

BBSR-  
Online-Publikation  
34/2021

# Konkretisierung von Auswertekriterien zur Berechnung der Verbrennungseffektivität

Autoren

Jochen Zehfuß  
Lukas Gößwein



# Konkretisierung von Auswertekriterien zur Berechnung der Verbrennungseffektivität

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.48

Projektlaufzeit: 02.2019–07.2020

## Impressum

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
Felix Lauffer  
felix.lauffer@bbr.bund.de

### Autoren

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz – Fachgebiet Brandschutz  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß (Projektleitung)  
j.zehfuss@ibmb.tu-bs.de

Lukas Gößwein  
l.goesswein@ibmb.tu-bs.de

### Stand

Juni 2021

### Bildnachweis

Titelbild: Lukas Gößwein  
Fotos Innenteil: Lukas Gößwein

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Zehfuß, Jochen; Gößwein, Lukas: Konkretisierung von Auswertekriterien zur Berechnung der Verbrennungseffektivität.  
BBSR-Online-Publikation 34/2021, Bonn, November 2021.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	6
1.2	Vorgehensweise	6
1.3	Forschungsteam	7
<b>2</b>	<b>Verwendete Unterlagen</b>	<b>8</b>
2.1	Fachbücher und Publikationen	8
2.2	Normen	9
<b>3</b>	<b>Ergebnisse der Literaturstudie</b>	<b>10</b>
3.1	Allgemeines	10
3.2	Auswertekriterien	10
3.3	Auswahl Auswertekriterien	19
3.4	Zusammenstellung von Verbrennungseffektivitäten	21
<b>4</b>	<b>Untersuchte Gegenstände und Materialien</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Beschreibung der Kleinversuche mit dem Cone-Kalorimeter</b>	<b>24</b>
5.1	Allgemeines	24
5.2	Entzündungszeitpunkte	25
5.3	Bildschirm	26
5.4	Kleidung	27
5.5	Laptop	28
5.6	Matratze	29
5.7	Wasserkocher	30
5.8	PVC-Bodenbelag	31
5.9	Teppich	31
5.10	Laminat	32
<b>6</b>	<b>Beschreibung der Großversuche unter der Haube des Room-Corner Prüfstandes</b>	<b>33</b>
6.1	Allgemeines	33
6.2	Versuchsaufbau und Beflammung der Alltagsgegenstände	34
6.3	Versuchsaufbau und Beflammung der Bodenbeläge	35
6.4	Entzündungszeitpunkte	37
6.5	Bildschirm	38
6.6	Kleidung	39
6.7	Laptop	41
6.8	Matratze	42
6.9	Wasserkocher	45
6.10	PVC-Bodenbelag	47
6.11	Teppich	48
6.12	Laminat	52
<b>7</b>	<b>Ergebnisse – Ermittelte Verbrennungseffektivitäten</b>	<b>55</b>
7.1	Allgemeines	55
7.2	Effektive Verbrennungswärme $H_{c,eff}$	55

7.3	VE aus Cone-Kalorimeter-Versuchen	57
7.4	VE aus den Großversuchen	60
7.5	VE aus Mittelwerten mehrerer Auswertekriterien	62
7.6	VE in Abhängigkeit der Zeit	64
<b>8</b>	<b>Fazit und Empfehlung der Auswahl von Auswertekriterien</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>71</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Verbrennungseffektivität  $\chi$  (kurz auch VE) ist wesentlicher, direkter Faktor zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate und der Brandlastdichte bei Anwendung der Eurocode-Brand-schutznachweise. Weder in EN 1991-1-2 (Eurocode 1 Teile 1-2) [21], noch in anderen Normen wird ein Berechnungsverfahren für  $\chi$  angegeben. Es wird lediglich ein fester Zahlenwert je Stoffgruppe (fest, flüssig, gasförmig) angegeben. Dieses Forschungsvorhaben dient der Erlangung eines besseren Verständnisses der Brandentstehungsphase und der Berechenbarkeit der Verbrennungseffektivität.

Die im Wohnungsbau vorhandenen und im Bauwesen verwendeten Materialien haben sich in den letzten Jahren beziehungsweise Jahrzehnten deutlich gewandelt. Wo früher zum Beispiel Vollholz verwendet wurde, wird heutzutage zunehmend auf Fertigteile und Kunststoffe in Holzoptik gesetzt. Der Einfluss veränderter Brandlasten auf das Brandgeschehen bleibt dabei weitestgehend unbetrachtet. Das Brandrisiko hat sich dementsprechend verändert und es bedarf einer systematischen Erforschung, um eine aussagekräftige Basis für Berechnungen liefern zu können.

## 1.2 Vorgehensweise

Zur Umsetzung der Ziele sind folgende Bearbeitungsschritte durchgeführt worden. Sie entsprechen den sechs Arbeitspaketen (kurz AP), in die das Forschungsvorhaben gegliedert ist.

- Durchführung einer umfangreichen Literaturstudie. Der Schwerpunkt lag dabei auf Veröffentlichungen der letzten 10 Jahre. Inhaltlich wurde sowohl nach Ausführungen über Kriterien für die Bestimmung der Verbrennungseffektivität als auch nach Werten für ebensolche recherchiert. (AP1)
- Sammlung beziehungsweise Definition von unterschiedlichen Auswertekriterien. Dies war notwendig, da derzeit weder in Eurocode 1 Teil 1-2 noch in einer anderen Norm ein Berechnungsverfahren für die Verbrennungseffektivität angegeben ist (AP2).
- Auswahl zu untersuchender Materialien beziehungsweise Gegenstände. Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigten, dass es wenige experimentelle Untersuchungen zu inhomogen aufgebauten Gegenständen wie Elektrogeräten gibt. Der Fokus verschob sich entsprechend weg von Baustoffen wie zum Beispiel Dämmstoffen hin zu zeitgemäßen Produkten moderner Wohnungseinrichtungen. Inspiriert durch [5] wurden diese Alltagsgegenständen durch die Auswahl dreier Bodenbeläge ergänzt. (Teil von AP3 und AP4)

- Experimentelle Untersuchungen im Labormaßstab: Bestimmung von Wärmefreisetzungsraten und Massenverlustraten von typischen Einrichtungsmaterialien mit dem Cone-Kalorimeter. Die hier gewonnenen Erkenntnisse stellten nicht nur den ersten Teil der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens dar, sondern flossen als Zwischenergebnisse auch in die Konzeptionierung der anschließenden Großversuche. Insbesondere dienten sie als Anhaltspunkt bei der Festlegung der Brennerleistungen. So konnten Brennerleistungen gewählt werden, von denen anzunehmen war, dass sie in einem guten Verhältnis zu den voraussichtlichen Wärmefreisetzungsraten stehen würden. (AP3)
- Durchführung realmaßstäblicher Brandversuche an typischen Einrichtungsgegenständen in Wohnungen unter der Abzugshaube des Room-Corner Kalorimeters. Untersuchung von Maßstabeffekten beim Vergleich von Klein- und Großversuchen. Die zu überprüfende Arbeitshypothese lautete, dass für beide Maßstäbe sehr ähnliche Verbrennungseffektivitäten erwartet wurden. Dies begründete sich insbesondere durch die gewählte Vorbereitungsart der Cone-Kalorimeter-Proben sowie die in beiden Fällen vorherrschenden, identischen Ventilationsbedingungen. In beiden Versuchsmaßstäben wurde ein vollständig ventilierter Brand sichergestellt. (AP4)
- Bestimmung von Verbrennungseffektivitäten aus den experimentell gewonnenen Daten. Anwendung und Vergleich einer Vielzahl unterschiedlicher Auswertekriterien. (AP5)
- Aussprechen einer Empfehlung bezüglich der Auswertekriterien.

### 1.3 Forschungsteam

Dieses Forschungsvorhaben wurde durch das Fachgebiet Brandschutz des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (kurz iBMB) der Technischen Universität in Braunschweig bearbeitet. Das Fachgebiet Brandschutz wird von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß geleitet. Maßgeblich bearbeitet wurde das Forschungsvorhaben von Herrn Lukas Gößwein. Ebenfalls involviert waren Herr Dr.-Ing. Olaf Riese sowie Herr Christian Northe. Durch den fachlichen Austausch innerhalb des Fachgebiets haben aber auch Anregungen und Ideen der anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fachgebietes zum erfolgreichen Abschluss des Vorhabens beigetragen. Ebenfalls beteiligt waren die Herren Patrick Wulfert und David Kellermann. Sie haben insbesondere durch die Vorbereitung der Proben für das Cone-Kalorimeter sowie der Unterstützung beim Aufbau und der Durchführung der Großversuche den praktischen Teil dieses Abschlussberichts erst möglich gemacht. Die Materialprüfanstalt für das Bauwesen in Braunschweig (MPA BS) wurde mit der Bestimmung der Brennwerte der einzelnen Proben beauftragt. Die Elementaranalysen wurden durch ein externes Labor durchgeführt. Brennwert und Elementaranalyse sind Voraussetzung zur Berechnung des Heizwertes  $H_i$ .

## 2 Verwendete Unterlagen

### 2.1 Fachbücher und Publikationen

- [1] Blume, G.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf der Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten. Dissertation, TU Braunschweig, 2002.
- [2] Hahn, S.-K.: Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Verbrennungseffizienzfaktors von Feststoffen. Dissertation, Universität Magdeburg, 2016
- [3] Zehfuß, J. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht vfdB TB 04-01, Altenberge, Braunschweig, 4. Auflage, 2020.
- [4] iBMB: Qualitätssicherung gewerblich genutzter Saunaräume - Verbesserung des Brandschutzes bei gewerblich genutzten Saunaräumen. InnoNet – Verbundprojekt, Förderkennzeichen 16IN0067, 2005.
- [5] Johansson, P., Axelsson, J., Hertzberg, T.: The influence of floor materials in room fires. Brandforsk project 300-061. SP Technical Research Institute of Sweden, SP Report 2007:29, Borås, 2007. ISBN: 978-91-85533-89-3.
- [6] Knaust, C.; Amecke-Mönnighoff, S.: Entwicklung eines Verfahrens zur Brandlastberechnung unter Anwendung der Verbrennungseffektivität und unter Berücksichtigung des Temperatur-Zeit-Verlaufs. ZukunftBau/BBSR Forschungsvorhaben, Abschlussbericht, 2017.
- [7] Knaust, C.; Kusche, C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen. ZukunftBau/BBSR Forschungsvorhaben, Abschlussbericht, 2014.
- [8] Köhler, J., Klein, J., Fontana, M.: Die Erhebung von Brandlasten in 95 Industrie- und Gewerbebauten. Ernst und Sohn Verlag, Bauphysik, Heft 6, S.360-367, Berlin, 2006. DOI: 10.1002/bapi.200610038.
- [9] Kusche, C.; Knaust, C.; Krause, U.: Ermittlung von Verbrennungseffizienzen für Feststoffe. 5. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, 2017.
- [10] Quintiere, J.-G.; Lyon, R. E.; Crowley, S. B: An exercise in obtaining flame radiation fraction from the cone calorimeter. Fire and Materials, 40, Seiten 861-872, 2016.
- [11] Tiemann, K.: Ermittlung der Verbrennungseffektivität unterschiedlicher Holzarten. Masterarbeit, TU Braunschweig, 2017.
- [12] Will, J.: Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden. Dissertation, TU Braunschweig, 2005.

- [13] Yuan, M.; Chen, B.; Li, C.; Zhang, J.; Lu, S.: Analysis of the combustion efficiencies and heat release rates of pool fires in ceiling vented compartments. *Procedia Engineering*, 62, Seiten 275-282, 2013.

## 2.2 Normen

- [14] DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Mai 1998.
- [15] DIN EN 13823: Prüfung zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Deutsche Fassung EN 13823:2010, Dezember 2010.
- [16] DIN EN 14390: Brandverhalten von Bauprodukten – Referenzversuch im Realmaßstab an Oberflächenprodukten in einem Raum; Deutsche Fassung EN 14390:2007, April 2007.
- [17] International Organization for Standardization: ISO 5660-1 – Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement), third edition, 2015-03-15.
- [18] International Organization for Standardization: ISO 5660-2 – Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement), first edition, 2002-12-15.
- [19] International Organization for Standardization: ISO 9705-1:2016 – Reaction to fire tests -- Room corner test for wall and ceiling lining products -- Part 1: Test method for a small room configuration.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13823:2019-02 – Prüfung zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Deutsche und Englische Fassung prEN 13823:2018.
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 1991-1-2:2010-12 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2020 + AC:2009.

## 3 Ergebnisse der Literaturstudie

### 3.1 Allgemeines

Der Schwerpunkt der durchgeführten Literaturstudie lag auf Veröffentlichungen der letzten 10 Jahre. Es wurde eine Vielzahl an Dissertationen, Abschlussarbeiten und anderer Veröffentlichungen in einschlägigen Zeitschriften zusammengetragen. Inhaltlich wurde sowohl nach Ausführungen über Kriterien für die Bestimmung der Verbrennungseffektivität als auch nach Werten für ebensolche recherchiert.

### 3.2 Auswertekriterien

Im Rahmen der durchgeführten Literaturrecherche wurden zunächst verschiedene Kriterien zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität gesammelt. Tabelle 3-1 stellt die Kriterien mit den korrespondierenden Formelzeichen übersichtlich dar. Da in unterschiedlichen Quellen identische Kriterien teilweise unterschiedliche Indizes tragen, kann die Tabelle auch als Bezeichnungshilfe dienen.

Die Unterschiede zwischen den Kriterien begründen sich in den meisten Fällen in den zeitlichen Bezügen der Eingangsparameter Wärmefreisetzungsrates (englisch Heat Release Rate, kurz HRR) und Massenverlustrate (englisch Mass Lost Rate, kurz MLR). Entscheidende Zeitpunkte neben Beginn und Ende eines Versuches sind unter anderem der Entzündungszeitpunkt sowie bestimmte prozentuale Massenverluste (zum Beispiel der 10 %ige bis 90 %ige Massenverlust) oder Zeitspannen (zum Beispiel 0 s bis 180 s) [2]. Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien aus Tabelle 3-1 genauer erläutert.

Tabelle 3-1: Kriterien zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität

Index	HRR	MLR	Sonstiges / Bemerkung	Referenz
EHC	Gesamtsumme	Gesamtsumme	Intervallbetrachtung (kurz IB)	[1], [2], [7], [9]
HRR,mean*	Gesamtmittelwert	Gesamtmittelwert	identisch zu EHC, IB	[2]
HRR,mean	Gesamtmittelwert	Mittelwert 10 % MV bis 90 % MV	IB	[2], [11]
HRR,10-90	Mittelwert 10 % MV bis 90 % MV	Mittelwert 10 % MV bis 90 % MV	IB	[2]
HRR,180s	Mittelwert Zündung bis 180 s	Mittelwert Zündung bis 180 s	IB	[2]
VBP	Mittelwert über Vollbrandphase	Mittelwert über Vollbrandphase	IB	[9]
60%,VBP	Zum Zeitpunkt nach 60 % der VBP	Zum Zeitpunkt nach 60 % der VBP	Zeitpunkt Betrachtung (kurz ZB)	[11]
IGN	Zeitpunkt Entzündung	Zeitpunkt Entzündung	ZB	[11]
$\dot{Q},\text{max}$	Maximum	Zum Zeitpunkt größter HRR	ZB	[11]
$\dot{m},\text{max}$	Zum Zeitpunkt größter MLR	Maximum	ZB	[11]
FL (Fuel Load)	-	-	Brennstoffbelastung, IB	[2]
CH	-	-	Chemische Verbrennungswärme	[2]
SP	-	-	Rauchpunkt	[2]

Die in der Literatur gängigste Variante der Definition der Verbrennungseffektivität legt diese als Quotient aus effektiver Verbrennungswärme  $H_{c,eff}$  (englisch Effective Heat of Combustion, kurz EHC) und Heizwert  $H_i$  entsprechend Gleichung (1) fest. Sie kann unter anderem in [1], [2], [7] und [9] gefunden werden.

$$\chi_{EHC} = \frac{H_{c,eff}}{H_i} \quad (1)$$

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

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

Die effektive Verbrennungswärme  $H_{c,eff}$  beschreibt die insgesamt freigesetzte Wärme  $Q$  bezogen auf die insgesamt verbrauchte Stoffmenge  $m$  (Gleichung (2)). Es handelt sich nicht um eine konstante Stoffkenngröße. Die unterschiedlichen Randbedingungen, wie zum Beispiel die Ventilationsbedingungen oder die Materialfeuchte, haben bei der experimentellen Bestimmung von  $H_{c,eff}$  maßgebenden Einfluss. Die effektive Verbrennungswärme kann durch kalorimetrische Messungen zum Beispiel im Cone-Kalorimeter (Labormaßstab, [17] [18]), nach dem Single Burning Item Verfahren (Zwischenmaßstab, [20]) oder in Room Corner Versuchen (Realmaßstab, [19]) bestimmt werden. [9]

$$H_{c,eff} = \frac{Q}{m} \quad (2)$$

$Q$  insgesamt freigesetzte Wärme [kJ]

$m$  insgesamt verbrauchte Stoffmenge [kg]

Eine Vielzahl weiterer Bestimmungskriterien können in [2] gefunden werden. Neben dem in der Literatur weit verbreiteten Kriterium der effektiven Verbrennungswärme, das weiter oben bereits vorgestellt wurde, kann auch die Brennstoffbeladung (englisch Fuel Load, kurz FL) herangezogen werden. Dabei bleibt der Massenverlust infolge Verbrennung zu Gunsten der Probenmasse  $m_s$  zu Versuchsbeginn unberücksichtigt (siehe Gleichung (3)).

$$\chi_{FL} = \frac{q}{H_i} = \frac{Q}{m_s \cdot H_i} \quad (3)$$

$q$  Brennstoffbeladung [kJ/kg]

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

$Q$  insgesamt freigesetzte Wärme [kJ]

$m_s$  Masse der Probe bei Versuchsbeginn [kg]

Als Vorteile dieses Kriteriums nennt Hahn zum einen die Massenbestimmung zu Testbeginn. Diese kann, anders als die Massenverlustrate, ohne Unsicherheiten bei kontrollier- und reproduzierbaren Laborrandbedingungen durchgeführt werden. Zum anderen werden auch unverbrannte Materialrückstände berücksichtigt. Diese resultieren in einer geringeren Verbrennungseffektivität. Auf Energieebene betrachtet, bezieht sich  $\chi_{FL}$  auf die insgesamt freigesetzte Wärme (englisch Total Heat Released, kurz THR). [2]

Zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität aus Wärmefreisetzungsraten werden in [2] weitere Gleichungen angegeben. Diese unterscheiden sich im Allgemeinen durch den Zeitraum, für den die mittlere Wärmefreisetzungsraten ermittelt wird.

Gleichung (4) definiert die Verbrennungseffektivität als Verhältnis des Mittelwerts der Wärmefreisetzungsraten und des 10 %igen bis 90 %igen Massenverlustes. Zu beachten ist dabei, dass im Nenner der mittlere Massenverlust über den Zeitraum des 10 %igen bis 90 %igen Massenverlustes steht. Wird sowohl für die Wärmefreisetzungsraten als auch den Massenverlust der jeweilige Gesamtmittelwert betrachtet ( $\chi_{HRR,mean*}$ , Gleichung (5)) entspricht das der Verbrennungseffektivität  $\chi_{EHC}$  nach Gleichung (1).

$$\chi_{HRR,mean} = \frac{\dot{Q}_{mean}}{\dot{m}_{10-90} \cdot H_i} \quad (4)$$

$\dot{Q}_{mean}$  Gesamtmittelwert Wärmefreisetzungsraten [kW]

$\dot{m}_{10-90}$  mittlere Massenverlustrate über den Zeitraum des 10 %igen bis 90 %igen Massenverlustes [kg/s]

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

$$\chi_{HRR,mean*} = \frac{\dot{Q}_{mean}}{\dot{m}_{mean} \cdot H_i} = \frac{H_{c,eff}}{H_i} = \chi_{EHC} \quad (5)$$

$\dot{Q}_{mean}$  Gesamtmittelwert Wärmefreisetzungsraten [kW]

$\dot{m}_{mean}$  Gesamtmittelwert Massenverlustrate [kg/s]

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

Wird sowohl die Massenverlustrate als auch die Wärmefreisetzungsraten über den Zeitraum des 10 %igen bis 90 %igen Massenverlustes gemittelt, berechnet sich die Verbrennungseffektivität nach Gleichung (6).

$$\chi_{\text{HRR},10-90} = \frac{\dot{Q}_{10-90}}{\dot{m}_{10-90} \cdot H_i} \quad (6)$$

$\dot{Q}_{10-90}$  mittlere Wärmefreisetzungsrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts [kW]

$\dot{m}_{10-90}$  mittlere Massenverlustrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts [kg/s]

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

Für die vierte Variante basierend auf der Wärmefreisetzungsrate (Gleichung (7)) wird jeweils der Mittelwert der ersten 180 Sekunden der Wärmefreisetzungsrate sowie des Massenverlustes ins Verhältnis gesetzt. Beginn der Zeitspanne ist dabei der Entzündungszeitpunkt. Die Unsicherheit bei dieser Variante besteht darin, dass der Zeitpunkt der Entzündung nicht immer exakt auszumachen ist, sondern im subjektiven Ermessen der Versuchsdurchführenden liegt.

