylen (PE)-Granulat in Säcken bei einer Brandmenge von  $159 \text{ kg/m}^2$ .

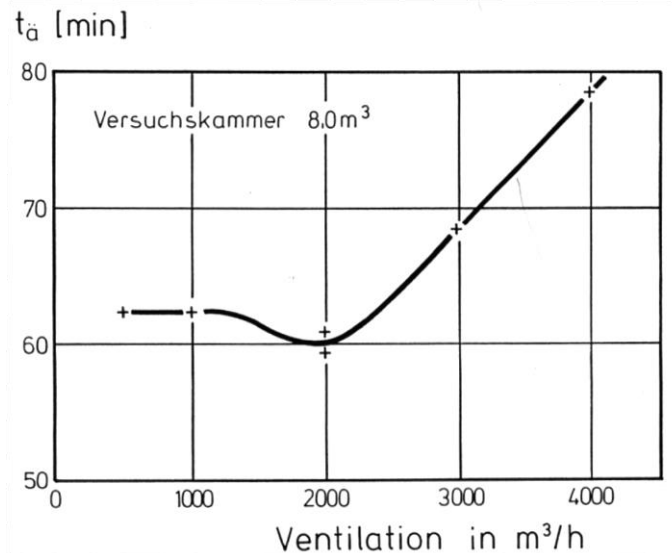


Abbildung 4: Einfluss der Ventilation auf den Abbrand von Polyethylen (PE)-Granulat in Säcken ( $159 \text{ kg}$ ) [13]

Die in Abbildung 4 dargestellte äquivalente Branddauer des PE-Granulats in Säcken, bleibt zunächst mit zunehmender Zulufrate konstant, bis diese bei ca.  $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$  leicht absinkt um kurz danach stark anzusteigen. Dieser Anstieg bleibt selbst bei einer Zulufrate von mehr als  $4.000 \text{ m}^3/\text{h}$  bestehen. Der Grund für dieses Verhalten liegt in dem gegenüber dem Holzkrippenabbrand des Fichtenholzes völlig unterschiedlichen Abbrandverhalten. So entspricht der Charakter des Abbrandes von Polyethylen (PE)-Granulat, nachdem es geschmolzen ist, einem Poolbrand mit starker Wärmefreisetzung [14]. Die auf  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  beschränkte Zulufrate des  $8 \text{ m}^3$ -Ofens liefert zu wenig Luftsauerstoff und führt somit zu einer geringen äquivalenten Branddauer von ca.  $t_{\text{ä}} = 63 \text{ min}$ . Demnach wird das von dem PE-Granulat in Säcken ausgehende Risiko mit einem zu kleinen m-Faktor bewertet. Für die Brandlastberechnung führt dies zu einer Fehleinschätzung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer.

Neben der kritisierten Zulufrate von  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  wird auch das Brandraumvolumen des m-Faktor-Ofens von  $8 \text{ m}^3$  als zu gering eingeschätzt. So bietet dieses Volumen nicht ausreichend Raum, um alle Stoffe entsprechend ihrer Lagerungsanordnung zu prüfen. Zudem können Lagerstrukturen, wie sie im Hochregallager der Fall sind, nicht getestet werden, da das Übereinanderstapeln von z.B. zwei Fichtenholzkrippen unmöglich ist. Dieses wäre jedoch für die Brandlastberechnung von großer Bedeutung, da eine Erhöhung der Stapelhöhe zum einen zu einer Vorwärmung der obenliegenden Lagerstoffe führt und somit deren Abbrand begünstigt. Zum anderen bedeutet eine Stapelanord-

nung eine Verbesserung der Luftzufuhr zum Brandherd. Die in der DIN 18230-2 angegebene Extrapolation ermöglicht das Bestimmen von m-Faktoren bei Lagerhöhen bis 9 m [4]. Für diese extrapolierten Werte liegen jedoch keine experimentellen Untersuchungen vor [15].

Zur Untersuchung des Einflusses des Brandraumvolumens und der Zulufrate auf den m-Faktor wurden in den 90er Jahren verschiedene Brandversuche in größeren Brandräumen als dem 8 m<sup>3</sup>-Ofen (m-Faktor-Ofen) durchgeführt. Es sollte ermittelt werden, ob die bestehenden m-Faktoren bei Übertragung auf größere Räume eine ausreichende Sicherheit gewährleisten [16].

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen“ [17] wurden ab 1990 an der Dortmunder Materialprüfanstalt Nordrhein-Westfalen Brandversuche in einem 62 m<sup>3</sup>-Brandraum durchgeführt. Wie auch der m-Faktor-Ofen, besaß dieser Versuchsstand ein Vergleichsbauteil (0,4 m x 0,4 m x 0,15 m) aus V2A-Stahl, in dem der Temperatur-Zeit-Verlauf während des Versuches aufgezeichnet wurde. Anders als beim dem 8 m<sup>3</sup>-Ofen verfügte dieser Versuchsstand über eine deutlich höhere Zwangsbelüftung von 6.000 m<sup>3</sup>/h. Nach Durchführung der Kalibrierversuche mit einem Ölbrenner entsprechend der Einheits-Temperatur-Zeitkurve [11], [12] wurden m-Faktoren entsprechend den Vorgaben der DIN 18230-2 von ausgewählten Stoffen bestimmt, die jedoch keine Übereinstimmung zu den im 8 m<sup>3</sup>-Ofen ermittelten Werten ergaben. Dies soll entsprechend den Ergebnissen des Abschlussberichtes in der zu geringen Zulufrate sowie dem zu kleinen Raumvolumen des 8 m<sup>3</sup>-Ofens liegen [17].

Nach Abschluss der Untersuchungen des Abbrandverhaltens von Stoffen in dem 62 m<sup>3</sup>-Brandraum gab es Zweifel, ob die Zulufrate von 6.000 m<sup>3</sup>/h geeignet sei. Es wurde vermutet, dass bei einer solch großen Zulufrate ein Teil der Wärmeenergie aus dem Brandraum ausgetragen würde, bevor die Temperatursensoren diesen Wärmeenergieanteil erfasst haben [18]. Die Abbildung 5 veranschaulicht den Zusammenhang.

Die Abbildung 5 zeigt die Kalibrierkurven für die zwei beschriebenen Brandräume, wobei die Kalibrierkurven des 8 m<sup>3</sup>-Ofens denen der DIN 18230-2 entsprechen (siehe Abbildung 2). Die Vergleichsbranddauer ist definiert als die Zeit in Minuten, die bei einer Prüfung erforderlich ist, um in dem Vergleichselement die gleiche Temperaturerhöhung gegenüber dem Ausgangszustand zu erzeugen, die bei dem Abbrand einer definierten Vergleichsbrandmenge maximal auftritt [4]. Diese Kalibrierkurven dienen dazu, unter Verwendung der experimentell bestimmten Vergleichselementtemperaturerhöhung die Brandlastmenge an Fichtenholz (Vergleichsbrandmenge  $Q_V$  bzw.  $M_V$ ) zu ermitteln, die in ihrer Brandwirkung auf andere Bauteile der Brandlastmenge des zu untersuchenden Stoffes äquivalent ist (vgl. siehe Abbildung 2). Die so ermittelte Vergleichsbrandmenge wird in die Gleichung für den m-Faktor (siehe Gleichung (2-5)) eingesetzt.

Der Vergleich der Kalibrierkurven des 8 m<sup>3</sup>-Ofens mit denen des 62 m<sup>3</sup>-Brandraumes zeigt, dass die Vergleichselementtemperaturerhöhung  $\Delta\vartheta_V = 390\text{ K}$  im 8 m<sup>2</sup>-Ofen zu einer Vergleichsbrandmenge von  $Q_V = 230\text{ kg}$  und im 62 m<sup>3</sup>-Brandraum zu einer Vergleichsbrandmenge von  $Q_V = 540\text{ kg}$  führt. Im 62 m<sup>3</sup>-Brandraum wird folglich mehr als die doppelte Menge an Fichtenholz benötigt, um in dem Vergleichsbauteil die gleiche Temperaturerhöhung zu erzeugen. Der Grund dafür ist das Austragen von Verbrennungsgasen bevor ein Energieübertrag auf das Vergleichsbauteil erfolgen konnte.

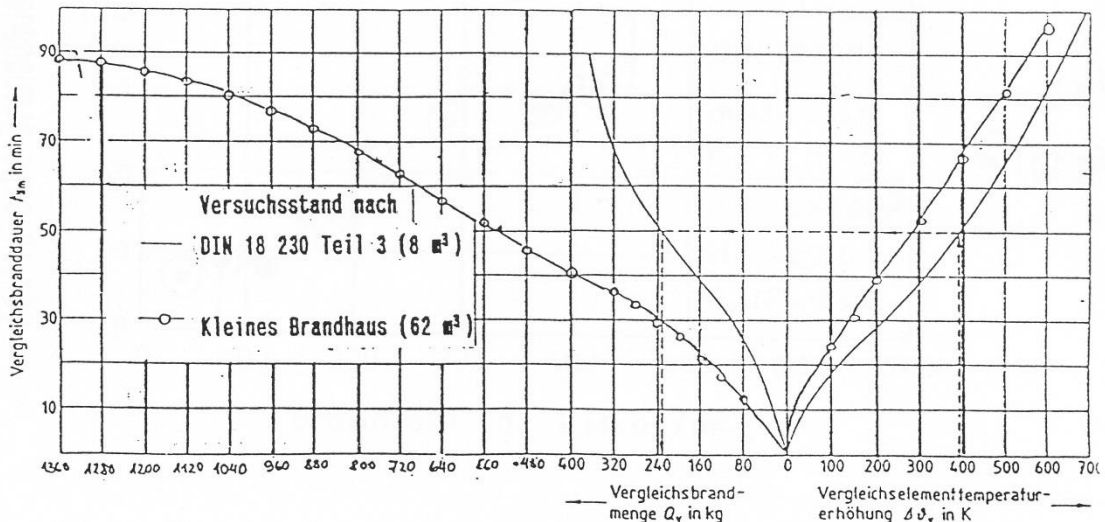


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Kalibrierkurven des m-Faktor-Ofens und des 62 m<sup>3</sup>-Brandraums [19]

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde zur Überprüfung der Übertragbarkeit von m-Faktoren auf größere Brandräume ein weiteres Forschungsprojekt durchgeführt [20]. Hierfür diente das Tresorbrandhaus am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz iBMB in Braunschweig, das ein Brandraumvolumen von 40 m<sup>3</sup> aufweist. Auch hier wurde unter anderem der Temperaturverlauf der Brandversuche über ein Vergleichsbauteil (0,4 m x 0,4 m x 0,15 m) aus V2A-Stahl aufgezeichnet. Im Gegensatz zu den beiden anderen Öfen verfügte der 40 m<sup>3</sup>-Brandraum über eine passive Belüftung (keine Zwangsbelüftung), die zudem durch ihre vertikale Zuluftöffnung und der horizontalen Abluftöffnung realitätsnahe Zustände beim Brand einstellte. So konnte die Zuluftrate entsprechend dem bei einem Brand benötigten Sauerstoffbedarf variieren. Außerdem war die Ausbildung einer Heißgasschicht an der Decke möglich, sodass eine Verfälschung der Temperaturmessung im Vergleichsbauteil durch direkte Beflammung ausgeschlossen werden konnte. Die natürliche Ventilation bewirkt, dass stets die „realitätsnahe“ Vergleichsbranddauer  $t_{\text{äm}}$  für Holz bestimmt werden konnte, was bei einer Zwangsventilation nur durch Zufall gelingen kann. Mittels der Kalibrierung mit Ölbrennern entsprechend der ETK und mit Fichtenholzkrippen konnten die Kalibrierkurven für den 40 m<sup>3</sup>-Brandraum bestimmt werden. [20]

Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt die Kalibrierkurven des 8 m<sup>3</sup>-Ofens sowie des 62 m<sup>3</sup>- und des 40 m<sup>3</sup>-Brandraumes:

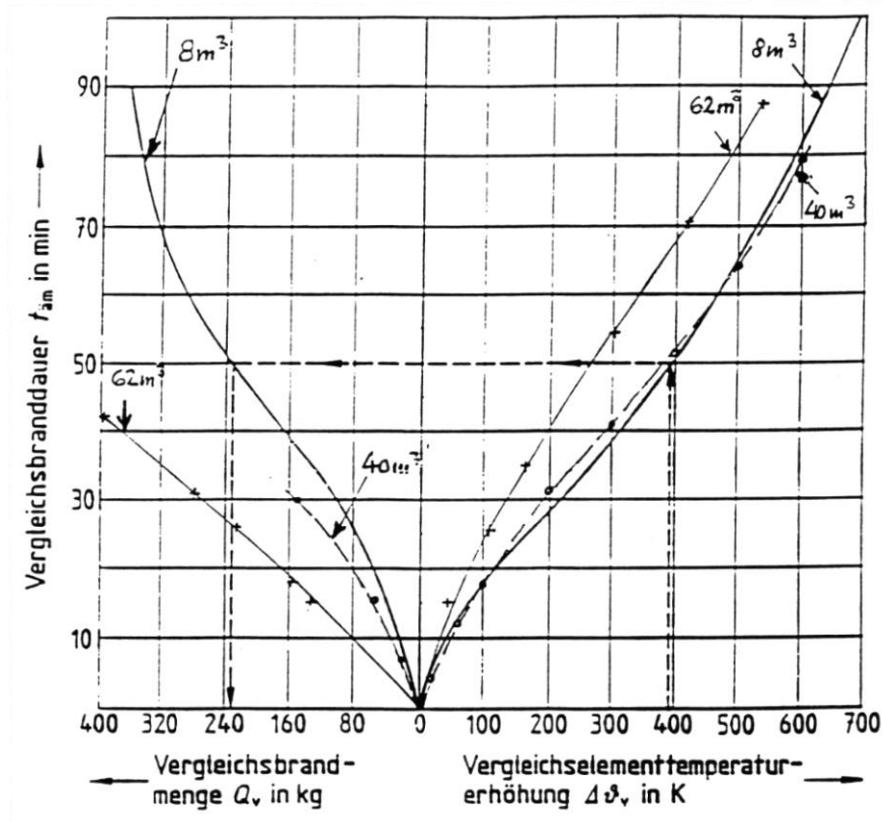


Abbildung 6: Kalibrierkurven für unterschiedliche Brandräume [19]

Der Vergleich der Kalibrierkurven der drei Brandräume macht deutlich, dass die Kalibrierkurven des 40 m<sup>3</sup>-Brandraumes tendenziell mit denen des 8 m<sup>3</sup>-Ofens übereinstimmen. Entsprechend dem Bericht zum Forschungsprojekt [20] ließ sich zudem hinsichtlich der Bestimmung der m-Faktoren von ausgewählten Stoffen eine ähnliche Tendenz zwischen dem 40 m<sup>3</sup>-Brandraum und dem 8 m<sup>3</sup>-Ofen feststellen.

Keine Übereinstimmung zwischen den drei Brandräumen fand jedoch hinsichtlich des  $k_t$ -Wertes statt. Dieser Wert berechnet sich entsprechend der Gleichung (2-6) und fließt mit in die Berechnung des m-Faktors ein. Er berücksichtigt den zeitlichen Verlauf bis zum Erreichen der maximalen Vergleichselementtemperatur. Da der Einfluss des  $k_t$ -Wertes in dem m-Faktor sehr groß ist und insbesondere der in der Gleichung enthaltene Faktor 0,4 den Anschein gibt, willkürlich ausgewählt worden zu sein und keinen physikalischen Ursprung aufweist, spricht nach Aussage in [20] vieles dafür, auf eine derartige „Korrektur“ zu verzichten.

Von den Autoren wird auf folgenden mathematischen Zusammenhang bei der Ermittlung der rechnerischen Brandbelastung mittels der m-Faktor-Gleichung hingewiesen. Wird Gleichung (2-5) in Gleichung (2-1) eingesetzt,

$$q_R = \frac{M_i \cdot H_{C_i} \cdot M_V \cdot H_{C_V} \cdot k_t}{A_B \cdot M_i \cdot H_{C_i}} \quad (2-7)$$

ergibt sich für die rechnerische Brandbelastung

$$q_R = \frac{M_V \cdot H_{C_V} \cdot k_t}{A_B} \quad (2-8)$$

Nach Gleichung (2-8) ist die rechnerische Brandbelastung eines Versuchsstoffes  $i$  in einem Brandraum damit nur noch von der Masse des Vergleichsstoffes, dem Heizwert des Vergleichsstoffes (Fichtenholz) sowie dem  $k_t$ -Wert des Versuchsstoffes abhängig.

#### 2.1.4 Verbrennungseffektivität

Wie viel Energie bei dem Abbrand eines Stoffes tatsächlich umgesetzt wird, hängt von vielen Faktoren ab, wobei die Ventilationsbedingungen den wohl entscheidendsten Faktor darstellen. Je mehr Luftsauerstoff den Brandherd erreicht, desto vollständiger findet die Verbrennung statt, wobei die Umsetzung der gesamten Energie in Wärme bei einem natürlichen Brand unter Luftsauerstoff ausgeschlossen werden kann. Ein Maß für die Vollständigkeit einer Verbrennung stellt die Verbrennungseffektivität  $\chi$  dar. Sie unterliegt einer starken Abhängigkeit von den chemischen Bindungen der Atome in dem Brennstoff, den Ventilationsbedingungen in dem Brandraum, dem Mischungsverhältnis zwischen den Brennstoffgasen und der Luft sowie den in der Umgebung und im Rauchgas bestehenden Temperaturen, die mit unter den auf die Brennstoffoberfläche treffenden Wärmestrom definieren. Damit stellt die Verbrennungseffektivität keinen reinen Stoffkennwert dar [21].

