

**Entwicklung einer Methodik zur  
Bestimmung des Verbrennungseffizienzfaktors  
von Feststoffen**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieurin**

**(Dr.-Ing.)**

von M. Sc. Sarah-K. Hahn

geb. am 24. Mai 1986 in Hannover

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. Dominique Thévenin (Vorsitz)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause (Gutachter)  
Prof. Dr.-Ing. Michael Rost (Gutachter)  
Associate Prof. Bjarne P. Husted, PhD (Gutachter)

eingereicht am: 03. Juni 2016

Promotionskolloquium am: 16. September 2016



---

## Kurzfassung

Zur Quantifizierung des Abbrandverhaltens von Materialien kann die Verbrennungseffizienz herangezogen werden. In Relation zum Heizwert beschreibt sie, wie viel der in einem Material potentiell vorhandenen Energie im Brandfall freigesetzt wird. Für ein Material, das vollständig verbrennt, ist diese Energie gleich dem Heizwert, sodass als maximaler Wert eine Effizienz von 1 folgt. Nicht brennbaren Materialien kann im Gegensatz dazu eine minimale Verbrennungseffizienz von 0 zugeordnet werden.

Die Verbrennungseffizienz ist keine Stoffeigenschaft und hängt daher maßgeblich von der Bestimmungsweise ab. Vor diesem Hintergrund wurde zunächst die Frage aufgegriffen, welche Größen zur Berechnung der Verbrennungseffizienz geeignet sind. Es wurden fünf Varianten zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz definiert, deren Basis neben dem Heizwert die Wärmefreisetzungsrates, die effektive Verbrennungswärme und die Brennstoffbeladung sowie ein entsprechender Massenbezug bilden.

Diese Varianten wurden anhand einer Materialauswahl bestimmt. Die Materialien wurden mit Blick auf eine möglichst große Bandweite ihrer Eigenschaften, ihre industrielle Bedeutung und Verbreitung sowie unter dem Aspekt ihrer Verwendung in der Forschung gewählt. Über die intrinsischen Merkmale der Materialien hinaus wurde deren Aufbereitungsart variiert.

Neben der Berechnungsweise ist die Wahl der Messtechnik von entscheidender Bedeutung. Hier wurde auf die derzeit führende Methode zur Bestimmung von Wärmefreisetzungsrates, die Sauerstoffverbrauchskalorimetrie, zurückgegriffen. In der Konsequenz wurden das Cone Calorimeter für Versuche im Labormaßstab und eine modifizierte Form des Single Burning Item Tests für Messungen im Zwischenmaßstab verwendet.

In Verbindung mit der Entscheidung über die Messgeräte wurde die optimale Wahl und Einstellung der äußeren Testparameter (Beaufschlagungsintensität, Probenhöhe, ...) untersucht. Die Einflüsse und Korrelationen der Faktoren wurden herausgearbeitet. Dies geschah mit Blick auf die Materialeigenschaften und die Probenform beziehungsweise -aufbereitung sowie im Hinblick auf die Basisgrößen der Varianten der Verbrennungseffizienz (Wärmefreisetzungsrates, effektive Verbrennungswärme, Massenverlustrate, ...) und die Verbrennungseffizienzen als solche. Abschließend erfolgte ein Maßstabsvergleich. In diesem Zusammenhang wurde ein materialunabhängiger, verschiedene Beaufschlagungsintensitäten umfassender Faktor generiert und in die Auswertung zum Scale-up mittels statistischer Methoden einbezogen.

Im Ergebnis hat sich die kombinierte Angabe von vier Varianten der Verbrennungseffizienz (Verbrennungseffizienz mit Bezug zur effektiven Verbrennungswärme, zur Brennstoffbeladung, zur Hauptbrandphase und zum Brandbeginn) als sinnvoll herausgestellt. Dies offen-

bart auf den ersten Blick eine Reihe an Informationen über das Abbrandverhalten eines Materials. Es wird deutlich, wie vollständig die Verbrennung aus chemischer Sicht in Bezug auf entstehende Verbrennungsprodukte (CO, CO<sub>2</sub>, ...) verläuft. Darüber hinaus wird eine Aussage über den Verbleib von Materialrückständen und damit über den tatsächlichen Anteil (Energieeintrag) des Materials am Brandgeschehen möglich. Weiterhin wird eine gesonderte Information zum Beitrag des Materials in der Hauptbrandphase (Vollbrandphase) sowie zu Beginn des Verbrennungsprozesses (Entstehungsbrand) bereitgestellt.

Die Betrachtungen zur Verbrennungseffizienz wurden durchgeführt, um Fortschritte zur Implementierung des Abbrandverhaltens im Rahmen der Bemessung der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen zu ermöglichen. Bisher findet hierfür der Abbrandfaktor  $m$  Verwendung, der das Brandverhalten eines Stoffs oder Stoffgemisches im Vergleich zu einer Krippe aus Fichtenholz bewertet. Im Zuge verbesserter Möglichkeiten zur Quantifizierung des Abbrandverhaltens sowie auf Grund der Tatsache, dass keine Prüfapparatur mehr zur Bestimmung von  $m$ -Faktoren existiert, kann die Verbrennungseffizienz einen Ersatz bieten. Unter diesem Aspekt der Brandlastbewertung, maßgeblich im Industriebau, hat sich die Verbrennungseffizienz mit Bezug zur Vollbrandphase als besonders geeignet dargestellt.

---

## Abstract

For quantifying the burning behavior of materials the combustion efficiency can be used. The combustion efficiency describes the energy which is set free by a material in case of a fire in relation to its lower heating value. If a material is burnt completely the energy set free equals the lower heating value and therefore a maximum efficiency of 1 results. By contrast, a combustion efficiency of 0 can be assigned to incombustible materials.

The combustion efficiency is not a material property and consequently depends on the method of its determination. Taking respect to this fact, at first it was discussed which values were adequate for calculating the combustion efficiency. Five variants of the combustion efficiency were defined. Beside the lower heating value they are based on the heat release rate, the effective heat of combustion and the fuel load as well as a referring mass quantity.

On the basis of a material selection these variants were determined. The materials have been chosen with a view to varying characteristic properties on the one hand and regarding their industrial meaning and their application within research on the other hand. Beside the intrinsic properties of the materials their kind of preparation was varied.

In addition to the calculation the choice of the test rig is quite important. Here, the currently leading technique for measuring heat release rates, the oxygen consumption calorimetry, was applied. In consequence, the Cone Calorimeter suited for small-scale tests and a modified version of the Single Burning Item Test was appropriate for mid-scale measurements.

In relation to the decision about the apparatuses the preferable adjustment of the test parameters (heat flux, height of specimens, ...) was studied. The influence and the correlation of the factors were analyzed. This was done concerning the material properties and the preparation of the specimens as well as regarding the main values of the variants of the combustion efficiencies (heat release rate, effective heat of combustion, mass loss rate, ...) and the combustion efficiencies themselves. Finally, the scales were compared and the possibility of a scale-up was investigated. A factor, calculated from results of different materials and heat fluxes, was generated and implemented in the context of the statistical evaluation.

In conclusion, the combined declaration of four variants of the combustion efficiency (combustion efficiency referring to the main burning period, to the effective heat of combustion, to the fuel load and to the beginning of the combustion) turned out to be meaningful. At first sight they show a lot of information about the combustion behavior of a material. Firstly, the completeness of the combustion under chemical aspects, for example concerning the produced gases, gets obvious. Further on, conclusions about residues and thereby about the part of energy which is actually released from the material and takes part in the fire can be

drawn. At last, the contribution of the material to the main burning period and its behavior in the beginning of the fire (incipient fire) get evident.

The development of a method for determining the combustion efficiency was of interest in the context of dimensioning the fire endurance of structural elements. So far for this purpose the combustion factor  $m$  is used which rates the burning behavior of a material in relation to a well defined crib made of spruce. In the course of enhanced possibilities for the quantification of the combustion behavior as well as to the fact that an apparatus for determining  $m$ -factors does not exist anymore the combustion efficiency can be an alternative. Taking this aspect of the assessment of fire loads, mainly regarding industrial buildings, into account, the combustion efficiency referring to the main burning period indicates to be suitable.

---

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Formelzeichen

$A_i$	in $\text{mm}^2$	Innenfläche
$A_s$	in $\text{m}^2$	Probenoberfläche
$C$	in $(\text{mgK})^{0,5}$	Kalibrierungskonstante (an der Messblende)
$c_p$	in $\text{J}/(\text{kgK})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$d$		Abstand zwischen zwei Mittelwerten
$d_a$	in $\text{mm}$	äußerer Durchmesser
$d_i$	in $\text{mm}$	innerer Durchmesser
$D_{n_1, n_2}$		größter vertikaler Abstand zwischen den empirischen Verteilungsfunktionen der Reihen 1 und 2 der Variante der Verbrennungseffizienz des Materials
$F_0$		hypothetische Verteilungsfunktion
$F_i$		Verteilungsfunktion der Reihe $i$
$h$	in $\text{mm}$	Füllhöhe
$H_0$		Nullhypothese
$H_1$		Alternativhypothese
$\Delta h_{\text{ch}}$	in $\text{kJ/g}$	spezifische chemische Verbrennungswärme
$\Delta H_{\text{c,eff}}$	in $\text{kJ}$	effektive Verbrennungswärme
$\Delta h_{\text{c,eff}}$	in $\text{kJ/g}$	spezifische effektive Verbrennungswärme
$h_o$	in $\text{kJ/g}$	Brennwert
$h_u$	in $\text{kJ/g}$	Heizwert
$h_{\text{W,a}}$	in $\text{mm}$	äußere Wandhöhe
$h_{\text{W,i}}$	in $\text{mm}$	innere Wandhöhe
HFX	in $\text{kW/m}^2$	Wärmestromdichte
$I$	in $\text{Ws}^{0,5}/(\text{m}^2\text{K})$	Wärmeeindringkoeffizient (Thermalträgheit)
$i$		erster laufender Parameter
$j$		zweiter laufender Parameter

## Symbolverzeichnis

---

$k$		Anzahl der Freiheitsgrade
$K_{n_1, n_2}$		aus den Grunddaten der Variante der Verbrennungseffizienz für das Material berechnete Realisation bei ungleichen Reihenlängen
$k_{n_1, n_2; 1-\alpha}$		tabellierter kritischer Wert zum KS-Test bei den Reihenlängen $n_1$ und $n_2$ zum Niveau $\alpha$
$k_t$		Zeit-Temperatur-Faktor nach [DIN18230-2]
$l$	in mm	minimale Probenhöhe
$L_n^{\text{norm}}$		aus den Grunddaten der Variante der Verbrennungseffizienz für das Material berechnetes Supremum
$l_{n, 1-\alpha}^{\text{norm}}$		tabellierter kritischer Wert zum Test auf nicht spezifizierte Normalverteilung bei $n$ Werten zum Niveau $\alpha$
$L_{\text{sp}}$	in m	Rauchpunkt
$m$		Abbrandfaktor
$\Delta m$	in g	Massenverlust
$\Delta m^*$	in g	gesamter Massenverlust
$\dot{m}$	in g/s	mittlere Massenverlustrate von der Entzündung bis zum Testende
$m_{10}$	in g	Probenmasse zum Zeitpunkt des 10%igen Massenverlusts
$m_{90}$	in g	Probenmasse zum Zeitpunkt des 90%igen Massenverlusts
$\dot{m}_{10-90}$	in g/s	mittlere Massenverlustrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts
$\dot{m}_{60s}$	in g/s	mittlere Massenverlustrate von der Entzündung bis 60 s hier-nach
$\dot{m}_{180s}$	in g/s	mittlere Massenverlustrate von der Entzündung bis 180 s hier-nach
$\dot{m}_{\text{CC}}$	in g/s	Massenverlustrate, small-scale
$m_{\text{end}}$	in g	Probenmasse am Testende
$M_i$		i-te Korngrößenmessung
$m_{\text{ign}}$	in g	Probenmasse zum Zeitpunkt der Entzündung

## Symbolverzeichnis

---

$m_s$	in g	Masse der Probe bei Testbeginn
$n$		Anzahl eingehender Werte
$n_i$		Anzahl der Werte der Reihe $i$
$\Delta p$	in Pa	Druckdifferenz an der Messblende
$Q$	in kJ	insgesamt freigesetzte Wärme
$q$	in kJ/g	Brennstoffbeladung
$Q_0$	in %	Summenverteilung nach der Partikelanzahl
$q_0$	in %/mm	Dichteverteilung nach der Partikelanzahl
$Q_3$	in %	Summenverteilung nach dem Volumen
$q_3$	in %/mm <sup>3</sup>	Dichteverteilung nach dem Volumen
$\dot{Q}_{10-90}$	in kW	mittlere Wärmefreisetzungsrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts
$\dot{Q}''_{60s}$	in kW/m <sup>2</sup>	mittlere flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate von der Entzündung bis 60 s hiernach
$\dot{Q}_{180s}$	in kW	mittlere Wärmefreisetzungsrate von der Entzündung bis 180 s hiernach
$\dot{Q}_{burner}$	in kW	mittlere Wärmefreisetzungsrate des Brenners
$Q''_{CC}$	in MJ/m <sup>2</sup>	flächenbezogene insgesamt freigesetzte Wärme, small-scale
$\dot{Q}_{CC}$	in kW	Wärmefreisetzungsrate, small-scale
$\dot{Q}_{mean}$	in kW	Gesamtmittelwert der Wärmefreisetzungsrate
$\dot{Q}_{peak}$	in kW	maximale Wärmefreisetzungsrate
$Q_{SBI}$	in kJ	insgesamt freigesetzte Wärme, mid-scale
$\dot{Q}_{SBI}$	in kW	Wärmefreisetzungsrate, mid-scale
$\dot{Q}^*_{SBI}$	in kW	Wärmefreisetzungsrate der Probe vor der Glättung, mid-scale
$\dot{Q}_{tot,SBI}$	in kW	Wärmefreisetzungsrate von Brenner und Probe, mid-scale
$s$		empirische Standardabweichung
$S_n$		empirische Verteilungsfunktion mit $n$ Werten
$S_{n_i,i}$		empirische Verteilungsfunktion mit $n_i$ Werten für Reihe $i$

## Symbolverzeichnis

---

t		aus den Grunddaten der Variante der Verbrennungseffizienz für das Material berechnete Realisation der standardisierten, approximativ t-verteiltern Zufallsvariable
$t_1$	in s	Zeitpunkt des ersten nicht negativen Werts der HRR nach dem Testbeginn
$t_{10}$	in s	Zeitpunkt des 10%igen Massenverlusts
$t_{90}$	in s	Zeitpunkt des 90%igen Massenverlusts
$t_{180s}$	in s	Zeitpunkt 180 s nach der Entzündung
$t_a$	in s	Referenzzeit; hier: Zeitpunkt, an dem $Q_{SBI} = \text{konst.}$ gilt
$T_e$	in K	absolute Gastemperatur an der Messblende
$t_{\text{end}}$	in s	Ende des Tests
$t_{\text{fo}}$	in s	Zeitpunkt des Erlöschens
$t_{\text{ign}}$	in s	Zeitpunkt der Entzündung
$t_{k;1-\frac{\alpha}{2}}$		tabelliertes Quantil der t-Verteilung bei k Freiheitsgraden zum Niveau $\frac{\alpha}{2}$
$t_{\text{peak}}$	in s	Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Wärmefreisetzungsrate
$t_s$	in s	Zeitpunkt des Testbeginns
V		Variationskoeffizient
$\dot{V}_{298K}$	in m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom des Abzugssystems bei 298 K
x	in mm	Äquivalentdurchmesser
$\bar{x}$		empirischer Mittelwert (arithmetisch)
$X_{\text{CO}}$		Kohlenstoffmonoxid Messwert Analysator, Molanteil
$X_{\text{CO}_2}$		Kohlenstoffdioxid Messwert Analysator, Molanteil
$X_{\text{CO}_2}^0$		Kohlenstoffdioxid Messwert Analysator am Versuchsbeginn, Molanteil
$x_i$		i-te Merkmalsausprägung
$X_{\text{O}_2}$		Sauerstoff Messwert Analysator, Molanteil
$X_{\text{O}_2}^0$		Sauerstoff Messwert Analysator am Versuchsbeginn, Molanteil