Neben der Zeitspanne von 180 Sekunden ab der Entzündung, können für dieses Kriterium auch andere Zeitspannen herangezogen werden. In der Literatur findet man insbesondere die Werte 60 Sekunden und 300 Sekunden. Der Index wird entsprechend angepasst. [12]

$$\chi_{\text{HRR},180s} = \frac{\dot{Q}_{180s}}{\dot{m}_{180s} \cdot H_i} \quad (7)$$

$\dot{Q}_{180s}$  mittlere Wärmefreisetzungsrate von der Entzündung bis 180 s danach [kW]

$\dot{m}_{180s}$  mittlere Massenverlustrate von der Entzündung bis 180 s danach [kg/s]

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

Ein empirischer Ansatz zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität basiert auf dem Auswerten des Rauchpunkts (englisch Smoke Point, kurz SP). Dieser ist als größte Höhe definiert, die eine rauchlose Flamme erreicht. Verbrennungseffektivitäten  $\chi_{\text{SP}}$  können für Rauchpunkte von  $L_{\text{sp}} = 0$  cm bis  $L_{\text{sp}} = 4$  cm wie folgt berechnet werden (Gleichung (8)). [2] Beispiele für über den Rauchpunkt ermittelte Verbrennungseffektivitäten können [2] entnommen werden.

$$\chi_{\text{SP}} = 1,15 \cdot L_{\text{SP}}^{0,10} \quad (8)$$

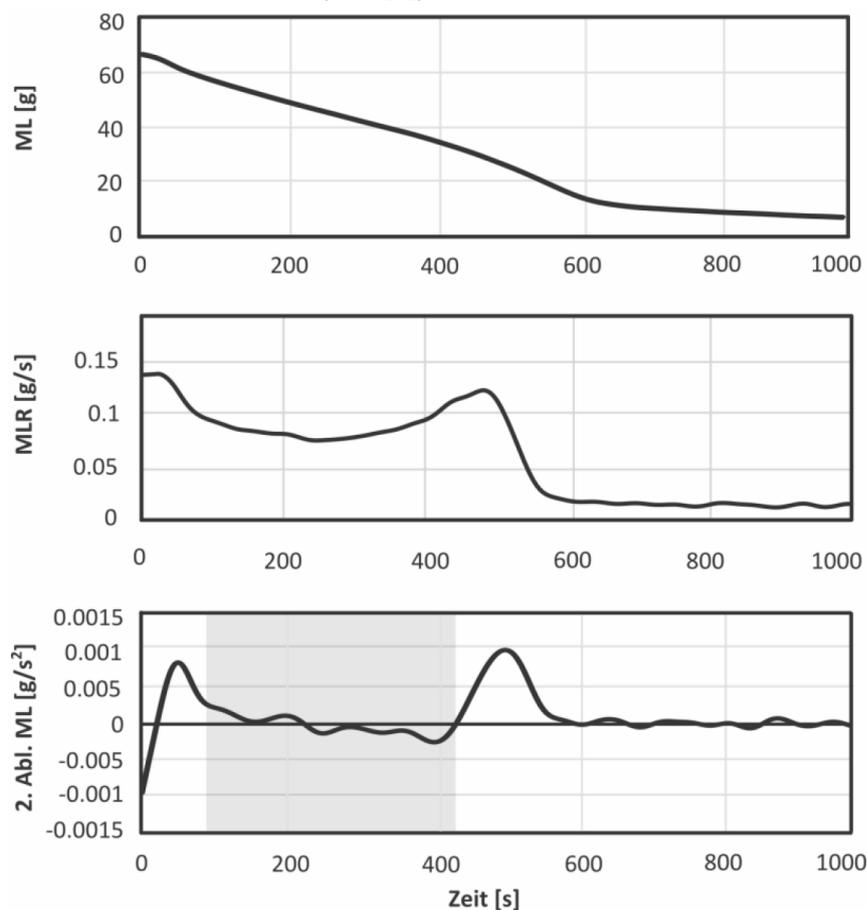
$L_{\text{SP}}$  Rauchpunkt [m]

Betrachtet man Verbrennungen auf reaktionsstöchiometrischer Ebene, können Verbrennungseffektivitäten ( $\chi_{\text{CH}}$ ) basierend auf der chemischen Verbrennungswärme bestimmt werden. Für

die dafür notwendige Auswertung von Reaktionsgleichungen muss jedoch die genaue chemische Zusammensetzung des Brennmaterials bekannt sein. Dies ist oft nicht der Fall. Außerdem berücksichtigen Betrachtungen auf chemischer Ebene weder die Verteilung eines Brennstoffs im Raum, noch seine Form und das daraus resultierende makroskopische Abbrandverhalten. [11]

Kusche et al. beschreiben in [9] die Berechnung der Verbrennungseffektivität gemittelt über die Vollbrandphase (kurz VBP, Gleichung (9)). Dabei handelt es sich um einen Zeitraum mit geringen Änderungen in der Branddynamik und dementsprechend mit einem homogenen Brandverlauf. Brandentstehungs- und Abklingphase werden nicht berücksichtigt. Die Vollbrandphase wird über die zweite Ableitung des Massenverlusts definiert. Sie befindet sich zwischen zwei Maximalwerten, die auf Wendepunkte in der Massenverlustrate hinweisen. [9] In Abbildung 3-1 ist der Massenverlust und seine zweite Ableitung sowie die Massenverlustrate eines Cone-Kalorimeter-Versuches dargestellt. Untersucht wurde Fichtenholz bei einer Wärmestromdichte von  $70 \text{ kW/m}^2$ . Die Vollbrandphase ist grau hinterlegt.

Abbildung 3-1: Definition der VBP (grau hinterlegt) über die zweite Ableitung des Massenverlusts nach Kusche et al. (aus [9])



$$\chi_{VBP} = \frac{H_{c,VBP}}{H_i} \quad (9)$$

$H_{c,VBP}$  effektive Verbrennungswärme für die Vollbrandphase [kW]

$$H_{c,VBP} = \frac{\int_{t_{VBP,start}}^{t_{VBP,end}} \dot{Q}(t) dt}{\int_{t_{VBP,start}}^{t_{VBP,end}} \dot{m}(t) dt}$$

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

Neben den zuvor beschriebenen Kriterien beschreibt Tiemann in [11] weitere Möglichkeiten zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität. Ihre Besonderheit liegt darin, dass sie nicht auf Mittelwertbildung über einen vorgegebenen Zeitraum basieren. Stattdessen erfolgt die Auswertung punktuell zu einem einzelnen, definierten Zeitpunkt. Dabei handelt es sich um den Zeitpunkt

- der Entzündung Gleichung (10),
- der maximalen Wärmefreisetzungsrate Gleichung (11),
- der maximalen Massenverlustrate Gleichung (12),
- an dem 60 % der VBP vergangen sind Gleichung (13).

$$\chi_{IGN} = \frac{\dot{Q}_{IGN}}{\dot{m}_{IGN} \cdot H_i} \quad (10)$$

$$\chi_{\dot{Q},max} = \frac{\dot{Q}_{max}}{\dot{m}_{\dot{Q},max} \cdot H_i} \quad (11)$$

$$\chi_{\dot{m},max} = \frac{\dot{m}_{max}}{\dot{m}_{max} \cdot H_i} \quad (12)$$

$$\chi_{60\%,VBP} = \frac{\dot{Q}_{60\%,VBP}}{\dot{m}_{60\%,VBP} \cdot H_i} \quad (13)$$

$H_i$  Heizwert [kJ/kg]

$\dot{Q}_{IGN}$  Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt der Entzündung [kW]

$\dot{m}_{IGN}$  Massenverlustrate zum Zeitpunkt der Entzündung [kg/s]

$\dot{Q}_{max}$  maximale Wärmefreisetzungsrate [kW]

$\dot{m}_{\dot{Q},max}$  Massenverlustrate zum Zeitpunkt der max. Wärmefreisetzungsrate [kg/s]

$\dot{Q}_{60\%,VBP}$  Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt  $t_{60\%,VBP}$  [kW]

$\dot{m}_{60\%,VBP}$  Massenverlustrate zum Zeitpunkt  $t_{60\%,VBP}$  [kg/s]

$$t_{60\%,VBP} = (t_{Ende} - t_{IGN}) \cdot 0,6 + t_{IGN}$$

Analog zur Verbrennungseffektivität führt Will in [12] die relative Kohlendioxidausbeute  $\chi_{CO_2}$  auf. Diese wird entsprechend Gleichung (14) als Verhältnis der vorhandenen Kohlendioxidausbeute

zur maximal möglichen Kohlendioxidausbeute gebildet. Dieses Maximum entspricht der vollständigen Umwandlung des in einem Brennstoff enthaltenen Kohlenstoffs zu Kohlendioxid.

$$\chi_{\text{CO}_2} = \frac{Y_{\text{CO}_2}}{Y_{\text{CO}_2, \text{st\"ochiometrisch}}} \quad (14)$$

$\chi_{\text{CO}_2}$  relative Kohlendioxidausbeute [-]

$Y_{\text{CO}_2}$  tatsächliche Kohlendioxidausbeute [kg/kg]

$Y_{\text{CO}_2, \text{st\"ochiometrisch}}$  maximal mögliche Kohlendioxidausbeute [kg/kg]

Die Versuchsergebnisse aus [12] zeigen gute bis sehr gute Übereinstimmung der relativen Kohlendioxidausbeute mit der Verbrennungseffektivität für das untersuchte PE-Granulat sowie Glykol.

Auch die Bestimmung der Verbrennungseffektivität aus mehreren Kriterien ist möglich. In [11] wird ein Ansatz beschrieben, der sich bei der Bestimmung der Verbrennungseffektivität nicht nur auf ein einzelnes Auswertekriterium beschränkt. Stattdessen wird für ein untersuchtes Material ein Mittelwert aus den nach unterschiedlichen Kriterien bestimmten Werten gebildet. Berücksichtigt werden dabei die zehn Kriterien nach Tabelle 3-2, wenn für ein Material verwertbare Ergebnisse vorliegen.

*Tabelle 3-2: Übersicht über Anwendbarkeit der Auswertekriterien [11]*

Kriterium (Index)	Verwertbare Verbrennungseffektivitäten [%]
EHC	65
FL	97
HRR,mean	73
HRR,10-90	72
HRR,180s	74
VBP	68
IGN	8
$\dot{Q}_{, \text{max}}$	44
$\dot{m}_{, \text{max}}$	28
60%,VBP	43

Für die Bestimmung des verwendbaren Anteils der Verbrennungseffektivitäten je Kriterium (Tabelle 3-2) wurden insgesamt über 300 Cone-Kalorimeter-Versuche mit 23 verschiedenen Holz-

sorten ausgewertet. Die Versuche wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens [4] durchgeführt. Ein Wert der bestimmten Verbrennungseffektivität gilt dabei als verwertbar, wenn er zwischen Null und Eins liegt. Den Anteil der verwertbaren Verbrennungseffektivitäten je Kriterium kann der rechten Spalte in Tabelle 3-2 entnommen werden.

Tiemann [11] schließt, ausgehend von deren geringen verwertbaren Verbrennungseffektivitäten (Tabelle 3-2, rechte Spalte), die Kriterien IGN (8 %) und  $\dot{m}_{\text{max}}$  (28 %) aus. Das gute Ergebnis des 60%,VBP Kriteriums wird stark durch die Einzelergebnisse lediglich zwei der 23 Materialien begünstigt. Darum fließt dieses Kriterium auch nicht in die Mittelwertbildung nach Gleichung (15) ein. Ebenso ausgeschlossen werden die Kriterien HRR,mean (73 %) und HRR,180s (74 %). Sie sind zwar zu einem großen Teil verwertbar, weichen jedoch innerhalb jeder Holzart zu deutlich von den anderen Werten ab [11].

Damit verbleiben die folgenden fünf Kriterien:

- EHC
- FL
- HRR,10-90
- VBP
- $\dot{Q}_{\text{max}}$

Mit diesen wird nach [12] die Verbrennungseffektivität von zum Beispiel Thermoholz entsprechend Gleichung (15) berechnet.

$$\chi = \frac{\int_1^n \chi_n}{n} = \frac{\chi_{\text{EHC}} + \chi_{\text{FL}} + \chi_{\text{HRR,10-90}} + \chi_{\text{VBP}} + \chi_{\dot{Q}_{\text{max}}}}{5} = 0,6234 \quad (15)$$

Der Vorteil der Mittelwertbildung nach Gleichung (15) liegt in seiner Einfachheit. Die einzelnen Werte der unterschiedlichen Kriterien können in der Regel aus einem einzigen Datensatz an Versuchsergebnissen gewonnen werden. Es entsteht durch die Auswertung hinsichtlich mehrerer Kriterien kein großer Mehraufwand. Außerdem ermöglicht die Bildung des Mittelwerts die Berücksichtigung mehrerer Kriterien mit nur einem einzigen Zahlenwert. Der Vergleich verschiedener Materialien wird dadurch vereinfacht.

Die folgende Abbildung 3-2 zeigt die einzelnen Werte zu Gleichung (15) verteilt um den Mittelwert. Enthalten sind auch die Werte nach den Kriterien HRR,mean und HRR,180s. Diese wur-

den in [11] als Ausreißer eingestuft und nicht bei der Mittelwertbildung berücksichtigt. Die gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert ohne Ausreißer (5 Kriterien, Gl. (15)), die durchgezogene Linie den Mittelwert aller sieben dargestellter Werte.

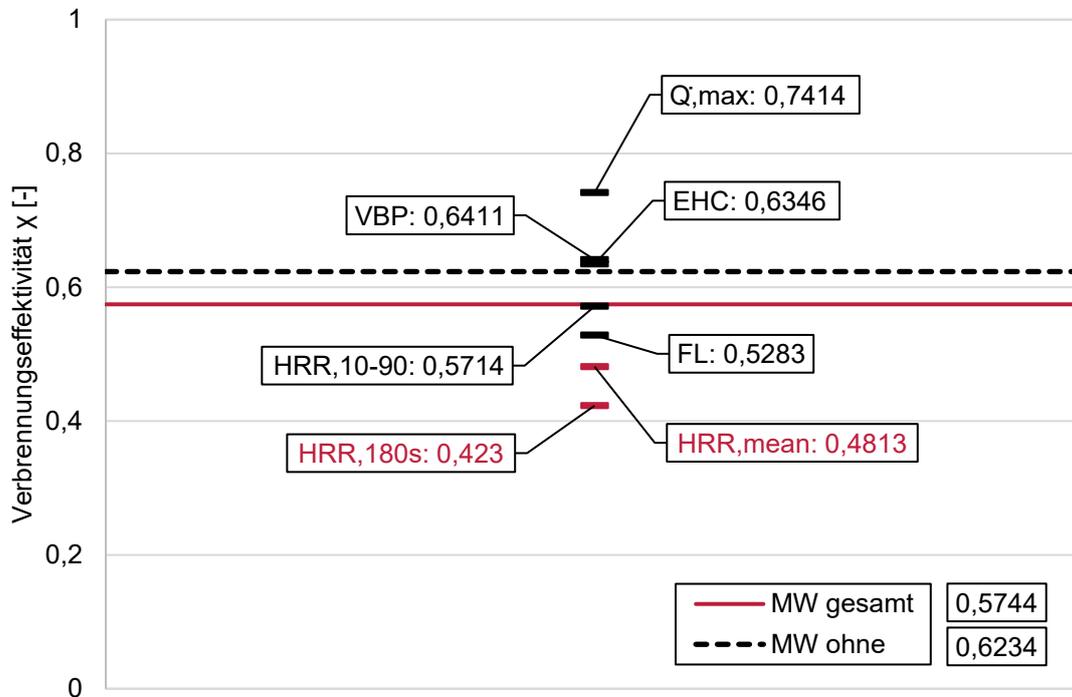


Abbildung 3-2: Bestimmung der Verbrennungseffektivität von Thermoholz als Mittelwert verschiedener Auswerteverfahren (nach [11])

### 3.3 Auswahl Auswertekriterien

Die Verbrennungseffektivität ist ein wesentlicher Faktor bei der Heißbemessung nach den Eurocode-Brandschutznachweise. Entsprechend ausschlaggebend ist die Wahl des Auswertekriteriums zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität. In Tabelle 3-3 sind die für die Auswertung im Rahmen dieses Vorhabens ausgewählten Kriterien aufgelistet.

Tabelle 3-3: Ausgewählte Kriterien zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität

Index	HRR	MLR	Sonstiges / Bemerkung
EHC	Gesamtmittelwert	Gesamtmittelwert	Intervallbetrachtung (kurz IB)
HRR,mean	Gesamtmittelwert	Mittelwert 10 % MV bis 90 % MV	IB
HRR,10-90	Mittelwert 10 % MV bis 90 % MV	Mittelwert 10 % MV bis 90 % MV	IB
HRR,...s	Mittelwert Zündung bis 60/180/300 s	Mittelwert Zündung bis 60/180/300 s	IB
FL (Fuel Load)	Gesamtsumme	-	Brennstoffbeladung, IB
IGN	Zeitpunkt Entzündung	Zeitpunkt Entzündung	Zeitpunktbetrach- tung (kurz ZB)
$\dot{Q},\text{max}$	Maximum	Zum Zeitpunkt größter HRR	ZB
$\dot{m},\text{max}$	Zum Zeitpunkt größter MLR	Maximum	ZB

Die Unterschiede zwischen den Kriterien begründen sich meist in den zeitlichen Bezügen der Eingangsparameter Wärmefreisetzungsrate und Massenverlustrate. Man unterscheidet dabei zwischen Intervallbetrachtung und Zeitpunktbetrachtung. Bei der Intervallbetrachtung wird die Verbrennungseffektivität aus der Division von Mittelwerten über einen definierten Bereich berechnet. Wichtige Zeitspannen sind

- die gesamte Versuchsdauer,
- die Dauer zwischen dem 10 %igem und 90 %igem Massenverlust und
- feste Zeitspannen ab der Entzündung (zum Beispiel 60 s, 180 s, 300 s).

Eine Sonderrolle bei der Intervallbetrachtung nimmt das Auswertekriterium der Brennstoffbeladung FL ein. Es bezieht sich auf die Probenmasse zu Versuchsbeginn anstatt auf den durch die Verbrennung eintretenden Massenverlust. Vergleiche auch Gleichung (3).

Für die Zeitpunktbetrachtung werden punktuelle, einzelne Werte zu wichtigen Zeitpunkten im Verlauf der Verbrennung herangezogen. Diese sind unter anderem

- der Entzündungszeitpunkt,
- der Zeitpunkt der maximalen Wärmefreisetzungsrate und
- der Zeitpunkt der maximalen Massenverlustrate.

Tabelle 3-4 enthält die Auswertekriterien, die im Rahmen der Literaturstudie gesammelt wurden, jedoch nicht bei der Auswertung dieses Vorhabens verwendet wurden. Für das Kriterium VBP sowie 60%,VBP muss eine Vollbrandphase definiert werden. Das in [9] beschriebene Verfahren dazu erwies sich als nicht praktikabel für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Daten. Die Kriterien CH und SP wurden ausgeschlossen, da sie auf weitere Eingangsparameter statt der Wärmefreisetzungsrate und der Massenverlustrate basieren.

Tabelle 3-4: Nicht berücksichtigte Kriterien zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität

Index	HRR	MLR	Sonstiges / Bemerkung
VBP	Mittelwert über VBP	Mittelwert über VBP	IB
60%,VBP	Zum Zeitpunkt nach 60 % der VBP	Zum Zeitpunkt nach 60 % der VBP	ZB
CH	-	-	Chemische Verbrennungswärme
SP	-	-	Rauchpunkt

### 3.4 Zusammenstellung von Verbrennungseffektivitäten

Neben der Recherche bezüglich der Auswertekriterien wurden auch Verbrennungseffektivitäten zusammengestellt, die zu unterschiedlichen Materialien veröffentlicht wurden. Die Literatur dazu wurde in die folgenden drei Kategorien eingeteilt.