Die Verbrennungseffektivität eines Stoffes ist der Quotienten aus effektiver Verbrennungswärme  $H_{eff}$  und Heizwert  $H_c$  und berechnet sich nach

$$\chi_i = \frac{H_{eff_i}}{H_{C_i}} \quad (2-9)$$

$\chi_i$	Verbrennungseffektivität des Versuchsstoffes
$H_{eff_i}$	effektive Verbrennungswärme des Versuchsstoffes in kJ/kg
$H_{C_i}$	Heizwert des Versuchsstoffes in kWh/kg

Würde bei dem Abbrand eines Versuchsstoffes die gesamte in dem Probenkörper enthaltene Energie in Wärme umgesetzt werden, entspräche die effektive Verbrennungswärme dem Heizwert, sodass sich für die Verbrennungseffektivität entsprechend der Gleichung (2-9) ein Wert von  $\chi = 1,0$  ergeben würde. Bei dem natürlichen Abbrand eines Stoffes erfolgt jedoch aufgrund verschiedener Faktoren, wie z.B. Sauerstoffmangel, eine unvollständige Verbrennung, sodass sich für die Verbrennungseffektivität ein Wert von  $\chi < 1,0$  ergibt.

Der Heizwert (Brutto-Verbrennungswärme) berechnet sich aus dem Brennwert (Netto-Verbrennungswärme), der experimentell im Bombenkalorimeter bestimmt werden kann [22], [10]. Dabei wird die Probe unter nahezu reinem Sauerstoff verbrannt, welches die Umsetzung der gesamten Energie in Wärme zur Folge hat. Der Brennwert ist gegenüber dem Heizwert um die Kondensationswärme des im Stoff enthaltenden Wassers höher. Hierbei handelt es sich um Wasser, das sich zum einen aus dem Feuchtegehalt der Probe und zum anderen aus den wasserstoffhaltigen Verbindungen der Probe ergibt.

Eine quantifizierte Bestimmung des Feuchtegehaltes kann z.B. durch die coulometrische Wasserbestimmung nach Karl-Fischer erfolgen. Für die Ermittlung des Wasseranteils, der sich aus den wasserstoffhaltigen Verbindungen ergibt, muss der Stoff einer Elementaranalyse unterzogen werden, bei der die Menge an Wasserstoffatomen in der Strukturformel des Stoffes bestimmt wird. [22]

Die effektive Verbrennungswärme definiert den Quotienten aus der Wärme (Total Heat Release - *THR*), die von einem brennenden Probenkörper in einer vorgegebenen Zeitspanne freigesetzt wird und dem Massenverlust (Mass Loss - *ML*) des Probekörpers in derselben Zeitspanne [23].

$$H_{eff} = \frac{THR}{ML} \quad (2-10)$$

*H<sub>eff</sub>* effektive Verbrennungswärme in kJ/kg

*THR* Total Heat Release in kJ

*ML* Massenverlust in kg

Alternativ kann die effektive Verbrennungswärme auch über den Quotienten aus Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate - *HRR*) und der Massenverlustrate (Mass Loss Rate - *MLR*) beschrieben werden.

$$H_{eff} = \frac{HRR}{MLR} \quad (2-11)$$

*HRR* Wärmefreisetzungsrate in kW

*MLR* Massenverlustrate in kg/s

Die zur Berechnung der effektiven Verbrennungswärme benötigte Wärmefreisetzungsrates eines Stoffes, wird in offenen Kalorimetern wie dem Cone Calorimeter (ISO 5660-1, [24]), dem Single Burning Item Test (DIN EN 13823, [25]) oder dem Room Corner Test (ISO 9705, [26]) bestimmt.

Die Wärmefreisetzungsrates  $HRR$  eines Stoffes beschreibt die Geschwindigkeit, mit der eine bestimmte Wärmemenge bei der Verbrennung freigesetzt wird [6]. Analog zur Wärmefreisetzungsrates beschreibt die Massenverlustrate  $MLR$  die Geschwindigkeit, mit der ein Stoff bei seinem Abbrand seine Masse verliert.

### 2.1.5 Prüfapparaturen

Grundlage der Untersuchungen zum Abbrandfaktor  $m$  und der Verbrennungseffektivität ist die experimentelle Ermittlung der Wärmefreisetzungsrates. Aus der Wärmefreisetzungsrates lässt sich die effektive Verbrennungswärme bestimmen. Dies ist erforderlich, um aus der effektiven Verbrennungswärme und dem zugehörigen Heizwert des Stoffes die Verbrennungseffektivität zu berechnen (vgl. 2.1.4).

Die experimentelle Ermittlung der Wärmefreisetzungsrates erfolgte für ausgewählte Stoffe an offenen Kalorimetern: Cone Calorimeter und Single Burning Item Test (SBI). Beide Prüfapparaturen bestimmen die Wärmefreisetzungsrates mittels der Sauerstoffverbrauchsmethode:

$$\dot{q} = E \cdot 1,10 \cdot C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e} \left[ \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1,105 - 1,5X_{O_2}} \right]} \quad (2-12)$$

$\dot{q}$	Wärmefreisetzungsrates in kW
$E$	Mittlere sauerstoffmassenbezogene Verbrennungswärme $E = 13,10 \text{ kJ/gO}_2$
1,10	Molmassenverhältnis
$C$	Blendenkonstante
$\Delta p$	Wirkdruckdifferenz des Abluftstroms über einer Messblende
$T_e$	Ablufttemperatur
$X_{O_2}^0$	Gemessener Molanteil Sauerstoff zur Zuluft; Referenzwert
$X_{O_2}$	Gemessener Molanteil Sauerstoff der (Verbrennungs-)Abluft
1,105	Stöch. Koeffizient (Dehnungsfaktor $\alpha$ )
1,5	Stöch. Koeffizient (Zunahmefaktor $\beta$ )

Nach Gleichung (2-12) wurde in Abhängigkeit der möglichen Funktionen der Prüfapparaturen zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates neben den Molanteilen des Sauerstoffes auch die des Kohlenstoffdioxids, des Kohlenstoffmonoxids sowie des Rußes berücksichtigt.



### 2.1.5.1 Cone Calorimeter

Das Cone Calorimeter [24] ermöglicht die experimentelle Untersuchung des Brandverhaltens von Versuchsstoffen mit kleinen Probenabmessungen (Small-Scale): Oberfläche 0,1 m x 0,1 m und Höhe 0,05 m. Die Prüfapparatur setzt sich aus den Komponenten: konisches Heizelement, Waage und Rauchabzugssystem zusammen. Das konische Heizelement besteht aus einer konisch gewickelten Anordnung einer elektrischen Widerstands-Heizleitung. Bei Stromfluss erhitzt sich die Heizleitung und bestrahlt die darunterliegende Probe. Infolge der Wärmeübertragung durch Strahlung kann dabei eine Wärmestromdichte an der Probenoberfläche von 0 kW/m<sup>2</sup> bis 100 kW/m<sup>2</sup> erreicht werden. Die Wärmefreisetzungsrate des Versuchsstoffes ergibt sich entsprechend Gleichung (2-12) aus dem verbrauchten Sauerstoff. Ein elektrischer Zündfunke unterstützt die Entzündung der infolge des Energieeintrages auf der Probenoberfläche freigesetzten Pyrolysegase. Über eine Abbrandwaage wurde die Masse über die Zeit gemessen und die Massenverlustrate bestimmt. Das oberhalb des konischen Heizelements angeordnete Rauchabzugssystem beinhaltet eine Abzugshaube, ein Abzugsrohr, einen Ventilator sowie eine Drosselblende. Im Rauchabzugssystem werden die Brandgase einer Probenentnahmestelle zugeführt, über die mittels einer Gasanalyseeinheit die Volumenanteile von CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> im Abgas gemessen werden. Gemessen werden auch die optische Dichte sowie die Temperatur des Rauchgases im Abzugssystem [24]. Die Abbildung 7 zeigt das Cone Calorimeter der BAM.



Abbildung 7: Cone Calorimeter der BAM (bestehend aus konischem Heizelement, Abbrandwaage, Rauchabzugssystem und Analyseeinheit)

### 2.1.5.2 Single Burning Item Test

Der Single Burning Item Test (SBI) [25] ist eine Prüfapparatur zum Testen des Brandverhaltens von Baustoffen. Anders als beim Cone Calorimeter werden hier deutlich größere Probenabmessungen (Mid-Scale) geprüft. Die Baustoffe bzw. Versuchsstoffe sind der Flamme eines Propan-Sandbettbrenners mit Brandleistungen von 16 kW, 33 kW, 51 kW, 75 kW, 101 kW oder 133 kW ausgesetzt, die der thermischen Beanspruchung eines einzelnen brennenden Gegenstandes (Single Burning Items) entspricht. Weil die Flamme des Sandbettbrenners selbst Sauerstoff verbraucht, muss dies bei der Berechnung der Wärmefreisetzungsrate mit berücksichtigt werden. Der SBI besteht aus einem Prüfraum, in dem sich neben einem Probenträgerwagen ein Neben- und ein Hauptbrenner befinden. In der Decke des Prüfraumes ist die Abzugshaube angeordnet, an der das Rauchabzugssystem anschließt. In ihm befinden sich die Gasprobenentnahmestelle sowie Thermoelemente zur Temperaturmessung und eine Messstrecke zur optischen Rauchgasdichtemessung. Darüber hinaus verfügt der SBI über eine Gasanalytikeinheit mit einem paramagnetischem Sauerstoff-Analysator sowie einem Infrarot-Kohlendioxid-Analysator. Die Abbildung 8 zeigt den Versuchsraum des SBI.



Abbildung 8: Single Burning Item Test (SBI) der BAM

Die Abbildung 8 zeigt die Flamme des Nebenbrenners sowie die an einem Stativ angebrachte Probe und die darunter befindliche Waage. Der Sandbettbrenner befindet sich in der Raumecke unter der Probe. Bei dem dargestellten Versuchsaufbau handelt es um ein modifiziertes Prüfverfahren nach DIN EN 13823 [25].

### 2.1.5.3 Bombenkalorimeter

Die Bestimmung des Brennwertes (Netto-Verbrennungswärme) eines Stoffes erfolgte entsprechend DIN EN ISO 1716 [10] und DIN 51900 [22] unter Anwendung des Bombenkalorimeters. Aus dem Brennwert lässt sich unter Berücksichtigung des Wassergehaltes der Probe der Heizwert (Brutto-Verbrennungswärme) berechnen. Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte coulometrisch nach der Karl-Fischer-Titration.

## 2.2 Ermittlung eines theoretischen Zusammenhanges zwischen Abbrandfaktor $m$ und Verbrennungseffektivität (AP 2)

Für vergleichende Betrachtungen zwischen dem Abbrandfaktor  $m$  und der Verbrennungseffektivität  $\chi$  werden im Folgenden die theoretischen Grundlagen der beiden brandschutztechnischen Kenngrößen näher erläutert.

### 2.2.1 Abbrandfaktor $m$

Brände bei Realbeanspruchung und unter Normbeanspruchung haben für gewöhnlich unterschiedliche Brandwirkungen auf Bauteile zur Folge. Sie lassen sich jedoch innerhalb eines Brandraumes näherungsweise mit der Methode der äquivalenten Branddauer  $t_{\text{ä}}$  vergleichen.

Die äquivalente Branddauer entspricht der Zeit in Minuten, bei der im Normbrand (Einheits-Temperatur-Zeitkurve nach DIN 4102-2) näherungsweise die gleiche Brandwirkung im Bauteil durch die Brandraumtemperatur (ETK) wie durch die im natürlichen Schadenfeuer auftretenden Temperaturen erreicht wird [3], [27]. Hierdurch wird ein direkter Bezug zwischen dem realen Schadenfeuer und der Bauteilprüfung nach DIN 4102-2 hergestellt. Nachfolgende Abbildung zeigt den Zusammenhang.

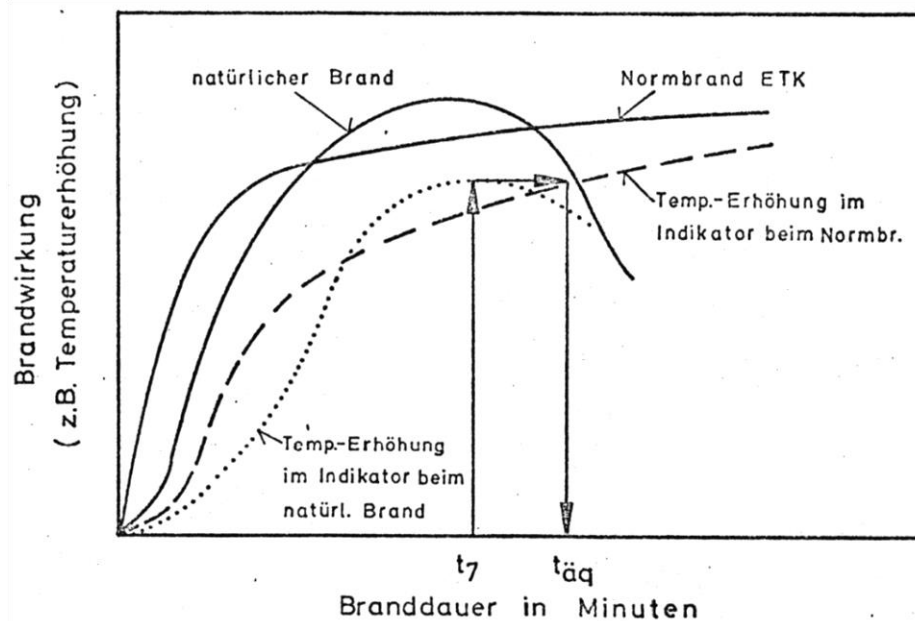


Abbildung 9: Umrechnung der Brandwirkung eines Naturbrandes auf die Brandwirkung nach DIN 4102-2 nach [19], [27]

Die oberen beiden Kurven zeigen den Temperaturanstieg bei einem natürlichen Brand und bei einem Normbrand entsprechend der Einheits-Temperatur-Zeitkurve nach DIN 4102-2 [28]], während die beiden unteren Kurven die Temperaturanstiege darstellen, die sich infolge des natürlichen Brandes und des Brandes nach ETK in einem Bauteil (Indikator) einstellen. Die äquivalente Branddauer ist als derjenige Zeitraum definiert, in dem sich bei einem Normbrand nach DIN 4102-2 die gleiche thermische Brandwirkung am Bauteil einstellt wie bei einem natürlichen Brand (vgl. Abbildung 9 Darstellung anhand der Pfeile) [1].

Die Berechnung der äquivalenten Branddauer erfolgt nach DIN 18230-1 [1]:

$$t_{\bar{a}} = q_R \cdot c \cdot w \quad (2-13)$$

$t_{\bar{a}}$  äquivalente Branddauer in min

$c$  Umrechnungsfaktor in  $\text{min} \cdot \text{m}^2 / \text{kWh}$

$w$  Wärmeabzugsfaktor zur Berücksichtigung der Ventilationsbedingungen

Wird in Gleichung (2-13) das Produkt aus Umrechnungsfaktor und Wärmeabzugsfaktor ( $c \cdot w$ ) durch  $C$  substituiert und für die rechnerische Brandbelastung  $q_R$  der Term  $\frac{M_i \cdot H_{C_i} \cdot m_i}{A_B}$  (siehe Gleichung (2-1)) eingesetzt, ergibt sich:

$$t_{\bar{a}} = \frac{M \cdot H_c \cdot m \cdot C}{A_B} \quad (2-14)$$

In [4] wird anstelle der äquivalenten Branddauer  $t_{\bar{a}}$  die Vergleichsbranddauer  $t_{\bar{a}m}$  verwendet. Die Vergleichsbranddauer  $t_{\bar{a}m}$  ist definiert als die Zeit, die bei der Prüfung erforderlich ist, um in dem Vergleichselement die gleiche Temperaturerhöhung gegenüber dem Ausgangszustand zu erzeugen, die bei dem Abbrand einer definierten Vergleichsbrandmenge maximal auftritt [4]. Die Temperaturerhöhung wird in dem Vergleichsbauteil gemessen. Unter Anwendung der Gleichung (2-14) lautet somit die Vergleichsbranddauer für die Vergleichsbrandlast und für die zu bewertende Brandlast wie folgt:

$$t_{\bar{a}m} = \frac{M_V \cdot H_{cV} \cdot m_V \cdot C}{A_B} \quad (2-15)$$

$$t_{\bar{a}m} = \frac{M_i \cdot H_{c_i} \cdot m_i \cdot C}{A_B} \quad (2-16)$$

$t_{\text{am}}$	Vergleichsbranddauer in min
$M_V$	Brandmenge des Vergleichsstoffes in kg
$M_i$	Brandmenge des zu bewertenden Stoffes in kg
$H_{cV}$	Heizwert des Vergleichsstoffes in kWh/kg
$H_{c_i}$	Heizwert des zu bewertenden Stoffes in kWh/kg
$m_V$	m-Faktor des Vergleichsstoffes
$m_i$	m-Faktor des zu bewertenden Stoffes
$C$	Substitution des Produktes aus Umrechnungsfaktor und Wärmeabzugsfaktor
$A_B$	Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes in $m^2$

Der Abbrandfaktor  $m$  beruht auf dem Äquivalenzprinzip, bei dem die thermische Brandwirkung des Vergleichsstoffes (Fichtenholz) mit dem eines beliebigen Stoffes ins Verhältnis gesetzt wird. Entsprechend des Äquivalenzprinzips zwischen Vergleichsbrandlast und der zu bewertenden Brandlast ergibt sich:

$$t_{\text{am}} = M_V \cdot H_{cV} \cdot m_V = M_i \cdot H_{c_i} \cdot m_i \quad (2-17)$$

Unter Anwendung von  $m_V = 1$  (sägerauhes Fichtenholz) ergibt sich die Gleichung für den m-Faktor entsprechend der DIN 18230-2 ohne Berücksichtigung des  $k_t$ -Wertes zu:

$$m_i = \frac{M_V \cdot H_{cV}}{M_i \cdot H_{c_i}} \quad (2-18)$$

$M_V$	Brandmenge des Vergleichsstoffes in kg
$M_i$	Brandmenge des zu bewertenden Stoffes in kg
$H_{cV}$	Heizwert des Vergleichsstoffes in kWh/kg
$H_{c_i}$	Heizwert des zu bewertenden Stoffes in kWh/kg
$m_i$	m-Faktor des zu bewertenden Stoffes

Der m-Faktor berücksichtigt die unterschiedliche thermische Brandwirkung der Vergleichsbrandlast und der zu bewertenden Brandlast auf das Vergleichsbauteil. In Bezug auf den m-Faktor von Fichtenholz mit  $m = 1,0$  erhält ein Stoff, der eine schwächere thermische Brandwirkung auf das Vergleichsbauteil hat einen kleineren m-Faktor, während ein Stoff mit intensiverer Brandwirkung einen größeren m-Faktor als das Fichtenholz erhält. Entsprechend der DIN 18230-3 sind dort m-Faktoren zwischen  $m = 0,2$  und  $m = 2,0$  zu finden.