$X_{O_2}^a$	Sauerstoff der Umgebungsluft, Molanteil
$z$	Anzahl der Beobachtungen

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\lambda$	in W/(mK) Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	Mittelwert
$\mu_i$	Mittelwert der Reihe $i$
$\rho$	in kg/m <sup>3</sup> Dichte
$\sigma$	Standardabweichung
$\Phi_{CC}$	Sauerstoffverbrauchsfaktor, small-scale
$\Phi_{SBI}$	Sauerstoffverbrauchsfaktor, mid-scale
$\Delta\chi$	Differenz zwischen den jeweiligen Mittelwerten der Verbrennungseffizienz
$\chi_{ch}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der chemischen Verbrennungswärme
$\chi_{EHC}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der effektiven Verbrennungswärme
$\chi_{FL}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der Brennstoffbeladung
$\chi_{HRR,10-90}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungsrates über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts
$\chi_{HRR,60s}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungsrates von der Entzündung bis 60 s hiernach
$\chi_{HRR,180s}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungsrates von der Entzündung bis 180 s hiernach
$\chi_{HRR,mean}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungsrates
$\chi_{HRR,mean*}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungs- und Massenverlustrates

$\chi_{sp}$

Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit des Rauchpunkts

**Relevante Stoffe**

C	Kohlenstoff
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethen (Ethylen)
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Methylmethacrylat
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Glukose
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	Styrol
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
H	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
N	Stickstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
S	Schwefel

---

## Abkürzungsverzeichnis

ASMLR	Average Specific Mass Loss Rate – mittlere Massenverlustrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts
ASTM	American Society for Testing and Materials – Internationale Organisation für Standardisierung
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
CC	Cone Calorimeter
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EHC	Effective Heat of Combustion – spezifische effektive Verbrennungswärme
EN	Europäische Norm
EPS	Expandierter Polystyrol-Hartschaum
EURIFIC	European Reaction to Fire Classification – Nordeuropäisches Forschungsvorhaben zur Klassifizierung des Brandverhaltens
FIGRA	Fire Growth Rate – Maximum des Quotienten der Wärmefreisetzungsrate einer Probe und dem zugehörigen Zeitpunkt
FL	Fuel Load – Brennstoffbeladung
FO	Flame-Out – Erlöschen der Flamme
FPA	Fire Propagation Apparatus
GGW	Gleichgewicht
HDPE	High-Density Polyethylene – Polyethylen hoher Dichte
HFX	Heat Flux – Wärmestromdichte
HRR	Heat Release Rate – Wärmefreisetzungsrate
ISO	International Organization for Standardization – Internationale Organisation für Normung
KS	Kolmogoroff-Smirnov
LDPE	Low-Density Polyethylene – Polyethylen geringer Dichte
LHV	Lower Heating Value – Heizwert
MLR	Mass Loss Rate – Massenverlustrate
NBS	National Bureau of Standards (alte Bezeichnung), neu: NIST

## Abkürzungsverzeichnis

---

NFPA	National Fire Protection Association – US-amerikanische Gesellschaft für Brandschutz
NIST	National Institute of Standards and Technology – US-amerikanisches Nationales Institut für Standards und Technologie
NISTIR	National Institute of Standards and Technology Interagency Report – Bericht des Nationalen Instituts für Standards und Technologie
NV	Normalverteilung
nv	nicht verworfen
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmethacrylat
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan
RCT	Room Corner Test
SBI	Single Burning Item Test
SFPE	Society of Fire Protection Engineers – US-amerikanische Gesellschaft der Brandschutzingenieure
SI	Système International d’Unités – Internationales Einheitensystem
SINTEF	Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning – Norwegische Stiftung für industrielle und technische Forschung
SMOGRA	Smoke Growth Rate – Maximum des Quotienten der Rauchentwicklungsrate und dem zugehörigen Zeitpunkt
SP	Smoke Point – Rauchpunkt
v	verworfen

---

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg sowie an der Hochschule Magdeburg-Stendal erstellt. Sie entstand maßgeblich am Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Rost. Danke für die interessante Themenstellung, die jederzeit gewährte freundliche Unterstützung und für die wertvollen Hinweise in den Diskussionen.

Weiterhin danke ich Herrn Associate Prof. Bjarne P. Husted, PhD, des "Department of Fire Safety Engineering" an der Universität Lund in Schweden für sein Interesse sowie die Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats.

Danken möchte ich weiterhin allen Mitarbeitern des Fachbereichs Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit, des Instituts für Apparate- und Umwelttechnik der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik sowie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, die mich bei der Durchführung und Anfertigung der Arbeit unterstützt haben. Des Weiteren gilt mein Dank den heutigen und vorigen Mitarbeitern des Lehrstuhls „Anlagentechnik und Anlagensicherheit“, die stets zu Diskussionen mit interessanten Anregungen bereit waren.

Ein sehr herzliches Dankeschön geht an meine Eltern Petra und Michael Hahn für die Möglichkeit – über die logische Konsequenz hinaus – und die fortwährende Unterstützung. Abschließend ein großes Dankeschön an Herrn PD Dr.-Ing. Marcus Marx für sein andauerndes Interesse an meiner Arbeit sowie für die Begleitung der Vortragsreisen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand von Technik und Wissenschaft sowie Zielstellung und Vorgehensweise .4</b>	<b>4</b>
2.1. <i>Stand der Technik.....</i>	<i>4</i>
2.2. <i>Stand der Wissenschaft .....</i>	<i>6</i>
2.3. <i>Zielstellung und Vorgehensweise.....</i>	<i>8</i>
<b>3. Theorie der Verbrennungseffizienz .....</b>	<b>11</b>
3.1. <i>Basisgrößen und deren Bestimmungsweise.....</i>	<i>11</i>
3.2. <i>Varianten der Verbrennungseffizienz .....</i>	<i>13</i>
3.3. <i>Berechnung auf Datengrundlage des Cone Calorimeters.....</i>	<i>16</i>
3.4. <i>Berechnung auf Datengrundlage des modifizierten Single Burning         Item Tests .....</i>	<i>19</i>
<b>4. Probenauswahl und Materialcharakterisierung .....</b>	<b>22</b>
4.1. <i>Holz und Holzwerkstoffe.....</i>	<i>25</i>
4.2. <i>Kunststoffe.....</i>	<i>26</i>
<b>5. Messung der Verbrennungseffizienz.....</b>	<b>33</b>
5.1. <i>Messung der Verbrennungseffizienz mittels Cone Calorimeter .....</i>	<i>33</i>
5.1.1. <i>Messregime.....</i>	<i>33</i>
5.1.2. <i>Versuchsübersicht.....</i>	<i>37</i>
5.2. <i>Messung der Verbrennungseffizienz mittels modifiziertem Single Burning         Item Test.....</i>	<i>39</i>
5.2.1. <i>Messregime.....</i>	<i>39</i>
5.2.2. <i>Versuchsübersicht.....</i>	<i>43</i>
5.3. <i>Einflussfaktoren bei der Bestimmung der Verbrennungseffizienz.....</i>	<i>43</i>
5.3.1. <i>Probenaufbereitung.....</i>	<i>44</i>
5.3.1.1. <i>Spezifische Oberfläche, Probenhöhe und thermische Stoffeigenschaften.....</i>	<i>45</i>

5.3.1.2. Umsetzung und Vergleich mit dem modifizierten Single Burning Item Test .....	46
5.3.2. Probenbeaufschlagung.....	47
5.3.2.1. Bestrahlungsstärke .....	47
5.3.2.2. Umsetzung und Vergleich mit dem modifizierten Single Burning Item Test .....	49
5.3.3. Brandverhalten der Proben.....	50
5.3.3.1. Aggregatzustandsänderung .....	50
5.3.3.2. Tendenz zur Rauch- und Rußbildung.....	51
5.3.3.3. Zusatz von Flammschutzmitteln .....	52
<b>6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter.....</b>	<b>54</b>
6.1. Holz und Holzwerkstoffe.....	54
6.1.1. Brandverhalten von Feststoffen der Brandklasse A am Beispiel von Holz .....	54
6.1.2. Fichtenholz.....	56
6.1.3. Rohspan P2 .....	65
6.1.4. Abschließende Betrachtung Holz- und Holzwerkstoffe .....	69
6.2. Kunststoffe.....	73
6.2.1. Brandverhalten von Feststoffen der Brandklasse B am Beispiel von Po- lyethylen und Polymethylmethacrylat .....	74
6.2.2. Leicht- und normalentflammbare Kunststoffe der Brandklasse B.....	75
6.2.2.1. Polyethylen .....	75
6.2.2.2. Polymethylmethacrylat .....	80
6.2.2.3. Abschließende Betrachtung leicht- und normalentflammbarer Kunststof- fe der Brandklasse B.....	83
6.2.3. Schwerentflammbare Kunststoffe der Brandklassen A und B.....	86
6.2.3.1. Polyurethan B1 und B3 .....	87
6.2.3.2. Polystyrol B1 .....	92
6.2.3.3. Abschließende Betrachtung schwerentflammbarer Kunststoffe der Brandklassen A und B.....	96

<b>7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning</b>	
<b>Item Test</b> .....	<b>101</b>
7.1. Holz und Holzwerkstoffe.....	101
7.2. Kunststoffe.....	107
<b>8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab</b> .....	<b>115</b>
8.1. Tabellarische Gegenüberstellung und Generierung von Maßstabsfaktoren	115
8.2. Statistische Methode.....	118
8.2.1. Vertrauenswahrscheinlichkeit.....	118
8.2.2. Testen der Daten auf Normalverteilung .....	119
8.2.3. Testen der Daten auf Vergleichbarkeit .....	120
8.3. Vergleich der Ergebnisse des Labor- und Zwischenmaßstabs .....	122
8.3.1. Testen der Daten auf Normalverteilung .....	122
8.3.2. Testen der Daten auf Vergleichbarkeit .....	125
8.3.2.1. Vergleich der Datensätze des Labormaßstabs bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken.....	125
8.3.2.2. Vergleich der Datensätze des Labormaßstabs bei einer Bestrahlungs- stärke mit dem Zwischenmaßstab .....	128
8.3.2.3. Vergleich der Datensätze des Labormaßstabs bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken mit dem Zwischenmaßstab .....	129
8.3.3. Abschließende Betrachtung Maßstabsvergleich .....	130
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>132</b>
<b>10. Verzeichnisse</b> .....	<b>135</b>
10.1. Literaturverzeichnis .....	135
10.2. Abbildungsverzeichnis.....	142
10.3. Tabellenverzeichnis.....	147
<b>11. Anhang</b> .....	<b>151</b>

---

## 1. Einleitung

Die Auslegung von Brandschutzmaßnahmen ist neben dem Streben nach Sicherheit durch wirtschaftliche Aspekte geprägt. Eine Überbemessung resultiert in hohen Investitionskosten, eine Unterbemessung bedeutet ein großes Risiko beträchtlicher Folgekosten auf Grund von Brandschäden. Dabei wird neben territorialen und strukturellen Unterschieden das Gefährdungsniveau von baulichen Anlagen vor allem durch die jeweilige Nutzung beurteilt [Sau14]. Für Industriebauten werden konkrete Anforderungen in der DIN 18230 [DIN18230-1], [DIN18230-2], [DIN18230-3] genannt. Als charakteristisches, das Gefährdungsniveau beschreibende Merkmal dieser Gebäudeart gilt die Handhabung beziehungsweise Lagerung großer Stoffmengen. Da die Materialien oftmals brennbar sind, folgen entsprechende Forderungen an den vorbeugenden Brandschutz. Diese Anforderungen gilt es ausreichend präzise abzuleiten, um zum einen die Kosten für die brandschutztechnische Infrastruktur gering zu halten, zum anderen die Gefahr eines Brandes – in Verbindung mit seinen bereits erwähnten Folgekosten – zu minimieren.

Um die Beurteilung zu ermöglichen, ist zunächst die Kenntnis des energetischen Potentials der gehandhabten beziehungsweise gelagerten Güter, der Brandstoffe, von entscheidender Bedeutung. Hierfür wird im Allgemeinen der Heizwert (Lower Heating Value – LHV) herangezogen. In der Regel wird bei einem Verbrennungsprozess jedoch nur ein gewisser Teil der potentiell vorhandenen (inhärenten) Energie umgesetzt. Da die Brandschutzmaßnahmen in Abhängigkeit der freiwerdenden Energie zu bemessen sind, ist es demzufolge von besonderem Interesse, die tatsächlich freiwerdende Energie, im Gegensatz zur inhärent vorhandenen, zu quantifizieren. So ist sichergestellt, dass geeignete Brandschutzmaßnahmen ergriffen werden können, das heißt die Kosten der Maßnahmen und das akzeptierte Restrisiko ein angemessenes Verhältnis bilden.

Für die Auslegung angemessener Brandschutzmaßnahmen ist demzufolge eine möglichst genaue Kenntnis realer Brandverläufe erforderlich. Hierbei kommt dem Abbrandverhalten von Materialien eine entscheidende Bedeutung zu. Im Rahmen des baulichen Brandschutzes im Industriebau wird es bisher durch den Abbrandfaktor  $m$  gemäß der im Jahr 1982 zuerst erschienenen Norm DIN 18230 bewertet [Spe13]: Es erfolgt eine empirisch-ingenieurtechnische Einschätzung des im Brandfall erwarteten Energieeintrags durch vorhandene Brandlasten [DIN18230-1]. Die verwendeten Abbrandfaktoren beurteilen dabei das Abbrandverhalten in Relation zu einem Vergleichsstoff.

Problematisch ist, dass eine Versuchsanlage [DIN18230-2] zur Bestimmung von  $m$ -Faktoren nicht mehr existiert. Auch ist die Übertragbarkeit bereits ermittelter Werte [DIN18230-3] auf weitere Materialien kritisch anzusehen. Weiterhin haben die in der Brandschutzforschung angewendeten Prüfmethode seit den 80er Jahren einen bedeutenden

## 1. Einleitung

---

Wandel durchlaufen: Während zunächst lediglich ein einfaches Testergebnis, oft mit wenig Bezug zum eigentlich interessierenden Brandszenario, erzielt werden konnte, sind mittlerweile deutlich bessere Testmethoden verfügbar, welche meist auf den Parameter der Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate – HRR) Bezug nehmen [Hir08]. So geht die nach Babrauskas [Bab92] wichtigste Kenngröße zur Quantifizierung von Bränden ein. Hinzukommend ist die Verwendung des Abbrandfaktors international nicht üblich [Blu03].

Eine andere, international bekannte Möglichkeit zur Quantifizierung des Abbrandverhaltens von Materialien ist die Verbrennungseffizienz. Sie quantifiziert unmittelbar, das heißt ohne Zuhilfenahme eines Bezugsstoffs, wie viel der in einem Material enthaltenen Energie im Fall einer Verbrennung tatsächlich frei wird. Ferner wird das Abbrandverhalten insofern direkt quantifiziert, dass im Gegensatz zur Bestimmung des m-Faktors keine empirischen Faktoren einfließen. Die Verbrennungseffizienz wird im Allgemeinen anhand der effektiven Verbrennungswärme (Effective Heat of Combustion – EHC) berechnet (zum Beispiel [Tew02]). Damit stellt sie eine Möglichkeit zur Charakterisierung des Abbrandverhaltens auf Basis von Wärmefreisetzungsraten dar.

Wie der Abbrandfaktor ist die Verbrennungseffizienz „im Gegensatz zu den physikalisch-chemischen Stoffgrößen jedoch auch von der Bestimmungsmethode [...] beeinflusst“ [Tsc13]. So variiert die Effizienz unter anderem mit der Aufbereitungsform des Materials oder dem verwendeten Messgerät. In der Konsequenz muss berücksichtigt werden, dass sie einen Prozess beschreibt und für ein Material durchaus unterschiedliche Ergebnisse folgen können.