- Kategorie 1 Angaben zur Verbrennungseffektivität
- Kategorie 2 Angaben zur Wärmefreisetzungsrate (oder zur insgesamt freigesetzten Wärme) sowie Massenverlustrate zur Berechnung der Verbrennungseffektivität
- Kategorie 3 Angaben zur Wärmefreisetzungsrate (oder zur insgesamt freigesetzten Wärme) oder Massenverlustrate, aber realistische Möglichkeit auf Nachfrage weitere Daten zu erhalten

*Da bereits für die ersten beiden Kategorien eine Vielzahl an Quellen gefunden wurde, wurde die gesammelte Literatur der dritten Kategorie nicht genauer ausgewertet. Im Folgenden sind ausgewählte Werte der ersten Kategorie tabellarisch dargestellt.*

*Tabelle 3-5: Ausgewählte Verbrennungseffektivitäten der gesammelten Literatur der Kategorie 1*

Material	Verbrennungseffektivität [-]	Kriterium	Prüfapparatur <sup>1</sup>	Quelle
R-B1	0,730	EHC	CK	[6]
Holz (MDF)	0,710	EHC	CK	[6]
PUR-B1	0,700	EHC	SBI	[7]
Holz (MDF)	1,080	EHC	SBI	[7]
Kabel <sup>2</sup>	0,600	HRR,mean	variiert <sup>2</sup>	[1]
Polystyrol (B1)	0,87 / 0,86 / 0,15 / 0,64 / 0,69	EHC / FL / HRR,mean / HRR,10-90 / HRR,180s	SBI	[2]
PVC	0,348	CH	-	[10]
Fichte	0,583	Mittelwert mehrerer Kriterien	CC	[11]

<sup>1</sup> CK = Cone-Kalorimeter [17][18], SBI = Single Burning Item [15]

<sup>2</sup> Mittlerer Wert unterschiedlicher Kabel (PE, PP, PVC, Silikon, etc.), kann im Einzelfall stark streuen [1]

## 4 Untersuchte Gegenstände und Materialien

Es wurden insgesamt acht Gegenstände beziehungsweise Materialien zur experimentellen Untersuchung ausgewählt. Diese können in zwei unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden: zum einen Alltagsgegenstände, die in beinahe allen Haushalten zu finden sind (Tabelle 4-1, Zeilen 1 bis 5), zum anderen handelsübliche Bodenbeläge (Tabelle 4-1, Zeilen 6 bis 8). In beiden Fällen lag der Fokus auf Produkten aus Kunststoff.

*Tabelle 4-1: Übersicht untersuchte Materialien bzw. Gegenstände (Herstellerangaben)*

Nr.	Bezeichnung	Abkürzung	Beschreibung
1	Bildschirm	Bil	Modern, 27 Zoll / 68,58 cm Bildschirmdiagonale, IPS Panel
2	Kleidung	Kle	T-Shirts, Jogginghosen, Sweatshirts; Mischgewebe, etwa 50 % Polyester & 50 % Baumwolle
3	Laptop	Lap	Ohne Akku
4	Matratze	PUR	Schaumstoffmatratze, 100 % Polyurethan, 200 cm x 100 cm x 12 cm, Raumgewicht (RG) 25 kg/m <sup>3</sup> , Stauchhärte (SH) 4 kPA
5	Wasserkocher	Was	900 Watt Leistung, 1 Liter Fassungsvermögen
6	PVC-Boden	PVC	Meterware von der Rolle, 2 m breit, handelsübliches Baumarktprodukt, 0,1 mm Nuttschicht, 0,55 mm Gesamtstärke
7	Teppich	Tep	Moderner Teppich, 100 % Polyester, Florhöhe ca. 25 mm
8	Laminat	Lam	Handelsübliches Baumarktprodukt, Nutzungsklasse NK 31, Trägerplatte: hochdichte Faserplatte

## 5 Beschreibung der Kleinversuche mit dem Cone-Kalorimeter

### 5.1 Allgemeines

Die Kleinversuche wurden mit einem Cone-Kalorimeter durchgeführt. Die Versuche erfolgten in Anlehnung an ISO 5660-1 [17] und ISO 5660-2 [18]. Die Probengröße betrug etwa 100 mm x 100 mm. Um die unterschiedlichen Dicken auszugleichen wurden unter einige Proben mit in Aluminiumfolie eingewickelte Stücke von Brandschutzplatten gelegt. Eine Kleidungsprobe bestand aus drei Lagen Textilien. Tabelle 5-1 enthält die durchschnittliche Masse und die eingestellten Wärmestromdichten (kurz WSD) zu allen Proben. Vor den Versuchen wurden die Materialien bei 23 °C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit bis zur Massenkonstanz getrocknet.

*Tabelle 5-1: Beschreibung der Cone-Kalorimeter Proben*

Nr.	Kürzel	Wärmestromdichten [kW/m <sup>2</sup> ]		durchschnittliche Masse [g]
1	Bil	30	50	131
2	Kle	15	30	7
3	Lap	30	50	237
4	PUR	15	30	14
5	Was	30	50	27
6	PVC	30	50	9
7	Tep	30	50	18
8	Lam	30	50	56

Die Proben wurden in Probenhaltern aus Stahl platziert. Um den Kanteneinfluss möglichst gering zu halten, wurden diese durch einen überstehenden Rand weitestgehend verdeckt. Die Probenhalter mit den Proben wurden horizontal unter dem konischen Heizer platziert. Der Abstand von der Probenoberfläche bis zur Unterkante des Heizers betrug 25 mm. Die Zündung der Proben erfolgte mittels eines Zündfunken. Als Zündkriterium wurde kontinuierliche Flammenerscheinung festgelegt. Nach Zündung wurde der Funken deaktiviert. Als Prüfbeginn wurde das Platzen der Probe unter dem konischen Heizer, als Prüfende das Erlöschen sichtbarer Flammenerscheinungen festgelegt.

Jedes Material wurde bei jeder Wärmestromdichte mindestens dreimal geprüft, um mögliche Messfehler zu minimieren. Im Wesentlichen erfolgten eine Messung der Wärmefreisetzungsrate mittels Sauerstoffverbrauchskalorimetrie sowie eine kontinuierliche Aufzeichnung der Masse.

## 5.2 Entzündungszeitpunkte

Der Zeitpunkt der Entzündung ist entscheidend für ein Auswertekriterium zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität (vergleiche Tabelle 3-1). Abbildung 5-1 zeigt die Entzündungszeitpunkte aller Cone-Kalorimeter-Versuche. Für jede Dreiergruppe eines Materials bei einer Wärmestromdichte ist der Mittelwert angegeben. In allen Fällen dauerte die Entzündung bei geringerer Wärmestromdichte wie erwartet länger. Der größte zeitliche Unterschied ist beim Laminat feststellbar ( $30 \text{ kW/m}^2 \rightarrow 143 \text{ s}$  und  $50 \text{ kW/m}^2 \rightarrow 38 \text{ s}$ ). Am dichtesten zusammen lagen die Entzündungen des PVC-Fußbodens ( $30 \text{ kW/m}^2 \rightarrow 15 \text{ s}$  und  $50 \text{ kW/m}^2 \rightarrow 7 \text{ s}$ ) und der Schaumstoffmatratze ( $15 \text{ kW/m}^2 \rightarrow 12 \text{ s}$  und  $30 \text{ kW/m}^2 \rightarrow 6 \text{ s}$ ).

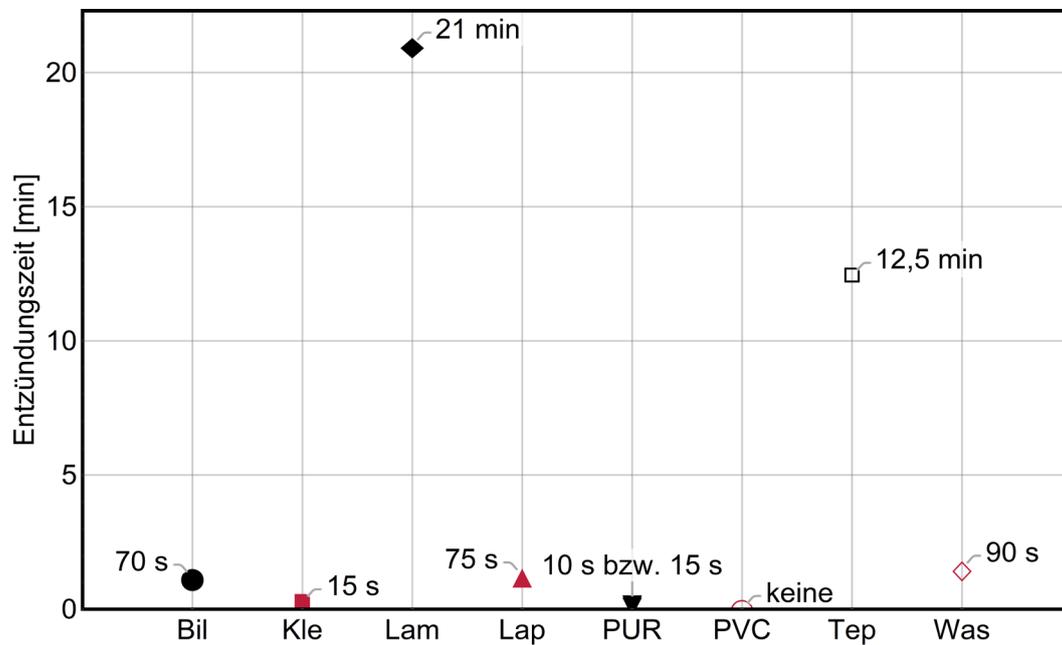


Abbildung 5-1: Entzündungszeitpunkte aller Cone-Kalorimeter-Versuche

### 5.3 Bildschirm



Abbildung 5-2: Vorder- und Rückseite des untersuchten Computerbildschirms, rote Sägekanten für die Probenherstellung

Abbildung 5-2 zeigt die Vorder- und Rückseite des untersuchten Computerbildschirms. Zur Herstellung der Cone-Kalorimeter-Proben wurde ein 100 mm breiter Streifen abgesägt (siehe rote Markierung) und anschließend in etwa 100 mm x 100 mm große Stücke zersägt. In Abbildung 5-3 ist eine Cone-Kalorimeter-Probe des Bildschirms im Probenhalter sowie in der Seitenansicht (Schnitt) dargestellt. Zwei der sechs Proben waren entsprechende Eckstücke mit Rand an zwei Seiten. Die vier restlichen Proben hatten Rand jeweils an einer Seite. Die Eckstücke wurden auf die beiden Wärmestromdichten aufgeteilt, um möglichst konsistente Ergebnisse zu erzielen.

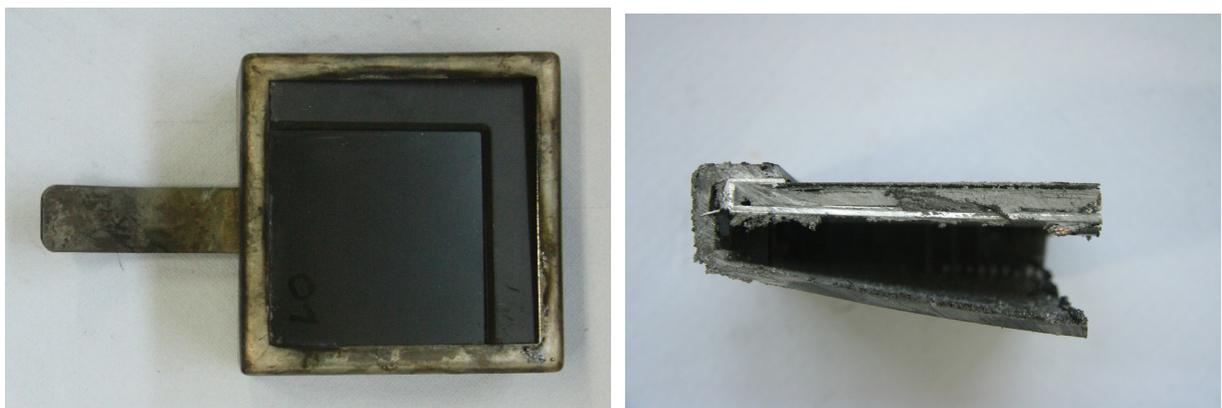


Abbildung 5-3: Eckstück des Bildschirms im Probenhalter (li.) sowie in der Seitenansicht (re.)

Für die Prüfungen des Bildschirms wurde der konische Heizer auf eine Wärmestromdichte von 30 kW/m<sup>2</sup> beziehungsweise 50 kW/m<sup>2</sup> eingestellt. Die Entzündungszeit lag im Durchschnitt bei 43 Sekunden (für 30 kW/m<sup>2</sup>) und 16 Sekunden (für 50 kW/m<sup>2</sup>).

## 5.4 Kleidung

Eine Kleidungsprobe für die Cone-Kalorimeter-Versuche bestand aus drei Lagen Textilien. Von oben (beflammt) nach unten wurden jeweils Stücke der Jogginghose, des T-Shirts und des Sweatshirts in den Probenhalter gelegt. Die unzerschnittenen Kleidungsstücke sind in Abbildung 6-7 zu sehen. Es wurde darauf geachtet, dass die Stücke jeweils mit der gleichen Seite (Innen- oder Außenseite) nach oben lagen und keine Nähte enthalten waren.



*Abbildung 5-4: Dreilagige Cone-Kalorimeter-Probe der Kleidung im Probenhalter*

Die Entzündungszeit lag im Durchschnitt bei 10 Sekunden für  $30 \text{ kW/m}^2$  und 67 Sekunden für  $15 \text{ kW/m}^2$ . Alle Kleidungsstücke bestanden aus einem Mischgewebe von etwa 50 % Baumwolle und 50 % Polyester.

## 5.5 Laptop

Abbildung 5-5 zeigt die Vorderseite des untersuchten Laptops. Zur Herstellung der Cone-Kalorimeter-Proben wurde zwei 100 mm breiter Streifen abgesägt (siehe rote Markierung) und anschließend in etwa 100 mm x 100 mm große Stücke zersägt. Dabei wurde der Bereich des Akku und des DVD-Laufwerks ausgespart. Die Probekörper 01, 02 und 03 wurden bei 50 kW/m<sup>2</sup> geprüft, die Probekörper 04, 05 und 06 bei 30 kW/m<sup>2</sup>. Die Zuordnung der Nummerierung ist in Abbildung 5-5 (re.) zu sehen.

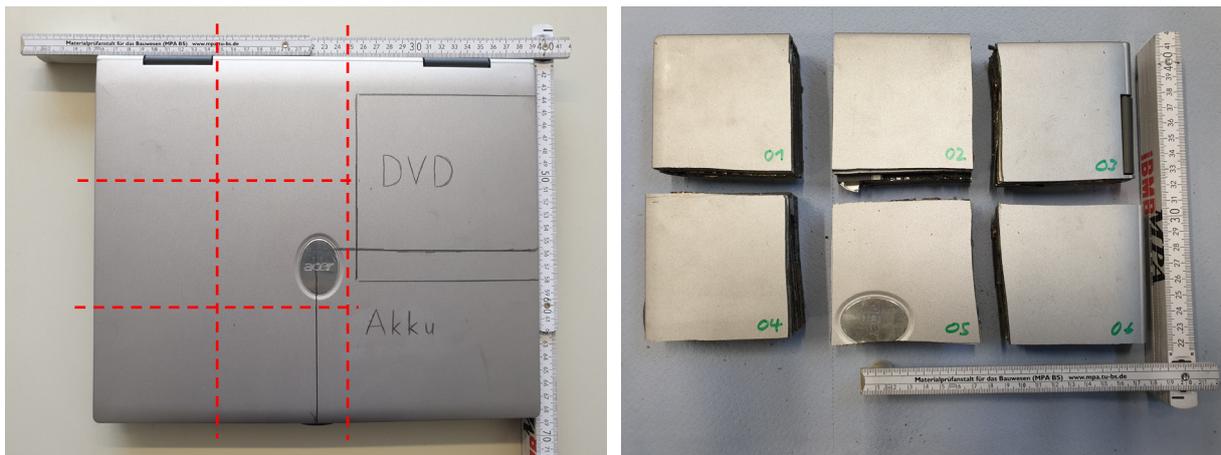


Abbildung 5-5: Vorderseite des untersuchten Laptops mit roten Sägekanten (li.), Cone-Kalorimeter-Proben des Laptops (re.)

In Abbildung 5-6 ist eine Cone-Kalorimeter-Probe des Laptops im Probenhalter dargestellt. Die Entzündungszeit lag im Durchschnitt bei 33 Sekunden (für 50 kW/m<sup>2</sup>) und 66 Sekunden (für 30 kW/m<sup>2</sup>).



Abbildung 5-6: Cone-Kalorimeter-Probe des Laptops im Probenhalter

## 5.6 Matratze

Die untersuchten Matratzen bestanden vollständig aus aufgeschäumten PUR. Das Raumgewicht betrug laut Hersteller  $25 \text{ kg/m}^3$ , die Stauchhärte  $4 \text{ kPa}$ . Die Matratzen wurden als schadstoffgeprüft nach ÖkoTex-Standard 100 bezeichnet. Die bei der Lieferung vakuumverpackten Matratzen wurden zunächst für mehrere Wochen offen liegen gelassen. Danach hatten sie annähernd ihre angegebenen Maße von  $200 \times 100 \times 12 \text{ cm}^3$  erreicht.

Die Herstellung der Cone-Kalorimeter-Proben erfolgte mittels heißem Draht. Es wurden etwa  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  große Stücke abgeschnitten. Diese wurden auf eine Dicke von  $60 \text{ mm}$  halbiert. Alle Proben lagen mit der Schnittfläche nach unten, so dass die unbearbeitete Außenseite durch den konischen Heizer beaufschlagt wurde. Abbildung 5-7 zeigt eine PUR-Probe im Probenhalter. Die Entzündungszeit lag für beide Wärmestromdichten dicht beieinander ( $7 \text{ Sekunden}$  für  $30 \text{ kW/m}^2$  und  $15 \text{ Sekunden}$  für  $15 \text{ kW/m}^2$ ).



*Abbildung 5-7: Cone-Kalorimeter-Probe der PUR-Matratze im Probenhalter*

## 5.7 Wasserkocher

Die untersuchten Wasserkocher waren handelsübliche Geräte mit einem Fassungsvermögen von einem Liter. Die maximale Heizleistung der Kocher betrug 900 W. Aufgrund der ovalen Bauform und der Größe konnten aus einem Wasserkocher nur zwei Cone-Kalorimeter-Proben gewonnen werden. Abbildung 5-8 (li.) zeigt einen Wasserkocher und den Bereich aus dem die Probe herausgesägt wurde (rot markiert). Abbildung 5-8 (re.) zeigt eine Cone-Kalorimeter-Probe des Kochers im Probenhalter. Die Entzündungszeit lag im Durchschnitt bei 17 Sekunden (für 50 kW/m<sup>2</sup>) und 79 Sekunden (für 30 kW/m<sup>2</sup>).



Abbildung 5-8: Ansicht eines Wasserkochers mit Sägekanten (li.), Cone-Kalorimeter-Probe des Wasserkochers im Probenhalter (re.)

## 5.8 PVC-Bodenbelag

Der PVC-Boden wurde als Meterware auf der Rolle geliefert. Von dieser wurden 100 mm x 100 mm große Stücke abgeschnitten. Die Gesamtstärke des Materials betrug laut Herstellerangaben 0,55 mm, die Stärke der Nutzschicht 0,10 mm. Der PVC-Boden sei als „schwer-entflammbar“ klassifiziert. Die Entzündungszeit lag im Durchschnitt bei 7 Sekunden (für 50 kW/m<sup>2</sup>) und 15 Sekunden (für 30 kW/m<sup>2</sup>).

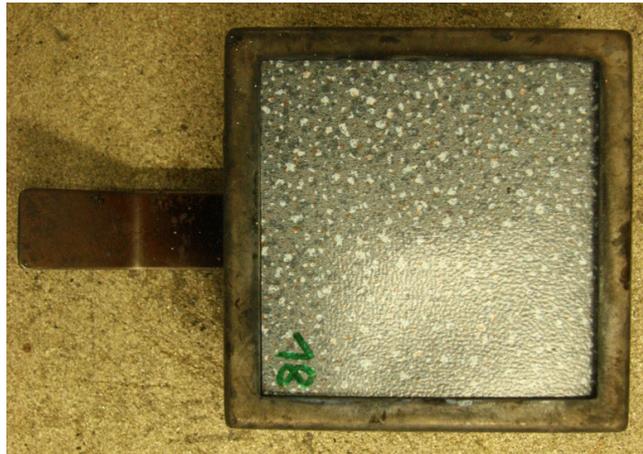


Abbildung 5-9: Cone-Kalorimeter-Probe des PVC-Bodens im Probenhalter

## 5.9 Teppich

Der Teppich mit einer Größe von 160 cm x 230 cm besteht laut Herstellerangaben aus 100 % Polyester (PES). Das Polgewicht beträgt 1.900 g/m<sup>2</sup>. Die Florhöhe/Stärke beträgt circa 25 mm. Um einen Einfluss des umgenähten Randes auf das Versuchsergebnis auszuschließen, wurde dieser entfernt. Die 100 mm x 100 mm großen Cone-Kalorimeter-Proben entsprechen Ausschnitten aus der Mitte eines Teppichs. Die Entzündungszeit lag im Durchschnitt bei 36 Sekunden (für 50 kW/m<sup>2</sup>) und 117 Sekunden (für 30 kW/m<sup>2</sup>).