## 2.2.2 Verbrennungseffektivität

Verglichen mit dem m-Faktor folgt die Verbrennungseffektivität einem grundsätzlich anderen Bewertungsansatz. So ist die Verbrennungseffektivität das Verhältnis aus effektiver Verbrennungswärme zu Heizwert (vgl. Gleichung (2-9)). Ein Wert der Verbrennungseffektivität von  $\chi = 1$  bedeutet eine vollständige Verbrennung, bei der die gesamte im Brennstoff gespeicherte Bindungsenergie in Wärme umgesetzt wird. Nach [29] variieren die Werte der Verbrennungseffektivität für stark flammgeschützte Materialien von  $\chi = 0,3$  bis  $\chi = 0,4$  und im Fall von sauerstoffhaltigen Stoffen (z.B. Polyoxymethylen) von  $\chi = 0,9$  bis  $\chi = 1,0$ . Entsprechend [30] lässt sich eine Zuordnung der Verbrennungseffektivität anhand der Aggregatzustände treffen. So liegt die Verbrennungseffektivität von gasförmigen Brennstoffen bei  $\chi = 1$ , von flüssigen bei  $\chi = 0,9$  und von festen Brennstoffen bei  $\chi = 0,8$ . Nach [5] werden für Mischbrandlasten mit einem überwiegenden Anteil an zellulosehaltigen Stoffen Werte von  $\chi = 0,7$  angegeben.

## 2.3 Experimentelle Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate und der Verbrennungseffektivität an verschiedenen Baustoffen und n-Heptan (AP 3)

Zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate wurden für verschiedene Stoffe (s. Tabelle 1) experimentellen Untersuchungen am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test (SBI) durchgeführt. Anhand der Wärmefreisetzungsrate wurden die Verbrennungseffektivität sowie weitere Kenngrößen (effektive Verbrennungswärme, Total Heat Release und FIGRA) bestimmt, um einen möglichen Zusammenhang zwischen dem Abbrandfaktor m und der Verbrennungseffektivität ermitteln zu können.

Tabelle 1: Die untersuchten Stoffe und ihre Stoffkennwerte sowie der Abbrandfaktor m nach DIN 18230-3

Stoff	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Heizwert (selbst ermittelt) [kWh/kg]	Heizwert (nach DIN 18230-3) [kWh/kg]	m-Faktor (nach DIN 18230-3) [-]
Fichtenholz	451	4,6	4,8	1
Mitteldichte Holzfaserverplatte (MDF)	810	4,4	-	-
Spanplatte	698	4,7	4,8	0,2
Polyurethan Hartschaum (PUR-B1)	31	7,1	6,7	0,2
Polyurethan Hartschaum (PUR-B2)	33	7,5	6,7	0,3
Polyurethan Hartschaum (PUR-B3)	33	7,6	-	-
Polystyrol (PS-B1)	14	11,0	11,0	0,4
n-Heptan	67	12,5	-	-

### 2.3.1 Grundlagen der experimentellen Untersuchung

Die Auswahl der im Forschungsvorhaben definierten Stoffe (Fichtenholz, MDF, PUR-B2, PS-B1 und n-Heptan) wurde um die drei Stoffe (PUR-B1, PUR-B3 und Spanplatte) erweitert. Dabei wird entsprechend der DIN 4102-1 [28] das PUR-B1 als schwerentflammbar, das PUR-B2 als normalentflammbar und das PUR-B3 als leicht entflammbar klassifiziert. Die experimentellen Untersuchungen erfolgten an Holzwerkstoffen (Fichtenholz, MDF, Spanplatte), an thermoplastischen und duroplastischen Kunststoffen (Polystyrol und Polyurethan) sowie an einer Flüssigkeit (n-Heptan).

Die Ermittlung des Brennwertes  $H_S$  und die Berechnung des Heizwertes  $H_C$  aus dem Brennwert erfolgte nach DIN 51900-1 [22] und DIN EN ISO 1716 [10]. Die für das Fichtenholz und das Polystyrol-B1 messtechnisch ermittelten Heizwerte stimmen sehr gut mit den tabellierten Heizwerten nach DIN 18230-3 überein. Geringfügige Unterschiede zwischen gemessenen Heizwerten und den Heizwerten nach DIN 18230-3 bestehen für PUR-B1 und PUR-B2. Die Unterschiede sind vermutlich auf andere Stoffzusammensetzungen von Polyurethan zurückzuführen. Die allgemein gute Übereinstimmung der messtechnisch ermittelten Heizwerte mit den in der DIN 18230-3 dokumentierten Heizwerten sind eine solide Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Verbrennungseffektivität und zum Abbrandfaktor  $m$ .

Die experimentellen Untersuchungen zur Wärmefreisetzungsrate wurden am Cone Calorimeter und Single Burning Item Test (SBI) durchgeführt. Während im Cone Calorimeter das Abbrandverhalten von Stoffen mit kleinen Probenabmessungen untersucht wurde, wurden im SBI Proben mit mittelgroßen Abmessungen untersucht. Nachfolgende Tabelle 2 liefert eine Übersicht zu den am Cone Calorimeter und SBI untersuchten Probenabmessungen.

Tabelle 2: Übersicht zu den am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test untersuchten Probenabmessungen

Stoff	Probenabmessung [mm]	
	Cone Calorimeter	Single Burning Item Test
Fichtenholz	100 x 100 x 15	500 x 500 x 15
Mitteldichte Holzfaserverplatte (MDF)	100 x 100 x 15	500 x 500 x 15
Spanplatte	100 x 100 x 10	500 x 500 x 15
Polyurethan Hartschaum (PUR-B1)	100 x 100 x 30	500 x 500 x 30
Polyurethan Hartschaum (PUR-B2)	100 x 100 x 30	500 x 500 x 30
Polyurethan Hartschaum (PUR-B3)	100 x 100 x 30	500 x 500 x 30
Polystyrol (PS-B1)	100 x 100 x 30	500 x 500 x 30
n-Heptan	$\varnothing 1 \times 10^4 \text{ mm}^2 \times 7 \text{ mm}$	$\varnothing 3 \times 10^4 \text{ mm}^2 \times 7 \text{ mm}$



Für Fichtenholz und mitteldichte Holzfaserplatte betrug die Probenhöhe 0,015 m und 0,03 m für Polyurethan-Hartschaum und schwerentflammbares Polystyrol. Für die Spanplatte wurde am Cone Calorimeter eine Probehöhe von 0,01 m und SBI von 0,015 m verwendet. Das n-Heptan wurde in einem runden Probenträger mit einer Oberfläche von 0,01 m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter und 0,03 m<sup>2</sup> im SBI verbrannt.

Zur Untersuchung des Einflusses des Energieeintrags auf das Abbrandverhalten von Stoffen wurden unterschiedliche Strahlungsintensitäten (Wärmestromdichte an der Probenoberfläche) am Cone Calorimeter und verschiedene Brennerleistungen am SBI vorgegeben. Die Tabelle 3 liefert eine Übersicht zu den Versuchsbedingungen.

Tabelle 3: Übersicht zu den Versuchsbedingungen zur experimentellen Untersuchung des Abbrandverhaltens von verschiedenen Stoffen am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test

Stoff	Versuchsbedingungen	
	Cone Calorimeter Strahlungsintensität [kW/m <sup>2</sup> ]	SBI Brennerleistung [kW]
Fichtenholz	35 / 50 / 70	33
Mitteldichte Holzfaserplatte (MDF)	75	33
Spanplatte	35 / 50 / 70	33
Polyurethan Hartschaum (PUR-B1)	35 / 50 / 70	33 / 51
Polyurethan Hartschaum (PUR-B2)	35 / 50 / 70	33 / 51
Polyurethan Hartschaum (PUR-B3)	35 / 50 / 70	33
Polystyrol (PS-B1)	35 / 50 / 70	33
n-Heptan	0	0

Am Cone Calorimeter wurden mit Ausnahme von MDF und n-Heptan alle Stoffe für Strahlungsintensitäten von 35, 50 und 70 kW/m<sup>2</sup> untersucht. Die mitteldichte Holzfaslerplatte brannte erst ab einer Strahlungsintensität von 75 kW/m<sup>2</sup>. Für den Abbrand von n-Heptan war keine zusätzliche Strahlungsintensität erforderlich. Die Entzündung von n-Heptan erfolgte durch den Zündfunken des Cone Calorimeters.

Am SBI führte erst eine Brennerleistung von 51 kW für die Stoffe PUR-B1 und PUR-B2 zu einem vollständigen Abbrand. Zur Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate von n-Heptan war keine Beflammung durch den Sandbettbrenner erforderlich. Alle anderen Stoffe wurden am SBI für eine Brennerleistung von 33 kW untersucht. Die Entzündung der Probe erfolgte mittels Feuerzeug.

Der Versuchsaufbau am SBI ist in Abbildung 10 dargestellt und wurde gegenüber dem standardisierten Versuchsaufbau nach DIN EN 13825 [25] um folgende Funktionen erweitert: Drahtkorb mit Feststoff-Probe, Stativ zur Befestigung des Drahtkorbes im Abstand von 0,25 m oberhalb des Sandbettbrenners, Waage zur Aufzeichnung des Massenverlustes. Die Probenteile befanden sich entsprechend der Abbildung 10 in einem 0,25 m oberhalb des Sandbettbrenners angeordneten Drahtkorb. Zwischen den

im Drahtkorb nebeneinander angeordneten Probenteilen wurde mittels Abstandshaltern ein Abstand von 5 mm erzeugt. Die dadurch erzeugte Belüftung zwischen den Probenteilen führte zu einem besseren Abbrand der Probe. Der Drahtkorb war über einen Tragarm an einem Stativ befestigt, das auf der Waage stand. Diese zeichnete den Massenverlust über die Zeit auf. Eine hinter dem Sandbettbrenner angeordnete Stützplatte gewährleistete eine direkte Beflammung der Probe.



Abbildung 10: Versuchsaufbau im Single Burning Item Test und Modifizierung

Für jede Strahlungsintensität (Cone) bzw. Brennerleistung (SBI) wurden aus Gründen der Reproduzierbarkeit jeweils drei Versuche durchgeführt. Neben der Wärmefreisetzungsrate wurden während des Versuches die Massenverlustrate (MLR) bzw. der Massenverlust (ML), die Total Heat Release (THR), die effektive Verbrennungswärme sowie der FIGRA-Wert aufgezeichnet.

Zur Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen an den drei Prüfapparaturen Bombenkalorimeter, Cone Calorimeter und Single Burning Item Test wurden die zu untersuchenden Stoffe über 20 Tage in einem Klimaraum bei einer Raumlufttemperatur von  $23,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ °C}$  und einer relativen Raumluftfeuchte von  $50,0\text{ \%} \pm 4,0\text{ \%}$  konditioniert [31], [32].

In den nachfolgenden Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 werden die Ergebnisse für das Abbrandverhalten der am Cone und SBI untersuchten Stoffe anhand der experimentell ermittelten Wärmefreisetzungsrate dargestellt.

Nachfolgende Tabelle 4 fasst die Versuchsbedingungen zusammen, für die exemplarisch eine grafische Darstellung der Wärmefreisetzungsrate in den Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 erfolgte.

Tabelle 4: Übersicht zu den Versuchsbedingungen, für die exemplarisch eine grafische Darstellung der Wärmefreisetzungsrate für die am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test untersuchten Stoffe erfolgte

---

Stoff	Versuchsbedingungen	
	Cone Calorimeter Strahlungsintensität [kW/m <sup>2</sup> ]	SBI Brennerleistung [kW]
Fichtenholz	50	33
Mitteldichte Holzfaserverplatte (MDF)	75	33
Spanplatte	50	33
Polyurethan Hartschaum (PUR-B1)	70	33
Polyurethan Hartschaum (PUR-B2)	70	33
Polyurethan Hartschaum (PUR-B3)	70	33
Polystyrol (PS-B1)	50	33
n-Heptan	0	0

---

In Abschnitt 2.3.4 erfolgt die Ermittlung der Verbrennungseffektivität auf der Grundlage der experimentell ermittelten Wärmefreisetzung und der in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Vorgehensweise.

### 2.3.2 Am Cone Calorimeter ermittelte Wärmefreisetzungsrate

Die Abbildung 11 zeigt die am Cone Calorimeter untersuchten Stoffe.

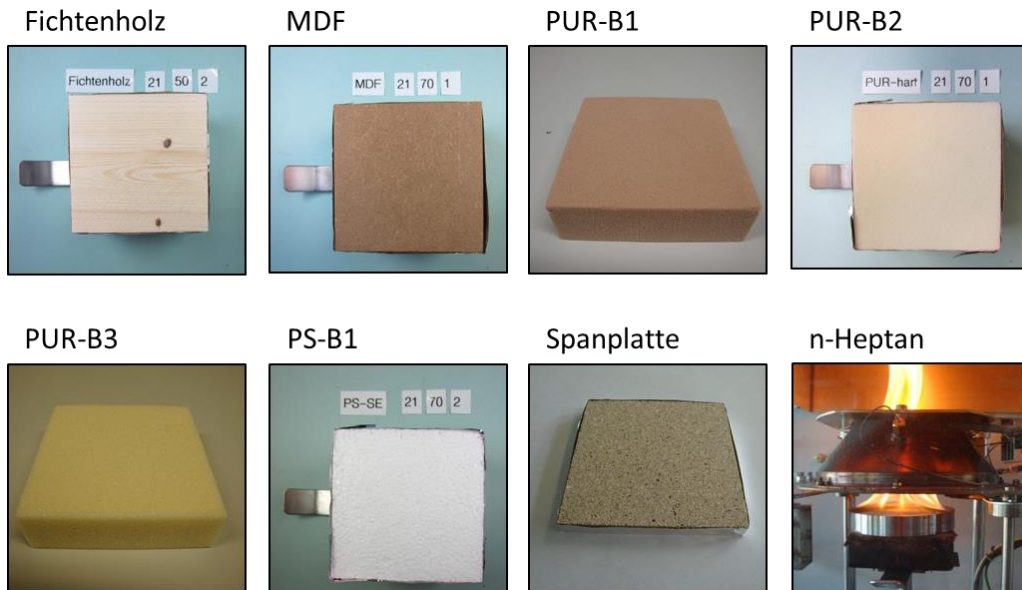


Abbildung 11: Am Cone Calorimeter untersuchte Stoffe

Die Abbildung 12 zeigt das Ergebnis der gemessenen Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz für eine Strahlungsintensität von  $50 \text{ kW/m}^2$ .

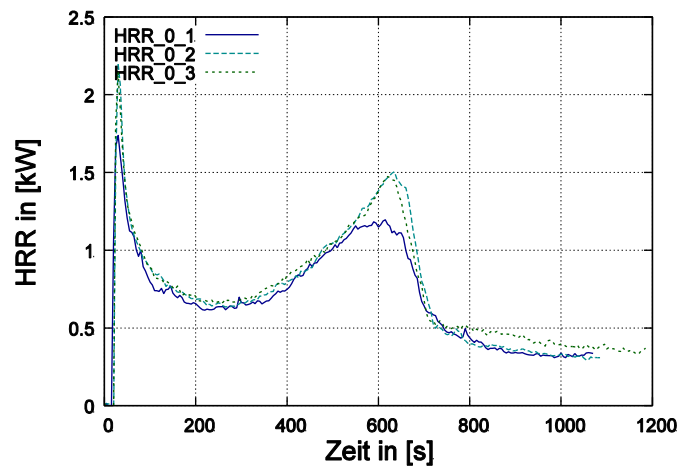


Abbildung 12: Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz für eine Strahlungsintensität von  $50 \text{ kW/m}^2$  (n=3 Versuche)

Nach der Entzündung steigt die Wärmefreisetzungsrate innerhalb kürzester Zeit stark an und erreicht einen Peak (Maximalwert) von ca. 2 kW. Das anschließende Absinken ist auf die beim Abbrand von Fichtenholz an der Oberfläche entstehende Kohleschicht zurückzuführen. Die isolierende Wirkung der Kohleschicht beeinflusst die Wärmeübertragung in Richtung des unverbrannten Teils der Probe und es werden weniger Pyroly-

segase freigesetzt. Aufgrund der isolieren Unterlage (Glaswolle) findet durch diese Schicht kein wesentlicher Wärmestrom (Adiabate Randbedingung) in diese Richtung statt. Dies führt folglich zu einer Temperaturerhöhung auf der Probenunterseite. Im weiteren Verlauf führt die Temperaturerhöhung dazu, dass auch an der Unterseite Pyrolysegase freigesetzt werden, die an der Verbrennung teilnehmen. Infolge dieses sogenannten Rückseiteneffekts (backing effect) [33] bildet sich der zweite Peak der Wärmefreisetzungsrate aus. Ab ca. 550 Sekunden wurde annähernd der gesamte brennbare Anteil des Fichtenholzes bei der Verbrennung umgesetzt, sodass die hier gemessene Wärmefreisetzungsrate auf das Glimmen der Probenreste zurückzuführen ist.