Ziel der Arbeit ist daher, eine Methodik zur Ermittlung der maßgeblichen physikalischen Einflussgrößen auf die Verbrennungseffizienz vorzuschlagen, die als Grundlage für die Bewertung von Brandlasten im Industriebau dienen kann. Dabei ist es wichtig, geeignete Messtechnik zu finden und ein Messverfahren zu entwickeln, das konträre Bedingungen erfüllt: Einerseits sollen die Ergebnisse so genau wie nötig, andererseits für die Anwendung in der Praxis mit so wenig Aufwand wie möglich (Materialeinsatz, Zeiterfordernis etc.) generiert werden. Hinzukommend wird an das Verfahren die Anforderung gestellt, möglichst vielseitig einsetzbar zu sein (zum Beispiel Flüssigkeiten- und Feststofftests). Dem gegenüber steht die Forderung, mit dem Verfahren weitestgehend die Eigenarten eines Materials zu berücksichtigen und bewerten zu können. Diese Ansprüche gilt es im Verlauf der Arbeit abzuwägen und bestmöglich zu vereinen.

Zu diesem Zweck werden möglichst verschiedenartige Materialien getestet und darüber hinaus deren Aufbereitungsart variiert. Ferner werden unterschiedliche Testbedingungen untersucht, um Aufschluss über die erforderlichen Versuchsbedingungen, das heißt die beste Wahl der Verfahrensparameter, abzuleiten.

## 1. Einleitung

---

Es ist zu unterscheiden zwischen der umfassenden wissenschaftlichen Betrachtung auf der einen und der planungstechnischen Anwendung auf der anderen Seite. Aus erstgenannter Sicht sind Detailkenntnisse, etwa zu während der Verbrennung ablaufenden Prozessen und zu den hieraus resultierenden Unterschieden in der Effizienz der Verbrennung, von Interesse. Für die anwendungsorientierte Überlegung ist es von übergeordneter Bedeutung, ein geeignetes Verfahren hinreichend genau zu definieren. So können konsistente, reproduzierbare Werte (normativ) produziert und festgelegt werden. Darüber hinaus wird die gleichartige Beurteilung weiterer Materialien sichergestellt.

Naturgemäß stellen sich Laborversuche etwa aus wirtschaftlicher, umweltfreundlicher sowie praktikabler Sicht vorteilhaft dar. Ein weiterer Aspekt der Arbeit ist daher, zu untersuchen, inwiefern im Labormaßstab gewonnene Verbrennungseffizienzen im Maßstabsvergleich bestehen können und damit geeignet sind, die freigesetzte Reaktionswärme in Anwendungen in verschiedenen Längenmaßstäben vorherzusagen.

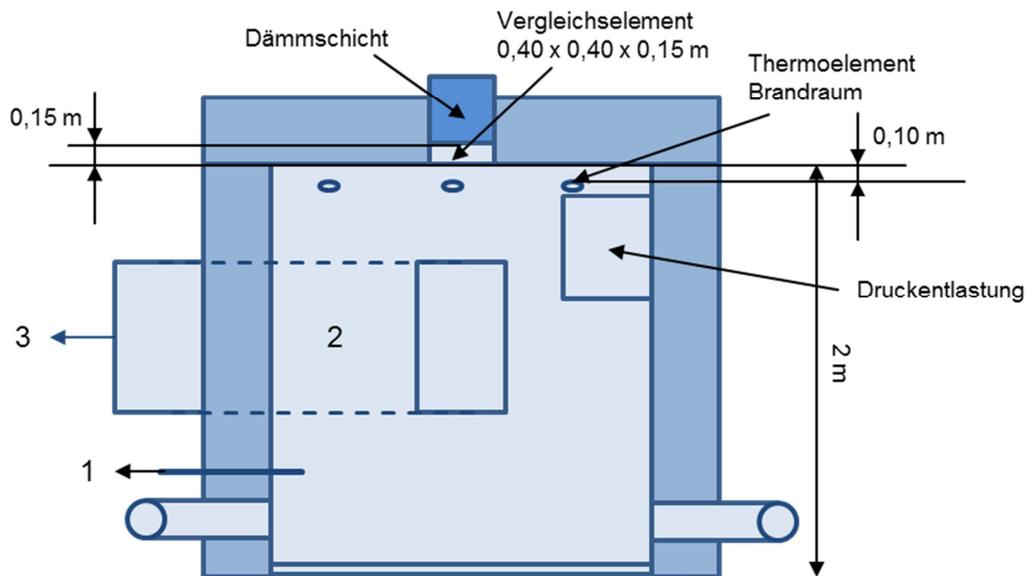
---

## **2. Stand von Technik und Wissenschaft sowie Zielstellung und Vorgehensweise**

Nachstehend wird zunächst der Stand der Technik zur Bewertung von Brandlasten im Industriebau dargelegt. Es schließen Erläuterungen zum Stand der Wissenschaft mit der üblichen Bemessungsweise von Faktoren der Verbrennungseffizienz an. Der hieraus resultierende Forschungsbedarf wird als Motivation der Arbeit benannt und schlussfolgernd die Vorgehensweise beschrieben.

### **2.1. Stand der Technik**

Wie bereits erwähnt, wird im Industriebau derzeit auf ein nationales Verfahren zur Bewertung von Brandlasten gemäß [DIN18230-1] zurückgegriffen. Das übergeordnete Ziel ist die Festlegung der notwendigen Feuerwiderstandsdauer tragender und aussteifender Bauteile: Sie wird basierend auf der Brandbelastung sowie auf der Nutzung und der Beschaffenheit des Gebäudes (etwa die brandschutztechnische Infrastruktur oder vorhandene Ebenen betreffend) über die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer bestimmt. Das Abbrandverhalten der Stoffe findet dabei mittels m-Faktoren in der Brandlastbewertung Berücksichtigung. Die Faktoren sollen „Form, Verteilung, Lagerungsdichte und Feuchte“ der Materialien [DIN18230-1] bewerten und gehen in das Produkt aus Masse und Heizwert ein. Ihre Bemessung erfolgte mit Hilfe eines eigens geschaffenen Brandofens (Abbildung 2-1) nach [DIN18230-2].



**Abbildung 2-1:** Versuchseinrichtung zur Bestimmung des Abbrandfaktors (Schnitt) nach [DIN18230-2]: Differenzdruck-Messstelle (1), Entnahmestelle für O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>-, CO-Messungen (2), Rauchgaskanal zur Abgasreinigungsanlage (3)<sup>1</sup>

Zentraler Gedanke bei der Entwicklung des Verfahrens war der Vergleich des zu testenden Materials mit einem Normbrandstoff, der eine Verbrennungskurve ähnlich der Einheitstemperaturzeitkurve nach [DIN4102-2] aufweist. Hierfür wurde sägeraues Fichtenholz gewählt, das in Krippenform auf der Wägeeinrichtung zu schichten war. Ihm wurde ein Abbrandfaktor von  $m = 1$  zugeordnet. Ein weiterer Grund für die Wahl dieses Normbrandstoffs kann in der Anfang der 60er Jahre üblichen Umrechnung aller Brandlasten in Holzgleichwerte [Hal61] gesehen werden.

Um den  $m$ -Faktor eines Materials zu bestimmen, wurde über das Produkt aus Heizwert und Masse der Probe sowie eines ermittelten Zeit-Temperatur-Faktors<sup>2</sup> ( $k_t$ ) nach [DIN18230-2] die Energie berechnet, die notwendig ist, um die gleichen Auswirkungen in einem Vergleichsbau teil zu erzielen wie beim Abbrand von Fichtenholzkrippen. Der so bestimmte  $m$ -Faktor gibt demnach an, „mit welchem Vielfachen des Energieinhaltes einer Vergleichsbrandmenge aus Holzrippen die gleiche Brandwirkung am Vergleichselement erzielt wird, wie mit dem Energieinhalt des untersuchten Stoffes“ [Hos92]. Das bedeutet, dass kleine Abbrandfaktoren größere Massen beziehungsweise Heizwerte des zu untersuchenden Stoffes

<sup>1</sup> Wiedergegeben mit Erlaubnis von DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Am DIN Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

<sup>2</sup> Das theoretische Minimum für den Zeit-Temperatur-Faktor von  $k_t = 0$  folgt, wenn die Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur am Vergleichsbau teil gegen unendlich läuft („Material nicht brennbar“). Ist die Zeit bis zum Erreichen des Temperaturmaximums dagegen minimal, resultiert für  $t = 0$  als maximaler Temperatur-Zeit-Faktor  $k_t \approx 1,49$ . Der geringste denkbare Abbrandfaktor liegt demnach bei  $m = 0$ , während sein maximaler Wert aus dem Produkt von  $k_t \approx 1,49$  und den eingesetzten Massen sowie dem Heizwert des Materials folgt.

„erlauben“. Diese für eine Reihe an Stoffen ermittelten und in [DIN18230-3] tabellierten Abbrandfaktoren finden bis heute im Rechenverfahren zur Bemessung von Brandschutzmaßnahmen nach [DIN18230-1] Anwendung.

Ansätze zur Implementierung der Verbrennungseffizienz in die Normung zeigen sich im Eurocode 1 (hier: Abbrandfaktor) bei der Beschreibung von Brandeinwirkungen auf Tragwerke [DINEN1991-1-2], dem nationalen Anhang zu dieser Norm [DINEN1991-1-2/NA] (hier: Verbrennungseffektivität) und in der Planung einer DIN18230-4 für Nachweise im Industriebau durch Brandsimulationen [Max11] (hier ebenso Verbrennungseffektivität). Alle Dokumente bleiben sehr vage in der Festlegung der Verbrennungseffizienz. So weist erstgenannte Norm zwar auf die Spannweite der Verbrennungseffizienz von 0 „keine Verbrennung, nichtbrennbares Material“ bis 1 „vollständige Verbrennung“ hin; sie nennt jedoch lediglich einen allgemeinen Wert von 0,8 für „überwiegend zellstoffhaltige Materialien“ [DINEN1991-1-2]. In den beiden weiteren Quellen wird die Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit des Aggregatzustandes definiert. Festgelegt werden Werte von 1 für gasförmige, von 0,9 für flüssige und von 0,8 für feste Stoffe. Einen reduzierten Ansatz in der internationalen Standardisierung zeigt die US-amerikanische Gesellschaft für Brandschutz (National Fire Protection Association – NFPA) [NFPA557]. Hier wird bei der Brandlastberechnung ein gewisser Faktor verwendet, der den potentiell brennbaren Anteil eines Materials quantifiziert („proportion of content or building component that can burn“ [NFPA557]). So erfolgt eine Abgrenzung zu nicht brennbaren Bestandteilen; unvollständig oxidierte Verbrennungsprodukte finden jedoch keine Berücksichtigung.

### **2.2. Stand der Wissenschaft**

Auch im Stand der Wissenschaft existieren unterschiedliche Definitionen der Verbrennungseffizienz parallel. Bei [Sch09] etwa werden „infolge unvollständiger Verbrennung beziehungsweise Ruß- und Aschebildung“ je vier Effizienzen in Abhängigkeit des Aggregatzustandes festgelegt und Zwischenwerte interpoliert (Tabelle 2-1). So stimmt der Bezug zum Aggregatzustand mit dem Stand der Technik überein, die Definition wird jedoch um den Aspekt der entstehenden Verbrennungsprodukte erweitert. Die resultierenden Werte sind zum Teil konträr zu denen der Normung.

**Tabelle 2-1:** Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der Ruß-, Aschebildung und unvollständigen Verbrennung für Produktions-, Bau- und Lagerstoffe nach [Sch09]

Ruß- und Aschebildung, unvollständige Verbrennung	Verbrennungseffizienz Flüssigkeiten	Verbrennungseffizienz Feststoffe
≤ 1%	1	1
≤ 5%	0,95	0,9
≤ 10%	0,90	0,8
≤ 20%	0,80	0,7

Genauer kann die Verbrennungseffizienz über Reaktionsgleichungen bestimmt werden, wie Tewarson [Tew02] anhand von Polymethylmethacrylat (PMMA) zeigt. Hierzu wird eine Annahme über die verfügbare Menge an Sauerstoff getroffen (beziehungsweise über den Anteil von Produkten der unvollständigen Verbrennung). Wird eine ideale vollständige Verbrennung vorausgesetzt, ergibt sich für PMMA eine Verbrennungseffizienz von 1 [Tew02]. In der Regel verläuft die Verbrennung jedoch auch bei Luftüberschuss zu einem gewissen Teil unvollständig. Dies verdeutlicht Abbildung 2-2, die den Einfluss des Brennstoff-Luft-Verhältnisses anhand von Reaktionsgleichungen zeigt: Mit abnehmendem Sauerstoffangebot und in der Konsequenz zunehmenden Produkten der unvollständigen Verbrennung sinken die spezifische chemische Verbrennungswärme ( $\Delta h_{ch}$ ) und damit die Verbrennungseffizienz ( $\chi_{ch}$ ). Der beschriebene Reaktionsmechanismus geht von Methylmethacrylat aus, dem bei der Spaltung von PMMA vorwiegend gebildeten Monomer (vergleiche Kapitel 4 und 6).

Reaktionsstöchiometrie	$\Delta h_{ch}$ [kJ/g] <sup>a</sup>	$\chi_{ch}$
$C_5H_8O_2$ (g) + 6.0 $O_2$ (g) = 5 $CO_2$ (g) + 4 $H_2O$ (g)	24.9	1.00
$C_5H_8O_2$ (g) + 5.5 $O_2$ (g) = 4 $CO_2$ (g) + 4 $H_2O$ (g) + CO (g)	22.1	0.89
$C_5H_8O_2$ (g) + 4.5 $O_2$ (g) = 3 $CO_2$ (g) + 4 $H_2O$ (g) + CO (g) + C (s)	18.2	0.73
$C_5H_8O_2$ (g) + 3.0 $O_2$ (g) = 2 $CO_2$ (g) + 3 $H_2O$ (g) + CO (g) + C (s) + 0.50 $C_2H_4$ (g)	11.5	0.46

<sup>a</sup>Standardbildungsenthalpie in kJ/mol: PMMA ( $C_5H_8O_2$ ) (g) = -442,7;  $O_2$  (g) = 0;  $CO_2$  (g) = -393,5;  $H_2O$  (g) = -241,8; CO (g) = -110,5; C (s) = 0;  $C_2H_4$  (g) = 26,2, mit g für gasförmig und s für solid (fest)

**Abbildung 2-2:** Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit des Sauerstoffangebots am Beispiel von Polymethylmethacrylat [Tew02]

Dem Maximum der Verbrennungseffizienz von 1 steht nach [Tew02] eine untere Grenze von 0,4 gegenüber, da andernfalls die Unstetigkeit der Verbrennung zum Erlöschen der Flamme und dem Erliegen der Verbrennungsreaktionen führen würde. Theoretisch kann die untere Grenze der Verbrennungseffizienz jedoch, wie bereits erwähnt, bei 0 angesetzt werden.

## 2. Stand von Technik und Wissenschaft sowie Zielstellung und Vorgehensweise

---

Neben der Tatsache, dass zum Teil nur ein indirekter Stoffbezug vorhanden ist, weisen die beschriebenen Ansätze den Nachteil auf, dass sie die Form und Verteilung der brennenden Stoffe nicht oder nur bedingt berücksichtigen. Bei der Bestimmung über Reaktionsgleichungen muss ferner die genaue chemische Zusammensetzung bekannt sein, was oft nicht gegeben ist.

Dem kann mit der praktischen Ermittlung von Effizienzen beigegeben werden. Einen Weg, der die Rauch- und Rußbildung aufgreift, zeigt erneut Tewarson [Tew02]. Er gibt eine direkte Relation zwischen der Verbrennungseffizienz und dem Rauchpotential in Form des Rauchpunkts (Smoke-Point – SP) an. Der Smoke-Point ist als die maximale Höhe einer rauchlosen Flamme definiert und wird nach [ASTMD1322] bestimmt. Eine Auswahl an Werten sowie Verweise auf weitere Daten können ebenso [Tew02] entnommen werden. Anhand dieser Daten hat [Tew02] den empirischen Ansatz

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

$\chi_{sp}$  Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit des Rauchpunkts [-]

$L_{sp}$  Rauchpunkt [m]

für Rauchpunkte von  $0 < L_{sp} < 0,240$  m aufgestellt. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass die Werte stark vom verwendeten Messgerät abhängen und ihre Anwendung und Übertragbarkeit problematisch ist.