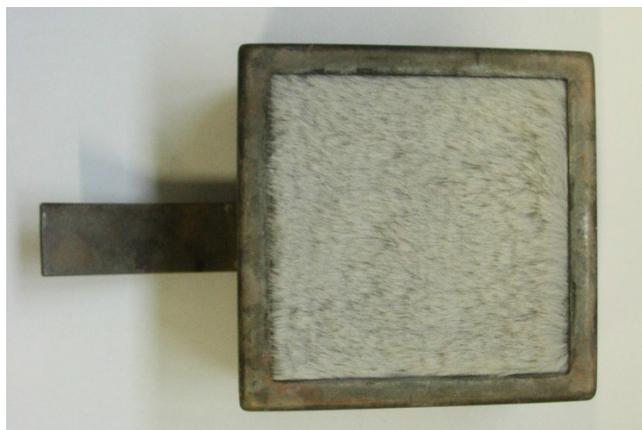


Abbildung 5-10: Cone-Kalorimeter-Probe des Teppichs im Probenhalter

## 5.10 Laminat

Wie beim Teppich wurden auch beim Laminat die Cone-Kalorimeter-Proben so hergestellt, dass die 100 mm x 100 mm großen Stücke keinen Rand der ursprünglichen Laminatdiele aufweisen. Das untersuchte Laminat war aus der Nutzungsklasse 31. Als Trägerplatte kam eine hochdichte Faserplatte zum Einsatz. Die Entzündungszeit lag im Durchschnitt bei 38 Sekunden (für 50 kW/m<sup>2</sup>) und 143 Sekunden (für 30 kW/m<sup>2</sup>).



*Abbildung 5-11: Cone-Kalorimeter-Probe des Laminats im Probenhalter*

## 6 Beschreibung der Großversuche unter der Haube des Room-Corner Prüfstandes

### 6.1 Allgemeines

Die Großversuche fanden unter der Haube des Room-Corner Prüfstandes des iBMB der TU Braunschweig statt. Der grundlegende Versuchsaufbau war bei allen durchgeführten Versuchen identisch. Als Unterkonstruktion diente eine 2 m mal 2 m große Stahlwanne. Der Wannenrand war etwa 30 cm hoch. Die Wanne stand auf einem Wägesystem bestehend aus drei Wägezellen. Die Auflösung der Waage betrug 100 g. Alle Messdaten wurden mit einer Frequenz von 0,2 Hz aufgezeichnet.

Als Zündinitial kam ein 30 cm mal 30 cm großer Kiesbettbrenner zum Einsatz. Die eingestellten Brennerleistungen können der Tabelle 6-1 entnommen werden. Die Kalibrierung der Haube und weiteren Messtechnik erfolgte gemäß [15]. Die für die Versuche eingestellten Brennerleistungen können den Auswertungsabschnitten (6.5 bis 6.12) entnommen werden. Die Beflammung der Alltagsgegenstände erfolgte direkt von unten, siehe Abschnitt 6.2. Die Beflammung der Bodenbeläge erfolgte indirekt über einen „Reflexionstisch“. Dieser wird in Abschnitt 6.3 genauer beschrieben. In allen Fällen lief der Brenner von Versuchsbeginn bis Versuchsende kontinuierlich. Nur für den PVC-Boden erfolgte eine Erhöhung der Leistung während des Versuches.

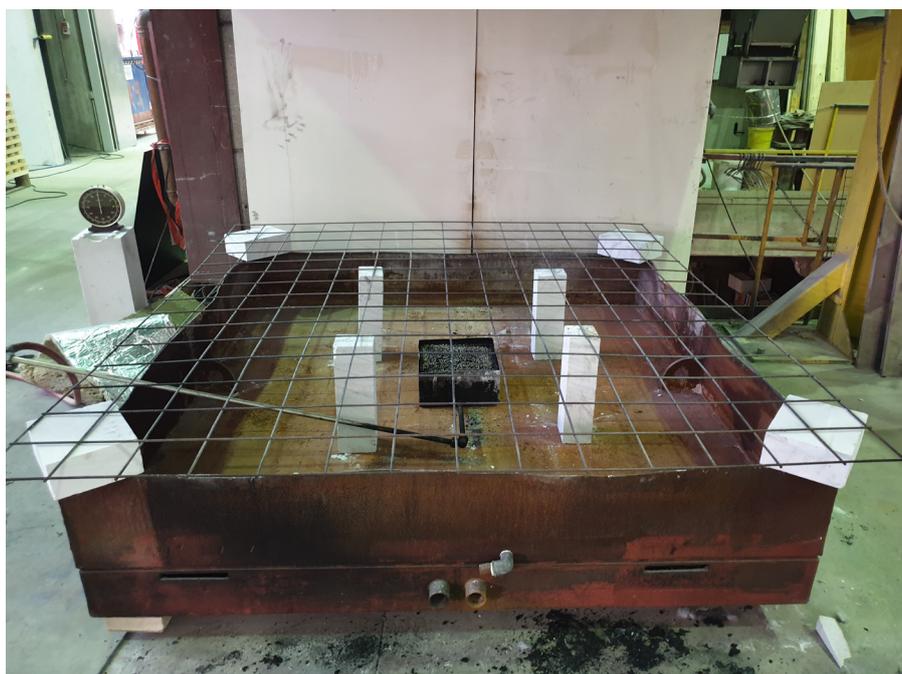
*Tabelle 6-1: Verwendete Brennerleistung*

Nr.	Anzahl Versuche	Bezeichnung	Brennerleistung [kW]
1	1	Bildschirm	30
2	1	Kleidung	30
3	1	Laptop	30
4	2	Matratze	30 bzw. 100
5	2	Wasserkocher	20
6	1	PVC-Boden	100, dann 300
7	1	Teppich	100
8	1	Laminat	100

Abgesehen von der Matratze und dem Wasserkocher wurde für jeden Gegenstand ein Versuch durchgeführt. Die Matratzen wurde in der Konfiguration „Einzelbett“ (einzelne Matratze, 1 m x 2 m, 30 kW) und „Doppelbett“ (zwei Matratzen nebeneinander, stumpf gestoßen, 2 m x 2 m, 100 kW) getestet (Abschnitt 6.8). Mit dem Wasserkocher musste aufgrund seiner geringen Masse ein Wiederholversuch mit mehr Probenmaterial (mehrere Kocher gleichzeitig) durchgeführt werden (Abschnitt 0).

## 6.2 Versuchsaufbau und Beflammung der Alltagsgegenstände

Zur Untersuchung der Alltagsgegenstände wurde der Gasbrenner mittig in die zuvor beschriebene Wanne gestellt. Über die Wanne wurde eine Q-Betonstahlmatte gelegt. Um den Abstand zwischen Brenner und Proben zu erhöhen wurden zwischen Matte und Wannenrand Steine platziert. Der Abstand zwischen Brenner und Oberkante Brenner betrug 25 cm. Der grundlegende Versuchsaufbau ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Die Matratzen wurden direkt auf die Betonstahlmatten gelegt. Alle anderen Gegenstände, mit Ausnahme der Kleidung, wurden auf einem 45 cm x 45 cm großen Lochblech auf der Betonstahlmatte platziert.



*Abbildung 6-1: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Alltagsgegenstände bei direkter Beflammung von unten*

Zur Untersuchung der Kleidung wurde auf die Betonstahlmatte verzichtet. Stattdessen wurden zwei Säulen aus Porenbeton links und rechts neben den Brenner in die Wanne gestellt. Die Kleidung wurde auf Metallbügeln auf eine horizontale Kleiderstange über den Brenner gehängt. Das längste Kleidungsstück hing etwa 40 cm über der Oberkante des Brenners. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6-2 dargestellt.



Abbildung 6-2: Untersuchung der Kleidung auf einer Kleiderstange über dem Brenner

Die für die Alltagsgegenstände gewählten Brennerleistungen (20 kW und 30 kW, vergleiche Tabelle 6-1) erfolgte in Anlehnung an die Brandschacht-Prüfung DIN 4102-1 [14] beziehungsweise das SBI-Gerät nach DIN EN 13823 [15]. Die Wärmefreisetzungsrate von 30 kW aus [15] ist einem Papierkorb als Zündinitial nachempfunden [3].

### 6.3 Versuchsaufbau und Beflammung der Bodenbeläge

Zur Untersuchung der Bodenbeläge wurde die Stahlwanne mit nichtbrennbaren Platten abgedeckt. Auf diesen wurden die Bodenbeläge lose ausgelegt. Der Brenner wurde mittig auf den Bodenbelägen platziert. Für die indirekte Beaufschlagung der Bodenbeläge wurde über dem Brenner eine 1 m<sup>2</sup> große, quadratische Stahlplatte angeordnet. Die Platte wurde auf vier Porenbetonsteinen aufgelegt. Um die Aufzeichnung des Massenverlustes nicht zu beeinflussen, wurden die Porenbetonsteine vor den Versuchen getrocknet. Der Abstand der Stahlplatte zu den Bodenbelägen betrug 40 cm, zur Oberkante des Brenners 25 cm (Brennerhöhe 15 cm). Abbildung 6-3 zeigt den beschriebenen Versuchsaufbau mit dem Laminat als zu untersuchendes Material.

Dieser Versuchsaufbau für die Bodenbelege wurde in Anlehnung an [5] gewählt. Ziel des dort beschriebenen Projektes war es, den Einfluss des Bodenbelags auf Brände in Räumen zu untersuchen. Dafür wurde ein sehr ähnlicher Aufbau mit „Reflexionstisch“ direkt im Room-Corner Testraum verwendet. Es wurde eine Brennerleistung in Anlehnung an den Room-Corner Test

nach DIN EN 14390 [16] gewählt: 100 kW über 10 Minuten, danach 300 kW über weitere 10 Minuten.



*Abbildung 6-3: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Bodenbeläge, hier Laminat, bei indirekter Beflammung mittels „Reflexionstisch“*

Bei den Großversuchen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnten die Bodenbelege nicht durch die indirekte Beflammung alleine entzündet werden. Es wurde deshalb eine Initialzündung mittels Wunderkerze vorgenommen. Die genaueren Umstände dieser Vorgänge werden in den entsprechenden Abschnitten 6.10 bis 6.12 erläutert. Auch in [5] wurden die Bodenbeläge teilweise mit einer Initialflamme gezündet.

## 6.4 Entzündungszeitpunkte

Der Zeitpunkt der Entzündung ist entscheidend für ein Auswertekriterium zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität (vergleiche Tabelle 3-1). Abbildung 6-4 zeigt die Entzündungszeitpunkte aller Großversuche. Aufgrund der indirekten Beflammung der Bodenbeläge (Abschnitt 6.3) dauerte deren Entzündung deutlich länger als bei den direkt beflamten Alltagsgegenständen. Der PVC-Fußboden entzündete sich gar nicht.

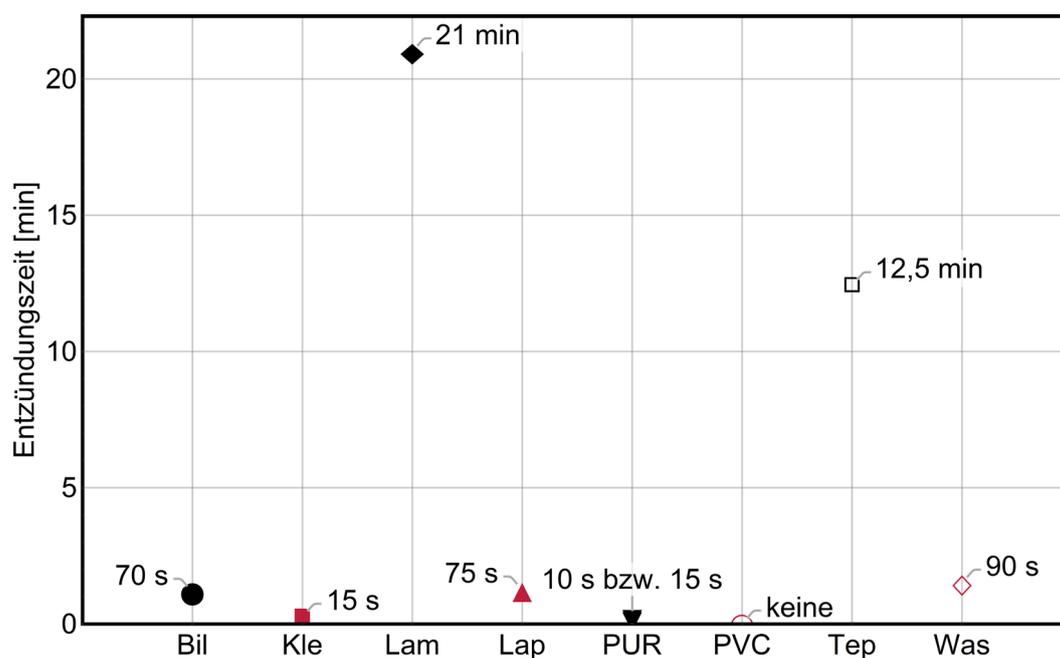


Abbildung 6-4: Entzündungszeitpunkte aller Großversuche

## 6.5 Bildschirm

Abbildung 6-5 zeigt den Versuchsaufbau des Großversuches mit dem Computerbildschirm. Um ein frühzeitiges Umkippen zu verhindern, wurde dieser mit Betonbindedraht fixiert. Die eingestellte Brennerleistung betrug 30 kW. Die Gesamtmasse des Bildschirms zu Versuchsbeginn betrug 7.785 g.



*Abbildung 6-5: Versuchsanordnung des Großversuchs mit dem Computerbildschirm*

In Abbildung 6-6 ist der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate während des Versuches dargestellt. Die schwarze Kurve zeigt die Leistung des Brenners. Diese liegt nach einem kurzen Einpendeln bei 28 kW. Nach etwa einer Minute kam es zur ersten Entzündung des Plastiks am Standfuß. Innerhalb einer weiteren Minute brannte der gesamte Bildschirm. Die Gesamtwärmefreisetzungsrate (rote und grüne Kurve) stieg nach der Entzündung rasch an und erreichte ihr Maximum von 303 kW nach etwas mehr als 4 Minuten. Die Massenabnahme (blaue Kurve) begann zeitlich verzögert nach 2,5 Minuten. Zum Versuchsende betrug die Restbildschirmmasse noch etwa 5.400 g. Hauptsächlich blieben nichtbrennbare, metallische Teile des Bildschirms sowie des Ständers übrig.

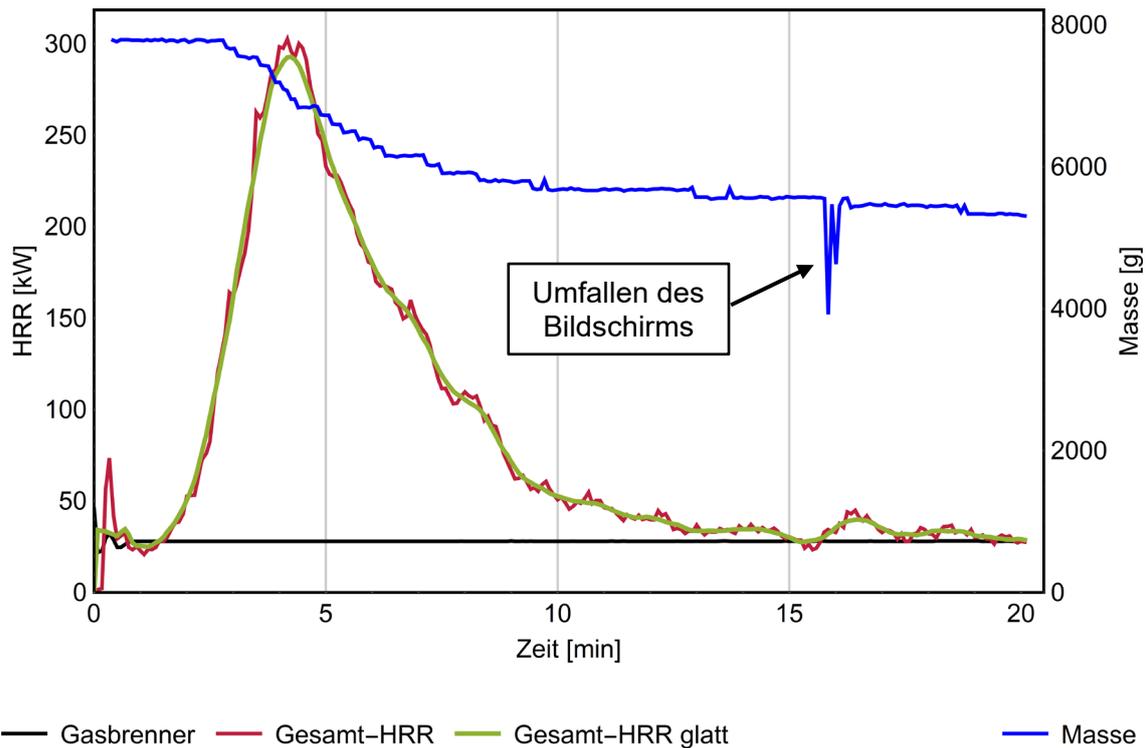


Abbildung 6-6: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse während des Bildschirm-Großversuches

## 6.6 Kleidung

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung der Kleidung ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Es wurden insgesamt drei Sweatshirts, vier T-Shirts und drei Jogginghosen verbrannt. Abbildung 6-7 zeigt die einzelnen Kleidungsstücke auf ihren Metallbügeln. Die Gesamtmasse der Kleidung betrug zum Versuchsbeginn 2.440 g. Die eingestellte Brennerleistung betrug 30 kW.



Abbildung 6-7: Ansicht der untersuchten Kleidungsstücke; Sweatshirt (li.), T-Shirt (mittig), Jogginghose (re.)

Nach 15 Sekunden kam es zur Entzündung der T-Shirts. Innerhalb weniger Sekunden danach brannten alle Kleidungsstücke. Das Fortschreiten der Entzündung ist in Abbildung 6-8 zu sehen. Nach etwa einer Minute sind alle Kleidungsstücke, bis auf die Hosen, herabgefallen. Sie brannten auf und um den Gasbrenner liegend weiter.



*Abbildung 6-8: Entzündungsverlauf der Kleidung im Großversuch*

In Abbildung 6-9 ist der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate während des Versuches dargestellt. Die schwarze Kurve zeigt die Leistung des Brenners. Diese lag nach einem kurzen Einpendeln bei 28 kW. Die Gesamtwärmefreisetzungsrate (rote Kurve) stieg nach der Entzündung rasch an und erreichte ihr Maximum von 492 kW nach etwas mehr als einer Minute. Ab Minute 4 war keine Wärmefreisetzungsrate der Kleidungsstücke mehr messbar. Die Massenabnahme (blaue Kurve) begann unmittelbar mit der Entzündung. Zum Versuchsende betrug die Restmasse noch etwa 136 g. In den Minutenabschnitten 1 bis 3 sowie 5 bis 6 sank die blaue Massenkurve treppenförmig ab. Dies ist auf die Auflösung der Waage zurückzuführen. Als kleinstes Intervall konnten 100 g Schritte aufgezeichnet werden. Dieses Phänomen ist auch bei den anderen Großversuchen zu erkennen.