Die Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Wärmefreisetzungsrate für die mitteldichte Holzfaserplatte für eine Strahlungsintensität von  $75 \text{ kW/m}^2$ .

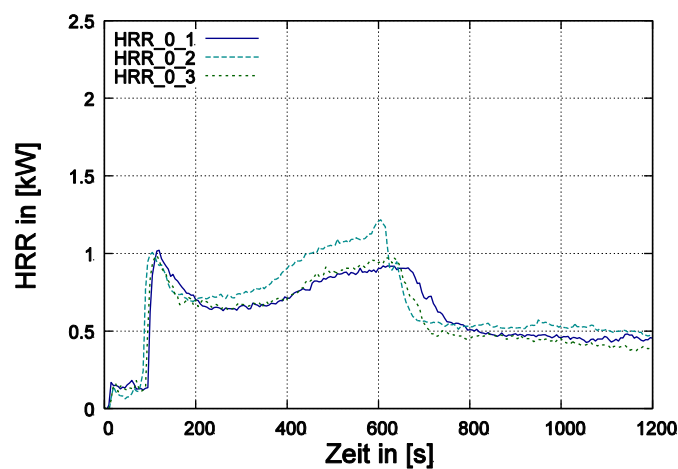


Abbildung 13: Wärmefreisetzungsrate der mitteldichten Holzfaserplatte für eine Strahlungsintensität von  $75 \text{ kW/m}^2$  ( $n=3$  Versuche)

Anhand des verzögerten Anstieges lässt sich erkennen, dass sich dieser Stoff schwerer entzündet als das Fichtenholz. Weiterhin ist der erste Peak mit  $1 \text{ kW}$  deutlich geringer als beim Fichtenholz. Dass die Wärmefreisetzungsrate sich nach dem ersten Peak verringert, ist auch hier auf die an der Oberfläche entstehende Kohleschicht zurückzuführen, bis der Rückseiteneffekt zum Tragen kommt sowie Risse in der Oberfläche entstehen und wieder mehr Wärme freigesetzt wird. Im Anschluss an den zweiten Peak findet auch bei der MDF nur noch ein Glimmen bei einer Wärmefreisetzungsrate von ca.  $0,5 \text{ kW}$  statt.

Die Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die gemessenen Wärmefreisetzungsraten von PUR-B1, PUR-B2 und PUR-B3 für eine Strahlungsintensität von 70 kW/m<sup>2</sup>.

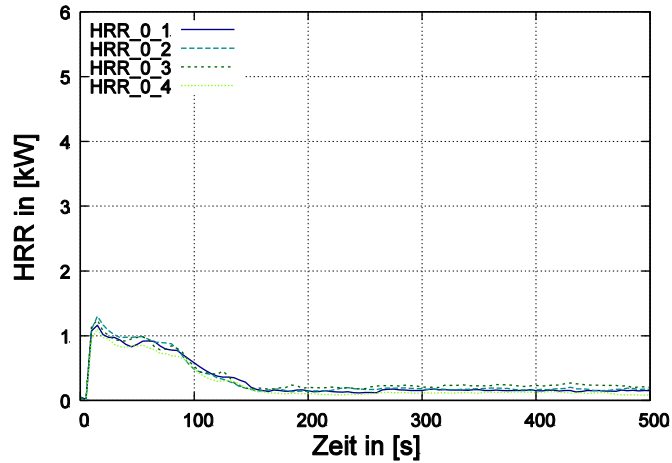


Abbildung 14: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B1) für eine Strahlungsintensität von 70 kW/m<sup>2</sup> (n=3 Versuche)

Der Verlauf der HRR von PUR-B1 erreicht eine Peak-HRR von ca. 1,2 kW. Nach 150 Sekunden besteht keine Flammeneerscheinung mehr, sodass nur noch eine sehr geringe Wärmefreisetzung verbleibt.

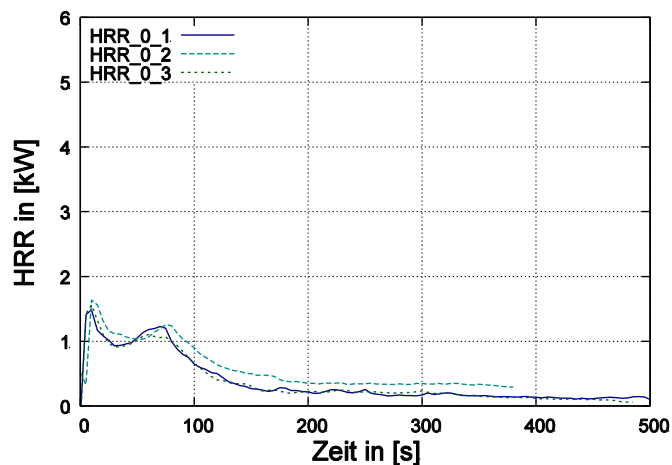


Abbildung 15: Wärmefreisetzungsrate von normalentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B2) für eine Strahlungsintensität von 70 kW/m<sup>2</sup> (n=3 Versuche)

Bei dem PUR-B2 bilden sich zwei Peak der HRR aus, wovon der Erste ca. 1,5 kW erreicht. Auch hier besteht nach 150 Sekunden nur noch eine geringe Wärmefreisetzung.

Das PUR-B3 liefert im Vergleich zu den anderen Polyurethan-Hartschäumen eine um das ca. fünffach höhere Wärmefreisetzung von etwa 5 kW. Dieser Stoff erlischt nach 70 Sekunden und setzt ab dann kaum Wärme mehr frei.

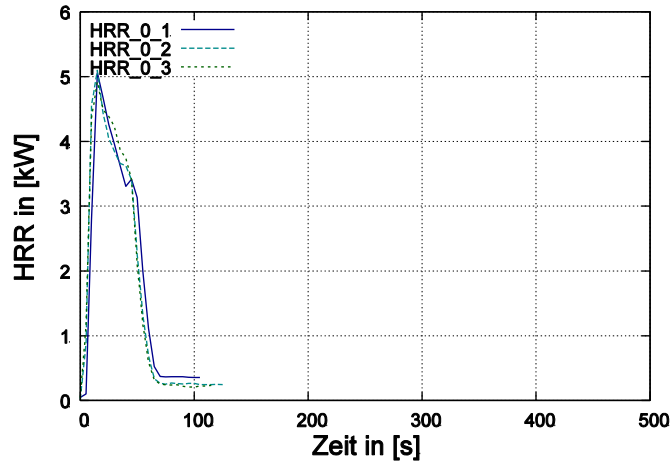


Abbildung 16: Wärmefreisetzungsrate von leichtentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B3) für eine Strahlungsintensität von 70 kW/m<sup>2</sup> (n=3 Versuche)

Die Abbildung 17 zeigt das Ergebnis der Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polystyrol (PS-B1) für eine Strahlungsintensität von 50 kW/m<sup>2</sup>.

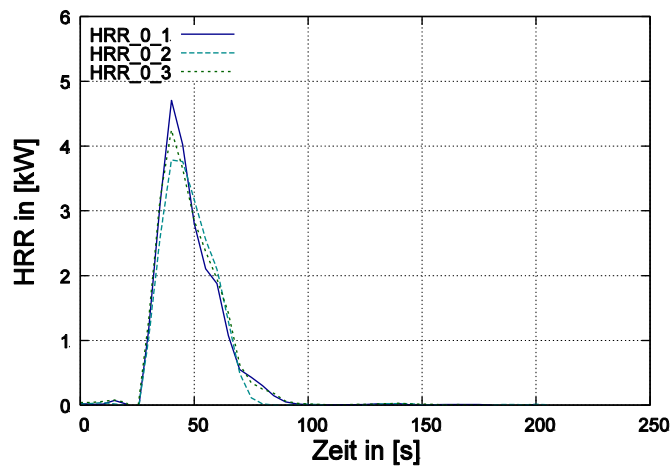


Abbildung 17: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polystyrol für eine Strahlungsintensität von 50 kW/m<sup>2</sup> (n=3 Versuche)

Mit Beginn der Bestrahlung schmilzt das Polystyrol zunächst vollständig zu einer Flüssigkeit, bevor es sich anschließend schlagartig entzündet. Die HRR verbleibt zunächst bei einem Wert von 0 kW bevor sie auf Werte von ca. 4,0 bis 4,8 kW ansteigt. Nachdem die Flüssigkeit innerhalb von 100 Sekunden nahezu rückstandslos verbrannt ist, sinkt die HRR ohne Glimmen bis auf einen Wert von 0 kW/m<sup>2</sup>.

Die Abbildung 18 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate von n-Heptan. Statt in einem quadratischen wurde das n-Heptan in einem kreisförmigen Probenträger verbrannt, wobei die Oberfläche ebenfalls  $0,01 \text{ m}^2$  betrug. Durch die kreisförmige Oberfläche wird ein für Flüssigkeiten typisches intensives Abbrennen in den Ecken des Probenträgers vermieden. Die Versuchsmenge betrug  $70 \text{ ml}$ , was einem Füllstand von  $7 \text{ mm}$  entspricht. Um starkes Sieden des n-Heptans zu vermeiden, wurde die gleiche Menge Wasser im Probenträger verwendet. Die Entzündung des n-Heptans durch einen Zündfunken führte zu einer selbstständigen Verbrennung.

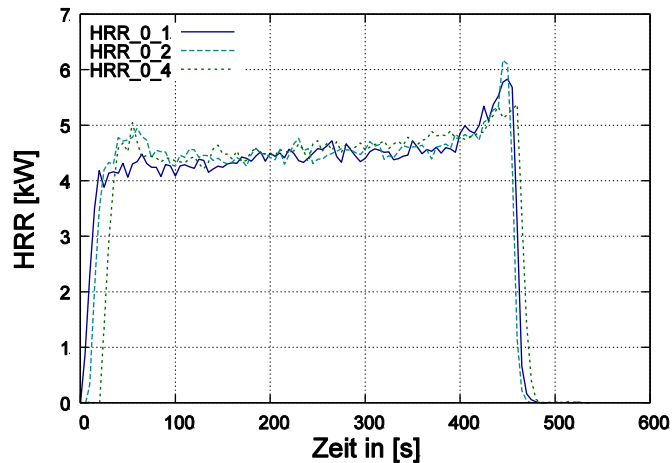


Abbildung 18: Wärmefreisetzungsrate von n-Heptan für eine Strahlungsin-  
tensität von  $0 \text{ kW/m}^2$  ( $n=3$  Versuche)

Nach der Entzündung erreicht die Wärmefreisetzungsrate für ca. 300 Sekunden einen konstant bleibenden Wert zwischen  $4,1$  und  $5,0 \text{ kW}$ . Das Abbrandverhalten zeigt eine gleichmäßige Verbrennung des n-Heptans. Nach ca. 300 Sekunden steigt die HRR weiter an, da durch die Erwärmung des Probenträgers das Wasser leicht zu sieden beginnt und infolge der Oberflächenvergrößerung des n-Heptans mehr brennbare Flüssigkeit in Dampf übergeht. Sobald das n-Heptan verbrannt ist, findet keine Wärmefreisetzung mehr statt.



Die Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse der Wärmefreisetzungsrate der Spanplatte für eine Strahlungsintensität von 50 kW/m<sup>2</sup>.

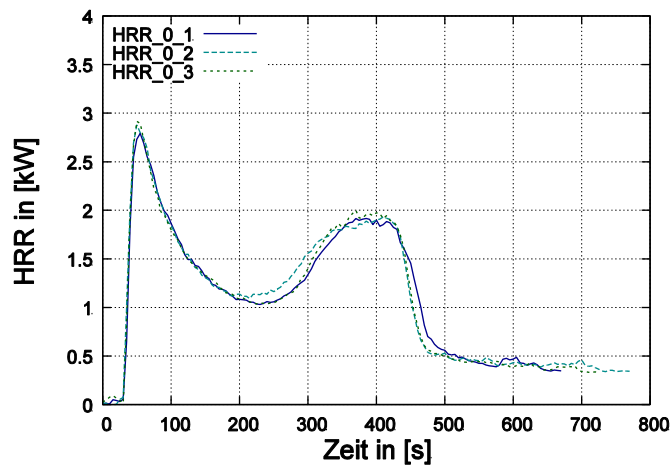


Abbildung 19: Wärmefreisetzungsrate der Spanplatte für eine Strahlungsintensität von 50 kW/m<sup>2</sup> (n=3 Versuche)

Etwa 40 Sekunden nach Entzündung der Probe erreicht die Wärmefreisetzungsrate einen Peak von ca. 2,7 kW. Die Ursache für die anschließende Verringerung der HRR und die Ausprägung eines zweiten Peaks liegt, wie auch bei Fichtenholz und dem MDF, an dem isolierenden Effekt der Kohleschicht und dem Rückseiteneffekt, der zu einer Temperaturerhöhung und zu einer Freisetzung von Pyrolysegasen an der Unterseite der Probe führt.

Grundsätzlich ist der zeitlich Verlauf der gemessenen Wärmefreisetzung für jeden Stoff unterschiedlich (vgl. Abbildung 12 bis Abbildung 19). Das unterschiedliche Abbrandverhalten ist auf die physikalisch chemischen Eigenschaften der Stoffe sowie deren Pyrolyseverhalten zurückzuführen.

### 2.3.3 Am Single Burning Item Test ermittelte Wärmefreisetzungsrate

Vorversuche haben gezeigt, dass Proben mit einer Abmessung von 0,5 x 0,5 m nicht vollständig abbrannten. Aus diesem Grund wurden die Proben in drei gleichgroße Probe­teile mit Abmessungen von je 0,5 x 0,166 m zugeschnitten und nebeneinander angeordnet. Auf diesem Weg konnte eine gleichmäßige Beflammung der Probe­teile durch den Sandbettbrenner gewährleistet werden. Die Abbildung 20 zeigt die zuge­ schnittenen Proben sowie das n-Heptan in der runden Wanne.

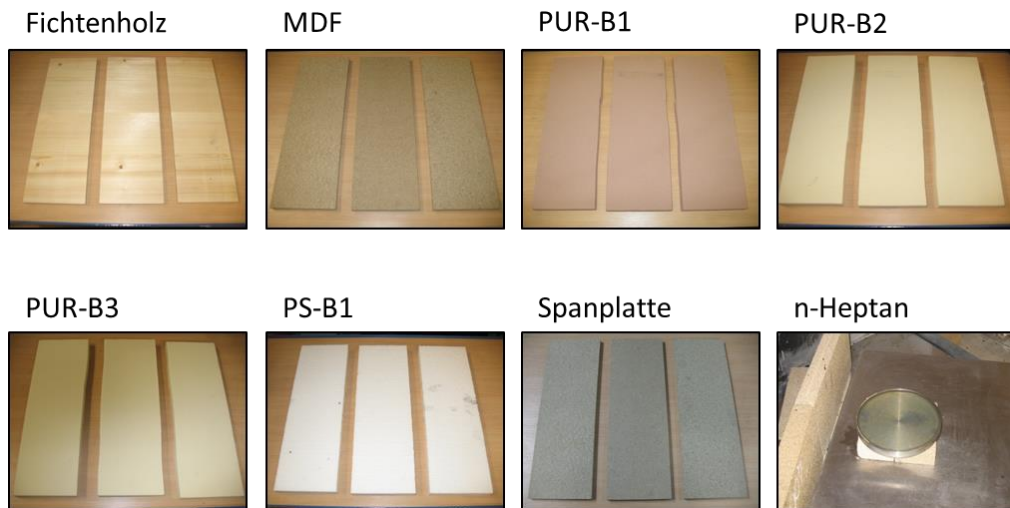


Abbildung 20: Am SBI untersuchte Proben

Die Abbildung 21 zeigt die experimentell ermittelte Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz für eine Brennerleistung von 33 kW.