Am häufigsten ist die Verbrennungseffizienz als das Verhältnis der spezifischen effektiven Verbrennungswärme zum Heizwert [Dry04], [Sch11], [Tew80] definiert. Diese Bestimmungsweise kann daraus resultieren, dass ursprünglich keine ausreichend genaue Messung der Wärmefreisetzungsrate durchführbar war. Mit der Möglichkeit die Wärmefreisetzungsrate experimentell zu bestimmen, kann die Verbrennungseffizienz in direkter Abhängigkeit dieser berechnet werden, wie zum Beispiel Heskestad [Hes02] vorschlägt. Für die Bemessung der Verbrennungseffizienz wird die Wärmefreisetzungsrate dazu ins Verhältnis zur Massenverlustrate (Mass Loss Rate – MLR) und zum Heizwert gesetzt.

### 2.3. Zielstellung und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur genaueren Bestimmung der Verbrennungseffizienz. Dem wird wie folgt nachgegangen:

- Aufstellung unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz:
  - o theoretisch,
  - o experimentell,
- Anwendung der Methoden:

## 2. Stand von Technik und Wissenschaft sowie Zielstellung und Vorgehensweise

---

- Verwendung aktueller Messtechnik im Labor- und Zwischenmaßstab,
- Verwendung eines breiten Probenspektrums,
- Generierung von Materialkennwerten,
- Berechnung von Faktoren der Verbrennungseffizienz unter Verwendung der auf Basis von Wärmefreisetzungsraten gewonnenen Daten,
- Analyse und Bewertung der Methoden:
  - Maßstabsvergleich,
  - Eignung für den Test von Materialien verschiedener Art und Aufbereitung,
  - Eignung für die Brandlastbewertung im Industriebau.

Der Schwerpunkt liegt bei der Ermittlung der Verbrennungseffizienz von Feststoffen. Zwar wird ein möglicher Versuchsaufbau für Flüssigkeiten vorgestellt. Die Erprobung dessen ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Für erste Ergebnisse weiterführender Untersuchungen in dieser Hinsicht sei auf [Sch14], [Sch15] verwiesen.

Über die wissenschaftliche Betrachtungsweise hinaus liegt stets ein Augenmerk bei der Tatsache, dass für die praktische Anwendung eine Standardisierung und Normung des Verfahrens notwendig sein wird. Dies ist zum einen aus sicherheitstechnischer, zum anderen aus wirtschaftlicher Sicht von Bedeutung [Bli14], [Bun14]. Die Vorgehensweise zur Erreichung der genannten Ziele wird nachfolgend erläutert.

Zunächst werden in Kapitel 3 Methoden zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz in der Theorie definiert. Dies geschieht anhand von fünf Varianten der Verbrennungseffizienz, deren Berechnungsweise in Abhängigkeit der verwendeten Messtechnik für den Labor- und Zwischenmaßstab gezeigt wird. Als Basisgrößen werden stets die Wärmefreisetzungsrate, der Heizwert sowie ein Massenbezug herangezogen. Maßgebliche Unterschiede liegen in der zeitlichen Gewichtung der eingehenden Größen.

Um Einflussfaktoren und Zusammenhänge bei der Bemessung der Verbrennungseffizienz betrachten, einschätzen und gewichten zu können, ist neben dem Maßstab eine Vielzahl weiterer Faktoren zu variieren. Hierzu werden unter anderem das Material als solches, seine Aufbereitungsart und die Intensität der Materialbeaufschlagung verändert. Erläuterungen hierzu sowie eine Übersicht der durchgeführten Versuche enthält Kapitel 4.

Die ausführliche Beschreibung der Versuchsaapparaturen und des Prüfverfahrens kann Kapitel 5 entnommen werden. Verwendet wird zum einen das Cone Calorimeter (CC, ISO 5660), das sich im Labormaßstab als führende und am häufigsten eingesetzte Versuchsanordnung zur Bestimmung der HRR entwickelt hat [Bab08]. Im halbtechnischen Maßstab (Zwischenmaßstab) kommt eine modifizierte Variante des Single Burning Item Tests (SBI, DIN EN 13823) zur Anwendung. Versuche dieser Art werden oft genutzt, um die Lücke zwischen Labor- und Realmaßstab (zum Beispiel Raumbrandversuche im Room Corner Test – RCT,

ISO 9705), die auf Grund hiermit verbundener hoher Kosten eher selten durchgeführt werden, zu überbrücken [Mou06]. Alle genannten Geräte beruhen auf dem Messprinzip der Sauerstoffverbrauchskalorimetrie, der derzeit exaktesten Methode zur Bestimmung von Wärmefreisetzungsraten [Bab92], [Mou06], [Mad08], [Gre11]. Sie ist sowohl in der Brandschutzforschung als auch in der Routineprüfung weit verbreitet [Dry04].

Die Versuchsergebnisse werden in den Kapiteln 6 für den Labormaßstab und 7 für den Zwischenmaßstab ausgewertet. Hierbei wird auf Einflüsse, die im Zusammenhang mit der experimentellen Bestimmungsweise stehen, eingegangen. Der Verbrennungsprozess der Proben wird insbesondere hinsichtlich Wärmefreisetzungs- und Massenverlusten untersucht.

Im Zuge des 7. Kapitels erfolgt eine erste Gegenüberstellung der Ergebnisse des Labor- und Zwischenmaßstabs, die in Kapitel 8 anhand statistischer Methoden vertieft wird. Zusammenfassend werden die Aussagekraft der unterschiedlichen Varianten der Verbrennungseffizienz und die Eignung der Methoden für die Beurteilung von Materialien verschiedener Art und Aufbereitung sowie für die Brandlastbewertung im vorbeugenden baulichen Brandschutz im Industriebau in Kombination mit einem Ausblick in Kapitel 9 dargelegt.

---

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

Nachstehend werden fünf Varianten für die Berechnung der Verbrennungseffizienz entwickelt. Abschnitt 3.1. gibt zunächst einen Überblick der Brandparameter, auf deren Grundlage die Varianten in Abschnitt 3.2. definiert werden. Die detaillierte Berechnungsweise der eingehenden Größen wird, in Abhängigkeit der verwendeten Messtechnik, in Abschnitt 3.3. für den Labormaßstab und in Abschnitt 3.4. für den Zwischenmaßstab gezeigt. Es sei bemerkt, dass im Sinne der in der Brandschutzforschung gebräuchlichen Einheiten (kJ, kW etc.) von der konsistenten Verwendung von SI-Einheiten abgesehen wird.

Wesentliche Inhalte des Kapitels wurden bereits unter [Hah13a], [Hah15] veröffentlicht und werden an dieser Stelle, überarbeitet und zum Teil ergänzt, wiedergegeben.

#### 3.1. Basisgrößen und deren Bestimmungsweise

Als Maß der maximal möglichen freiwerdenden Energie geht stets der Heizwert ein. Er kann für eine Vielzahl von Stoffen Tabellen entnommen werden. Alternativ ist seine Bestimmung mittels Bombenkalorimeter möglich [DIN51900-1], [DIN51900-2], [DIN51900-3], [DINEN1716]. Für einige Stoffe kann er zudem anhand von Standardbildungsenthalpien berechnet werden. Bei bekanntem Luftbedarf ([kJ/g Luft], analog zum Sauerstoffverbrauchsäquivalent) ist ferner eine Abschätzung mittels Reaktionsgleichung über die zur Verbrennung erforderliche Masse an Sauerstoff möglich [Dry04]. Typische Heizwerte für Kohlenwasserstoffverbindungen liegen zwischen 10 und 45 kJ/g [DIN18230-3].

Alle weiteren energetischen beziehungsweise leistungsbasierten Größen können anhand der Wärmefreisetzungsrates bestimmt werden. Sie ist als die pro Zeiteinheit abgegebene Wärmemenge definiert und damit die Leistung eines Feuers. Nach [Bab92] und [Qui98] ist die HRR die entscheidende Größe zur Quantifizierung der von einem Brand ausgehenden Gefährdung. Sie steht in Beziehung zur Entzündungsneigung näher gelagerter Objekte und der erforderlichen Menge an Löschmittel [Qui98]. Auch [Mou06] nennt die HRR als maßgebenden Wert zur Charakterisierung des Brandverhaltens von Materialien und verweist auf die Abhängigkeit der Rauch- sowie CO-Produktion von dieser Größe. Übliche Wärmefreisetzungsrates in Abhängigkeit des Brandereignisses werden in Kapitel 5 in Zusammenhang mit den gewählten Intensitäten der Materialbeaufschlagung genannt.

Zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates wird, wie bereits erwähnt, die Sauerstoffverbrauchskalorimetrie verwendet. Diese Methode beruht darauf, dass bei der Verbrennung organischer Materialien je Kilogramm verbrauchtem Sauerstoff etwa die gleiche Energie freigesetzt wird; die effektive Verbrennungswärme ist demnach proportional zum Sauerstoffverbrauch [Tho17], [Hug80], [ISO5660-1]. In der Konsequenz kann durch die kontinuierliche

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

---

Messung der Sauerstoffkonzentration auf die freigesetzte Wärme geschlossen werden. Eine zusätzliche Analyse der CO- und CO<sub>2</sub>-Produktion steigert die Genauigkeit des Verfahrens [Jan91].

Die Menge an Energie, die bei der Verbrennung organischer Materialien je Kilogramm verbrauchtem Sauerstoff freigesetzt wird, ist als E-Faktor definiert und beträgt durchschnittlich 13,1 MJ [Hug80]. Für eine Reihe an Stoffen sind darüber hinaus Einzelwerte tabelliert [ISO5660-3]. Ebenda sind zwar einige der untersuchten Materialien genannt. Jedoch weichen die angeführten Heizwerte von denen der untersuchten Stoffe ab. So ist zum einen die Gleichartigkeit der gelisteten Materialien mit den untersuchten fraglich. Zum anderen ist es im Sinne einer einheitlichen Vorgehensweise vorzuziehen, den Durchschnittswert zu verwenden und eventuelle systematische Fehler zu akzeptieren.<sup>3</sup> Auf Grund dessen, dass alle bekannten E-Faktoren kleiner als 13,1 sind, liegt dies darüber hinaus im Interesse einer konservativen Vorgehensweise.

Ferner geht in die Verbrennungseffizienz stets die Masse beziehungsweise Massenverlustrate ein, die als weitere kennzeichnende Eigenschaft eines Brandes gilt [Mou06]. Sie wird gravimetrisch bestimmt und beschreibt die Abnahme des Brandstoffangebots. Von der Massenverlustrate ist die Verbrennungsrate zu unterscheiden, die die je Zeiteinheit tatsächlich zu Verbrennungsprodukten umgesetzte Brandstoffmenge quantifiziert [Qui98]. Dies ist hauptsächlich bei größeren Bränden infolge mangelndem Sauerstoffangebot relevant. Üblicherweise liegen flächenbezogene Verbrennungsraten bei Feststoffen zwischen 5 und 50 g/(m<sup>2</sup>s), wobei Werte < 5 g/(m<sup>2</sup>s) insbesondere bei kohlebildenden Stoffen in der Regel zum Erlöschen führen; größere Werte sind bei übereinander gestapelten Materialien zu erwarten [Qui98]. Maximale flächenbezogene Verbrennungsraten können [Qui98] entnommen werden. Auf Grund der geringen Probengröße sowie der Betrachtung einzelner Objekte können die Massenverlust- und Verbrennungsraten im Rahmen dieser Arbeit als identisch angesehen werden [Qui98].

---

<sup>3</sup> Die maximale systematische Abweichung durch den E-Faktor im Vergleich mit den tabellierten Werten liegt bei 4,6% für Holz (dort: Ahorn / hier: Fichte; die weiteren Abweichungen betragen: Polyethylen 3,8%, Polymethylmethacrylat 1,5%, Polystyrol 0,8%). Eine Gegenüberstellung der Heizwerte mit denen der hier untersuchten Stoffe zeigt Abweichungen von 0,9% für Polyethylen (Folie) bis zu 12,0% für die untersuchten Spanplatten. Die Unterschiede der Heizwerte nach [ISO5660-3] zu den Heizwerten nach [DIN18230-3] liegen zwischen 0,4% und 2,3%. Zum Vergleich: gemäß [Wil05] beträgt bei der Bestimmung von Wärmefreisetzungsraten mittels sauerstoffkalimetrischer Verfahren der systematische Fehler des gesamten Systems 5%; bei genauer Kenntnis der chemischen Zusammensetzung ist eine Verringerung unter 1% möglich.

#### 3.2. Varianten der Verbrennungseffizienz

Die Unterschiede der im Folgenden definierten Varianten der Verbrennungseffizienz folgen insbesondere aus den zeitlichen Bezügen ihrer masse- und energie- beziehungsweise leistungsbasierten Eingangswerte. Charakteristische Zeiten sind:

- Start des Tests,
- Zeitpunkt der Entzündung,
- drei Minuten nach der Entzündung,
- Zeitpunkt des 10%igen Massenverlusts,
- Zeitpunkt des 90%igen Massenverlusts,
- Zeitpunkt des Erlöschens,
- Ende des Tests.

In der Literatur wird, wie vorstehend angeführt, meist auf eine Berechnung der Verbrennungseffizienz anhand der effektiven Verbrennungswärme verwiesen. Dies resultiert in:

$$\chi_{\text{EHC}} = \frac{\Delta h_{\text{c,eff}}}{h_{\text{u}}} = \frac{\Delta H_{\text{c,eff}}}{\Delta m \cdot h_{\text{u}}} \quad (2)$$

$\chi_{\text{EHC}}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der effektiven Verbrennungswärme [-]
$\Delta h_{\text{c,eff}}$	spezifische effektive Verbrennungswärme [kJ/g]
$h_{\text{u}}$	Heizwert [kJ/g]
$\Delta H_{\text{c,eff}}$	effektive Verbrennungswärme [kJ]
$\Delta m$	Massenverlust [g]

Es sei bemerkt, dass  $\Delta H_{\text{c,eff}}$  lediglich zur Verdeutlichung des Massenbezugs von  $\Delta h_{\text{c,eff}}$  eingeführt wird. Im Folgenden ist unter dem Begriff der effektiven Verbrennungswärme stets die spezifische Größe  $\Delta h_{\text{c,eff}}$  zu verstehen.

Anstatt auf die verbrannte Masse kann die Verbrennungseffizienz auf die Gesamtmasse vor Versuchsbeginn bezogen werden. Dies führt zur Verbrennungseffizienz auf Basis der Brennstoffbeladung (Fuel Load – FL):

$$\chi_{\text{FL}} = \frac{q}{h_{\text{u}}} = \frac{Q}{m_{\text{s}} \cdot h_{\text{u}}} \quad (3)$$

$\chi_{\text{FL}}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der Brennstoffbeladung [-]
$q$	Brennstoffbeladung [kJ/g]
$Q$	insgesamt freigesetzte Wärme [kJ]
$m_{\text{s}}$	Masse der Probe bei Testbeginn [g]

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

---

Durch den Bezug auf die Masse vor Testbeginn entstehen zwei Vorteile dieser Variante: Zum einen erfolgt die Massenbestimmung unter reproduzierbaren Bedingungen – bei der Messung zu Testbeginn sind diejenigen Unsicherheiten ausgeschlossen, welche durch den Einbezug eines Entzündungskriteriums entstehen. Seine Definition ist kritisch, weil eine Erfassung nach verschiedenen Kriterien erfolgen kann. Während oftmals ein Temperaturkriterium oder eine zu erreichende Wärmefreisetzungsrates angesetzt werden, erfolgt am Cone Calorimeter eine optische Bestimmung durch den Versuchsdurchführenden anhand des Kriteriums „durchgehende Flammerscheinung“. Zum anderen werden bei der Verbrennungseffizienz  $\chi_{FL}$  unverbrannte Materialrückstände einbezogen. So werden Materialanteile, die nicht in den Verbrennungsprozess eintreten, „positiv bewertet“ und in Form einer geringeren Verbrennungseffizienz berücksichtigt. Aus energetischer Sicht wird Bezug auf die insgesamt freigesetzte Wärme (Total Heat Released – THR) genommen.

Neben den Verbrennungseffizienzen auf Basis der Energien ist die direkte Bestimmung aus der Wärmefreisetzungsrates möglich. Hierfür werden die folgenden drei Mittelwerte der Wärmeleistung herangezogen:

- Gesamtmittelwert der Wärmefreisetzungsrates (HRR mean),
- mittlere Wärmefreisetzungsrates über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts,
- mittlere Wärmefreisetzungsrates zu Beginn der Verbrennung (HRR 180 s).