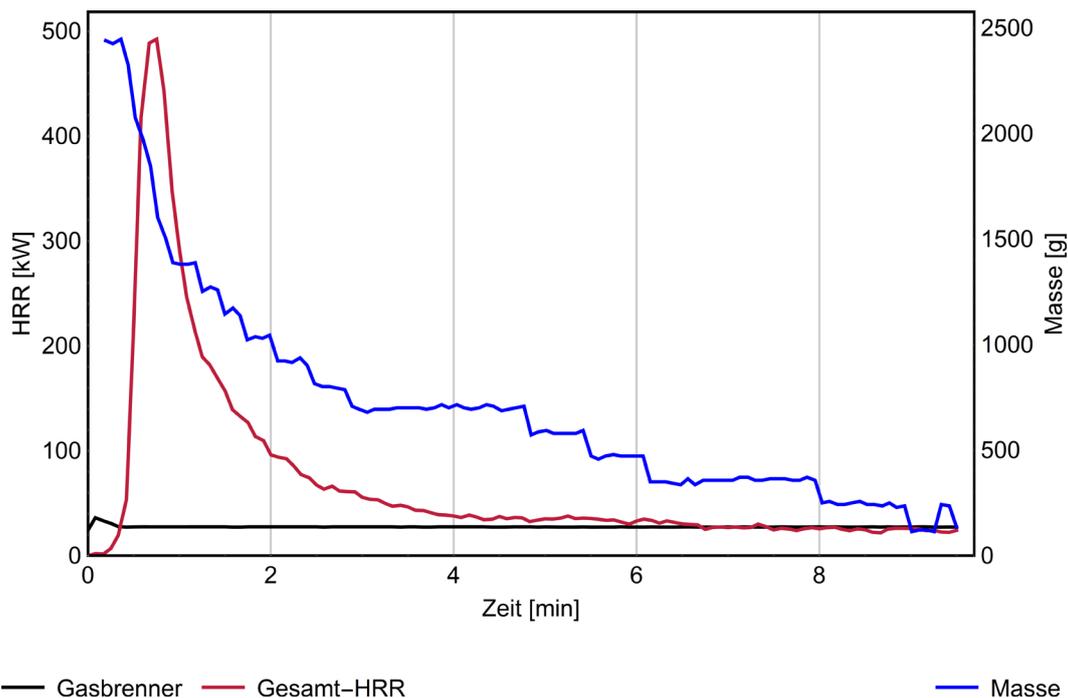


Abbildung 6-9: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, Kleidung)

### 6.7 Laptop

Abbildung 6-10 zeigt den Versuchsaufbau des Großversuchs mit dem Laptop. Dieser wurde im geschlossenen Zustand über dem Brenner platziert. Der Akku wurde aufgrund der Explosionsgefahr für den Versuch entfernt.



Abbildung 6-10: Versuchsanordnung des Großversuchs mit dem Laptop

Abbildung 6-11 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrates sowie der Probenmasse während des Versuches. Die schwarze Kurve zeigt die Leistung des Brenners. Diese lag nach einem kurzen Einpendeln bei 28 kW. Zu einer Entzündung des Plastikgehäuses kam es nach etwa 60 Sekunden. Die Gesamtwärmefreisetzungsrates (rote und grüne Kurve) stieg in den ersten 2,5 Minuten stark an und erreichte ein Maximum von etwa 50 kW. Dieser Wert wurde bis auf leichte Schwankungen bis zur 13. Minute gehalten. Nach Minute 13 fiel die Wärmefreisetzungsrates schlagartig auf 40 kW zurück und sank langsam weiter.

Insgesamt sind zehn Stufen in der blauen Kurve zu erkennen. Etwa alle 2,5 Minuten wurde ein Massenverlust von 100 g (Auflösung der Waage) gemessen. Insgesamt ging die Masse von 2.500 g auf etwas unter 1.500 g zurück.

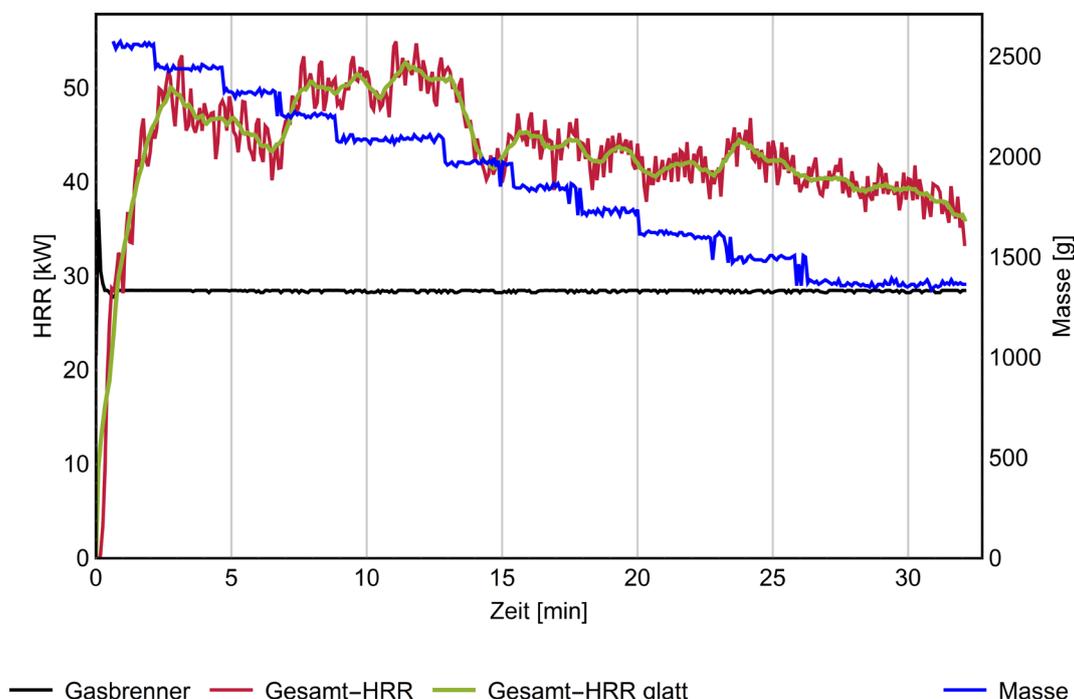


Abbildung 6-11: Verlauf der Wärmefreisetzungsrates und der Masse (Großversuch, Laptop)

## 6.8 Matratze

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung der Matratze ist in Abbildung 6-12 dargestellt. Es wurden drei identische Exemplare getestet: einmal eine Matratze alleine („Einzelbett“) und einmal zwei Matratzen nebeneinanderliegend („Doppelbett“). Die Konfiguration „Doppelbett“ wurde bei einer Brennerleistung von 100 kW verbrannt. Für das „Einzelbett“ wurde die Brennerleistung auf 30 kW reduziert. Die Position des Brenners unter den Matratzen ist in Abbildung 6-13 dargestellt.



Abbildung 6-12: Versuchsanordnung des Großversuchs mit der Matratze in der Anordnung „Einzelbett“ (li.) und „Doppelbett“ (re.)



Abbildung 6-13: Position des Brenners unter den Matratzen (Konfiguration „Doppelbett“)

Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15 zeigen die Wärmefreisetzungsraten während der Matratzenversuche. Die schwarzen Kurven zeigen jeweils die Leistung des Brenners. Diese lag nach einem kurzen Einpendeln bei 28 kW beziehungsweise 90 kW. Die roten Kurven zeigen den Verlauf der jeweiligen Gesamtwärmefreisetzungsrate. Für das „Einzelbett“ konnte ein Maximum von 331 kW gemessen werden. Für die „Doppelbett“ Konfiguration ein niedrigerer Wert von 255 kW. Die reale Wärmefreisetzung des Doppelbetts war vermutlich aber deutlich größer. Es kann vermutet werden, dass mehr Wärme unter dem Haubenrand in die Halle entweichen konnte. Dies begründet sich in der größeren Fläche der Probenkonfiguration, die fast so groß wie die Haubengrundfläche war, sowie der begrenzten Absaugleistung.

Das Verhältnis der Masse bei Versuchsende zur Anfangsmasse ist für beide Matratzenversuche gleich und beträgt etwa 0,364 (4.000 g zu 11.000 g und 2.000 g zu 5.500 g). Der Verlauf der Masse ist blau in Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15 dargestellt.

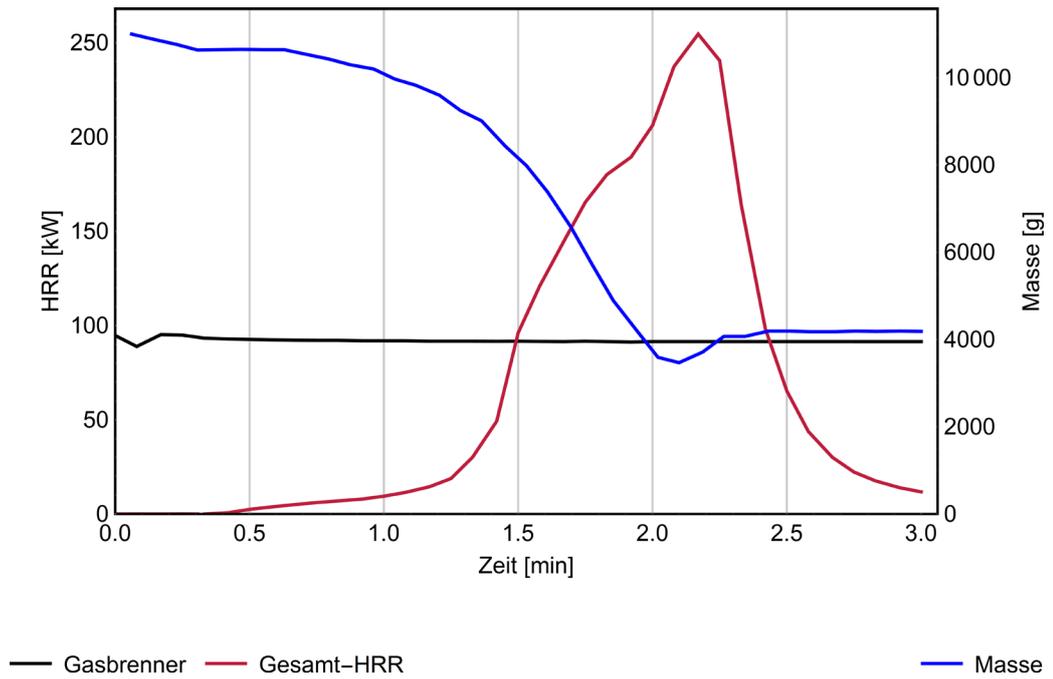


Abbildung 6-14: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, Matratze, „Doppelbett“)

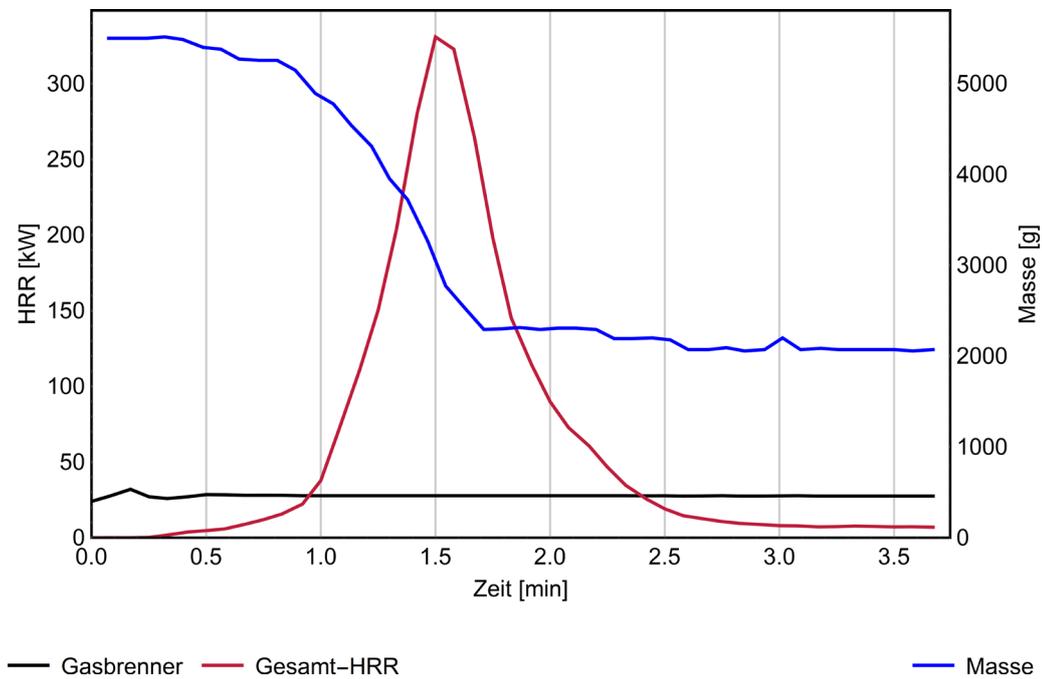


Abbildung 6-15: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, Matratze, „Einzelbett“)

## 6.9 Wasserkocher

Zur Untersuchung des Wasserkochers wurden insgesamt zwei Großversuche durchgeführt. Die Versuchsanordnung der beiden Versuche ist in Abbildung 6-16 dargestellt. Bei einem ersten Versuch wurde ein einzelner Wasserkocher bei einer Brennerleistung von 20 kW untersucht. Bei einem zweiten Versuch wurden zwei Wasserkocher nebeneinander gestellt. Zusätzlich wurde einer der beiden Kocher mit Teilen der Basen (ohne Kabel) gefüllt, um möglichst viel Probenmaterial auf einmal zu testen.



Abbildung 6-16: Versuchsanordnung des Großversuchs mit dem Wasserkocher, einzeln (li.) und mit erhöhtem Probenmasse (re.)

Der Grund für den Wiederholversuch mit erhöhtem Probenmasse ist in Abbildung 6-17 zu erkennen. Aufgrund der sehr geringen Masse eines einzelnen Wasserkochers von nur rund 300 g und der groben Auflösung des verwendeten Wägesystems von 100 g konnte während des gesamten Versuchs keine Abnahme festgestellt werden (blaue Kurve).

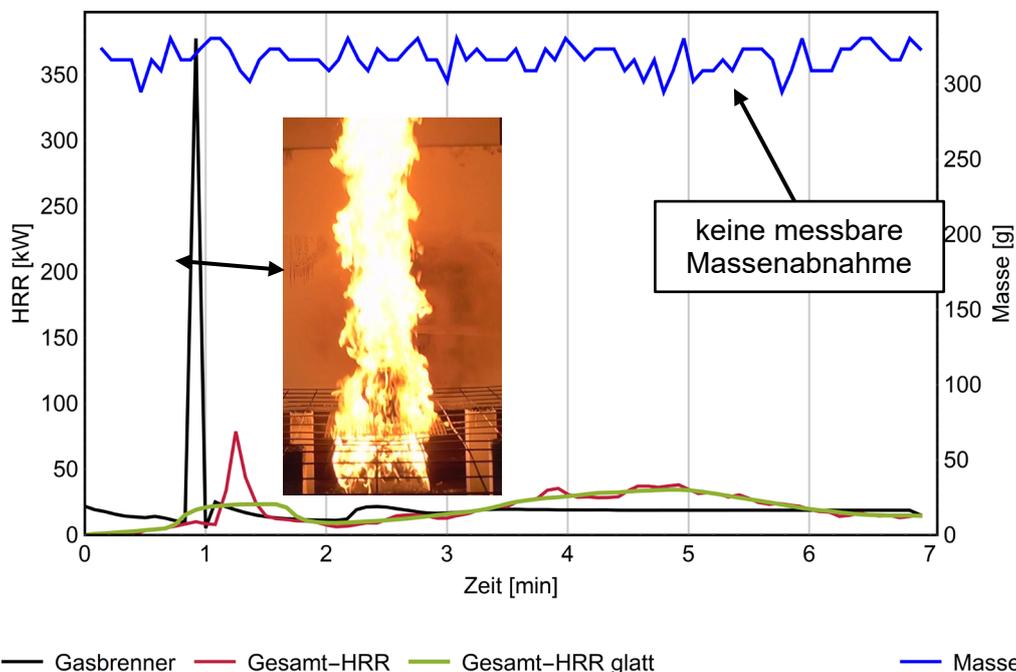


Abbildung 6-17: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, einzelner Wasserkocher)

Der extreme und sehr kurzzeitige Anstieg der Wärmefreisetzungsrate des Gasbrenners (Abbildung 6-17, schwarze Kurve) ist auf ein lockeres Ventil zurückzuführen. Dieses öffnete sich nach etwa 60 Sekunden vollständig von selbst, was eine mehrere Meter hohe Stichflamme zur Folge hatte, bevor es wieder abgedreht werden konnte.

Im Verlauf der Masse über der Zeit des zweiten Versuchs (Abbildung 6-18, blaue Kurve) sind zwei 100 g Sprünge zu erkennen. Die maximale Wärmefreisetzungsrate lag, ähnlich wie beim Einzelversuch bei 50 kW.

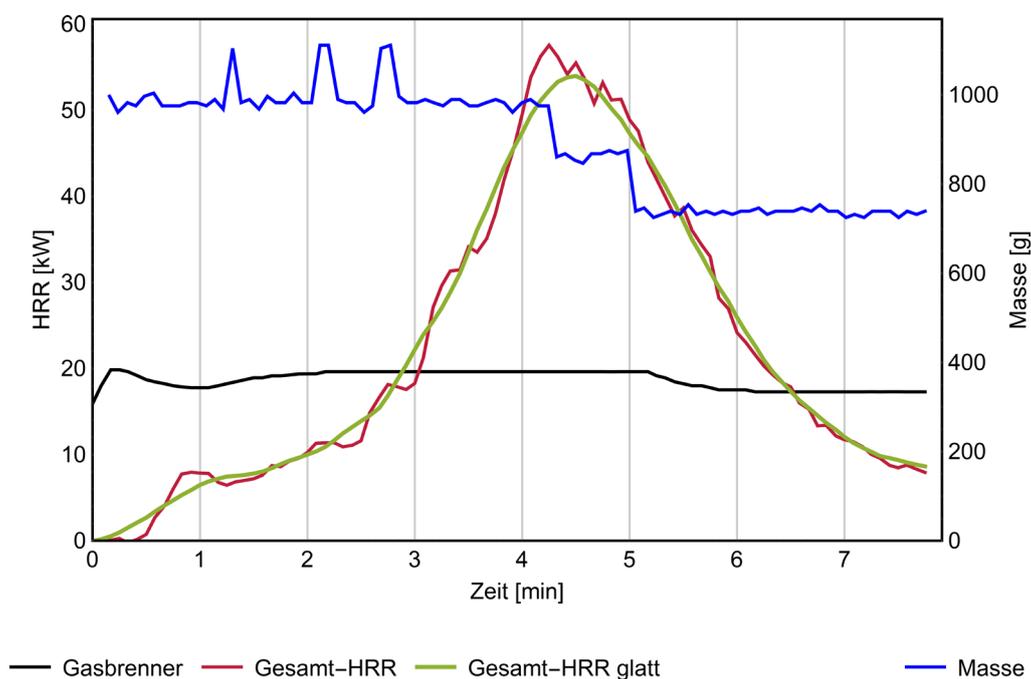


Abbildung 6-18: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, mehrere Wasserkocher)

## 6.10 PVC-Bodenbelag

Der Versuchsaufbau für den PVC-Bodenbelag mit Reflexionstisch zur indirekten Beflammung ist in Abbildung 6-19 dargestellt. Es wurde ein 2 m langes Stück von der 2 m breiten Rolle lose auf die Unterkonstruktion gelegt.



*Abbildung 6-19: Versuchsaufbau des Großversuches mit dem PVC-Fußboden bei indirekter Beflammung durch „Reflexionstisch“*

Abbildung 6-20 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate sowie der Masse während des Versuches mit dem PVC-Bodenbelag. Da es auch nach 15 Minuten und einem Initialfunken nicht zu einer anhaltenden Entzündung des Materials kam, wurde die Brennerleistung in Anlehnung an [16] von zuvor 100 kW auf 300 kW erhöht. Dies beschleunigte die Massenabnahme (blaue Kurve, Abbildung 6-20) scheinbar. In den ersten 15 Minuten wurde ein Rückgang um 500 g von 3.500 g auf 3.000 g gemessen. In der zweiten Versuchshälfte wurde innerhalb von 10 Minuten ein Rückgang um 1.000 g auf ein Restmasse zum Versuchsende von 2.000 g festgestellt.