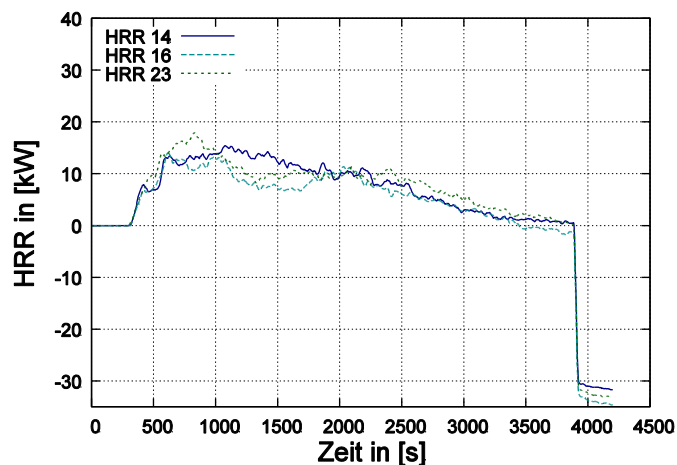


Abbildung 21: Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche)

Der Anstieg der Wärmefreisetzungsrate beginnt nach 300 Sekunden. Nach dieser Zeit erlischt der Nebenbrenner und der Hauptbrenner beginnt die Probe zu beflammen. Nach 3.900 Sekunden fand nahezu keine Wärmefreisetzung mehr statt. Vielversprechend im Sinne der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen anhand der durchgeführten Versuche ist, dass die hier gemessenen Wärmefreisetzungen nur minimale Abweichungen zueinander aufweisen. Geringe Abweichungen im Bereich zwischen 1.000 und 1.900 Sekunden sind auf das infolge des dynamischen Brandverhaltens stattfindende Nachrutschen von Probenstücken im Drahtkorb zurückzuführen.

Die Abbildung 22 zeigt die experimentell ermittelte Wärmefreisetzungsrate der mitteldichten Holzfaserplatte (MDF) für eine Brennerleistung von 33 kW.

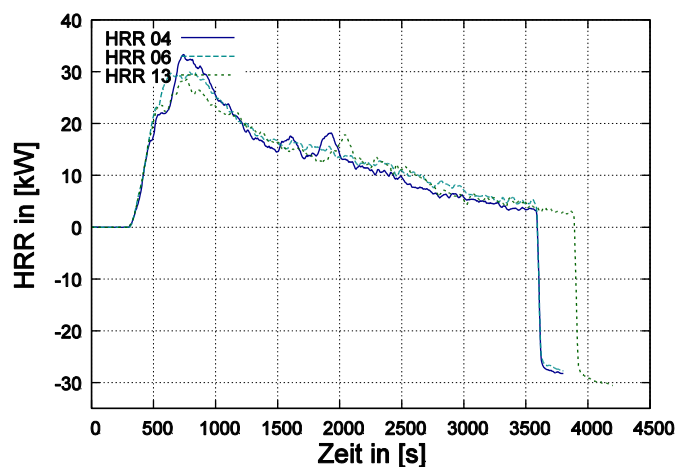


Abbildung 22: Wärmefreisetzungsrate der mitteldichten Holzfaserplatte für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche)

Nach 300 Sekunden mit Zündung des Hauptbrenners wird Wärme durch die Probe freigesetzt. Ähnlich wie bei Fichtenholz findet auch hier nach ca. 3.600 Sekunden nahezu keine Wärmefreisetzung mehr statt. Für alle drei Versuche tritt die maximale Wärmefreisetzung (Peak HRR) nach 750 Sekunden auf. Verglichen mit Fichtenholz erreicht MDF in Bezug auf die Peak HRR für alle drei Versuche Werte von ca. 31 kW und damit um 23 kW höhere Werte als das verwendete Fichtenholz.

Die Abbildung 23 zeigt die experimentell ermittelte Wärmefreisetzungsrate von PUR-B1 für eine Brennerleistung von 33 kW.

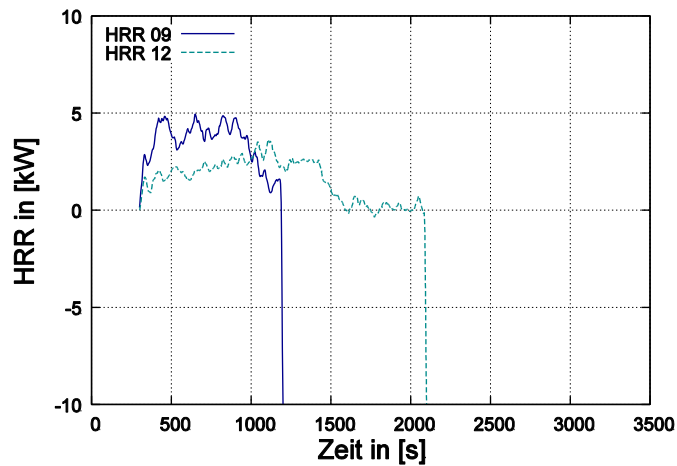


Abbildung 23: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B1) für eine Brennerleistung von 33 kW (n=2 Versuche)

Mit Beginn der Beflammung durch den Hauptbrenner findet nur im unteren Bereich der Probe eine Verbrennung statt. Abbildung 23 zeigt, dass nur Werte von maximal 5 kW bzw. 4 kW für die Wärmefreisetzung erreicht werden. Nach 1.200 bzw. 2.100 Sekunden bis zum Versuchsende findet im oberen Drittel der Probe keine Verbrennung mehr statt. Dieses Abbrandverhalten ist auf die materialbedingten Eigenschaften des schwerentflammbaren Polyurethan-Hartschaums (PUR-B1) zurückzuführen.

Die Abbildung 24 zeigt die experimentell ermittelte Wärmefreisetzungsrate von PUR-B2 für eine Brennerleistung von 33 kW.

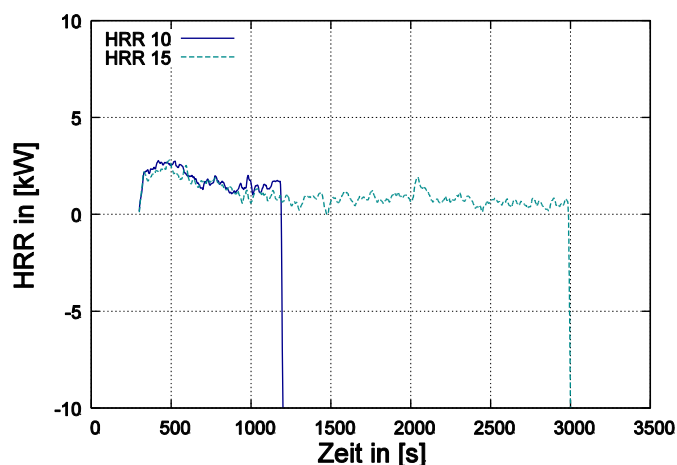


Abbildung 24: Wärmefreisetzungsrate von normalentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B2) für eine Brennerleistung von 33 kW (n=2 Versuche)

Ähnlich den Versuchen des PUR-B1 fand auch bei PUR-B2 keine selbstständige Verbrennung der Probe statt. Auch hier erfolgte nur im unteren Bereich der Probe eine Verbrennung. Infolge der Erwärmung und damit einhergehender thermischer Ausdehnung der Probe mit Beginn der Beflammung, schlossen sich trotz Abstandhalter die Fugen zwischen den Probenteilen. Dies ist vermutlich die Ursache dafür, dass verglichen mit dem PUR-B1, für PUR-B2 um ca. 2 kW geringere Werte der Peak HRR gemessen werden. Da die Wärmefreisetzungsrate für den Versuch „HRR 10“ nach 1.000 Sekunden unter einen Wert von 2 kW fällt, wird, anders als bei dem Versuch „HRR 15“, der Versuch „HRR 10“ nach 1.200 abgebrochen.

Die Abbildung 25 zeigt die experimentell ermittelte Wärmefreisetzungsrate von PUR-B3 für eine Brennerleistung von 33 kW.

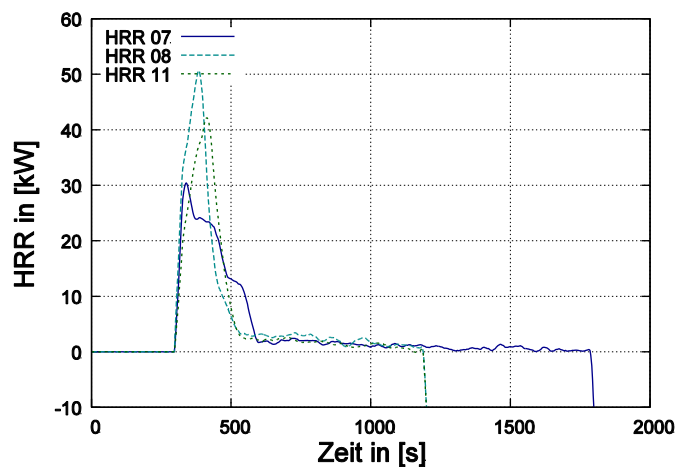


Abbildung 25: Wärmefreisetzungsrate von leichtentflammbarem Polyurethan-Hartschaum (PUR-B3) für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche)

Die für PUR-B3 durchgeführten Versuche zeigen mit Einschalten des Hauptbrenners einen starken Anstieg der Wärmefreisetzungsrate bis zum Erreichen der Peak HRR. Die Versuche liefern unterschiedliche Werte für die Peak HRR. Bezogen auf den maximal gemessenen Wert der Peak HRR des Versuchs „HRR 08“ erreicht der Versuch „HRR 07“ 60 % und der Versuch „HRR 11“ 80 % des maximal gemessenen Wertes. Im Anschluss daran fällt die HRR stark ab, sodass nach ca. 700 Sekunden nur noch eine geringe Wärmefreisetzung von ca. 2 kW stattfindet. Verglichen mit den Versuchen für PUR-B1 und PUR-B2 findet bei PUR-B3 direkt nach der Beflammung eine selbstständige Verbrennung der Probe statt. Die gesamte Probe verbrennt nahezu rückstandslos während des Versuchs.

Die Abbildung 26 zeigt die experimentell ermittelte Wärmefreisetzungsrate von Polystyrol-B1 für eine Brennerleistung von 33 kW.

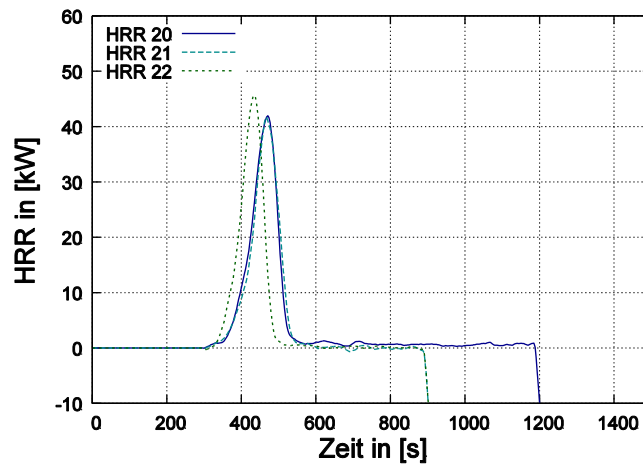


Abbildung 26: Wärmefreisetzungsrate von schwerentflammarem Polystyrol für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche)

Mit Beflammung des schwerentflammaren Polystyrols durch den Hauptbrenner erfolgt eine „Verflüssigung“ der Probe. Die entstehende Flüssigkeit sammelt sich in einer speziell für das Auffangen des verflüssigten Polystyrols am Boden des Korbes angebrachten Wanne, in der die Flüssigkeit sich entzündet. Die Peak HRR erreicht nach ca. 450 Sekunden einen Wert von ca. 43 kW. Nach ca. 550 Sekunden wird keine Wärme mehr freigesetzt. Wie bei dem PUR-B3 erfolgt auch hier ein intensiver Abbrand in kurzer Zeit.

Die Abbildung 27 zeigt die experimentell ermittelte Wärmefreisetzungsrate von n-Heptan.

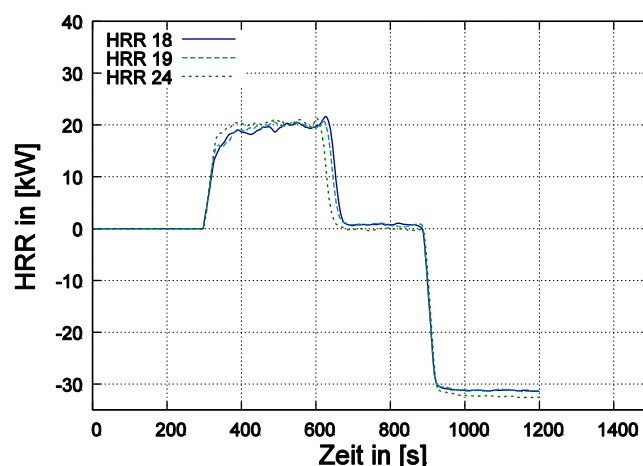


Abbildung 27: Wärmefreisetzungsrate von n-Heptan (n=3 Versuche)

Nach Zündung durch ein Feuerzeug steigt die Wärmefreisetzungsrate stark an und verbleibt im Bereich zwischen 400 Sekunden und 600 Sekunden auf einem Wert von ca. 20 kW. Erst kurz bevor das n-Heptan vollständig verbrannt ist, erfolgt ein weiterer Anstieg der Wärmefreisetzungsrate bis auf einen Wert von ca. 22 kW. Dieser Anstieg resultiert aus dem Sieden des Wassers, das eine Vergrößerung der Oberfläche des n-Heptans zur Folge hat. Nach ca. 650 Sekunden wird keine Wärme mehr freigesetzt.

Die Abbildung 28 zeigt die Wärmefreisetzungsrate der Spanplatte für eine Brennerleistung von 33 kW.

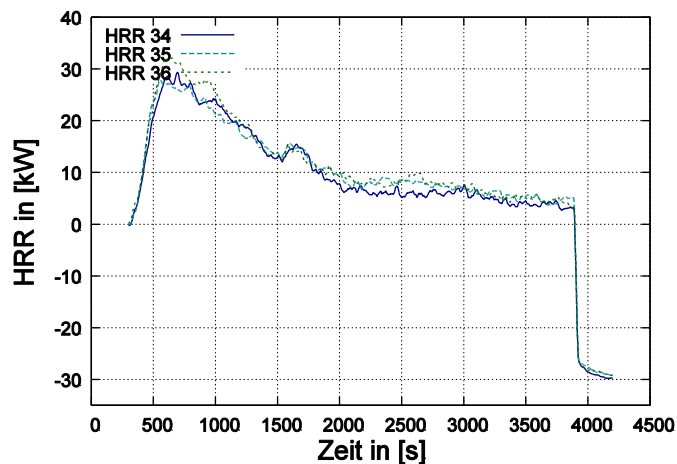


Abbildung 28: Wärmefreisetzungsrate der Spanplatte für eine Brennerleistung von 33 kW (n=3 Versuche)

Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzung der Spanplatte ist der von MDF ähnlich. Auch das nach ca. 600 Sekunden erreichte Maximum der Wärmefreisetzung von ca. 30 kW ist sowohl für die Spanplatte als auch für MDF nahezu identisch.

Grundsätzlich ist auch am SBI der zeitlich Verlauf der gemessenen Wärmefreisetzung für jeden Stoff unterschiedlich (vgl. Abbildung 21 bis Abbildung 28). Im Vergleich zu den am Cone Calorimeter gemessenen Maximalwerten der Wärmefreisetzungsrate sind die am SBI gemessenen signifikant höher. So wird für das Fichtenholz am Cone Calorimeter einen Wert von ca. 2 kW gemessen, während am SBI ein Wert von ca. 15 kW gemessen wird. Der Grund dafür ist die, verglichen mit dem Cone Calorimeter, im SBI um das 25-fach größere Probenoberfläche.

### 2.3.4 Ermittlung der Verbrennungseffektivität

Anhand der experimentell ermittelten Wärmefreisetzungsrate und dem Masseverlust wurde die effektive Verbrennungswärme bestimmt (Gleichung (2-10)). Über das Verhältnis aus effektiver Verbrennungswärme zu Heizwert wurde die Verbrennungseffektivität für jeden untersuchten Stoff ermittelt (Gleichung (2-9)).

Die experimentelle Untersuchung erfolgte am Cone Calorimeter für Wärmestromdichten an der Probenoberfläche von 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup> und 70 kW/m<sup>2</sup> bzw. 75 kW/m<sup>2</sup> und am SBI für Brennerleistungen von 33 kW und 51 kW.

Werte der Wärmestromdichte von 20 kW/m<sup>2</sup> können am Boden des Brandraumes auftreten, wenn im Brandraum ein Flashover erreicht wird. Als Flashover wird die Brandphase bezeichnet bei der Gastemperaturen von 500 - 600 °C unterhalb der Decke erreicht werden [34]. Diese Brandphase entspricht der Übergangsphase zum vollentwickelten Brand. Für den Beginn der Vollbrandphase werden entsprechend [3] Wärmestromdichten von 50 kW/m<sup>2</sup> angegeben. Zur Berücksichtigung der Übergangs- und Vollbrandphase wurde daher zur Berechnung der Verbrennungseffektivität die am Cone Calorimeter bei einer Wärmestromdichte von 50 kW/m<sup>2</sup> ermittelte effektive Verbrennungswärme herangezogen. Für jede Versuchsreihe wurde die Standardabweichung berechnet.

Die Abbildung 29 zeigt die anhand der Cone Calorimeter Messung ermittelte effektive Verbrennungswärme von Fichtenholz und der Spanplatte für Wärmestromdichten an der Probenoberfläche von 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup> und 70 kW/m<sup>2</sup> sowie die Standardabweichung der Versuchsreihe.