Entsprechend folgen die drei Varianten der Verbrennungseffizienz:

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

$$\chi_{HRR,10-90} = \frac{\dot{Q}_{10-90}}{\dot{m}_{10-90} \cdot h_u} \quad (5)$$

$$\chi_{HRR,180s} = \frac{\dot{Q}_{180s}}{\dot{m}_{180} \cdot h_u} \quad (6)$$

$\chi_{HRR,mean}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungsrates [-]
$\dot{Q}_{mean}$	Gesamtmittelwert der Wärmefreisetzungsrates [kW]
$\dot{m}_{10-90}$	mittlere Massenverlustrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts [g/s]
$\chi_{HRR,10-90}$	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungsrates über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts [-]
$\dot{Q}_{10-90}$	mittlere Wärmefreisetzungsrates über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts [kW]

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

---

$\chi_{HRR,180s}$  Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungsrate von der Entzündung bis 180 s hiernach [-]

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

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

Im Gegensatz zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  ist die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  auf die Hauptbrandphase bezogen: Die HRR sowie die Massenverlustrate werden hier über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts gemittelt. So werden die Phasen größter Unsicherheit, der Entzündungsprozess sowie das Erlöschen, „abgeschnitten“. Der Beginn der Verbrennung wird gesondert durch die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,180s}$  bewertet.

Wird bei der Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  der Gesamtmittelwert der Massenverlustrate herangezogen, entsprechen sich die Verbrennungseffizienzen auf Basis der mittleren HRR und der EHC:

$$\chi_{HRR,mean*} = \frac{\dot{Q}_{mean}}{\dot{m} \cdot h_u} = \frac{\Delta h_{c,eff}}{h_u} = \chi_{EHC} \quad (7)$$

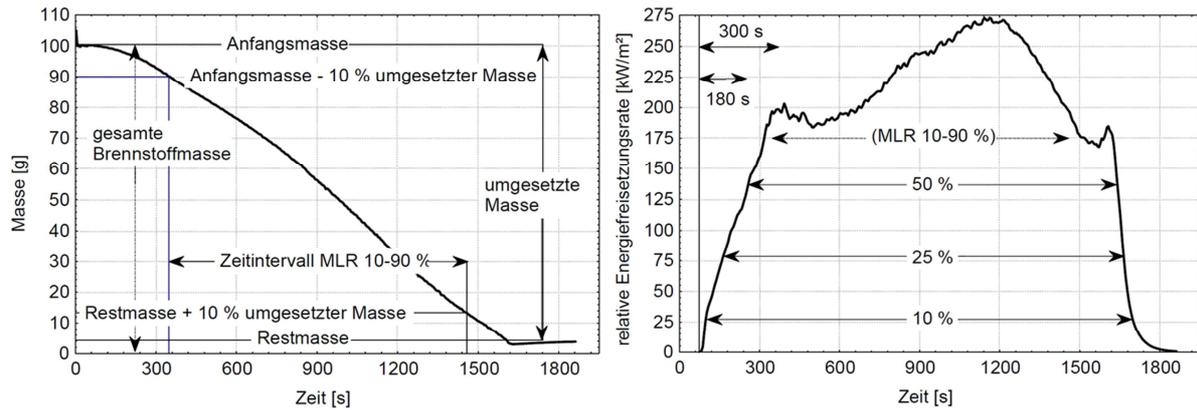
$\chi_{HRR,mean*}$  Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der mittleren Wärmefreisetzungs- und Massenverlustrate [-]

$\dot{m}$  mittlere Massenverlustrate von der Entzündung bis zum Testende [g/s]

Zu bemerken ist, dass die Mittelwertbildung beim SBI Test zwar abweichend ab dem Start des Tests erfolgt. Dieser kann jedoch mit dem Entzündungszeitpunkt approximiert werden (vergleiche Abschnitt 3.4.).

Die beispielhafte Übertragung der Berechnungsweisen auf einen Versuchslauf zeigt Abbildung 3-1. Hierbei ist auf der x-Achse die Zeit, auf der y-Achse die Masse beziehungsweise die Wärmefreisetzungsrate aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass der Massenverlust im Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts annähernd linear verläuft. Ebenso kann dieser Zeitraum anhand des Verlaufs der HRR als Hauptbrandphase ausgemacht werden. Der Beginn des Verbrennungsprozesses mit steigender Massenverlust- und Wärmefreisetzungsrate ist mit dem 180-Sekunden-Intervall erfasst. Über die bereits genannten hinaus sind weitere, denkbare Bezugszeiträume eingezeichnet, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz



**Abbildung 3-1:** Bezugszeiträume für Massenverlust und Energiefreisetzungsrates [Wil05]

Mit Blick auf die derzeitige Gebräuchlichkeit der Größen ist zu bemerken, dass die gewählten Zeiträume der ersten drei Minuten nach der Entzündung sowie des 10- bis 90-%igen Massenverlusts auch im Messprotokoll des Cone Calorimeters nach [ISO5660-1] als charakteristische Größen angeführt sind. Ebenso wird in der Literatur des Öfteren auf die über die ersten 180 s gemittelte HRR Bezug genommen (zum Beispiel [Bab95]).

Im Folgenden wird die Berechnung der Varianten der Verbrennungseffizienz aus Messungen im Labor- beziehungsweise Zwischenmaßstab erläutert. Im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit werden dabei möglichst wenige Indizes verwendet, das heißt lediglich zweifach verwendete Größen werden durch den Zusatz „CC“ beziehungsweise „SBI“ ergänzt. Zudem wird auf die explizite Benennung bereits ohne Maßstabsbezug erläuterter Größen verzichtet.

#### 3.3. Berechnung auf Datengrundlage des Cone Calorimeters

Wie bereits erwähnt, wird die Verbrennungseffizienz im Labormaßstab mittels Cone Calorimeter bestimmt. Dabei wird die Wärmefreisetzungsrates nach der Sauerstoffverbrauchskalorimetrie wie folgt berechnet [ISO5660-1]:

$$\dot{Q}_{CC}(t) = 13,1 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \cdot 1,10 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \cdot X_{O_2}^a \cdot \frac{\phi_{CC} - 0,172 \cdot (1 - \phi_{CC}) \cdot \frac{X_{CO}}{X_{O_2}}}{1 - \phi_{CC} + 1,015 \cdot \phi_{CC}} \quad (8)$$

$\dot{Q}_{CC}(t)$  Wärmefreisetzungsrates, small-scale [kW]

C Kalibrierungskonstante (an der Messblende, orifice flow meter calibration constant) [(mgK)<sup>0,5</sup>]

$\Delta p$  Druckdifferenz an der Messblende [Pa]

$T_e$  absolute Gastemperatur an der Messblende [K]

$X_{O_2}^a$  Sauerstoff der Umgebungsluft, Molanteil [-]

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

---

$\phi_{CC}$	Sauerstoffverbrauchs faktor, small-scale [-]
$X_{CO}$	Kohlenstoffmonoxid Messwert Analysator, Molanteil [-]
$X_{O_2}$	Sauerstoff Messwert Analysator, Molanteil [-]

mit

$$\phi_{CC} = \frac{X_{O_2}^0 \cdot (1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2} \cdot (1 - X_{CO_2}^0)}{X_{O_2}^0 \cdot (1 - X_{CO_2} - X_{CO} - X_{O_2})} \quad (9)$$

$X_{O_2}^0$	Sauerstoff Messwert Analysator am Versuchsbeginn, Molanteil [-]
$X_{CO_2}$	Kohlenstoffdioxid Messwert Analysator, Molanteil [-]
$X_{CO_2}^0$	Kohlenstoffdioxid Messwert Analysator am Versuchsbeginn, Molanteil [-]

Weitere Informationen zu den Messwerten sowie zu ihrer Berechnungsweise enthält [ISO5660-1].

Hieraus werden die zuvor genannten Wärmefreisetzungsraten wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{\text{mean,CC}} = \frac{\int_{t_{\text{ign}}}^{t_{\text{end}}} \dot{Q}_{CC}(t) dt}{t_{\text{end}} - t_{\text{ign}}} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{10-90,CC} = \frac{\int_{t_{10}}^{t_{90}} \dot{Q}_{CC}(t) dt}{t_{90} - t_{10}} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{180s,CC} = \frac{\int_{t_{\text{ign}}}^{t_{180s}} \dot{Q}_{CC}(t) dt}{t_{180s} - t_{\text{ign}}} \quad (12)$$

$t_{\text{ign}}$	Zeitpunkt der Entzündung [s]
$t_{\text{end}}$	Ende des Tests (Kriterien siehe [ISO5660-1]) [s]
$t_{90}$	Zeitpunkt des 90%igen Massenverlusts [s]
$t_{10}$	Zeitpunkt des 10%igen Massenverlusts [s]
$t_{180s}$	Zeitpunkt 180 s nach der Entzündung [s]

Bei der Ermittlung anhand von Energien werden, wie bereits erwähnt, drei Energien (EHC, FL, THR) unterschieden, die sich ebenso im Messprotokoll des Cone Calorimeters wiederfinden. Während sich die effektive Verbrennungswärme auf die Masse bezieht, ist die insgesamt freigesetzte Wärme gemäß Protokoll eine flächenbezogene Größe. Die massenbezogene Brennstoffbeladung geht aus letztgenannter Größe hervor. Neben der offensichtlich variierenden Bezugsgröße differieren die Energien hinsichtlich ihrer Berechnungszeiträume.

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

---

Die effektive Verbrennungswärme ist das Integral über die Wärmefreisetzungsratesrate dividiert durch die verbrannte Masse [ISO5660-1]:

$$\Delta h_{c,eff,CC} = \frac{\int_{t_{ign}}^{t_{end}} \dot{Q}_{CC}(t) dt}{\Delta m} \quad (13)$$

mit

$$\Delta m = m_{ign} - m_{end} \quad (14)$$

$m_{ign}$  Probenmasse zum Zeitpunkt der Entzündung [g]

$m_{end}$  Probenmasse am Testende [g]

Ihr Berechnungszeitraum erstreckt sich damit von der Entzündung bis zum Testende.

In Anlehnung an [ASTME1354] wird die THR ebenso als Integral über die HRR gebildet:

$$Q_{CC}'' = \int_{t_1}^{t_{end}} \dot{Q}_{CC}''(t) dt \quad (15)$$

$Q_{CC}''$  flächenbezogene insgesamt freigesetzte Wärme, small-scale [MJ/m<sup>2</sup>]

$t_1$  Zeitpunkt des ersten nicht negativen Werts der HRR nach dem Testbeginn [s]

Ihr Berechnungszeitraum läuft jedoch vom ersten nicht negativen Wert der HRR nach dem Teststart bis zum Testende.<sup>4</sup>

Die Brennstoffbeladung entspricht der insgesamt freigesetzten Wärme THR multipliziert mit der Probenoberfläche, dividiert durch die Probenmasse zu Versuchsbeginn:

$$q_{CC} = \frac{Q_{CC}'' \cdot A_s}{m_s} \quad (16)$$

mit

$$A_s = 0,01 \text{ m}^2$$

$A_s$  Probenoberfläche [m<sup>2</sup>]

Ihr Bezugszeitraum ist identisch mit dem der THR. Sie entspricht damit der spezifischen insgesamt freigesetzten Wärme.

Weiterhin werden zwei Massenverlustraten unterschieden. Die mittlere Massenverlustrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts (Average Specific Mass Loss Rate – ASMLR) wird gemäß [ISO5660-1] berechnet:

---

<sup>4</sup> Negative Werte sind auf Grund von Messungenauigkeiten in der Gasanalyse möglich (Schwankungen der Gasmesswerte), zur Genauigkeit des Verfahrens siehe auch [Wil05].

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

---

$$\dot{m}_{10-90} = \frac{m_{10} - m_{90}}{t_{90} - t_{10}} \quad (17)$$

$m_{10}$  Probenmasse zum Zeitpunkt des 10%igen Massenverlusts [g]

$m_{90}$  Probenmasse zum Zeitpunkt des 90%igen Massenverlusts [g]

mit

$$m_{10} = m_{ign} - 0,1 \cdot \Delta m \quad (18)$$

$$m_{90} = m_{ign} - 0,9 \cdot \Delta m \quad (19)$$

Die auf die ersten drei Minuten nach Versuchsbeginn bezogene Massenverlustrate wird nach

$$\dot{m}_{180s,CC} = \frac{\int_{t_{ign}}^{t_{180s}} \dot{m}_{CC}(t) dt}{t_{180s} - t_{ign}} \quad (20)$$

$\dot{m}_{CC}(t)$  Massenverlustrate, small-scale [g/s]

ermittelt, wobei die Berechnung des Integrals anhand der Messdatenaufzeichnung analog zu den mittleren Wärmefreisetzungsraten nach [ISO5660-1] erfolgt. Die momentane Massenverlustrate wird mittels numerischer Differentiation anhand von fünf Punkten errechnet; für die verwendeten Gleichungen sei an dieser Stelle auf [ISO5660-1] verwiesen.

#### 3.4. Berechnung auf Datengrundlage des modifizierten Single Burning Item Tests

Die Wärmefreisetzungsrate im Zwischenmaßstab wird mittels Sauerstoffverbrauchskalorimetrie nach [DINEN13823] bestimmt:

$$\dot{Q}_{tot,SBI}(t) = 17,2 \frac{MJ}{m^3} \cdot \dot{V}_{298K} \cdot X_{O_2}^a \cdot \frac{\phi_{SBI}}{1 + 0,105 \cdot \phi_{SBI}} \quad (21)$$

$\dot{Q}_{tot,SBI}(t)$  Wärmefreisetzungsrate von Brenner und Probe, mid-scale [kW]

$\dot{V}_{298K}$  Volumenstrom des Abzugssystems bei 298 K [m<sup>3</sup>/s]

$\phi_{SBI}$  Sauerstoffverbrauchsfaktor, mid-scale [-]

mit

$$\phi_{SBI} = \frac{X_{O_2}^0 \cdot (1 - X_{CO_2}) - X_{O_2} \cdot (1 - X_{CO_2}^0)}{X_{O_2}^0 \cdot (1 - X_{CO_2} - X_{O_2})} \quad (22)$$

Weitere Informationen zur Berechnungsweise sowie zur Ermittlung der eingehenden Größen können [DINEN13823] entnommen werden.

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

Um die Wärmefreisetzungsrates der Probe zu bestimmen, wird die HRR des Brenners abgezogen [DINEN13823]:

$$\dot{Q}_{SBI}^*(t) = \dot{Q}_{tot,SBI}(t) - \dot{Q}_{burner} \quad (23)$$

$\dot{Q}_{SBI}^*(t)$  Wärmefreisetzungsrates der Probe vor der Glättung, mid-scale [kW]

$\dot{Q}_{burner}$  mittlere Wärmefreisetzungsrates des Brenners (zur Bestimmung siehe [DINEN13823]) [kW]

Im Folgenden ist mit der Bezeichnung „Wärmefreisetzungsrates“ wiederum die Wärmefreisetzungsrates der Probe gemeint. Sie wird kontinuierlich über ein 30-Sekunden-Intervall bestimmt, das heißt über einen Zeitraum von 30 s gemittelt [DINEN13823]:

$$\dot{Q}_{SBI}(t) = \frac{0,5 \cdot \dot{Q}_{SBI}^*(t-15) + \dot{Q}_{SBI}^*(t-12) + \dots + \dot{Q}_{SBI}^*(t+12) + 0,5 \cdot \dot{Q}_{SBI}^*(t+15)}{10} \quad (24)$$

$\dot{Q}_{SBI}(t)$  Wärmefreisetzungsrates, mid-scale [kW]

Hieraus berechnete Mittelwerte werden nach den Gleichungen (25) bis (27) bestimmt:

$$\dot{Q}_{mean,SBI} = \frac{\int_{t_s}^{t_a} \dot{Q}_{SBI}(t) dt}{t_a - t_s} \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{10-90,SBI} = \frac{\int_{t_{10}}^{t_{90}} \dot{Q}_{SBI}(t) dt}{t_{90} - t_{10}} \quad (26)$$

$$\dot{Q}_{180s,SBI} = \frac{\int_{t_s}^{t_{180s}} \dot{Q}_{SBI}(t) dt}{t_{180s} - t_s} \quad (27)$$

$t_s$  Zeitpunkt des Testbeginns [s]

$t_a$  Referenzzeit; hier: Zeitpunkt, an dem  $Q_{SBI} = \text{konst.}$  gilt [s]

Der Zeitpunkt des Testbeginns wird mit dem Beginn der Probenbeaufschlagung gleichgesetzt, sodass ohne Berücksichtigung von Vorlaufzeiten  $t_s = 0$  gesetzt werden kann. Für das schwerentflammbare Material Polyurethan B1 wurde abweichend das Abschalten des Brenners als Referenzzeit  $t_a$  festgelegt.