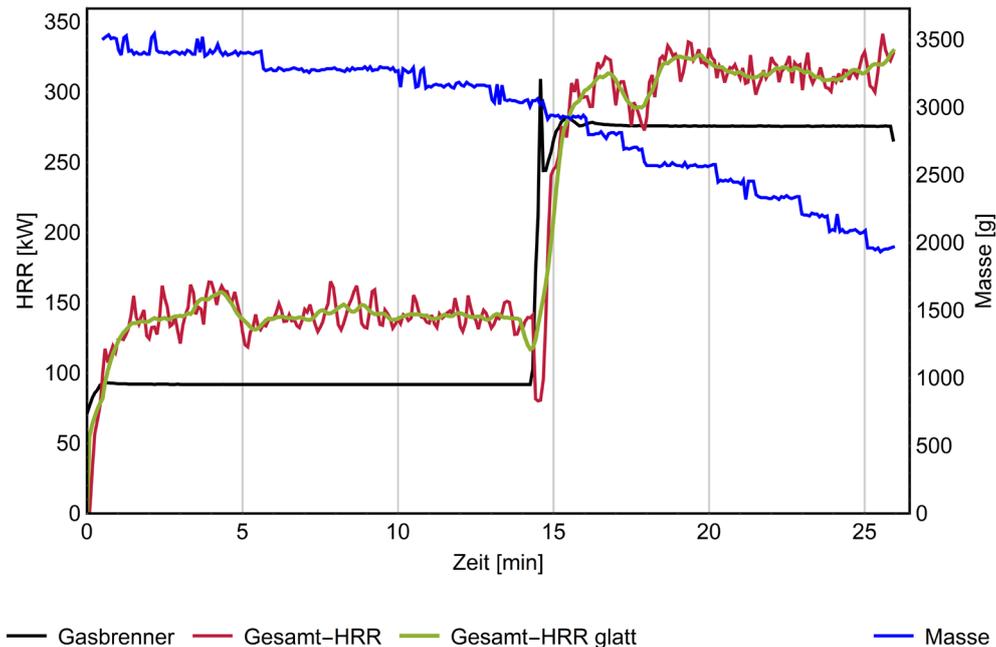


Abbildung 6-20: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, PVC-Boden)

## 6.11 Teppich

Die untersuchten, identischen Teppiche hatten jeweils die Maße 1,6 m x 2,3 m. Um bei allen Bodenbelägen eine Fläche von 4 m<sup>2</sup> testen zu können, wurde für den Teppich die in Abbildung 6-22 sichtbare Anordnung gewählt. Neben einem unzerschnittenen Exemplar (3,68 m<sup>2</sup>) wurde ein weiterer, 20 cm langer Streifen (0,32 m<sup>2</sup>) platziert. Die Teppiche wurden wie alle Bodenbeläge nicht mit dem Unterbau noch untereinander verbunden (Abbildung 6-21).



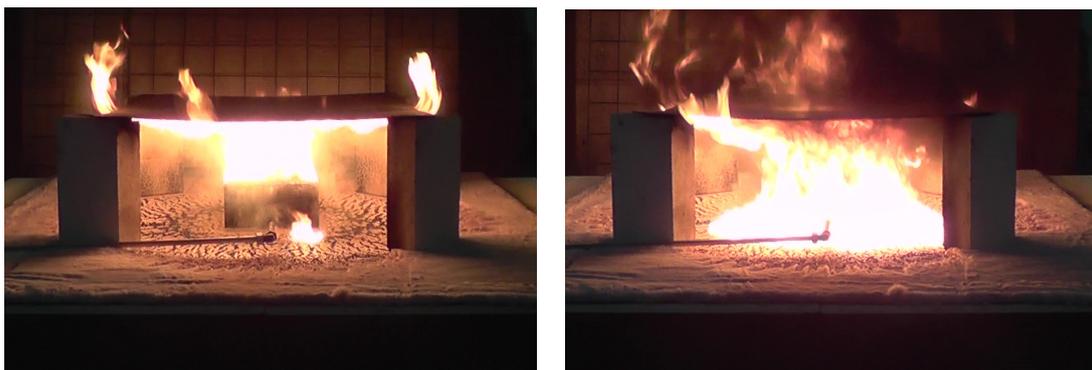
Abbildung 6-21: Detail der Stoßfuge beider Teppichstücke

Durch die indirekte Beflammung bei einer Brennerleistung von 100 kW (Abbildung 6-24, schwarze Kurve) schmolzen die Polyesterfasern des Teppichs und verblieben als Tropfen auf dem stabileren Untergewebe, das ebenfalls aus Polyester bestand. Zu einer selbstständigen Entzündung des flüssigen Materials kam es nicht. Nach 12,5 Minuten wurde deshalb durch eine

Wunderkerze eine Entzündung herbeigeführt. Innerhalb weniger Minuten breitete sich das Feuer um den Brenner herum aus (Abbildung 6-23).



*Abbildung 6-22: Versuchsaufbau des Großversuches mit dem Teppich bei indirekter Beflammung durch „Reflexionstisch“*



*Abbildung 6-23: Ausbreitung der Flammen während des Teppich-Großversuches, 5 Sekunden (li.) und 35 Sekunden (re.) nach Initialzündung*

Der Brandverlauf des Teppichs kann in drei Phasen eingeteilt werden. Sie sind in Abbildung 6-24 dargestellt: Phase 1 und 3 grau hinterlegt, Phase 2 mit weißem Hintergrund. In den ersten 12 Minuten kommt es bei einer konstanten Wärmefreisetzungsrate von 170 kW (Abbildung 6-24, rote und grüne Kurve) zu einem Massenverlust von 500 g (6.800 g → 6.300 g, Abbildung 6-24, blaue Kurve). Durch die Initialzündung kam es im zweiten Bereich zu einem sehr schnellen Anstieg der Wärmefreisetzungsrate. Die Spitze von 1.200 kW dauerte nur einen extrem kurzen Moment an. Innerhalb kürzester Zeit sank die Masse von 6.300 g auf 4.000 g ab. Im weiteren Brandverlauf, Phase 3, ging die Wärmefreisetzungsrate auf den Wert der ersten Phase (170 kW) zurück und blieb dann konstant. Bei ebenso konstanter Massenverlustrate sank diese auf 2.800 g. Der Versuch wurde beendet, als ab Minute 45 für 5 Minuten lang kein weiterer Massenverlust mehr beobachtet werden konnte.

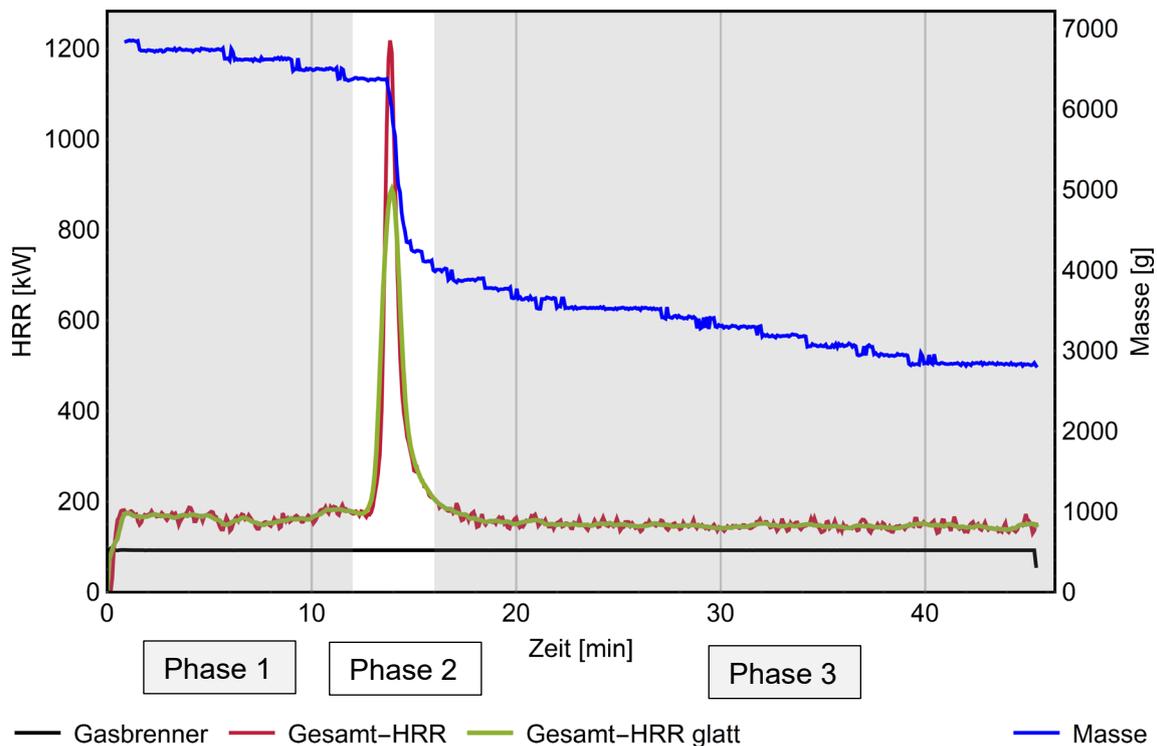


Abbildung 6-24: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, Teppich)

Während der dritten Brandphase breiteten sich die Flammen kreisförmig nach außen aus (Abbildung 6-25). Die Ausbreitung betraf dabei fast die gesamte Fläche des Teppichs, auch die nicht vom „Reflexionstisch“ überdeckten Bereiche.



*Abbildung 6-25: Kreisförmiges Ausbreiten der Flammen beim Teppich-Großversuch nach etwa 30 Minuten*

## 6.12 Laminat

Der Laminat-Versuchsaufbau des Großversuches ist in Abbildung 6-26 dargestellt. Die einzelnen Bretter waren entsprechend der Herstellervorgaben mit ihren Nut-/Feder-Klickverbindungen auf einer Fläche von 4 m<sup>2</sup> verlegt worden. Die Beflammung erfolgte indirekt mittels „Reflexionstisch“.



*Abbildung 6-26: Versuchsaufbau des Großversuches mit dem Laminat bei indirekter Beflammung durch „Reflexionstisch“*

Wenige Minuten nach Zündung des Brenners begann das Laminat kreisförmig um den Brenner herum zu verkohlen. Die Verkohlung breitete sich immer weiter aus, bis sie eine Fläche von 1 m<sup>2</sup> betraf. Nach 20 Minuten entzündete sich das Laminat unter dem „Reflexionstisch“ noch immer nicht von selbst. Die Rauchentwicklung war da bereits deutlich sichtbar. Das Laminat war an einigen Stellen oberflächlich aufgerissen. Es waren immer wieder Knackgeräusche zu hören.

In der 20. Minute wurde mit einer Wunderkerze als Initial eine Entzündung herbeigeführt. Wie beim Teppich entzündete sich nach und nach das Laminat rings um den Brenner (Abbildung 6-27).



*Abbildung 6-27: Ausbreitung der Flammen während des Laminat-Großversuches, 5 Sekunden (li.) und 5 Minuten (re.) nach Initialzündung*

Anders als beim Teppich erfolgte quasi keine Brandausbreitung auf die nicht durch den „Reflexionstisch“ überdeckten Bereiche. Lediglich entlang einer Laminatfuge breiteten sich Flammen circa 20 cm weit aus, bevor sie erloschen (Abbildung 6-28).



*Abbildung 6-28: Keine Brandausbreitung auf nicht durch „Reflexionstisch“ überdeckte Bereiche*

In Abbildung 6-29 ist zu erkennen, dass erst mit der Entzündung in der 21. Minute ein deutlicher Anstieg der Wärmefreisetzungsrate (rote und grüne Kurve) einsetzt. Innerhalb weniger Minuten wird das Maximum von 273 kW erreicht.

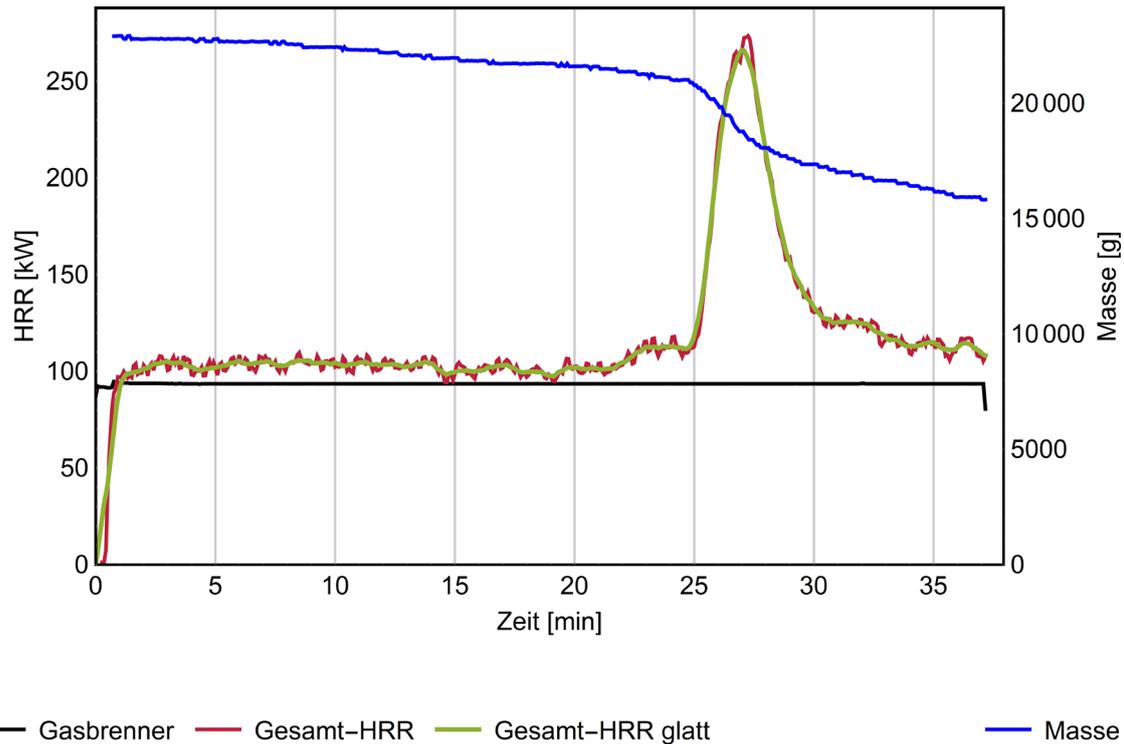


Abbildung 6-29: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Masse (Großversuch, Laminat)

Von Versuchsbeginn bis zur 25. Minute nahm die Masse von 23.000 g auf 20.500 g ab. Während der entscheidenden Brandphase (Minute 25 bis 30) sank die Masse weiter auf 17.400 g. Zum Versuchsende verbleiben 15.800 g des Laminats auf dem Probenaufbau. Obwohl sich die Brandfläche nur auf etwa 1 m<sup>2</sup> der vorhandenen 4 m<sup>2</sup> erstreckte, reduzierte sich die Masse auf etwa zwei Drittel des Ausgangswertes.

## 7 Ergebnisse – Ermittelte Verbrennungseffektivitäten

### 7.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die mit dem Cone-Kalorimeter bei niedriger und hoher Wärmestromdichte sowie während der Großversuche bestimmten Verbrennungseffektivitäten vorgestellt. In den Abschnitten 7.3 und 7.4 kamen die Auswertekriterien entsprechend Tabelle 3-3 zur Anwendung. In Abschnitt 7.5 werden die Mittelwerte aus mehreren Auswertekriterien beschrieben. Außerdem wurden die Verbrennungseffektivitäten in Abhängigkeit der Zeit bestimmt (Abschnitt 7.6). Die Bestimmung der Heizwerte zur Berechnung der Verbrennungseffektivitäten erfolgte als Leistung Dritter in einem externen Labor.

Neben den Zahlenwerten der Verbrennungseffektivitäten selbst lag der Schwerpunkt der Arbeit auf der Anwendbarkeit und den Vor- und Nachteilen der einzelnen Kriterien. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Verbrennungseffektivitäten für die Cone-Kalorimeter-Versuche aus dem Mittelwert dreier Wiederholversuche eines Materials bei einer Wärmestromdichte berechnet.

Auf die effektive Verbrennungswärme  $H_{c,eff}$  wird in Abschnitt 7.2 zunächst gesondert eingegangen. Sie dient als Eingangsgröße für die Auswertungsvariante EHC.

### 7.2 Effektive Verbrennungswärme $H_{c,eff}$

Das verbreitetste Auswertekriterium mittels Intervallbetrachtung ist EHC. Dafür wird entsprechend den Gleichungen (1) und (2) die effektive Verbrennungswärme  $H_{c,eff}$  mit dem Heizwert  $H_i$ , also der maximal möglichen freigesetzten Energie, verglichen. Abbildung 7-1 zeigt die mit dem Cone-Kalorimeter sowie in den Großversuchen gewonnenen effektiven Verbrennungswärmen. Für die Cone-Kalorimeter-Versuche ist jeweils der Mittelwert aus drei Versuchen für eine gewählte Wärmestromdichte angegeben.

Für den Bildschirm, das Laminat sowie den Laptop wurde in allen drei Versuchsreihen eine vergleichbare effektive Verbrennungswärme ermittelt. Sie liegt für den Bildschirm bei etwa 42 MJ/kg, für das Laminat bei etwa 18 MJ/kg und für den Laptop bei etwa 38 MJ/kg. Für die PUR-Matratze sowie den Wasserkocher wurde im Großversuch ein deutlich kleinerer Wert als in den Cone-Kalorimeter-Versuchen bestimmt. Bei dem PVC-Boden und dem Teppich ist das Verhältnis umgekehrt. Hier überstieg die im Großversuch erzielte effektive Verbrennungswärme die aus den Cone-Kalorimeter-Versuchen um ein Vielfaches. Die Werte für die Kleidung weisen eine Besonderheit auf. Hier unterscheiden sich die Werte aus den beiden Cone-Kalorimeter-

Versuchsreihen sehr deutlich. Für die geringere Wärmestromdichte von 15 kW/m<sup>2</sup> wurde ein H<sub>c,eff</sub> = 29 MJ/kg, für 30 kW/m<sup>2</sup> ein H<sub>c,eff</sub> = 6 MJ/kg berechnet.

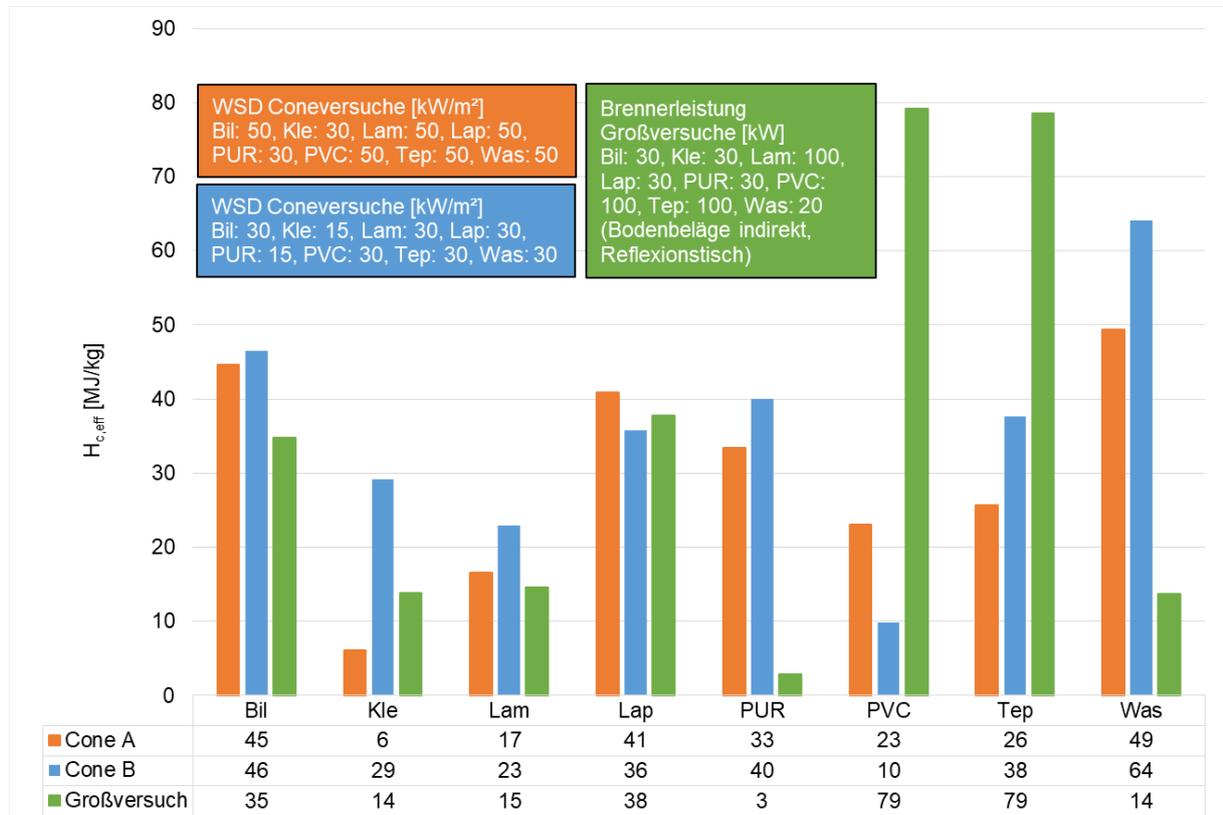


Abbildung 7-1: Effektive Verbrennungswärme in Abhängigkeit des Versuchsmaßstabs und der Wärmestromdichte (Cone-Kalorimeter) oder Brennerleistung (Großversuch)

Beim Vergleich der Ergebnisse aus den Cone- sowie Großversuchen konnte kein eindeutiger Einfluss des Maßstabeffektes auf die effektive Verbrennungswärme festgestellt werden. Vergleicht man die Cone-Kalorimeter-Versuchsreihen A (hohe Wärmestromdichte) und B (niedrige Wärmestromdichte), wurden für alle Materialien mit Ausnahme der Kleidung annähernd gleiche effektive Verbrennungswärmen bestimmt.