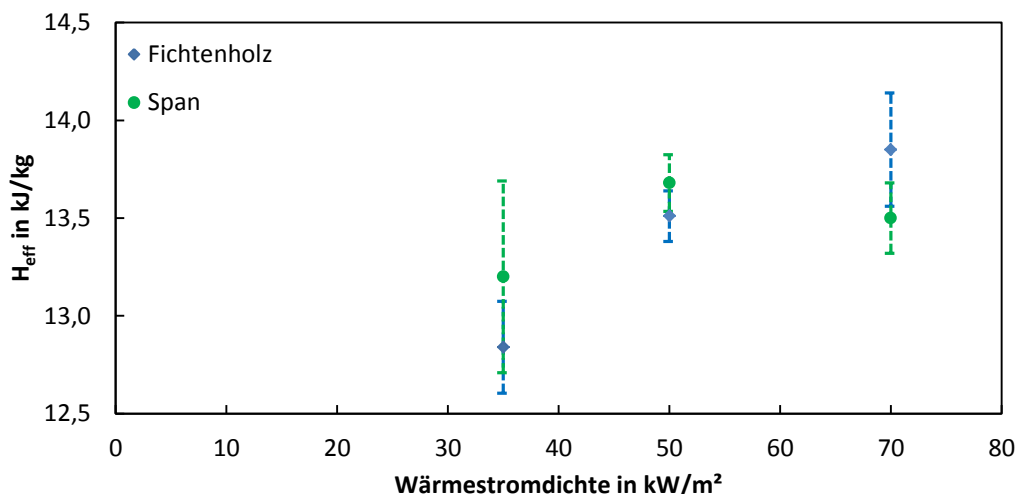


Abbildung 29: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Fichtenholz und der Spanplatte und Standardabweichung der Versuchsreihe



Die effektive Verbrennungswärme des Fichtenholzes und der Spanplatte variiert im Bereich zwischen 12,5 und 14,5 kJ/kg. Das Fichtenholz liefert bei 70 kW/m<sup>2</sup> den größten Wert der effektiven Verbrennungswärme aber auch die größte Streuung um den Mittelwert. Bei einem Wert der Wärmestromdichte von 50 kW/m<sup>2</sup> ist die Standardabweichung sowohl für Fichtenholz als auch für die Spanplatte am geringsten. Die bei dieser Wärmestromdichte gemessenen Messwerte werden zur Berechnung der Verbrennungseffektivität herangezogen.

Die Abbildung 30 zeigt die effektive Verbrennungswärme von PUR-B1 für Wärmestromdichten an der Oberfläche von 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup> und 70 kW/m<sup>2</sup>.

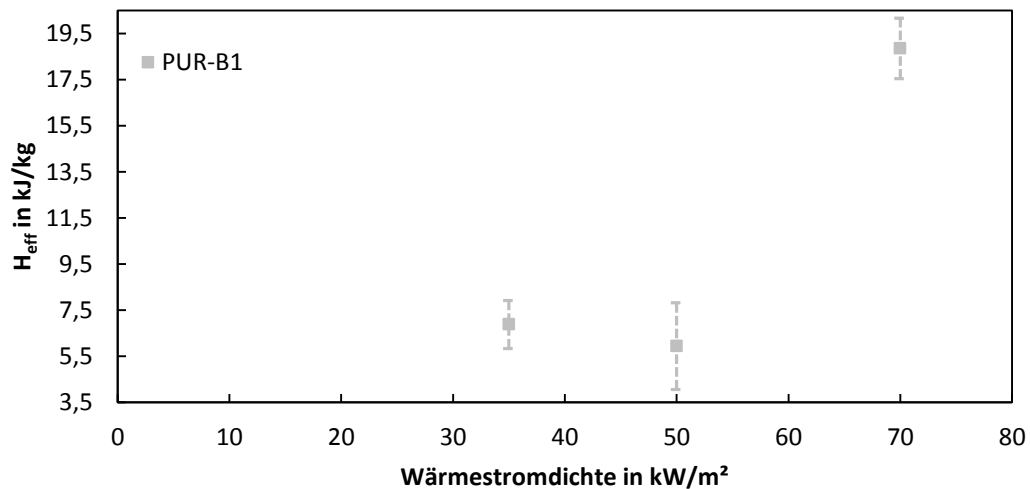


Abbildung 30: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Polyurethan-Hartschaum (PUR-B1) und Standardabweichung der Versuchsreihe

Das PUR-B1 liefert sowohl für 35 kW/m<sup>2</sup> als auch für 50 kW/m<sup>2</sup> Werte der effektiven Verbrennungswärme von nahezu gleicher Größenordnung und für 70 kW/m<sup>2</sup> den größten Wert der effektiven Verbrennungswärme von ca. 18,8 kJ/kg. Die Schwankung der Messwerte um den Mittelwert ist bei 50 kW/m<sup>2</sup> am größten, sodass in diesem Fall der Wert der effektiven Verbrennungswärme für die nächstgrößere Wärmestromdichte von 70 kW/m<sup>2</sup> herangezogen wurde. Zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität von PUR-B1 wurde die bei 70 kW/m<sup>2</sup> ermittelte effektive Verbrennungswärme verwendet.

Die Abbildung 31 zeigt die effektive Verbrennungswärme von PUR-B2 und PUR-B3.

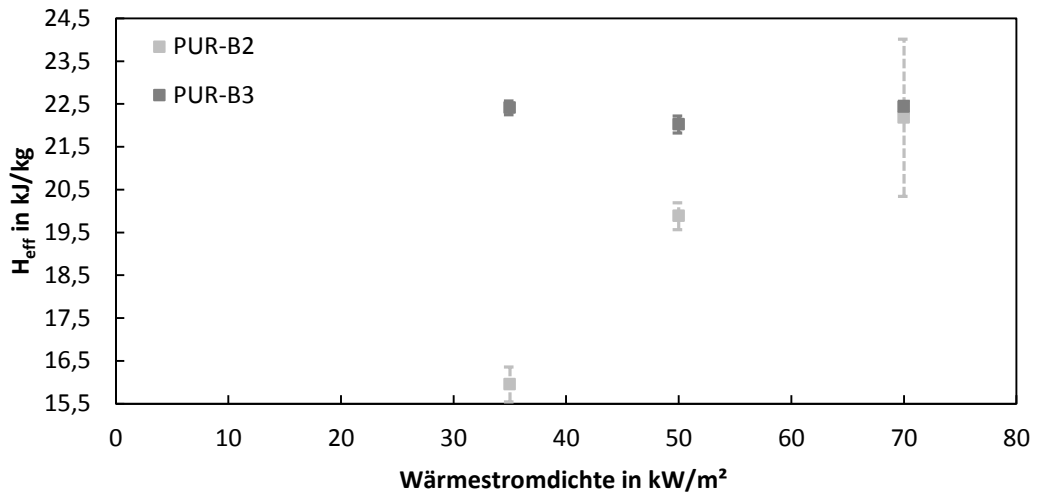


Abbildung 31: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Polyurethan-Hartschaum (PUR-B2) und (PUR-B3) und Standardabweichung der Versuchsreihe

Das Abbrandverhalten des PUR-B2 zeigt einen signifikanten Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme, während für PUR-B3 nahezu Werte gleicher Größenordnung für die effektive Verbrennungswärme ermittelt werden. Zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität von PUR-B2 und PUR-B3 werden die bei 50 kW/m² ermittelten Werte der effektiven Verbrennungswärme verwendet.

Die Abbildung 32 zeigt die effektive Verbrennungswärme von Polystyrol-B1.

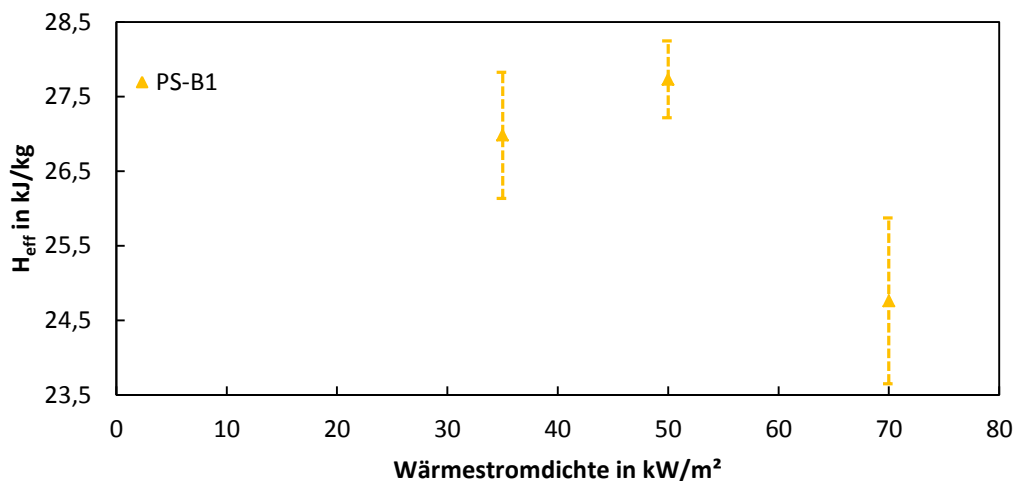


Abbildung 32: Einfluss der Wärmestromdichte auf die effektive Verbrennungswärme von Polystyrol-B1 und Standardabweichung der Versuchsreihe

Verglichen mit den anderen untersuchten Stoffen erreicht dieser Stoff bei 50 kW/m<sup>2</sup> die größte effektive Verbrennungswärme.

Für das n-Heptan wurde die Verbrennungseffektivität unter den in Abschnitt 2.3, Tabelle 3 angegebenen Versuchsbedingungen ermittelt. Für die mitteldichte Holzfaserplatte wurde versuchsbedingt die Verbrennungseffektivität bei einer Wärmestromdichte von 75 kW/m<sup>2</sup> bestimmt (vgl. Abschnitt 2.3 und Tabelle 3).

Im SBI wurden mit Ausnahme von n-Heptan, PUR-B1 und PUR-B2 die in Tabelle 3 aufgeführten Stoffe für eine Brennerleistung von 33 kW untersucht. Für den Abbrand von n-Heptan am SBI wurde keine Brennerleistung benötigt. Für die Stoffe PUR-B1 und PUR-B2 führte erst eine Brennerleistung von 51 kW zu einem vollständigen Abbrand und damit zu brauchbaren Messergebnissen.

Die Abbildung 33 zeigt die für 33 kW und 51 kW ermittelten Werte der effektiven Verbrennungswärme.

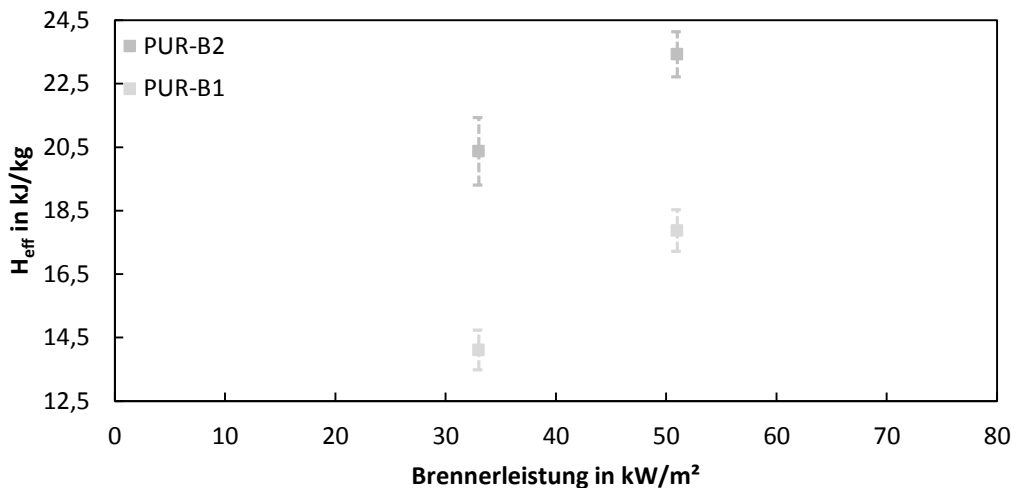


Abbildung 33: Einfluss der Brennerleistung auf die effektive Verbrennungswärme von PUR-B1 und PUR-B2 und Standardabweichung der Versuchsreihe

Aufgrund des vollständigen Abbrandes bei einer Brennerleistung von 51 kW werden für das PUR-B1 und PUR-B2 höhere Werte der effektiven Verbrennungswärme erreicht als bei einer Brennerleistung von 33 kW. Zur Berechnung der Verbrennungseffektivität werden die bei 51 kW ermittelten Werte der effektiven Verbrennungswärme herangezogen.

Nachfolgende Tabelle 5 fasst die Wärmestromdichten bzw. die Brennerleistungen zusammen für die eine Verbrennungseffektivität bestimmt wurde.

Tabelle 5: Wärmestromdichten bzw. die Brennerleistungen für die eine Verbrennungseffektivität bestimmt wurde

Stoff	Energieeintrag	
	Cone Calormeter Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	SBI Brennerleistung [kW]
Fichtenholz	50	33
MDF	75	33
Spanplatte	50	33
PUR-B1	70	51
PUR-B2	50	51
PUR-B3	50	33
PS-B1	50	33
n-Heptan	0	0

Entsprechend der Gleichung (2-9) wurde die Verbrennungseffektivität für die in Tabelle 5 aufgeführten Stoffe berechnet. Die Abbildung 34 fasst die Ergebnisse der am Cone Calorimeter ermittelten Verbrennungseffektivitäten für die in Tabelle 5 aufgeführten Stoffe sowie die zugehörigen Standardabweichungen zusammen.

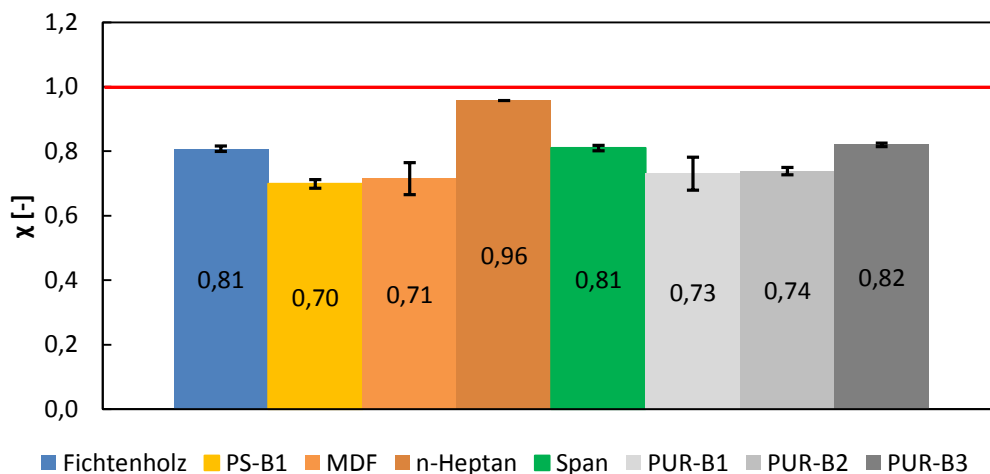


Abbildung 34: Am Cone Calorimeter ermittelte Verbrennungseffektivitäten für die in Tabelle 5 aufgeführten Stoffe

In Abbildung 34 ist der maximal mögliche Wert der Verbrennungseffektivität von  $\chi = 1,0$  gekennzeichnet. Ein Wert von  $\chi = 1,0$  wird erreicht, wenn die gesamte gespeicherte Energie in Wärme umgewandelt wird. Den größten Wert der Verbrennungseffektivität bei gleichzeitig geringster Standardabweichung liefert n-Heptan mit  $\chi = 0,96$ . Für PS-B1 wird mit einem Wert von  $\chi = 0,7$  der geringste Wert für die Verbrennungseffektivität ermittelt. Die im SBI ermittelten Werte der Verbrennungseffektivität sowie die zugehörigen Standardabweichungen zeigt Abbildung 35.

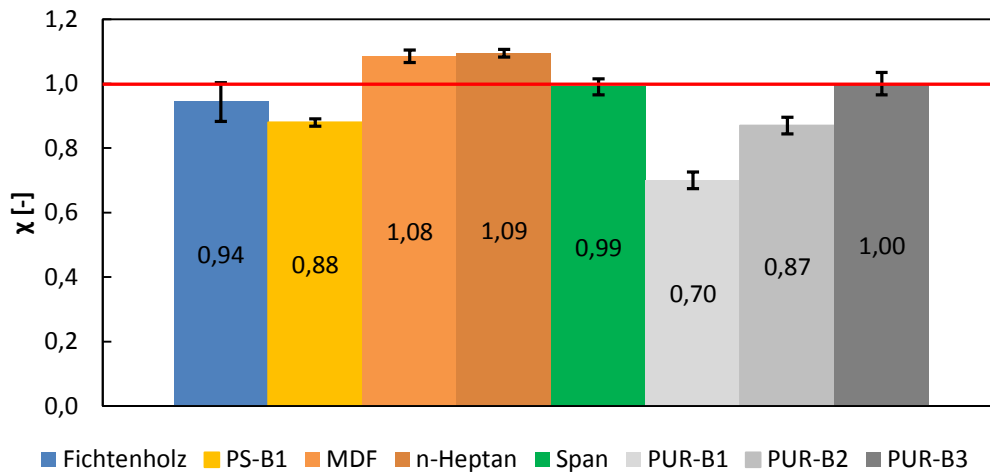


Abbildung 35: Am SBI ermittelte Verbrennungseffektivitäten für die in Tabelle 5 aufgeführten Stoffe

Das n-Heptan liefert den größten Wert und PUR-B1 den kleinsten Wert der Verbrennungseffektivität. Für MDF wurden um 8 % und für n-Heptan um 9 % höhere Werte der Verbrennungseffektivität als maximal  $\chi = 1,0$  ermittelt. Die Ursache dafür konnte noch nicht abschließend geklärt werden konnte. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass mit Ausnahme von PUR-B1 am SBI größere Werte der Verbrennungseffektivität für die untersuchten Stoffe als bei den Messungen am Cone Calorimeter ermittelt wurden. In Bezug auf den Baustoff Polyurethan-Hartschaum zeigen die Ergebnisse der Verbrennungseffektivität, dass mit geringer werdenden Anforderungen an den Baustoff – von Baustoffklasse B1 zu B3 – die Werte der Verbrennungseffektivität zunehmen.