Um weiterhin die effektive Verbrennungswärme und die Brennstoffbeladung zu erhalten, wird zunächst die THR berechnet. Sie ist definiert als die Wärme, die über die Referenzperiode von  $t_s$  bis  $t_a$  freigesetzt wird [DINEN13823]:

$$Q_{SBI}(t_a) = 3 \text{ s} \cdot \sum_{t_s}^{t_a} (\max. [\dot{Q}_{SBI}(t); 0]) \quad (28)$$

$Q_{SBI}(t_a)$  insgesamt freigesetzte Wärme, mid-scale [kJ]

### 3. Theorie der Verbrennungseffizienz

---

Der Faktor von 3 s resultiert aus dem Intervall der Datenaufzeichnung nach [DINEN13823].

Schließlich kann die EHC durch Gleichung (29) definiert werden:

$$\Delta h_{c,eff,SBI} = \frac{Q_{SBI}(t_a)}{\Delta m^*} \quad (29)$$

$\Delta m^*$  gesamter Massenverlust [g]

wobei der gesamte Massenverlust durch

$$\Delta m^* = m_s - m_{end} \quad (30)$$

gegeben ist. Da die Verbrennung des Materials gewöhnlich mit oder kurze Zeit nach dem Start des Brenners beginnt, wird angenommen:

$$m_s = m_{ign} \quad (31)$$

sodass folgt

$$\Delta m^* = \Delta m \quad (32)$$

und damit

$$\Delta h_{c,eff,SBI} = \frac{Q_{SBI}(t_a)}{\Delta m^*} = \frac{Q_{SBI}(t_a)}{\Delta m} \quad (29-1)$$

Zur Bestimmung der Brennstoffbeladung wird Gleichung (33) angewendet:

$$q_{SBI} = \frac{Q_{SBI}(t_a)}{m_s} \quad (33)$$

Die Ermittlung der mittleren Massenverlustrate über den Zeitraum des 10- bis 90%igen Massenverlusts erfolgt wie unter Abschnitt 3.3. für das Cone Calorimeter beschrieben in Verbindung mit Gleichung (31). Die auf die ersten drei Minuten nach der Entzündung bezogene Massenverlustrate wird gemäß

$$\dot{m}_{180s,SBI} = \frac{m_s - m(t_{180s})}{t_{180s} - t_s} \quad (34)$$

berechnet.

---

## 4. Probenauswahl und Materialcharakterisierung

Die Probenauswahl ist zum einen mit Blick auf die industrielle Bedeutung der Materialien erfolgt. Zum anderen gilt als Ziel, bei der Entwicklung der Methode möglichst viele Einflussfaktoren berücksichtigen und bewerten zu können. So werden einerseits Messdaten für gebräuchliche Materialien generiert, andererseits die Eignung des Verfahrens für den Test verschiedenartiger Produktklassen untersucht. Neben der Verbreitung der Materialien wurden daher die folgenden Kriterien berücksichtigt beziehungsweise variiert:

- Aggregatzustand (fest / flüssig),
- Aggregatzustandsänderung bei der Verbrennung (Brandklasse nach [DINEN2]),
- Entflammbarkeit (leicht- / normal- / schwerentflammbar nach [DIN4102-1]).

So wird die Methode für den Test von Feststoffen verschiedener Brandeigenschaften sowie für den Test von Flüssigkeiten ausgelegt.

Bei der Auswahl der Polymere wurde ferner die Art ihrer Zusammensetzung aus Monomeren berücksichtigt, indem homogene und inhomogene Polymere untersucht wurden. Dies geschah zum einen mit Blick auf das beim Aufbau aus identischen Monomereinheiten zu erwartende gleichförmigere Brandverhalten. Da derartige Polymer-Proben weniger durch den „zufälligen“ Aufbau beziehungsweise den Ausschnitt des Probenmaterials beeinflusst werden, sind die Messabweichungen infolge verschiedenartiger Brandverläufe minimiert. Auf der anderen Seite zeigt der Test inhomogener Materialien mögliche Spannweiten der Ergebnisse infolge zufällig bedingter Materialschwankungen und gibt damit ebenso eine Auskunft über die Genauigkeit der Methode.

Eine Übersicht der unter diesen Voraussetzungen gewählten Stoffe zeigt Tabelle 4-1: Getestet wurden Holz und Holzwerkstoffe, Kunststoffe der Brandklassen A und B verschiedener Entflammbarkeit sowie Flüssigkeiten. Neben der Probenauswahl sind die eingesetzten Versuchsanordnungen ersichtlich. Wie bereits erwähnt, war der Schwerpunkt die Ermittlung der Verbrennungseffizienz von Feststoffen. Die durchgeführten Versuche mit Flüssigkeiten sind daher lediglich im Sinne eines Gesamtüberblicks angeführt.

#### 4. Probenauswahl und Materialcharakterisierung

**Tabelle 4-1: Stoffauswahl und eingesetzte Versuchsapparaturen (x)**

Material	Cone Calorimeter	Single Burning Item Test (modifiziert)
Fichtenholz, sägerau	x	x
Spanplatte (Rohspan P2)	x	x
Polyethylen (PE)	x	
Polymethylmethacrylat, geschwärzt (PMMA)	x	
Polyurethan, Hartschaum B3 (PUR B3)	x	x
Polyurethan, Hartschaum B1 (PUR B1)	x	x
Polystyrol, Hartschaum B1 (PS B1)	x	x
Benzin	x	x
Diesel	x	x
n-Heptan (≥ 99,0%)	x	x
Ethanol (≥ 99,8%)	x	
Isopropanol (≥ 99,8%)	x	

Mit sägerauem Fichtenholz ist der Vergleichsstoff der mittels m-Faktor-Brandofens nach [DIN18230-2] bewerteten Materialien einbezogen. Das geschwärzte PMMA ist der Feststoff zur Kalibrierung des Cone Calorimeters. Die Heizwerte sowie Dichten der untersuchten Proben können ergänzend Tabelle 4-2 entnommen werden. Hierbei wurden für die Materialien mit eigener Heizwertbestimmung

- eine Immediatanalyse am Gerät TGA 701 LECO zur thermogravimetrischen Bestimmung der Feuchte, der flüchtigen Bestandteile und des Ascheanteils,
- eine Elementaranalyse am Gerät CHN 628 LECO zur Bestimmung des Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoffanteils,
- eine Elementaranalyse am Gerät CS 230 LECO zur Bestimmung des Schwefelgehalts sowie
- eine Heizwertbestimmung über eine Brennwertbestimmung mit Hilfe des Geräts C200 IKA

mit mindestens zwei Testläufen durchgeführt. Die Analyseergebnisse der untersuchten Materialien stellen die Anhänge 1 und 2 bereit.

In Tabelle 4-2 sind zudem die für die weitergehenden Untersuchungen verwendeten Heizwerte markiert. (Die Signifikanz der zweiten Nachkommastelle ist bedingt, in Anlehnung an [Din02] wird sie angegeben.) Die Heizwerte der Spanplatten, die in der weiterführenden Un-

#### 4. Probenauswahl und Materialcharakterisierung

tersuchung zur statistischen Auswertung in Kapitel 8 getestet wurden, weichen geringfügig ab und betragen 16,25 und 16,70 kJ/g. Es wurde sichergestellt, dass für jedes Material der tatsächlich hierfür gemessene Heizwert verwendet wurde. Eine Ausnahme bildet lediglich das am Cone Calorimeter getestete Polystyrol (PS), von dem auf Grund sehr großer Unsicherheiten bei der Bestimmung des Wassergehalts kein Heizwert bestimmt werden konnte. Vergleichsrechnungen mit den Heizwerten nach Norm sind im Anhang angeführt, worauf an den entsprechenden Stellen verwiesen wird.

**Tabelle 4-2:** Dichten und Heizwerte der untersuchten Proben gemäß eigener Bestimmung und Literatur

Material	Rohdichte	Heizwert Eigenbest.	Heizwert [Kna14]	Heizwert [DIN18230-3]	Heizwert [Din02]
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kJ/g]
<b>Fichtenholz</b> 10 / 20 mm 15 mm	455 453	16,39* -	- 16,56**	17,28	20,4
<b>Rohspan P2</b> 10 mm 16 mm 19 mm	703 698 <sup>a</sup> 583	16,02* - 15,84*	- 16,92** -	17,28	-
<b>PE</b> Folie Granulat	839 390 <sup>b</sup>	42,89* 42,73*	- -	43,90	43,1 – 43,4 (Midrange 43,25)
<b>PMMA</b>	1164	24,47*	-	24,84	24,88
<b>PUR B3</b>	33	-	27,36***	-	23,2 – 28 (Midrange 25,60)
<b>PUR B1</b>	33	-	25,56***	24,12	-
<b>PS B1</b>	14	37,22 (Brennwert)	39,6**	39,60	35,6* – 40,8 (ohne Flammenresistenz)

<sup>a</sup>[Kna14], <sup>b</sup>Schüttdichte; die für die Berechnungen herangezogenen Heizwerte sind gekennzeichnet mit \*Material im Cone Calorimeter Test, \*\*Material im modifizierten Single Burning Item Test, \*\*\*Material in beiden Tests

Zu bemerken ist, dass die mittels CC und SBI getesteten Materialien den für eine Klassifizierungsgruppe („Fichtenholz“, „PS B1“, ...) üblichen Schwankungen unterliegen. Bei den Proben Polyurethan B1 und B3 (PUR B1 / B3) lag an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin und an der Hochschule in Magdeburg identisches Material vor. Für Spanplatten wurden die gleiche normierte Klassifizierung sowie der gleiche Anbieter gewählt. Für die Flüssigkeiten ist dieser Aspekt insofern nicht von Bedeutung, als sie einen hohen Reinheitsgrad besitzen.

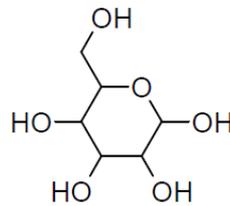
Weitere Materialeigenschaften und Informationen zur Probenauswahl enthalten die nachstehenden Abschnitte 4.1. und 4.2. Die Aufbereitungsform der Materialien wird in den Kapiteln 5, 6 und 7 in Verbindung mit den durchgeführten Versuchen erläutert.

### 4.1. Holz und Holzwerkstoffe

Basierend auf [Dry04] wird zunächst der allgemeine Aufbau von Holz thematisiert. Es besteht maßgeblich aus den natürlichen Polymeren:

- Zellulose (ca. 50%, Dekomposition bei 240 – 350°C) ,
- Hemizellulose (ca. 25%, Dekomposition bei 200 – 260°C) und
- Lignin (ca. 25%, Dekomposition bei 280 – 500°C)

und damit den Elementen C, H, N, S und O. „Stets finden sich auch einige Prozent so genannte Holzinhaltstoffe wie zum Beispiel Harze, Wachse, Terpene und Terpeneide (Kautschuk), Phenole, Gerbstoffe, Chinone, Farbstoffe, Fette, Zucker, Eiweiß, Mineralstoffe“ im Rohstoff [Röm13]. Der Hauptbestandteil Zellulose ist das in Pflanzen höherer Ordnung (Kornus) am häufigsten vorkommende Polymer und entsteht durch Polykondensationsreaktion aus dem Monosaccharid Glukose (D-Glukose,  $C_6H_{12}O_6$ , Abbildung 4-1).



**Abbildung 4-1:** Glukose

Während Hemizellulose ähnlich aufgebaut ist (Basis Pentose), hat Lignin einen sehr verzweigten Aufbau. Die Polymerstruktur bedingt eine hohe Stabilität und anisotrope Eigenschaften. In Abhängigkeit des Zuschnitts – mit oder entgegen der Faserrichtung – sind diese Eigenschaften unterschiedlich stark ausgeprägt, was sich auf das Brandverhalten auswirken kann.

Die stellvertretend für Holz und Holzwerkstoffe ausgewählten Materialien Fichte und Spanplatte zeigt Abbildung 4-2.



**Abbildung 4-2:** Hölzer a) sägeraues Fichtenholz und b), c) Rohspan P2

Fichten gehören den weichen Nadelhölzern an. Sie nehmen etwa ein Drittel der deutschen Waldfläche ein und sind damit aus industrieller Sicht die wichtigste Baumart innerhalb der deutschen Forstwirtschaft [Boh09], [Köl09]. Neben der industriellen Bedeutung wurde säge-

raues Fichtenholz auf Grund seiner historischen Verankerung in der Brandschutzforschung (siehe Abschnitt 2.1.) gewählt.

Mit Spanplatten geht weiterhin der in Deutschland am häufigsten hergestellte Holzwerkstoff ein; den größten Einsatz finden sie in der Möbelindustrie [Boh09]. Die Platten werden im Allgemeinen durch den Schnitt nativen Holzes in Späne und anschließender Verarbeitung mit Bindemitteln heiß gepresst. Als Bindemittel werden Kunstharzleime (Harnstoff- oder Melamin-Formaldehyd-Harze) verwendet [Röm13]. Je nach Art und Anordnung der Späne sowie des Kunstharzanteils (ca. 3 – 8%) können unterschiedliche Platten hergestellt werden [Röm13]. Dabei bleiben die wesentlichen aus der chemischen beziehungsweise molekularen Zusammensetzung von Holz bedingten Eigenschaften erhalten, die Anisotropie wird jedoch weitgehend aufgehoben. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Rohspanplatten sind aus zerspannten Holzresten, Sägemehl sowie Leim gepresst und gemäß [DINEN312] für Möbel und Innenausbau im Trockenbereich (Kategorie P2) eingestuft.

#### 4.2. Kunststoffe

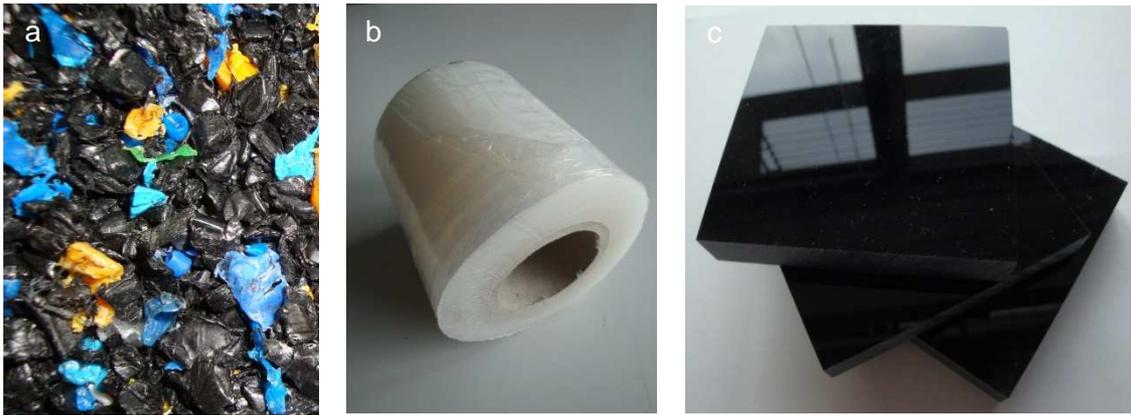
Als Vertreter der synthetischen Polymere wurden aus der Brandklasse B Polymethylmethacrylat, Polyethylen (PE) und Polystyrol sowie aus der Brandklasse A Polyurethan untersucht. Die Basis der Polymere stellen ihre spezifischen Monomereinheiten dar, die sich durch zwei elementare Bildungsreaktionen, die direkte Addition und Kondensationsreaktionen, zusammenschließen [Dry04].<sup>5</sup> So weisen die Polymere grundsätzlich einen homogenen Aufbau auf; zum Teil wurden jedoch Produkte mit Zuschlagmitteln (zum Beispiel Flammschutzmittel) getestet.