### 7.3 VE aus Cone-Kalorimeter-Versuchen

Die Verbrennungseffektivitäten aus den Cone-Kalorimeter-Versuchen sind in Abbildung 7-2 (hohe Wärmestromdichte) und Abbildung 7-3 (niedrige Wärmestromdichte) als Streudiagramme dargestellt. Die Bereiche kleiner Null und größer eins wurden ausgegraut. Es wird sichtbar, dass mit den Auswertekriterien

- HRR,60/180/300s
- IGN
- $\dot{Q},\text{max}$
- $\dot{m},\text{max}$

keine Werte bestimmt werden konnten. Aus dem Verhältnis der gemessenen Wärmefreisetzungsraten und Massenverlustraten ergaben sich Verbrennungseffektivitäten nahe Null.

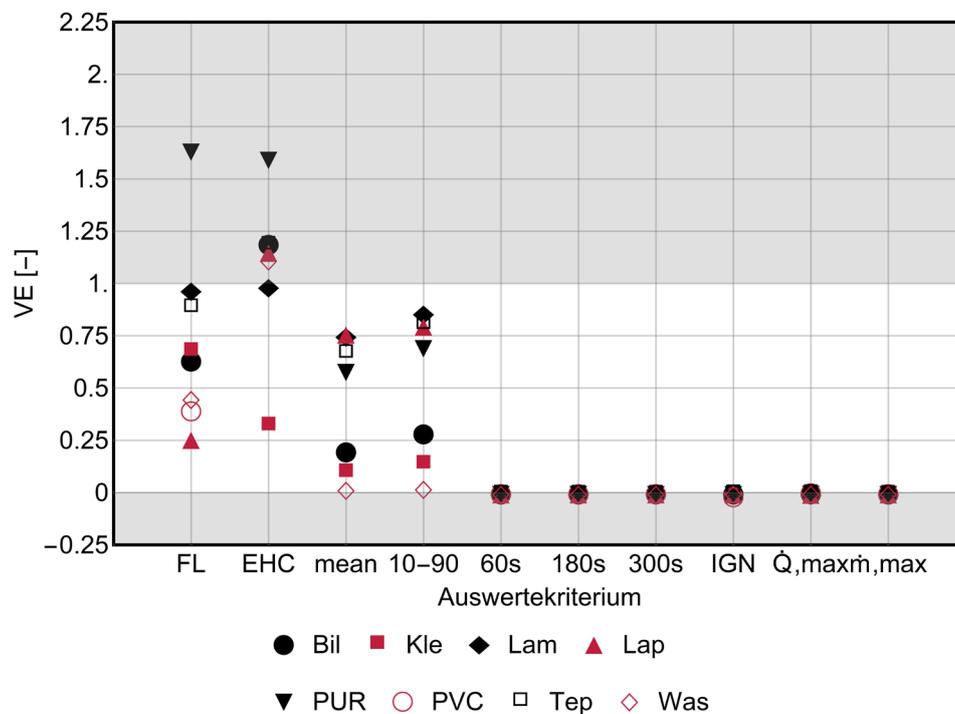


Abbildung 7-2: Streudiagramm der Verbrennungseffektivitäten aus den Cone-Kalorimeter-Versuchen bei hoher Wärmestromdichte

Für die Auswertekriterien

- FL
- EHC
- HRR,mean
- HRR,10-90

konnten in fast allen Fällen plausible Wärmefreisetzungsraten berechnet werden. Für die niedrigere Wärmestromdichte (Abbildung 7-3) lagen mehr Werte im grauen Bereich als für die hohe Wärmestromdichte (Abbildung 7-2).

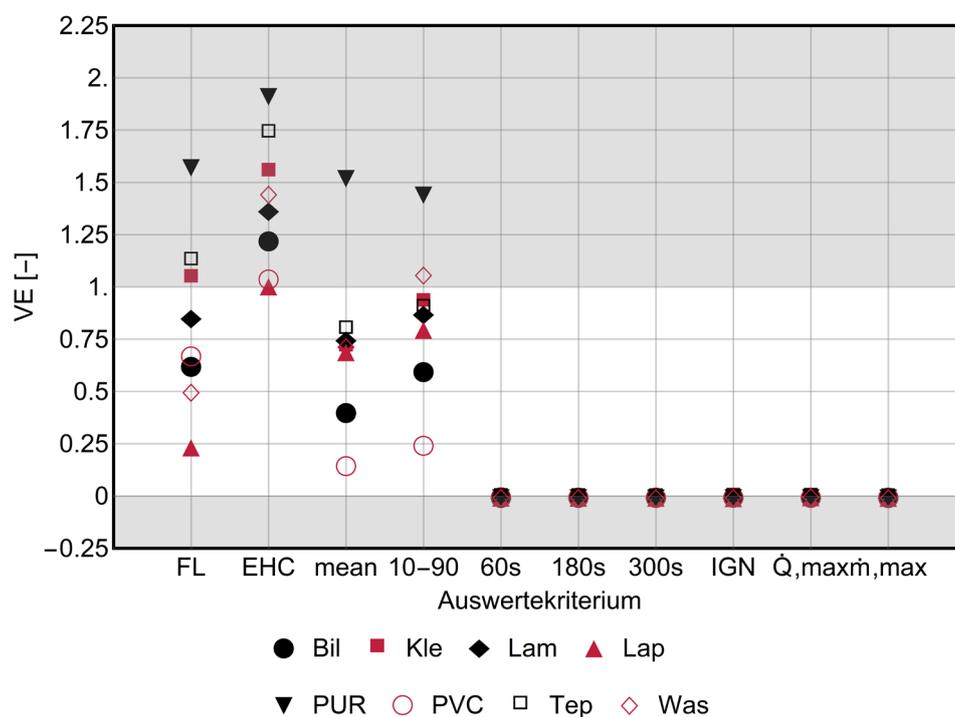


Abbildung 7-3: Streudiagramm der Verbrennungseffektivitäten aus den Cone-Kalorimeter-Ver-suchen bei niedriger Wärmestromdichte

Die einzelnen Werte für jedes Auswertekriterium und alle Materialien können der nachfolgenden Tabelle 7-1 entnommen werden. Der erste Wert in jeder Spalte wurde für die hohe, der zweite für die niedrige Wärmestromdichte ermittelt.

*Tabelle 7-1: Verbrennungseffektivitäten für Cone-Kalorimeter-Versuche; erster Wert bei hoher, zweiter Wert bei niedriger Wärmestromdichte*

Probe	Verbrennungseffektivität [-] nach Auswertekriterium			
	FL	EHC	HRR,mean	HRR,10-90
Bil	0,63 / 0,64	1,19 / 1,23	0,20 / 0,41	0,29 / 0,60
Kle	0,68 / 1,05	0,33 / 1,56	0,10 / 0,72	0,14 / 0,93
Lam	0,97 / 0,86	0,99 / 1,37	0,75 / 0,75	0,86 / 0,88
Lap	0,26 / 0,24	1,16 / 1,01	0,76 / 0,70	0,80 / 0,80
PUR	1,64 / 1,58	1,60 / 1,92	0,59 / 1,53	0,70 / 1,45
PVC	- / 0,68	2,43 / 1,04	12,71 / 0,15	20,04 / 0,25
TEP	0,89 / 1,13	1,19 / 1,74	0,67 / 0,80	0,81 / 0,91
WAS	0,45 / 0,50	1,12 / 1,45	0,02 / 0,72	0,02 / 1,07

### 7.4 VE aus den Großversuchen

Die Verbrennungseffektivitäten der Großversuche sind in Abbildung 7-4 als Streudiagramm dargestellt. Anders als bei den Cone-Kalorimeter-Versuchen konnten mit jedem Auswertekriterium Verbrennungseffektivitäten bestimmt werden. Jedoch nicht mit jedem Kriterium für jedes Material. Etwa die Hälfte der Wert liegt im grauen Bereich oben oder auf der Nullachse.

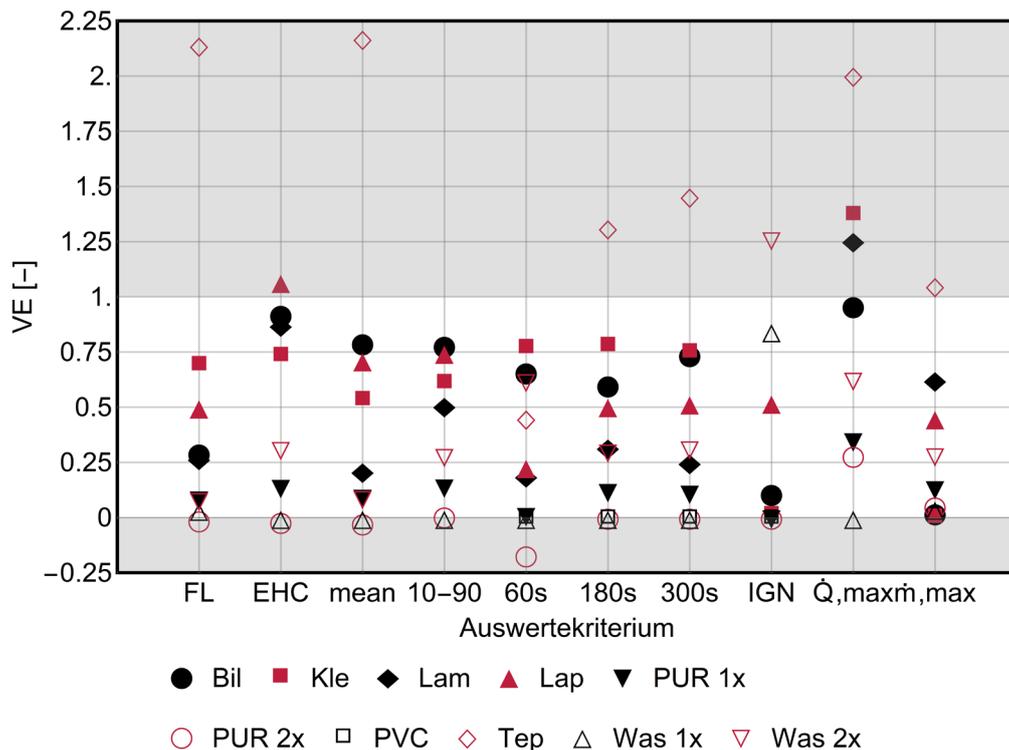


Abbildung 7-4: Streudiagramm der Verbrennungseffektivitäten aus den Großversuchen

Die einzelnen Werte für jedes Auswertekriterium und alle Materialien können der nachfolgenden Tabelle 7-2 entnommen werden.

Tabelle 7-2: Verbrennungseffektivitäten nach Auswertekriterium für Großversuche

Probe	Verbrennungseffektivität [-] nach Auswertekriterium									
	FL	EHC	mean	10-90	60s	180s	300s	IGN	Q̇,max	ṁ,max
Bil	0,29	0,92	0,79	0,78	0,66	0,60	0,74	0,11	0,96	0,02
Kle	0,70	0,74	0,54	0,61	0,77	0,78	0,75	0,02	1,38	0,00
Lam	0,27	0,87	0,21	0,51	0,19	0,32	0,25	3,41	1,26	0,62
Lap	0,50	1,07	0,71	0,75	0,23	0,51	0,52	0,52	-3,99	0,45
PUR (1x)	0,09	0,14	0,10	0,14	0,01	0,12	0,11	0,00	0,35	0,13
PUR (2x)	-0,01	-0,02	-0,03	0,01	-0,17	0,00	0,00	0,00	0,28	0,05
PVC	3,66	8,34	3,48	5,57	0,00	0,00	0,00	0,00	-253,4	6,93
TEP	2,14	3,64	2,17	2,30	0,45	1,31	1,46	64,08	2,01	1,05
WAS (1x)	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85	0,00	0,04
WAS (2x)	0,08	0,31	0,09	0,28	0,62	0,30	0,31	1,26	0,63	0,28

## 7.5 VE aus Mittelwerten mehrerer Auswertekriterien

Für die Berechnung des Mittelwerts aus mehrere Auswertekriterien wurden zunächst alle Kriterien, für die Werte vorliegen, herangezogen. Die Mittelwerte wurden jeweils für die Cone-Kalorimeter-Versuche bei hoher sowie niedriger Wärmestromdichte und für die Großversuche bestimmt. Sie sind in Tabelle 7-3 aufgeführt.

*Tabelle 7-3: Verbrennungseffektivitäten aus Mittelwerten jeweils aller verfügbaren Auswertekriterien*

Abkürzung	Cone-Kalorimeter		Großversuch
	hohe WSD	niedrige WSD	
Bil	0,58	0,72	0,59
Kle	0,31	1,06	0,63
Lam	0,89	0,96	0,79
Lap	0,75	0,69	0,13
PUR	1,13	1,62	0,12 (1x), 0,01 (2x)
PVC	8,90	0,53	-
TEP	0,89	1,15	8,06
WAS	0,40	0,94	- (1x), 0,42 (2x)

In einem nächsten Schritt wurden jeweils alle Auswertekriterien herausgefiltert, die negative Werte oder Werte größer Eins ergaben. Das Ergebnis ist exemplarisch für den Laptop und die Werte aus dem Großversuch in Abbildung 7-5 dargestellt. Herausgefiltert wurden die Werte  $\chi_{\text{EHC}} = 1,07$  und  $\chi_{\dot{Q},\text{max}} = -3,99$ . Es ergab sich ein korrigierter Mittelwert von  $\chi_{\text{Lap,MW}} = 0,52$  (rote Linie).

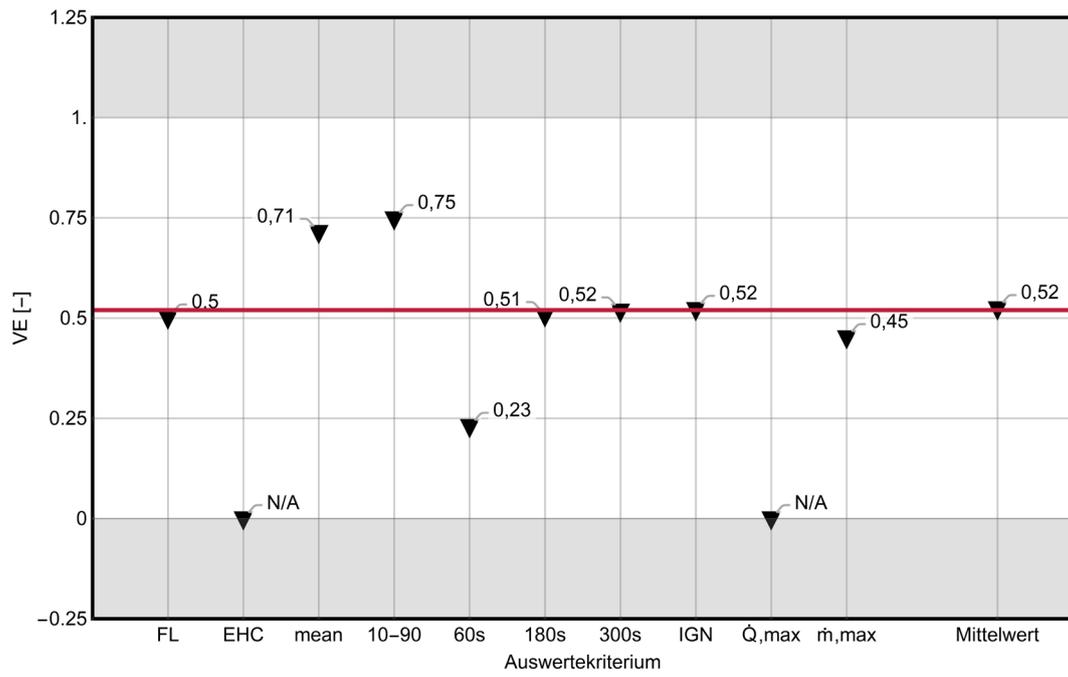


Abbildung 7-5: Berechnung der Verbrennungseffektivität als Mittelwert aller Auswertekriterien zwischen Null und Eins (Großversuch, Laptop)

## 7.6 VE in Abhängigkeit der Zeit

Unabhängig von den Auswahlkriterien wurde für alle Versuche auch jeweils der Verlauf der Verbrennungseffektivität über der Zeit bestimmt. Dafür wurde entsprechend Gleichung (16) zu jedem Zeitpunkt  $t$  die Wärmefreisetzungsrate  $\dot{Q}(t)$  durch die Massenverlustrate  $\dot{m}(t)$  und den über die Zeit konstanten Heizwert  $H_i$  dividiert.

$$\chi(t) = \frac{\dot{Q}(t)}{\dot{m}(t) \cdot H_i} \quad (16)$$

$\chi(t)$	Verbrennungseffektivität zum Zeitpunkt $t$
$\dot{Q}(t)$	Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt $t$ [kW]
$\dot{m}(t)$	Massenverlustrate zum Zeitpunkt $t$ [kg/s]
$H_i$	Heizwert [kJ/kg]

Der Verlauf der zeitabhängigen Verbrennungseffektivität während des Laptop-Großversuches ist in Abbildung 7-6 dargestellt. Aufgrund des Dividierens durch die stark oszillierende Massenverlustrate kam es zu zwar rechnerisch korrekten Verbrennungseffektivitäten die jedoch kleiner Null oder größer Eins waren. In schwarz ist die von diesen physikalisch nicht plausiblen Werten bereinigte Kurve dargestellt. Sowohl der gleitende Durchschnitt (grüne Linie) als auch die lineare Trendlinie (rote Linie) deuten darauf hin, dass die Verbrennungseffektivität ungefähr 0,6 beträgt und während des Brandverlaufes konstant war. Dieser Wert liegt nahe den anderen für den Laptop berechneten Verbrennungseffektivitäten (Abbildung 7-5).

Abbildung 7-7 zeigt den Verlauf der zeitabhängigen Verbrennungseffektivität des Laminats. Die Werte basieren auf dem Mittelwert der drei Cone-Kalorimeter-Versuchen bei einer Wärmestromdichte von 50 kW/m<sup>2</sup>, was dem hohen Wert entspricht. Fast alle ermittelten Werte liegen im Bereich zwischen Null und Eins. Dafür oszillieren die Verbrennungseffektivitäten (schwarze Linie) selbst deutlich. Der gleitende Durchschnitt (grüne Linie) und die quadratische Trendlinie (rot) lassen einen parabelförmigen Verlauf vermuten. Die Werte der Verbrennungseffektivität entsprechend der Trendlinie sind in Tabelle 7-4 aufgelistet.