Die Werte der am Cone Calorimeter und am SBI ermittelten Verbrennungseffektivität und der entsprechende m-Faktor nach DIN 18230-3 werden in der Abbildung 36 zusammengefasst. Dargestellt wurden die Werte der Stoffe, für die Werte des m-Faktors bekannt sind. Mit in Abbildung 36 dargestellt sind die Werte der Standardabweichung. Die Ergebnisse aus der Abbildung 36 zeigen, dass kein direkter Zusammenhang zwischen dem m-Faktor und der Verbrennungseffektivität existiert. Dies wäre der Fall, wenn die in Abbildung 36 dargestellten Verbrennungseffektivitäten einer Diagonalen folgen würden. Dies trifft jedoch weder für die aus den Messungen am Cone Calorimeter noch für die aus den Messungen am SBI ermittelten Werte für die Verbrennungsef-

ektivität zu. Ursache dafür sind die in Abschnitt 2.2 beschriebenen unterschiedlichen Ansätze und Verfahren für die Verbrennungseffektivität und den m-Faktor.

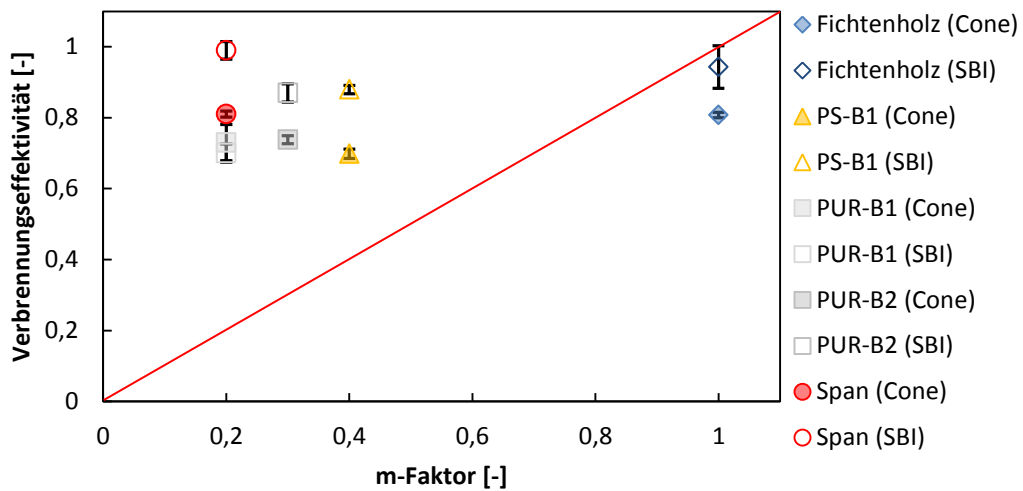


Abbildung 36: Gegenüberstellung der aus den Messungen am Cone Calorimeter und am SBI ermittelten Verbrennungseffektivitäten und des der DIN 18230-2 entsprechenden m-Faktors

In der Tabelle 6 werden die am Cone Calorimeter ermittelten Werte der Verbrennungseffektivität mit Werten aus der Literatur [30] und [35] verglichen. Das am SBI für MDF und n-Heptan Werte der Verbrennungseffektivität von größer als maximal 1,0 ermittelt wurden, sind Gründe dafür, dass für den Vergleich nur die mit dem Cone Calorimeter gemessenen Werte herangezogen wurden.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der am Cone Calorimeter ermittelten Werte der Verbrennungseffektivität mit Werten aus der Literatur

Stoff	Verbrennungseffektivität experimentell ermittelte Werte (Mittelwerte und Standardabweichung)	Verbrennungseffektivität nach [30]
Fichtenholz	0,81 ±0,015	0,69 bis 0,79
PS-B1	0,70 ±0,026	0,69
MDF	0,71	-
PUR-B1	0,73	-
PUR-B2	0,74 ±0,023	0,60 bis 0,88
PUR-B3	0,82	-
n-Heptan	0,96 ±0,003	0,91 [30] bis 0,93 [35]
Spanplatte	0,81	-

Für Fichtenholz, Polystyrol-B1, Polyurethan-Hartschaum (PUR-B2) und n-Heptan konnten Werte entsprechend [30] und [35] angegeben werden. Es wurden jeweils die für eine Stoffgruppe minimalen und maximalen Werte angegeben. Die am Cone Calorimeter ermittelten Werte der Verbrennungseffektivität konnten unter Berücksichtigung der Standardabweichung für die Stoffe Fichtenholz, PS-B1, PUR-B2 durch Werte aus der Literatur [30] bestätigt werden. Zum Beispiel werden entsprechend den Angaben in [30] Werte der Verbrennungseffektivität für Fichtenholz zwischen 0,69 und 0,79 und für Polyurethan zwischen 0,60 und 0,88 angegeben.

Für die Werte aus der Literatur [30] für die Verbrennungseffektivität von Holz ist zu berücksichtigen, dass der angegebene Wert von 0,69 einem Kiefer- und der Wert von 0,79 einem Douglasie-Holzbaustoff entspricht. Zwischen den beiden Werten der Verbrennungseffektivität wird Roteiche als Holzbaustoff angegeben. Für die ermittelte Verbrennungseffektivität von n-Heptan wurde, verglichen mit den Werten aus der Literatur [30], ein um 3% höherer Wert ermittelt.

In einem nächsten Schritt wurde anhand von Versuchsergebnissen aus den 70er Jahren zum m-Faktor [36] die rechnerische Brandbelastung  $q_R$  nach Gleichung (2-8) und Gleichung (2-1) sowie die Brandlastdichte (Fire Load Density -  $Q''$ ) nach Gleichung (2-4) ermittelt und gegenübergestellt.

Die Tabelle 7 fasst die in den 70er Jahren ermittelten Versuchsergebnisse [36] zur Berechnung des m-Faktors von PS-B1 (zwei Versuchsreihen von Polystyrol-Hartschaum B1; dicht gestapelt), PUR-B1 (Polyurethan-Hartschaum "Baymer", zwei Blöcke aufeinanderliegend) und PUR-B2 (zwei Versuchsreihen von PIR Polyisocyanurat-Hartschaumplatten; normal und dicht gestapelt) zusammen.

Tabelle 7: Versuchsergebnissen für den m-Faktor im 8 m<sup>3</sup>-Ofen von PS-B1 (Polystyrol-Hartschaum B1; dicht gestapelt), PUR-B1 (Polyurethan-Hartschaum "Baymer", zwei Blöcke aufeinanderliegend) und PUR-B2 (PIR Polyisocyanurat-Hartschaumplatten; dicht gestapelt) nach [36]

Stoff	$M_i$ [kg]	$H_{C_i}$ [kWh/kg]	$\Delta\theta$ [K]	$t$ [min]	$\frac{M_V \cdot H_{C_V}}{M_i \cdot H_{C_i}}$	$m_i$ [-]	$\bar{m}$ [-]	$k_t$ [-]	$M_V$ [kg]
PS-B1 (dicht gestapelt)	67	11	158	111	0,47	0,43	0,41	0,91	72,2
	60	11	145	124	0,45	0,38		0,84	61,9
PUR-B1 (zwei Blöcke aufeinanderliegend)	73	6,7	116	222	0,56	0,25	0,25	0,45	57,1
PUR-B2 (dicht gestapelt)	99	6,7	12	330	0,06	0,01	0,01	0,17	8,3
	98	6,7	7	325	0,03	0,01		0,33	4,1

Der Wert für  $M_V$  wurde nach Gleichung ( $M_V \cdot H_{C_V} / M_i \cdot H_{C_i}$ ) und der  $k_t$ -Wert nach Gleichung (2-5) ermittelt. Die Ergebnisse der Berechnung der rechnerischen Brandbelastung  $q_R$  nach Gleichung (2-8) und Gleichung (2-1) und der Brandlastdichte  $Q''$  nach Gleichung (2-4) auf der Grundlage der Werte aus Tabelle 7 und sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Zur Ermittlung der Brandlastdichte wurde die im Rahmen des Vorhabens ermittelte Verbrennungseffektivität nach Tabelle 6 verwendet.

Tabelle 8: Ergebnisse für die rechnerische Brandbelastung nach Gleichung (2-8) und nach Gleichung (2-1) sowie der Brandlastdichte nach Gleichung (2-4) mit  $A_B = 30 \text{ m}^2$

Stoff	Gleichung (2-8)	Gleichung (2-1)	Gleichung (2-4)
	$q_R = \frac{M_V \cdot H_{C_V} \cdot k_t}{A_B}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$q_{R,u} = \frac{\sum M_i \cdot H_{C_i} \cdot m_i}{A_B}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$Q'' = \frac{M_i \cdot H_{C_i} \cdot \chi_i}{A_B}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
PS-B1 (dicht gestapelt)	10,51	10,56	17,2
	8,32	8,36	15,4
PUR-B1 (zwei Blöcke aufeinanderliegend)	4,11	4,08	12,06
PUR-B2 (dicht gestapelt)	0,23	0,22	15,48
	0,22	0,22	15,32

Die Ergebnisse für die rechnerische Brandbelastung  $q_R$  und die Brandlastdichte  $Q''$  zeigen, dass die Berechnung der rechnerischen Brandbelastung mittels m-Faktor andere Werte zur Folge hat als die Berechnung der Brandlastdichte unter Anwendung der Verbrennungseffektivität. Den geringsten Wert der rechnerischen Brandbelastung mit ca. 0,2 kWh/m<sup>2</sup> liefert PUR-B2. Dieser liegt signifikant unter der berechneten Brandlastdichte  $Q''$ . Die Gegenüberstellung der Werte soll die Größenordnung der mit unterschiedlichen Ansätzen berechneten Werte für die rechnerische Brandbelastung und die Brandlastdichte veranschaulichen.

Wie zu erwarten stimmen die Ergebnisse der mit Gleichung (2-8) und mit Gleichung (2-1) ermittelten Werte überein. D.h. das mit Gleichung (2-8) die Berechnung der rechnerischen Brandbelastung eines Versuchsstoffes  $i$  in einem Brandraum auch über die Masse des Vergleichsstoffes, dem Heizwert des Vergleichsstoffes (Fichtenholz) sowie dem  $k_t$ -Wert des Versuchsstoffes gelingt.



Ergänzend zur Verbrennungseffektivität wurde der Wert der Fire-Growth-Rate (FIGRA-Wert) für die am Cone Calorimeter und am SBI durchgeführten Versuche ermittelt. Der FIGRA-Wert ergibt sich aus

$$FIGRA = 1000 \cdot \left( \frac{HRR_{max}}{t_{max}} \right). \quad (2-19)$$

- FIGRA* Fire Growth Rate [W/s]  
*HRR<sub>max</sub>* Maximalwert der Wärmefreisetzungsrate [kW]  
*t<sub>max</sub>* Zeit bis zum Erreichen von *HRR<sub>max</sub>* [s]

Analog zu dem im m-Faktor enthaltenen *k<sub>t</sub>*-Wert berücksichtigt der FIGRA-Wert die Dynamik des Brandes. Während der *k<sub>t</sub>*-Wert die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Temperatur in dem Vergleichsbauteil beschreibt, beschreibt der FIGRA-Wert die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate.

Die Abbildung 37 zeigt exemplarisch die Ergebnisse des FIGRA-Wertes von MDF am Cone Calorimeter und am SBI entsprechend Gleichung (2-19).

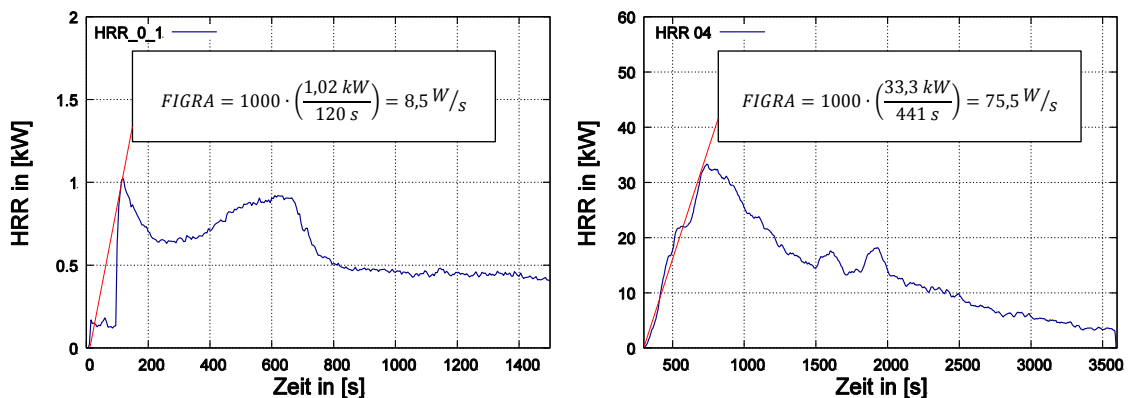


Abbildung 37: Ergebnisse des FIGRA-Wertes von MDF am Cone Calorimeter (links) und am SBI (rechts)

Die Ergebnisse für MDF in Abbildung 37 zeigen, dass am SBI signifikant höhere FIGRA-Werte als bei den Messungen am Cone Calorimeter erreicht werden. Weshalb am SBI Werte dieser Größenordnung erreicht werden, konnte noch nicht abschließend geklärt werden. Grundsätzlich werden für alle am SBI untersuchten Stoffe andere FIGRA-Werte erreicht als am Cone Calorimeter.

Die Abbildung 38 zeigt die am Cone Calorimeter bei unterschiedlichen Wärmestromdichten ermittelten FIGRA-Werte für die Stoffe Fichtenholz, PS-B1, PUR-B2 und Spanplatte.

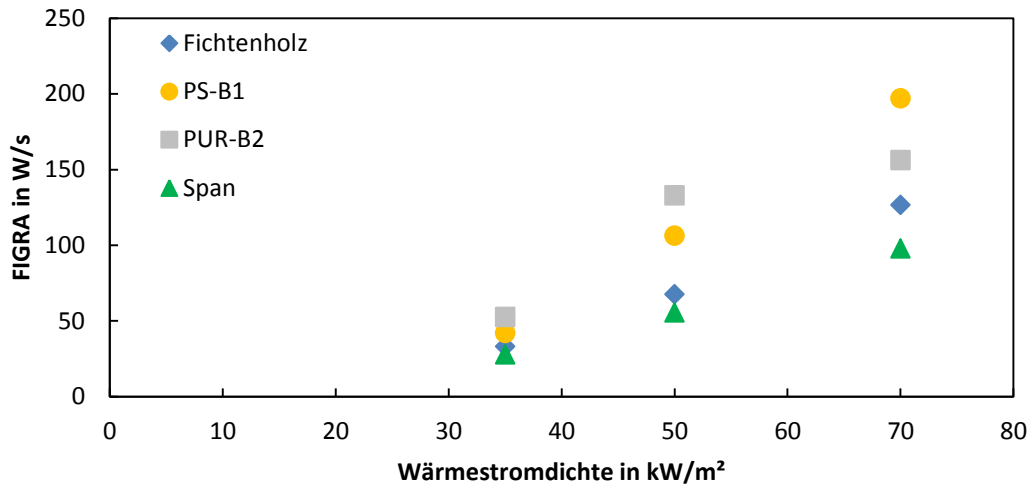


Abbildung 38: Ergebnisse der am Cone Calorimeter ermittelten FIGRA-Werte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte

Die Ergebnisse der Abbildung 38 zeigen, dass für die untersuchten Stoffe Fichtenholz, PS-B1, PUR-B2 und Spanplatte mit zunehmender Wärmestromdichte größere FIGRA-Werte erreicht werden. Bisher ließ sich noch kein Zusammenhang zwischen dem m-Faktor und den im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten Werten für die Wärmefreisetzungsrate, die Total Heat Release, die effektive Verbrennungswärme, die Verbrennungseffektivität, dem Heizwert und dem FIGRA-Wert erkennen. Der in Gleichung (2-1) enthaltene m-Faktor kann noch nicht ohne weitere Überlegungen durch die Verbrennungseffektivität ersetzt werden.

## 2.4 Erarbeitung einer Methode zur Brandlastberechnung mit der Verbrennungseffektivität (AP 4)

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens hat sich entsprechend bisheriger Erkenntnisse zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität als Grundlage für Brandlastberechnungen das Cone Calorimeter als geeignete Prüfapparatur erwiesen. Nachfolgende Abbildung 39 liefert einen Vorschlag wie die Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen (Brandlastdichte  $q$  bzw. Fire Load Density  $Q$ ) bestimmt werden kann. Die Abbildung 39 zeigt, welche Schritte dazu erforderlich sind. Mit der ermittelten Verbrennungseffektivität kann das unterschiedliche Abbrandverhalten von Brandlasten bewertet werden. Die Ermittlung der Verbrennungseffektivität erfolgt unter Anwendung der in der Abbildung 39 und in dem Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Vorgehensweise.