Um möglichst umfassende Ergebnisse zu erzielen und die Eignung der Methode für leicht- und schwerentflammbare Materialien zu untersuchen, erfolgten sowohl Versuche mit schwerentflammbaren Kunststoffen der Brandklasse A als auch der Brandklasse B. Hierzu wurden Polyurethan B1 und B3 sowie Polystyrol B1 gewählt. Eine Klassifizierung der PE- und PMMA-Proben hinsichtlich ihrer Entflammbarkeit nach [DIN4102-1] liegt nicht vor. Formell sind sie daher als leichtentflammbar zu betrachten.

Nachstehend werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften des untersuchten PE und des PMMA (Abbildung 4-3) dargestellt. Auf die hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Entflammbarkeit ausgewählten Materialien PUR und PS wird abschließend eingegangen.

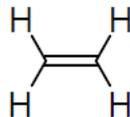
---

<sup>5</sup> Diese Definition geht auf [Car31] zurück. Abweichend hiervon ist ebenso die Unterscheidung in Ketten- und Stufenpolymerisation üblich, eine Gegenüberstellung beider Klassifizierungsweisen gibt [Rav12].



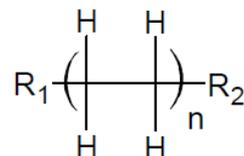
**Abbildung 4-3:** Kunststoffe Polyethylen a) Granulat und b) Folie sowie c) geschwärztes Polymethylmethacrylat

Der Thermoplast PE wird durch Additionsreaktionen aus dem Monomer Ethylen ( $C_2H_4$ , Abbildung 4-4) gebildet.



**Abbildung 4-4:** Ethylen (Ethen)

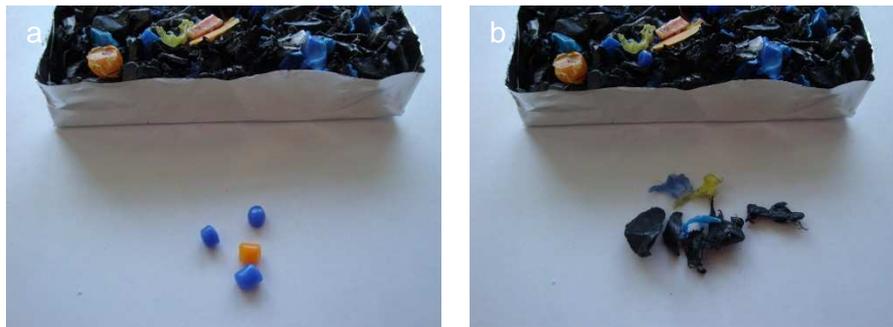
Das entstehende Polyethylen (Abbildung 4-5) hat eine mittlere Molmasse von rund 200000 g/mol [Dry04].



**Abbildung 4-5:** Polyethylen

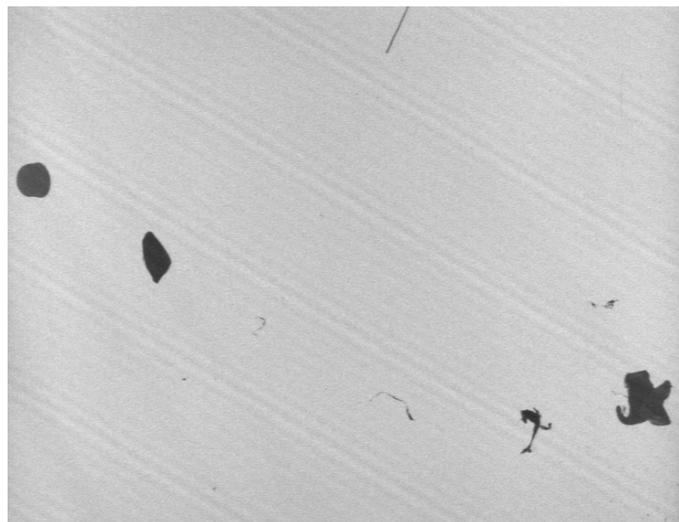
Die industrielle Bedeutung von Polyethylen ist hoch, das Material ist unter den ersten drei der am häufigsten verwendeten künstlichen Polymere [Bey02]. Kennzeichnend sind unter anderem eine gute Verformbarkeit und geringe Durchlässigkeit von Feuchtigkeit [Ben08]. Es wird unterschieden zwischen PE geringer und hoher Dichte (Low-Density Polyethylene – LDPE / High-Density Polyethylene – HDPE) [Bey02].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde PE in Form von Verpackungsfolie (LDPE) sowie als Granulat (HDPE) untersucht. Die Folie wurde in übereinander angeordneten, gepressten Schichten mit einer resultierenden Dichte von  $839 \text{ kg/m}^3$  präpariert. Dem Granulat kann eine Schüttdichte von  $390 \text{ kg/m}^3$  zugeordnet werden. Es besteht aus zwei Fraktionen: dem Rohstoff PE, wie er in der Industrie zur Herstellung von Formteilen vorliegt, und dem bei der Erzeugung von PE-Produkten anfallenden Reststoff (Abbildung 4-6).



**Abbildung 4-6:** Zusammensetzung des untersuchten Polyethylen-Granulats aus a) Produktionsrohstoff und b) -abfall

Die Partikelgrößenverteilung des Granulats wurde mittels fotooptischer Korngrößenanalyse am Gerät EKGM 12 - Messtechnik Schwartz bestimmt. Durch die Abbildung der Partikel-Silhouetten (Abbildung 4-7) wird hierbei mit Hilfe eines Bildauswertungsprogramms die Anzahl der Partikel in verschiedenen Korngrößenklassen ( $Q_0(x)$ ) gemessen. Mittels Äquivalentdurchmesser kann weiterhin die Verteilung der Partikel nach ihrem Volumen ( $Q_3(x)$ ) bestimmt werden.



**Abbildung 4-7:** Nahaufnahme des untersuchten Polyethylen-Granulats (links Produktionsrohstoff, rechts Produktionsabfall)

Aus den Verteilungssummen  $Q(x)$  können die Verteilungsdichten  $q(x)$  der Partikel bestimmt werden ( $q_3(x)$  analog):

$$q_0(x) = \frac{dQ_0(x)}{dx} \quad (35)$$

$q_0(x)$  Dichteverteilung nach der Partikelanzahl [%/mm]

$Q_0(x)$  Summenverteilung nach der Partikelanzahl [%]

$x$  Äquivalentdurchmesser [mm]

#### 4. Probenauswahl und Materialcharakterisierung

---

Die Verteilungen wurden mit drei unterschiedlichen Berechnungsverfahren ermittelt, die als Basisgrößen

- den FERET-Durchmesser,
- die maximale Sehne oder
- den Durchmesser eines flächengleichen Kreises

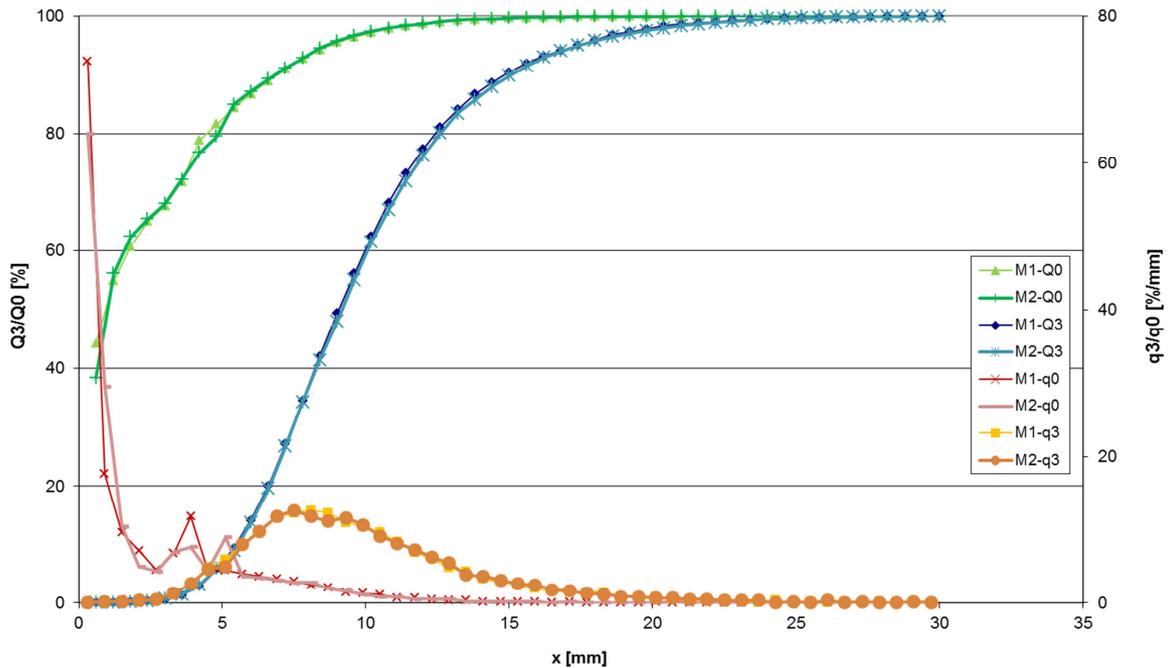
verwenden. Zur detaillierten Erläuterung der Parameter sowie des Messverfahrens sei an dieser Stelle auf [Sta04] verwiesen.

Wie die Abbildungen 4-6 und 4-7 zeigen, schwanken Länge, Breite und Höhe der Partikel bedeutend. Hieraus folgt, dass die Partikelgrößenbestimmung stark von der zufälligen Ausrichtung des Korns zum Detektor abhängig ist. Um dem nachzukommen, wurde eine entsprechend große Probe (ca. 2 l) gewählt. Im Ergebnis lieferte der FERET-Durchmesser die höchsten und die Methode anhand der maximalen Sehne die geringsten Werte für  $x$ .

Da auf Grund der sehr vielfältigen Kornformen nicht sicher war, welcher Beurteilungsparameter am besten geeignet ist, wurde die Analyse ferner zweifach durchgeführt ( $M_1$ ,  $M_2$ ). Ziel war es, die geringste Abweichung zwischen den Ergebnissen der Durchläufe zu bestimmen. Hierbei hat sich der FERET-Durchmesser als am besten geeignet herausgestellt; er zeigt nahezu deckungsgleiche Kurven der zwei Probendurchläufe. Abbildung 4-8 veranschaulicht die Ergebnisse dieses Beurteilungsparameters.

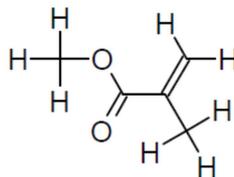
Im Diagramm wird weiterhin die Vermischung des PE-Abfallmaterials mit dem gleichförmigen PE-Rohgranulat deutlich: Das Maximum der  $q_3$ -Verteilungsdichtefunktion liegt bei einem Durchmesser von ca. 7 mm, was der Fraktion des PE-Rohmaterials entspricht. Auch der zweite Peak der  $q_0$ -Verteilungsdichtefunktion ist auf das uniforme PE-Ausgangsgranulat zurückzuführen.

#### 4. Probenauswahl und Materialcharakterisierung



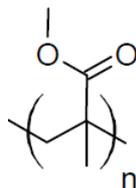
**Abbildung 4-8:** Partikelgrößenverteilungen von Polyethylen-Granulat (FERET-Durchmesser)

Wie bereits erwähnt, wurde weiterhin der Thermoplast PMMA untersucht. Er wird aus dem Monomer Methylmethacrylat (Methacrylsäuremethylester – MMA,  $C_5H_8O_2$ , Abbildung 4-9) gebildet.



**Abbildung 4-9:** Methylmethacrylat

Im Unterschied zum PE-Monomer sind neben C- und H- auch O-Atome enthalten. Durch Additionsreaktion entsteht PMMA mit einer Molmasse von ca. 150000 g/mol [Dry04] (Abbildung 4-10).



**Abbildung 4-10:** Polymethylmethacrylat

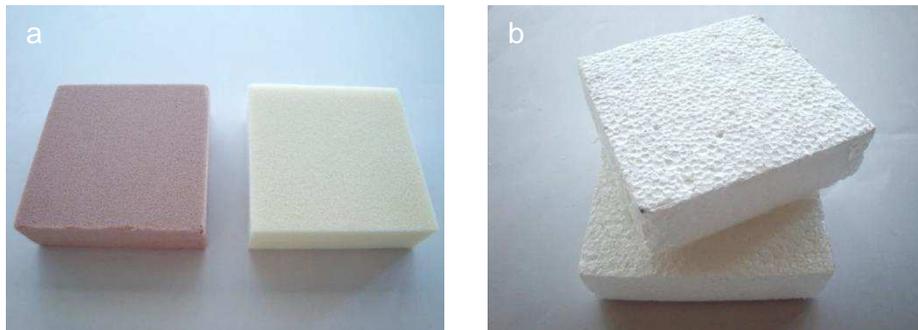
PMMA ist als transparentes Material mit einem Transmissionsgrad für Licht von rund 92% unter der Bezeichnung „Plexiglas“ weit verbreitet [Zen02a]. In geschwärtzter Form, mit demzufolge minimiertem Transmissionsgrad, stellt es, wie bereits erwähnt, den Feststoff zur Kalibrierung des Cone Calorimeters dar. Neben seiner industriellen Bedeutung ist PMMA als

#### 4. Probenauswahl und Materialcharakterisierung

---

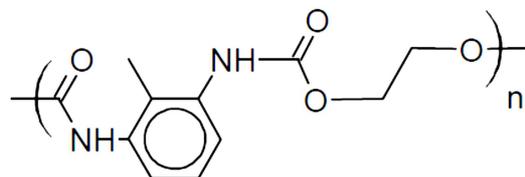
idealer Repräsentant von Thermoplasten bekannt und findet im Rahmen von Forschungsarbeiten eine weite Verwendung [Iqb94]. Auch [Bey02] charakterisiert PMMA als das am häufigsten verwendete Polyacryl und betont seine Bedeutung in der Brandschutzforschung.

Wie zuvor genannt, wurden ergänzend Kunststoffe getestet, deren Entflammbarkeit nach [DIN4102-1] klassifiziert wurde. Die ausgewählten Vertreter PUR und PS zeigt Abbildung 4-11. Sie wurden als Hartschaum untersucht, da sie in dieser Form üblicherweise in der Bauindustrie als Dämmstoff Verwendung finden [Ben08]. Es folgen zunächst Ausführungen zum Duroplasten Polyurethan, wobei wesentliche Inhalte [Eye08] entnommen sind. Im Anschluss wird näher auf den Thermoplasten Polystyrol eingegangen.



**Abbildung 4-11:** Untersuchte leicht- und schwerentflammbare Kunststoffe a) Polyurethan-Hartschaum (links B1, rechts B3) und b) Polystyrol-Hartschaum B1

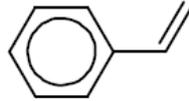
Polyurethan-Schäume werden durch Polyadditionsreaktion von Diisocyanaten (Ester) und Polyolen gebildet. Finden dabei ausschließlich Diole Verwendung, bilden sich lineare Ketten und thermoplastischer PUR-Weichschaum entsteht. Werden hingegen Triole beigemischt, entstehen stärker verzweigte, dreidimensionale Ketten und damit duroplastischer PUR-Hartschaum. Das Grundmolekül der PUR-Schäume ist identisch und in Abbildung 4-12 dargestellt.



**Abbildung 4-12:** Polyurethan

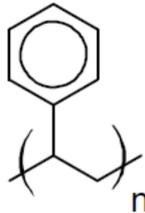
Von Polyurethan-Schäumen (hart- und weich) abzugrenzen sind Polyurethan-Elastomere wie Elastanfasern oder Abformmasse. Weitere detaillierte Informationen zu Polyurethan können [Lei00] entnommen werden.

Das hinzukommend untersuchte PS wird auf Basis des Monomers Styrol ( $C_8H_8$ , Abbildung 4-13) hergestellt.



**Abbildung 4-13: Styrol**

Durch Additionsreaktion entsteht Polystyrol [Rav12] mit einer Molmasse von rund 230000 g/mol [Dry04] (Abbildung 4-14).