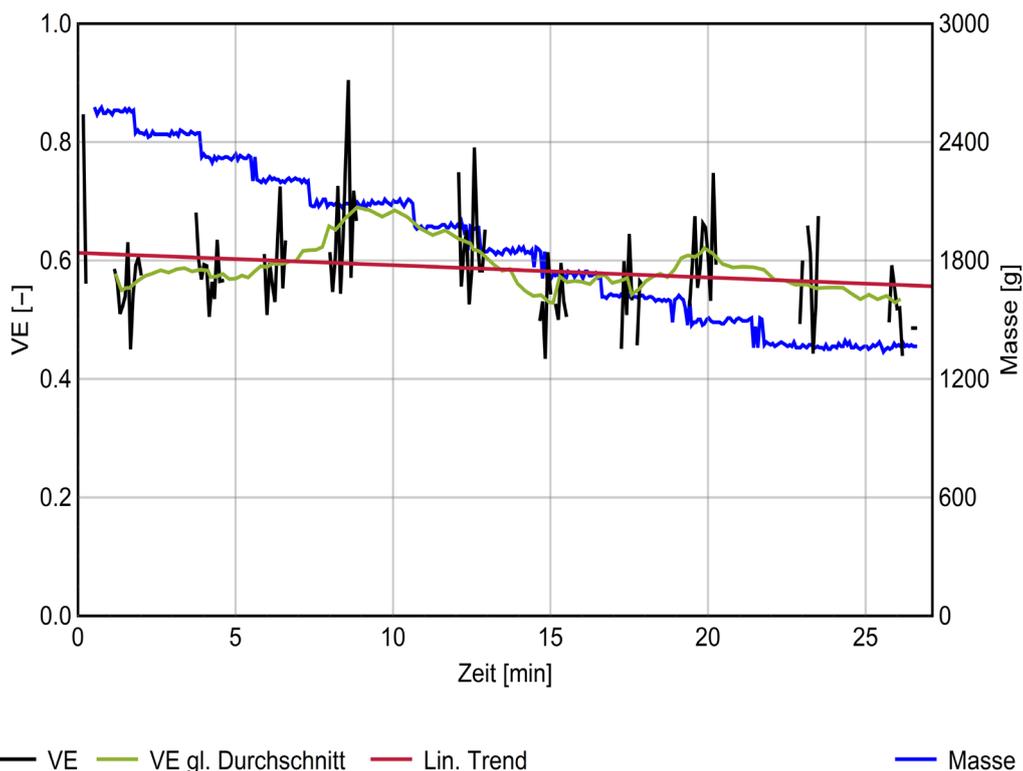


Abbildung 7-6: Verlauf der zeitabhängigen Verbrennungseffektivität während des Laptop-Großversuches

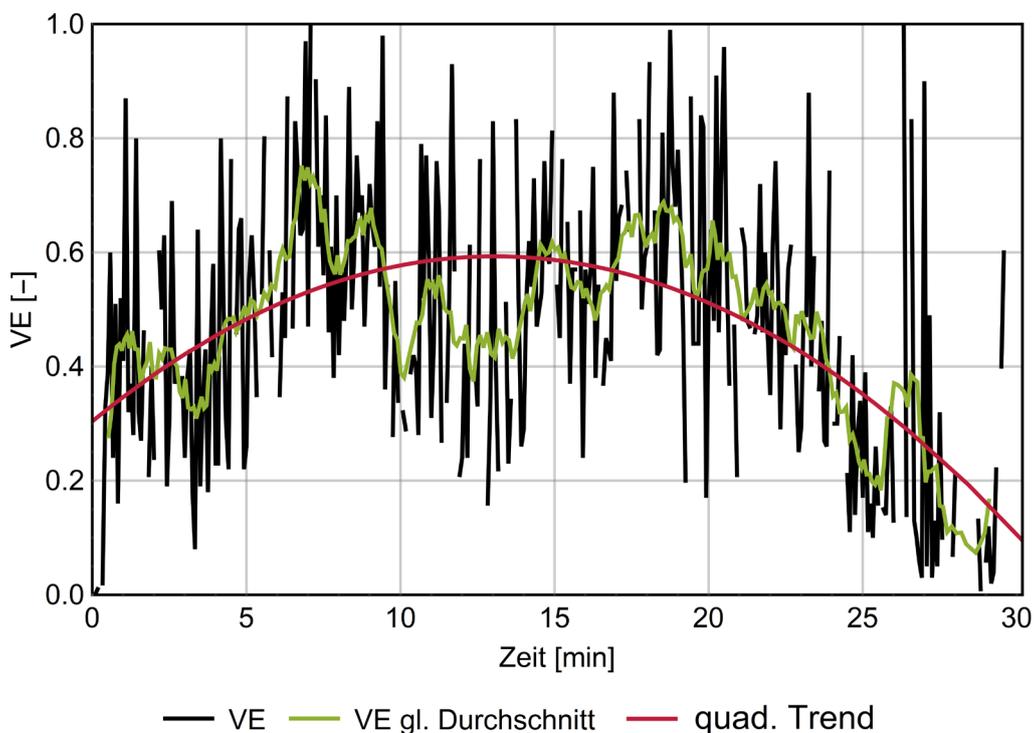


Abbildung 7-7: Verlauf der zeitabhängigen Verbrennungseffektivität des Laminats bei 50 kW/m<sup>2</sup> im Cone-Kalorimeter

*Tabelle 7-4: Verbrennungseffektivität des Laminats in Abhängigkeit der Zeit basierend auf der quadratischen Trendlinie aus Abbildung 7-7*

Zeit [min]	$\chi(t)$ [-]
0	0,30
5	0,48
10	0,58
15	0,59
20	0,51
25	0,35
30	0,11

## 8 Fazit und Empfehlung der Auswahl von Auswertekriterien

Es konnte bei den verschiedenen Gegenständen und Materialien häufig keine Verbrennungseffektivität bzw. keine Verbrennungseffektivität zwischen Null und Eins bestimmt werden. Dies kann im Allgemeinen auf die folgenden zwei Gründe zurückgeführt werden:

- Starkes Oszillieren der Massenverlustraten,
- Bestimmung des Heizwerts nur ohne Metallbestandteile möglich.

In Abbildung 8-1 ist der Massenverlauf und die darauf basierende Massenverlustrate des Teppichs beim Großversuch abgebildet. Um zu zeigen, wie stark die Massenverlustwerte oszillieren, wurde die abgebildete Kurve bereits mittels gleitendem Durchschnitt geglättet. Auf die Darstellung des Maximums von knapp 35 g/s wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

Das starke Schwanken der Massenverlustwerte führte in Abhängigkeit der Art des Auswertekriteriums (vergleiche Tabelle 3-3 Spalte 4) zu zwei unterschiedlichen Problemen.

- Bei den Kriterien mit **Intervallbetrachtung** heben sich die negativen und positiven Werte bei der Mittelwertbildung größtenteils gegenseitig auf. Es ergeben sich sehr kleine Durchschnittswerte nahe Null, welche in unrealistisch großen Verbrennungseffektivitäten resultieren.
- Bei Kriterien mit **Zeitpunktbetrachtung** wird die Massenverlustrate zu einem einzelnen, definierten Zeitpunkt betrachtet. Es besteht die Möglichkeit, einen der negativen oder deutlich zu großen Werte für die Berechnung der Verbrennungseffektivität heranziehen zu müssen. Bei sehr großen Massenverlustraten ergeben sich unrealistisch kleine Verbrennungseffektivitäten. Bei einer negativen Massenverlustrate wird auch die Verbrennungseffektivität rechnerisch negativ.

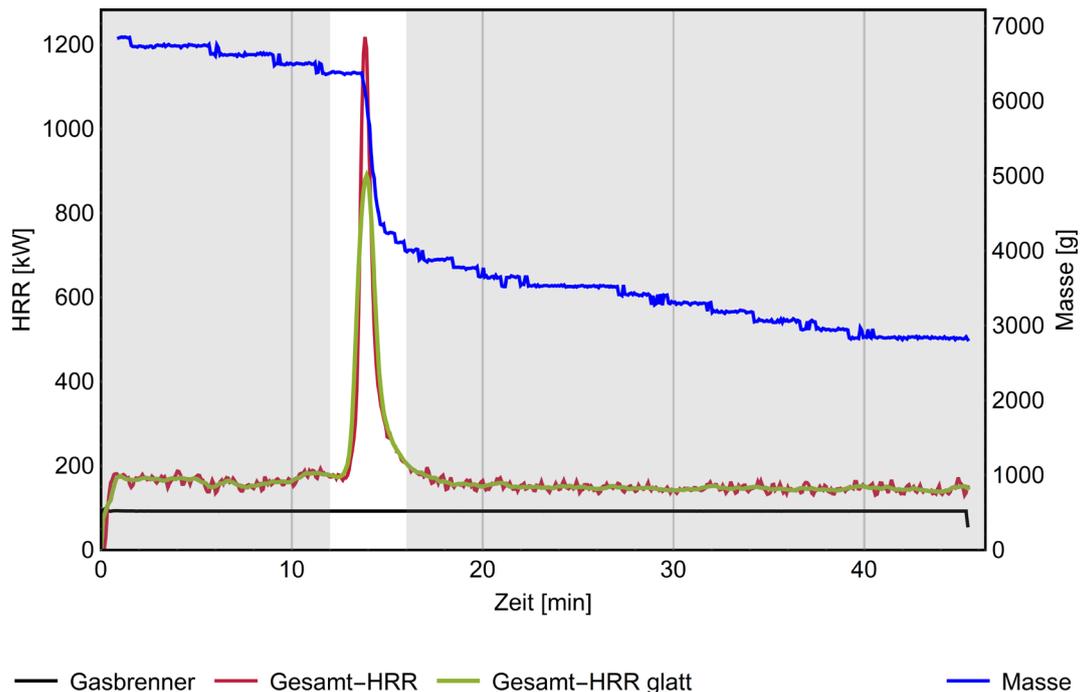


Abbildung 8-1: Verlauf der Massenverlustrate und der Masse (Großversuch, Teppich)

Vor diesem Hintergrund erwies sich das Auswertekriterium FL nach Gleichung (3) als besonders robust. Bei diesem bleibt der Massenverlust infolge Verbrennung zu Gunsten der Probenmasse zu Versuchsbeginn unberücksichtigt. Diese kann ohne Unsicherheiten bei kontrollier- und reproduzierbaren Laborbedingungen im Vorfeld bestimmt werden. Für fast alle Versuche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte mittels FL eine Verbrennungseffektivität bestimmt werden.

Bei sehr vielen Brandversuchen, die nicht explizit zur Ermittlung einer Verbrennungseffektivität durchgeführt wurden, wird die Brennstoffmasse zu Versuchsbeginn festgestellt. Ebenso häufig wird die Wärmefreisetzungsrate aufgezeichnet. Weniger häufig, da oft nicht notwendig und aufwändiger, erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Massenverlustrate. Das Auswertekriterium FL eignet sich deshalb auch besonders zur Berechnung der Verbrennungseffektivitäten von bereits durchgeführten Versuchen.

Eine zweite Schwierigkeit im Vorfeld zur Berechnung von Verbrennungseffektivitäten war die Bestimmung des Heizwerts der einzelnen Gegenstände und Materialien. Dieser geht als Bezugsgröße in beinahe alle Auswertekriterien nach Tabelle 3-3 ein. Entsprechend der Vorgaben der externen Labore, welche die notwendigen Bestimmungen für dieses Forschungsvorhaben durchgeführt haben, dürfen bei der Heizwertbestimmung keine metallischen Bestandteile im Probenmaterial enthalten sein. So konnten zum Beispiel nicht alle Teile des Laptops, sondern lediglich das Plastikgehäuse für die Heizwertbestimmung herangezogen werden.

Die Untersuchung aller Bestandteile eines Gegenstandes ist sehr aufwändig. Der Gegenstand müsste dafür vollständig zerkleinert und die metallischen Bestandteile herausgefiltert werden. Alternativ wäre eine Beschränkung für die Brandversuche (Cone-Kalorimeter, Großversuch, etc.) auf die nichtmetallischen Bestandteile möglich. Statt eines vollständigen Laptops könnten auch nur die Plastikgehäuse mehrerer identischer Geräte verbrannt werden.

Das Cone-Kalorimeter hat sich als insgesamt gute Versuchsanordnung zur Bestimmung von Verbrennungseffektivitäten herausgestellt. Cone-Kalorimeter sind sehr gut etabliert und weit verbreitet in der Brandschutzforschung. Sie dienen meist als erster Ansatzpunkt zur experimentellen Bestimmung des Brandverhaltens von Baustoffen und sonstigen Produkten. Auch bei der Bestimmung von Verbrennungseffektivitäten sollten Cone-Kalorimeter-Versuche die erste Wahl darstellen. Sie können günstig, ohne großen Zeiteinsatz und reproduzierbar Daten liefern. Die Auswertung (Rohdaten → Verbrennungseffektivität) kann mit entsprechender Vorbereitung automatisch oder wenigsten halbautomatisch ablaufen. Bezüglich der Wärmestromdichte sollten nicht zu kleine Werte gewählt werden.

Ebenso gut etabliert sind der Room-Corner-Prüfstand und die eingesetzte Messtechnik beziehungsweise -methode. Die Kosten und insbesondere der nötige (Vorbereitungs-)Aufwand zur Durchführung von Versuchen unter der Haube eben dieses Prüfstandes sind überschaubar (Abschnitt 6.2 f.). Dementsprechend können Großversuche im labormaßstab gewonnenen Werten ergänzen beziehungsweise diese bestätigen. Als Musterbeispiel hierfür können die durchgeführten Laptop-Klein- und Großversuche dienen. In beiden Versuchsmaßstäben konnten ähnliche Verbrennungseffektivitäten von etwa 0,50 bis 0,60 mit wenigen Ausreißern in beide Richtungen bestimmt werden.

Werden während eines Brandversuches die Wärmefreisetzungsrate sowie die Massenverlustrate aufgezeichnet, könnten immer alle der ausgewählten Auswertekriterien genutzt werden. Die Auswertung ist im Vergleich zu den Versuchen wenig aufwendig. Auch bei einer großen Versuchsanzahl sollte die Auswertung deshalb idealerweise mehrere Auswertekriterien umfassen. Dabei haben die Intervallbetrachtungen eine höhere Priorität gegenüber den Zeitpunktbetrachtungen. Insbesondere das FL-Kriterium weist aufgrund seiner Unabhängigkeit vom Massenverlust infolge Verbrennung einen ganz besonderen Vorteil auf.

Auch die Mittelwertbildung über mehrere Kriterien hinweg ist eine gute Möglichkeit, zuverlässige Werte zu erhalten. Bei der Anwendung mehrerer Auswertekriterien können Ausreißer eingefangen werden (Abbildung 7-5). Die Qualität des Mittelwerts ist von der Größe der zugrundeliegenden Stichprobe abhängig.

Ebenso kann die Bestimmung der zeitabhängigen Verbrennungseffektivität aufschlussreiche Erkenntnisse liefern. Sie kann als über den Zeitverlauf konstanter Wert andere Ergebnisse bestätigen (vergleiche Abbildung 7-6 mit Abbildung 7-5). Oder aufzeigen, dass die Verbrennungseffektivität im Brandverlauf nicht konstant ist und etwaige andere Werte womöglich kritisch zu hinterfragen sind (vergleiche Abbildung 7-7 und Tabelle 7-4 mit Tabelle 7-1).

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Konkretisierung von Auswertekriterien zur Berechnung der Verbrennungseffektivität für den modernen Wohnungsbau. Dies ist notwendig, da es derzeit keine normative Regelung zur Berechnung der Verbrennungseffektivität gibt. Eine einheitliche und verlässliche Bestimmung ist aber notwendig, da die Verbrennungseffektivität als eine entscheidende Größe bei Berechnungen nach den Eurocode-Brandschutznachweisen Verwendung findet.

In einer umfangreichen Literaturstudie wurden verschiedenste Auswertekriterien zusammengetragen. Der Schwerpunkt der Studie lag auf Veröffentlichungen der letzten 10 Jahre. Es wurde eine Vielzahl an Dissertationen und Veröffentlichungen gesichtet. Die gesammelten Kriterien wurden miteinander verglichen und eine einheitliche Nomenklatur entwickelt. Die weitverbreitetsten und in der Praxis anwendbarsten Kriterien

- EHC
- HRR,mean
- HRR,10-90
- HRR,60/180/300s
- FL
- IGN
- $\dot{Q}_{max}$
- $\dot{m}_{max}$

wurden zur Anwendung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ausgewählt.

Acht unterschiedliche Gegenstände und Materialien wurden für die experimentellen Untersuchungen ausgewählt. Es handelte sich um Alltagsgegenstände (Bildschirm, Kleidung, Laptop, Matratze, Wasserkocher) sowie handelsüblichen Bodenbelägen (PVC-Boden, Teppich, Laminat). In beiden Fällen lag der Fokus auf Produkten aus Kunststoff. Alle Proben wurden jeweils dreimal im Cone-Kalorimeter bei einer hohen und einer niedrigen Wärmestromdichte untersucht. Es wurden Großversuche im Realmaßstab unter der Haube des Room-Corner-Prüfstandes durchgeführt. Bei den Großversuchen erfolgte die Beflammung der Alltagsgegenstände direkt mittels eines Kiesbettbrenners, die Bodenbeläge wurden indirekt mittels eines „Reflexions-tisches“ mit Hitze beaufschlagt. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden Verbrennungseffektivitäten gemäß den gewählten Auswertekriterien bestimmt. Insbesondere bei den Zeitpunkt Betrachtungen, aber teilweise auch bei den Intervallbetrachtungen konnten nicht im-

mer eine Verbrennungseffektivität berechnet werden. In einigen Fällen ergaben sich Verbrennungseffektivitäten kleiner Null oder größer Eins, was im Widerspruch zur Definition der Größe steht. Teilweise konnten Verbrennungseffektivitäten berechnet werden, diese waren allerdings sehr klein (dritte Nachkommastelle). In anderen Fällen war die Massenverlustrate eines betrachteten Zeitpunkts oder Intervalls gleich Null, was eine Division unmöglich machte.

Die Probleme bei der Berechnung der Verbrennungseffektivitäten konnten insbesondere auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

- Zum einen das starke Oszillieren der Massenverlustraten. Dies lässt sich durch die Wahl des FL-Kriteriums umgehen. Damit kann der Massenverlust infolge Verbrennung zu Gunsten der Probenmasse  $m_s$  zu Versuchsbeginn unberücksichtigt bleiben.
- Zum anderen die Bestimmung des Heizwerts eines Gegenstandes. Diese kann beim Vorhandensein metallischer Bestandteile nicht durchgeführt werden. Soll der Heizwert aus möglichst allen nichtmetallischen Bestandteilen eines Gegenstandes bestimmt werden, muss dieser aufwändig zerkleinert und alles Metall herausgefiltert werden. Werden lediglich Teile zum Beispiel des Plastikgehäuses zur Bestimmung von  $H_i$  herangezogen, ist fraglich, ob der Wert repräsentativ ist im Vergleich zu einer Wärmefreisetzungsrate, die bei einem Brandversuch eines Gegenstandes mit all seinen Bestandteilen gewonnen wurde.

Abschließend stellt Tabelle 9-1 die Empfehlungen, die auf den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Daten und Erkenntnissen basierenden Empfehlungen bezüglich

- des Versuchsmaßstabs und der Zündquelle,
- der Wahl des Auswertekriteriums sowie
- der Wahl eines alternativen Auswerteverfahrens

übersichtlich zusammen. Diese können durch zukünftige Versuchsreihen verbessert beziehungsweise weiter konkretisiert werden. Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben hat dafür aufgrund der gewählten Ausrichtung, also die Untersuchung

- möglichst vieler Auswertekriterien,
- an einer Vielzahl von Gegenstände
- in sowohl Klein- als auch Großversuchen

eine solide Grundlage in Form einer Vorauswahl geschaffen. Zukünftige Vorhaben können darauf aufbauend durch eine Beschränkung zwei der drei genannten Parameter zielstrebige Folgeuntersuchungen durchführen.

Tabelle 9-1: Empfehlungen bezüglich der Wahl des Auswertekriteriums sowie der Versuchsparameter

Parameter	Anmerkung bzw. Spezifikation	Empfehlung bzw. Bewertung	Grundlage der Bewertung <sup>(1)</sup>
Cone-Kalorimeter	Labormaßstab	++	
Großversuch	Direkte Beflammung	+	Lap-GrV
	Indirekte Beflammung	o	
Zündquelle (GrV <sup>(2)</sup> ) bzw. WSD (CK <sup>(3)</sup> )	Groß	-	PUR-GrV („Doppelbett“)
	Normal (realistisches Brandszenario)	++	Lap-GrV
	Klein	+	Abbildung 7-3
Auswertekriterium	EHC	++	
	FL	++	
	HRR,mean	+	
	HRR,10-90	+	
	HRR,...s	+	
	IGN	o	
	$\dot{Q},\text{max}$	o	
	$\dot{m},\text{max}$	o	
Mittelwert	Mehrere Auswertekriterien	+(4)	
VE(t)	Verlauf der zeitabhängigen VE	+	Lap-GrV, Lam-CK

## Bewertungsskala:

- ++ sollte immer ausgewertet/durchgeführt werden
- + kann ausgewertet/durchgeführt werden
- o kann ausgewertet/durchgeführt werden, ist aber stark von den jeweiligen Randbedingungen (Material, etc.) abhängig; es ist nicht unbedingt mit verwertbaren Ergebnissen zu rechnen
- sollte nicht ausgewertet/durchgeführt werden

## Anmerkungen:

- (1) Wird keine explizite Grundlage genannt, basiert die Bewertung auf der Gesamtheit der gesammelten Informationen, Daten und Erkenntnisse dieses Forschungsvorhabens zum jeweiligen Parameter.
- (2) GrV: kurz für Großversuch
- (3) CK: kurz für Cone-Kalorimeter
- (4) Mittelwertbildung nur zielführend, wenn mehrere plausible Werte vorliegen

Braunschweig, den 22.07.2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Joh. Zehfuß', with a long horizontal stroke extending from the end of the name.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Zehfuß

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Lukas Gößwein', written in a cursive style.

Lukas Gößwein, M.Sc.