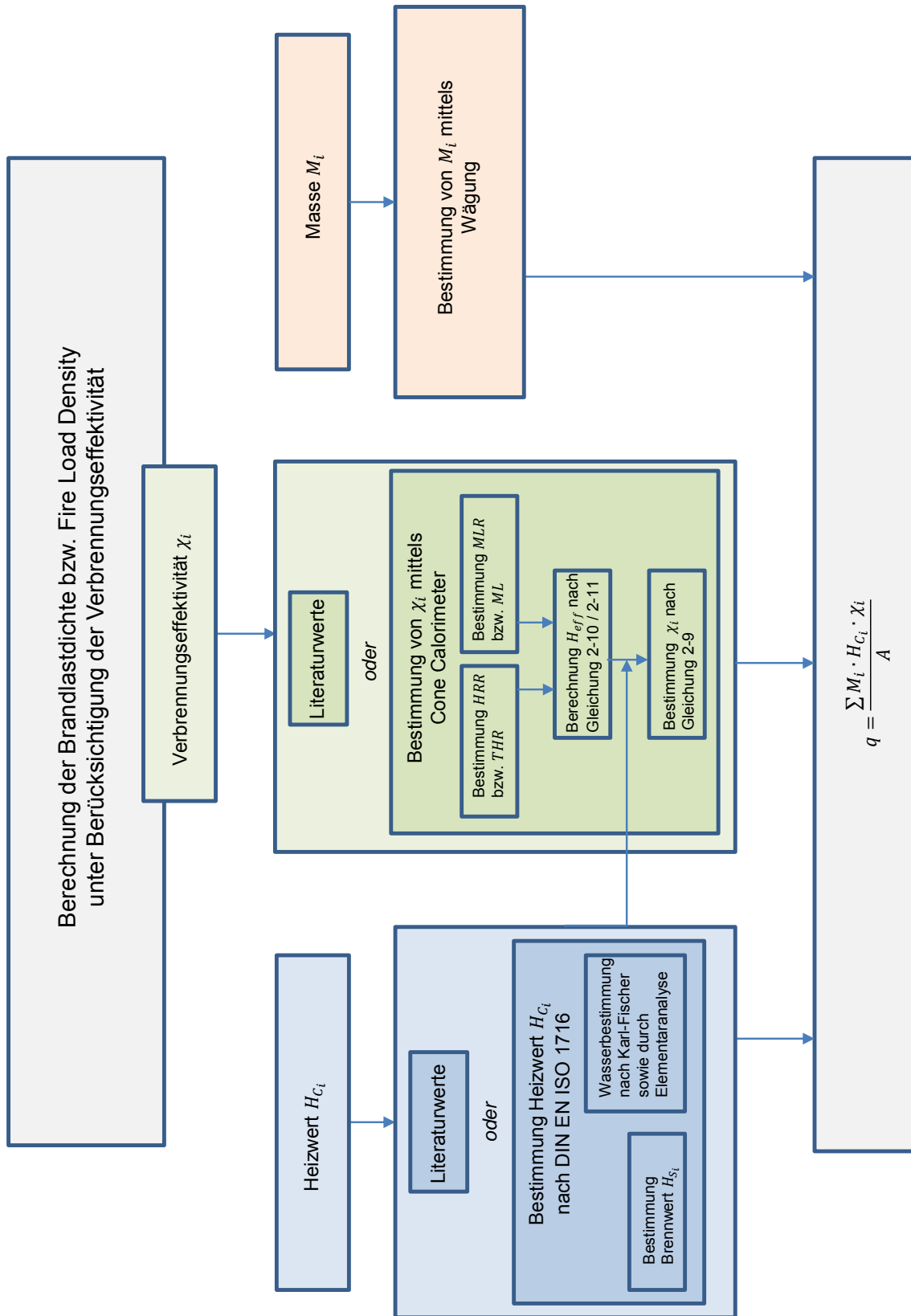


Abbildung 39: Vorschlag für die Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen

### 3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen. Brandlastberechnungen für Industriebauten werden in Deutschland entsprechend der DIN 18230 unter Anwendung des Abbrandfaktors  $m$  durchgeführt. Der Abbrandfaktor  $m$ , auch als  $m$ -Faktor bezeichnet, bewertet wie auch die Verbrennungseffektivität das Abbrandverhalten eines Stoffes. Allerdings unterliegen der  $m$ -Faktor und die Verbrennungseffektivität unterschiedlichen theoretischen Ansätzen. Weil die einzige in Deutschland verfügbare Prüfapparatur zur experimentellen Ermittlung von Abbrandfaktoren abgeschafft wurde, sollte geprüft werden, ob und in wie weit die Verbrennungseffektivität ergänzend zum  $m$ -Faktor für Brandlastberechnungen nach der DIN 18230 angewendet werden kann. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Ergebnisse in zwei Fachvorträgen und in einem Beitrag zu einem Tagungsband veröffentlicht<sup>1</sup>.

Für verschiedene Feststoffe (sägerauhes Fichtenholz, mitteldichte Holzfaserverplatte – MDF, Polystyrol – PS-B1, Polyurethan-Hartschaum – PUR-B1, PUR-B2, PUR-B3 und Spanplatte) und einer Flüssigkeit (n-Heptan) wurden experimentelle Untersuchungen zur Wärmefreisetzungsrates am Cone Calorimeter und am Single Burning Item Test (SBI) durchgeführt. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit wurden für jeden Stoff drei Versuche ausgeführt und die Standardabweichung ermittelt. Anhand der experimentell ermittelten Wärmefreisetzungsrates und dem Masseverlust wurde die effektive Verbrennungswärme bestimmt. Über das Verhältnis aus effektiver Verbrennungswärme zu Heizwert wurde die Verbrennungseffektivität für jeden untersuchten Stoff ermittelt. Der zur Berechnung der Verbrennungseffektivität erforderliche Heizwert wurde für jeden Stoff entsprechend der DIN EN ISO 1716 im Bombenkalorimeter experimentell ermittelt. Bezüglich der experimentell ermittelten Heizwerte wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit den in der DIN 18230-3 tabellierten Werten erreicht. Ergänzend zur effektiven Verbrennungswärme wurde an beiden Prüfapparaturen die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrates experimentell bestimmt. Dieser Wert wird mit der Fire-Growth-Rate (FIGRA-Wert) beschrieben.

Um den Einfluss des Energieeintrages auf das Abbrandverhalten von Stoffen zu untersuchen wurde am Cone Calorimeter die Wärmestromdichte an der Probenoberfläche ( $35 \text{ kW/m}^2$ ,  $50 \text{ kW/m}^2$  und  $70 \text{ kW/m}^2$  bzw.  $75 \text{ kW/m}^2$ ) und am SBI die Brennerleistung ( $33 \text{ kW}$  und  $51 \text{ kW}$ ) variiert. Grundsätzlich hatte für alle am Cone Calorimeter und im SBI untersuchten Stoffe – mit Ausnahme von PUR-B3 – die Variation des Energieeintrags eine Änderung der effektiven Verbrennungswärme und damit eine Änderung

---

<sup>1</sup> Siehe Tabelle 9 im Anhang des Abschlussberichtes

der Verbrennungseffektivität zur Folge. Die Ergebnisse der am Cone Calorimeter ermittelten FIRGA-Werte zeigen, dass für die untersuchten Stoffe Fichtenholz, PS-B1, PUR-B2 und Spanplatte mit zunehmender Wärmestromdichte an der Probenoberfläche größere FIGRA-Werte erreicht werden. Für alle am SBI untersuchten Stoffe werden andere FIGRA-Werte gemessen als am Cone Calorimeter. Dies zeigt sich auch bezüglich des Abbrandverhaltens der Stoffe. In Einzelfällen können sich die Werte um eine Größenordnung unterscheiden.

Für die Verbrennungseffektivität werden am SBI – mit Ausnahme von PUR-B1 – größere Werte ermittelt als bei den Messungen am Cone Calorimeter. Ob dies auf den Einfluss der unterschiedlichen Abmessungen der Prüfapparaturen zurückzuführen ist, konnte nicht geklärt werden. Ebenfalls nicht geklärt werden konnte, weshalb am SBI für MDF und n-Heptan Werte der Verbrennungseffektivität von größer als maximal 1,0 ermittelt werden. Dies sind Gründe dafür, dass für die Ermittlung der Verbrennungseffektivität nur die mit dem Cone Calorimeter gemessenen Werte herangezogen wurden.

Die Ergebnisse der Verbrennungseffektivität zeigen am Beispiel Polyurethan-Hartschaum, dass mit geringer werdenden Anforderungen an den Baustoff – von Baustoffklasse B1 zu B3 – die Werte der Verbrennungseffektivität zunehmen. Ob das auch für andere Baustoffe zutrifft, bedarf weitere Untersuchungen.

Für die Verbrennungseffektivität sind in der Literatur für Fichtenholz Werte von 0,69 bis 0,79, für Polyurethan Werte von 0,60 bis 0,88, für PS-B1 ein Wert von 0,69 und n-Heptan Werte von 0,91 bis 0,93 angegeben. Für die Verbrennungseffektivität wurde aus Messungen für Fichtenholz:  $0,81 \pm 0,015$ , für PUR-B2:  $0,74 \pm 0,023$ , für PS-B1:  $0,70 \pm 0,026$  und für n-Heptan:  $0,96 \pm 0,003$  ermittelt. Die für die Verbrennungseffektivität durch Messungen ermittelten Werte bestätigen die in der Literatur bekannten Werte, welche in der Praxis zur Ermittlung der Brandlastdichte herangezogen werden.

Die Werte der Verbrennungseffektivität werden zur Bewertung von Brandlasten im Zusammenhang mit der in Abschnitt 2.1 beschriebenen internationalen Vorgehensweise und zur Ermittlung der Brandlastdichte nach DIN EN 1991-1-2/NA herangezogen. Im Ergebnis des Forschungsvorhabens hat sich entsprechend bisheriger Erkenntnisse zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität als Grundlage für Brandlastberechnungen das Cone Calorimeter als geeignete Prüfapparatur erwiesen (Abschnitt 2.4).

Die Untersuchungsergebnisse reichen nicht aus, einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem m-Faktor und der Verbrennungseffektivität herzuleiten. Der m-Faktor ist ein dimensionsloser Beiwert, der den Temperatur-Zeit-Verlauf im Vergleichsbau teil bei Abbrand eines Stoffes oder Stoffgemisches unter Bezug auf Fichtenholz bewertet. Der m-Faktor wird durch Form, Verteilung, Lagerungsdichte und Feuchte beeinflusst. Auch die Verbrennungseffektivität wird durch diese Faktoren beeinflusst und beschreibt damit den tatsächlichen Energieumsatz von Stoffen. Das Cone Calorimeter, welches zur messtechnischen Ermittlung der Verbrennungseffektivität herange-

zogen wurde ist nicht geeignet den Temperatur-Zeit-Verlauf im Vergleichsbauteil zu bestimmen. Im Ergebnisse der Forschung besteht kein einfacher mathematisch physikalischer Zusammenhang zwischen dem m-Faktor und der Verbrennungseffektivität.

Um die Verbrennungseffektivität auf das Verfahren der DIN 18230-1 anwenden zu können, ist deshalb nach funktionellen Zusammenhängen zwischen der Wärmefreisetzungsrate und den Temperatur-Zeit-Verläufen im Vergleichsbauteil bei Abbrand von Stoffen zu suchen. Dies ist erforderlich um auch das Abbrandverhalten von neu entwickelten Stoffen bewerten zu können.

Um zukünftig die Verbrennungseffektivität auf das Verfahren der DIN 18230-1 anwenden zu können, sind im Ergebnis der Forschung nunmehr folgende Untersuchungen noch erforderlich:

- Experimentelle Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate unter Verwendung des Cone Calorimeters für weitere Stoffe und Berechnung der Verbrennungseffektivität
- Erstellung eines Berechnungsmodells zur Nachbildung des 8 m<sup>3</sup>-Ofen (m-Faktor-Ofen) zur Simulation der Temperatur-Zeit-Verläufe im Vergleichsbauteil bei Abbrand von Stoffen
- Überprüfung der simulierten Ergebnisse mit auf Messergebnissen beruhenden Werten des m-Faktors
- Bei hinreichender Übereinstimmung der Simulierten und auf Messung beruhenden Werten des m-Faktors, Ermittlung des funktionellen Zusammenhangs.

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN 18230-1 – Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Berlin, Mai 1998
- [2] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau. März 2000.
- [3] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz. 2.Auflage, Werner Verlag 2009
- [4] DIN 18230-2 – Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 2: Ermittlung des Abbrandverhaltens von Materialien in Lageranordnung – Werte für den Abbrandfaktor m. Berlin, Januar 1999
- [5] DIN EN 1991-1-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Berlin, Dezember 2010
- [6] Karlsson, B., Quintiere, J. G.: Enclosure Fire Dynamics. Boca Raton: CRC Press, 2000
- [7] Schneider, U.: Bewertung des unterschiedlichen Abbrandverhaltens von Stoffen bei natürlichen Bränden – Beitrag zum Berechnungsverfahren nach DIN 18230 E, August 1975
- [8] DIN 18230-3 – Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 3: Rechenwerte. Berlin, August 2002
- [9] Di Nenno, P. J., Drysdale, D. et al.: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, National Fire Protection Engineering Press, 2002
- [10] DIN EN ISO 1716 – Prüfung zum Brandverhalten von Produkten – Bestimmung der Verbrennungswärme (des Brennwertes). Berlin, November 2010
- [11] DIN 4102-2 – Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 2: Bauteile – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin, September 1977
- [12] ISO 834 – Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements; Amendment 1. Genf, CH: International Organization for Standardization, 2012
- [13] Schneider, U.: Stand der Beratungen zum Abbrandfaktor m nach DIN 18230 Teil 2. TU Wien, September 1992
- [14] Klingelhöfer, H. G.: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung der Brandlasten in Industriebauten – Bewertungsfaktor „m“ DIN 18230; Abschlussbericht. Juni 1972
- [15] Schneider, U., Lebeda, C.: Bewertung des Abbrandverhaltens von Stoffen und Lagergütern. vfdb-Zeitschrift 3/98, S. 100-113
- [16] Ueberall, T.: Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen. April 1988

- [17] Ueberall T.: Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen – Teil 1. August 1991
- [18] Hosser, D.: Zur Übertragbarkeit von m-Faktoren nach DIN 18230-2 auf reale Brandsituationen. Positionspier für den NABau-Arbeitsausschuss „m-Faktor“. August 1992
- [19] Ueberal, T., Schneider, U., Kersken-Bradley, M., Max, U.: Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen. Zusammenfassender Abschlussbericht. Februar 1992
- [20] Dobbernack, R.: Zur praxisgerechten Ermittlung des Abbrandfaktors m für reale Brandgutanordnung. Positionspapier für den NABau-Arbeitsausschuss „m-Faktor“. 1994
- [21] Blume, G. W.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten, Dissertation. Juni 2002
- [22] DIN 51900-1 – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter und Berechnung des Heizwertes; Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren. Berlin, April 2000
- [23] DIN EN ISO 13943 – Brandschutz-Vokabular. Berlin. Februar 2011
- [24] ISO 5660-1 – Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate; Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). Genf, CH: International Organization for Standardization, 2002
- [25] DIN EN 13823 – Prüfung zum Brandverhalten von Bauprodukten: Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennbaren Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen. Berlin, Juni 2002
- [26] ISO 9705 – Fire tests – Full-scale room test for surface products. Genf, CH: International Organization for Standardization, 1996
- [27] Schneider, U.: Über die Umrechnung von natürlichen Bränden auf die Brandbeanspruchung nach DIN 4102. Zentralblatt für Industriebau, 19. Jahrgang, Heft 1, C.R. Vincentz Verlag Hannover 1973
- [28] DIN 4102-2 – Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Teil 2: Bauteile – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin, September 1977
- [29] Tewarson, A.: Flame Retardant Polymeric Materials (M. Lewin, ed.), Plenum, New York 1982
- [30] Fouad, N. A.: Bauphysik Kalender 2011. Schwerpunkt Brandschutz. Ernst & Sohn 2011
- [31] ISO 139 – Textiles - Standard atmospheres for conditioning and testing. Textilien - Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung. Second edition, January 2005
- [32] DIN EN 13238 – Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Konditionierungsverfahren und allgemeine Regeln für die Auswahl von Trägerplatten; Deutsche Fassung EN 13238:2010, Juni 2010



- [33] Dietenberger, M.: Effect on Backing Board on the Heat release Rate of Wood. Proceeding of the twenty-eight International Conference on Fire Safety, Columbus, USA, Juli 1999
- [34] Quintiere, J.G.: Fundamentals of Fire Phenomena, John Wiley & Sons, Ltd, 2006
- [35] Tewarson, A.: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association Press, 2002
- [36] Klingelhöfer, H. G.: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung der Brandlasten in Industriebauten – Bewertungsfaktor “m” DIN 18230 – Abschlussbericht – Auswertung.07.06.1972

## Anhang

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Ergebnisse in zwei Fachvorträgen und in einem Beitrag zu einem Tagungsband veröffentlicht.

Tabelle 9: Fachvorträge und Beitrag zu einem Tagungsband

---

Publikation	Veranstaltung	Thema
Fachvortrag	Doktorandentag am Lehrstuhl Anlagentechnik und Anlagensicherheit. Magdeburg, 14. Dezember 2012	Ist die Verbrennungseffektivität eine alternative Kenngröße zum Abbrandfaktor $m$ für die Brandlastberechnung nach DIN 18230? <sup>2</sup>
Fachvortrag	Magdeburger Brand- und explosionschutztag 21. und 22. März 2013	Untersuchungen zur Verbrennungseffektivität als Grundlage für Brandlastberechnungen der DIN 18230. <sup>2</sup>
Beitrag in einem Tagungsband	Magdeburger Brand- und explosionschutztag 21. und 22. März 2013	Experimentelle Untersuchungen zur Verbrennungseffektivität als Grundlage für Brandlastberechnungen der DIN 18230. <sup>2</sup>

---

---

<sup>2</sup> Autoren: Christian Kusche, Christian Knaust, Ulrich Krause