**Abbildung 4-14: Polystyrol**

PS gehört „zu den wichtigsten thermoplastischen Kunststoffen“ [Röm13] und findet zum einen als „solider“ Werkstoff in Teilen der Elektroindustrie oder Haushaltsartikeln Verwendung. Hierbei werden seine Verformbarkeit, seine guten dielektrischen Eigenschaften sowie die physiologische Unbedenklichkeit geschätzt [Röm13]. Zum anderen wird es in aufgeschäumter Form als expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS) im Wärme- und Schallschutz sowie als Verpackungsmaterial eingesetzt [Kai07]. Damit gilt Polystyrol als einer „der wichtigsten Massenkunststoffe“ [Eye08]. [Bab02] weist darüber hinaus auf das gesteigerte Interesse an Polystyrol-Schäumen in der Brandschutzforschung hin. Auf Grund der Tatsache, dass EPS meist als schwerentflammbarer Dämmstoff verbaut wird, wurde auch im Rahmen dieser Arbeit EPS der Baustoffklasse B1 gewählt (Dichte 14 kg/m<sup>3</sup>).

---

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

In den nachstehenden Abschnitten werden die maßgeblichen Versuchsaufbauten, das Cone Calorimeter und eine modifizierte Version des Single Burning Item Tests, vorgestellt. Da die Bestimmung des Heizwerts als Stoffkenngröße unproblematisch und allgemein erprobt ist, sei zum Bombenkalorimeter auf die einschlägige, bereits genannte Literatur verwiesen. Darüber hinaus wird eine Übersicht der jeweils durchgeführten Versuche gegeben. Im letzten Abschnitt erfolgen Erläuterungen zu charakteristischen, die Messung beeinflussenden Faktoren und es werden geeignete Versuchsbedingungen für die Bestimmung der Verbrennungseffizienz abgeleitet.

### 5.1. Messung der Verbrennungseffizienz mittels Cone Calorimeter

Versuche am Cone Calorimeter sind nach dem ASTM-Standard „Standardisierte Testmethode für Wärme- und Rauchfreisetzungsraten für Materialien und Produkte unter Verwendung eines Sauerstoffverbrauchskalorimeters“ [ASTME1354] und der ISO-Norm „Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen – Wärmefreisetzung, Rauchentwicklung und Masseverluste“ [ISO5660-1] standardisiert. Letztgenannter Standard wurde im Jahr 2013 überarbeitet, woraus 2015 die neue Fassung [ISO5660-1N] hervorging. Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuche sind auf die zum Durchführungszeitpunkt gültige Norm [ISO5660-1] bezogen.

Der nachkommende Unterabschnitt gibt Ausführungen zum Messregime aus [Hah13a] wieder, die zum Teil ergänzt wurden.

#### 5.1.1. Messregime

Das Cone Calorimeter gilt als Messapparatur zur Produktion günstiger, schneller, konsistenter, reproduzierbarer Ergebnisse im Labormaßstab [Mou06]. Hervorgehoben werden die beim Test vorhandenen Umgebungsbedingungen, die insbesondere für Brände in gut ventilierten Räumen repräsentativ sind [Mou06]. Auch die gleichmäßige Erhitzung der Probe weist das Cone Calorimeter gegenüber anderen Versuchsapparaturen im Labormaßstab aus [Mou06]. Weiterhin ist die simultane Bestimmung von Wärmefreisetzungsrate, effektiver Verbrennungswärme, Massenverlustrate, Zündzeit, Rauch- und Rußparametern sowie entstehender toxischer Gase von Vorteil.

Eine detaillierte Beschreibung der Entwicklung, des Einsatzbereichs (einschließlich seiner Grenzen), der charakteristischen Bestandteile dieses Kalorimeters, des Messverfahrens sowie des Funktionsprinzips sind [Bab84], [Bab02] zu entnehmen. An dieser Stelle wird ein zusammenfassender Überblick gegeben.

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

---

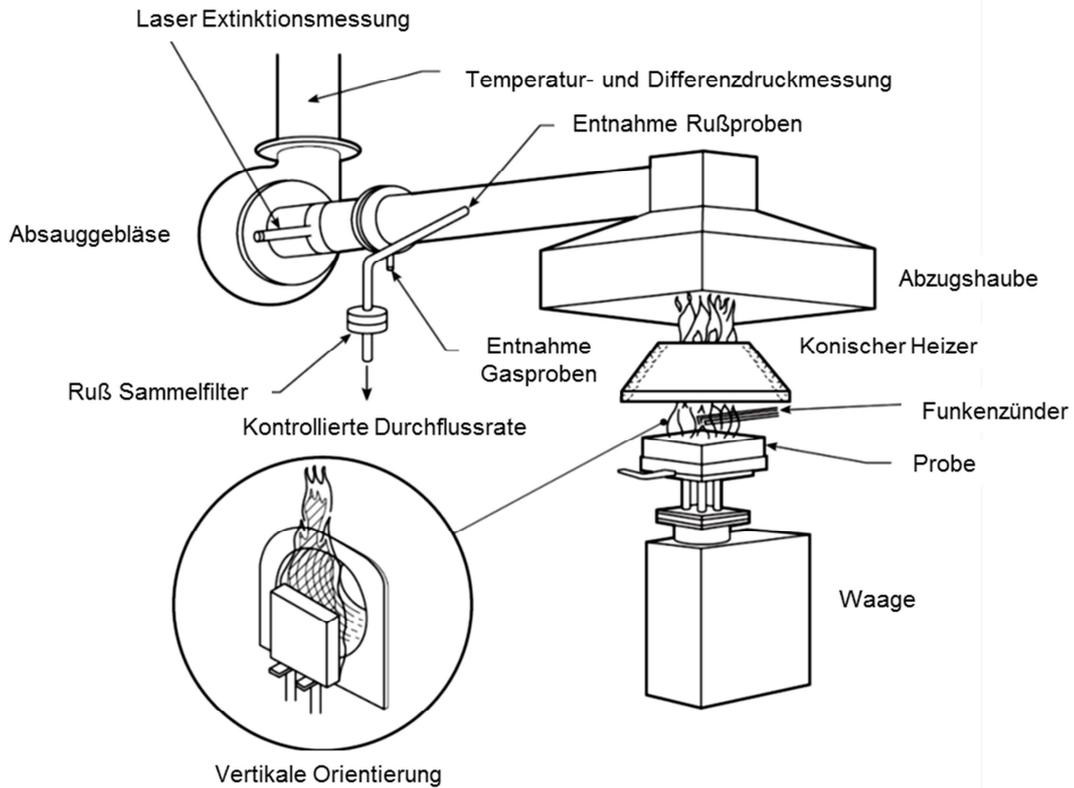
Das verwendete Cone Calorimeter (Fire Testing Technology, Auswertungssoftware Cone-Calc Version 5.4) im Brandschutzlabor der Hochschule Magdeburg-Stendal zeigt Abbildung 5-1. Zu erkennen ist der modulare Aufbau des Kalorimeters: auf der linken Seite eine Messeinheit mit Analysatoren für Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und -monoxid sowie einem Data-Logger, mittig eine Messeinheit mit Laser (Rauchdichtemessung), Waage, Funkenzünder, konischem Heizer und einer optionalen Pumpe zur Rußgravimetrie, rechts der Probenstand.



**Abbildung 5-1:** Cone Calorimeter der Hochschule Magdeburg-Stendal

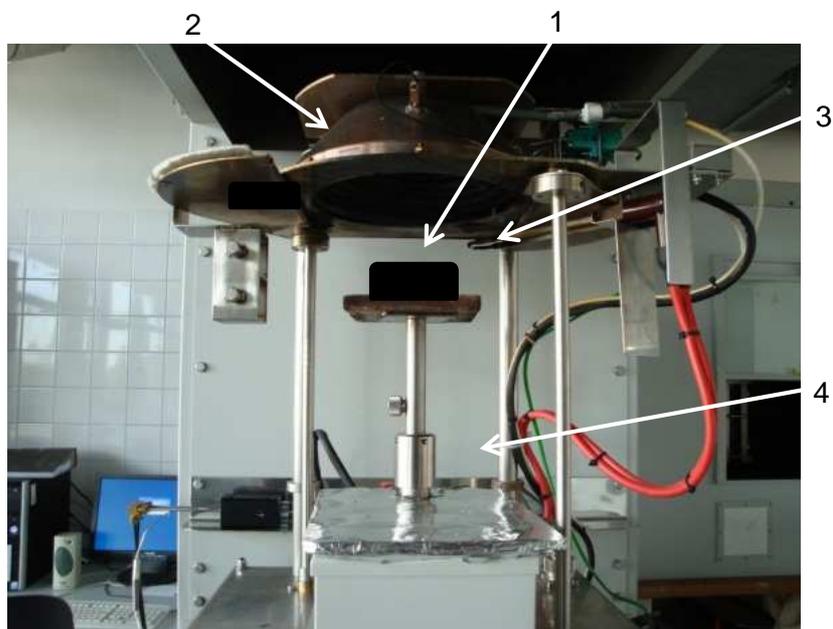
Abbildung 5-2 gibt darüber hinaus die charakteristischen Bestandteile des Cone Calorimeters schematisch wieder. Es ist ersichtlich, dass neben der üblichen horizontalen Prüfweise eine vertikale Ausrichtung der Probe möglich ist. Betont wird jedoch, dass in der Regel horizontal geprüft werden soll, auch bei in der Praxis vertikal anzufindenden Teilen [Bab02] (beispielsweise um zu vermeiden, dass maßgebliche Wärmeeinträge über Schnittkanten der Probe erfolgen, die in dieser Form in der Praxis kaum anzutreffen sind).

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz



**Abbildung 5-2:** Schematische Ansicht der charakteristischen Bestandteile des Cone Calorimeters (ohne Kalibrierungsequipment) [Din02]

Den verwendeten horizontalen Prüfstand veranschaulicht Abbildung 5-3.



**Abbildung 5-3:** Probenstand im Detail: „Probe“ (1), konischer Heizer (2), Funkenzünder (3), Probenhalterung und Wiegeeinheit (4)

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

---

Die Wärmeübertragung auf die Probe (1) erfolgt bei vernachlässigbar geringem konvektiven Anteil, sodass in der Regel von einer gänzlichen Erhitzung durch Strahlung auszugehen ist [Bab02]. Hierzu ist im konischen Heizer (2) eine Heizspirale angeordnet, die Wärmestromdichten (Heat Flux – HFX) von 0 bis 100 kW/m<sup>2</sup> erreicht. Mit einer maximalen Abweichung von etwa 2% ist zwischen 25 und 100 kW/m<sup>2</sup> eine gleichmäßige Erwärmung der Probe garantiert [Mou06]; ein Verteilungsprofil kann zum Beispiel [Kem13] entnommen werden. Bei Feststoffen beträgt die beaufschlagte Probenoberfläche 10 cm x 10 cm, die Höhe der Probe sollte zwischen 6 mm und 5 cm betragen. Der Abstand der Probenoberfläche zur Unterkante des Heizers liegt bei 25 mm. Durch den elektrischen Funkenzünder (3) wird gleichzeitig eine Funkenstrecke mit 10 kV erzeugt, um aufsteigende Pyrolysegase zu entzünden. Während des Versuchs wird kontinuierlich das Probengewicht gemessen (4), um die Massenverlustrate zu bestimmen. Die Messwerterfassung erfolgt im Sekundentakt, hieraus berechnete Werte werden in 5-Sekunden-Intervallen angegeben.

Die Probenhalter für den Test der Feststoffe entsprechen [ISO5660-1] ohne Rahmenhalterung. Für Flüssigkeiten liegen hingegen keine Standards vor. Hier wurden kreisförmige Edelstahlschalen mit Innendurchmessern von 5 bis 11,3 cm (Abbildung 5-4) verwendet. Letztgenannter Durchmesser führt zu einer Oberfläche von 100 cm<sup>2</sup> und ist analog zu den Feststoffproben gewählt. Der Abstand zum konischen Heizer von 25 mm wurde vom Schalenrand gemessen.



**Abbildung 5-4:** Prüfgefäße für Flüssigkeiten am Cone Calorimeter

Die Kenngrößen der Schalen – des inneren und äußeren Durchmessers  $d_i$  und  $d_a$ , der inneren Fläche  $A_i$  sowie der Wandhöhen  $h_{w,i}$  und  $h_{w,a}$  – gibt Tabelle 5-1 wieder. Weiterhin ist jeweils die Höhe  $h$  der Flüssigkeit bei einem standardmäßig verwendeten Prüfvolumen von 30 ml ersichtlich. Dieses Volumen folgt aus den Sicherheitsvorgaben der Hochschule und stellt das Maximum an Testflüssigkeit dar.

**Tabelle 5-1:** Kenngrößen der Prüfgefäße für Flüssigkeiten am Cone Calorimeter

Schale	$d_i$	$d_a$	$A_i$	$h_{w,i}$	$h_{w,a}$	$h$
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]
1	50,0	52,0	1963	19,0	22,0	15,3
2	70,0	73,0	3848	20,0	23,0	7,8
3	82,5	85,5	5346	19,5	22,8	5,6
4	113,0	119,0	10000	17,0	20,1	3,0

Die Bestrahlungsstärke wurde für die Versuchsdurchläufe zwischen 0 und 70 kW/m<sup>2</sup> eingestellt. Um diese Größenordnung zu verdeutlichen, sind in Tabelle 5-2 Brandszenarien mit entsprechenden Wärmestromdichten dargestellt. Die Quantifizierung des Brandes anhand der HFX (anstatt durch die Flammentemperatur) ist nach [Mou06] gängige Praxis.

**Tabelle 5-2:** Wärmestromdichten nach Brandszenarien [Gre11]

Brandszenario	Wärmestromdichte
	[kW/m <sup>2</sup> ]
Kleines Feuer, Brandklasse A	25
Frühe Brandentstehungsphase	35
Großer Abfallcontainerbrand	50
Bedeutender Großbrand	75
Erdölbrand	100

Eine weitere Unterteilung, örtlich sowie zeitlich hinsichtlich des Flash-overs, zeigt Tabelle 5-3. Während als Kriterium für die Zeit vor dem Flash-over eine Wärmestromdichte in Bodennähe von weniger als 20 kW/m<sup>2</sup> charakteristisch ist [Lee85], sind für das „Post-Flash-over“ etwa 150 kW/m<sup>2</sup> typisch [Bab95].

**Tabelle 5-3:** Wärmestromdichten nach Ort und Zeit (Mittelwerte)

Ort	Vor Flash-over	Nach Flash-over
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]
Raumdecke (mittig) [Söd91], [Bab95]	< 45	68 – 147
Bodennähe [Lee85]	< 20	> 20
Wände [Bab95]	25 – 45	91 – 194
Fassade (Plume aus Fenster) [Bab95]	–	50

Es ist ersichtlich, dass die gewählten Wärmestromdichten den unteren bis mittleren Bereich üblicher Brandszenarien gut erfassen.

### 5.1.2. Versuchsübersicht

Durch die Variation des Materials, der Aufbereitungsart, der Probenhöhe und der Bestrahlungsstärke ergibt sich eine Gesamtanzahl von 366 Versuchen am Cone Calorimeter (ohne Fehl- und nicht systematische Versuche). Dabei wurde jeder Test in der Regel drei Mal

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

durchgeführt. Für die statistische Auswertung erfolgten 21 Wiederholungen. Tabelle 5-4 gibt einen Überblick der getesteten Feststoffe.

**Tabelle 5-4:** *Versuchsübersicht Cone Calorimeter für Feststoffe*

Untersuchtes Material	Bemerkung / Beaufschlagung	Anzahl
Fichtenholz, sägerau	- Platten, Krippen, Späne - Probenhöhe variiert - 20, 35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup>	36
Rohspan P2	- Platten, Krippen - Probenhöhe variiert - 20, 35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup>	74
Polyethylen	- Granulat, Folie - Probenhöhe variiert - 20, 35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup>	19
Polymethylmethacrylat, geschwärzt	- Platten - 20, 35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup>	12
Polyurethan, Hartschaum B3	- Platten - 35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup>	9
Polyurethan, Hartschaum B1	- Platten - 35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup>	9
Polystyrol, Hartschaum B1	- Platten - 35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup>	9
<b>Summe Versuche</b>		<b>168</b>

Die Versuche mit Flüssigkeiten zeigt Tabelle 5-5. Diese Tests wurden hauptsächlich im Rahmen der Arbeit von Schmöche [Sch14] durchgeführt. Die hohe Versuchsanzahl von knapp 200 folgt zum einen aus der Problematik, dass kein standardisiertes Testverfahren vorhanden ist. Zum anderen sind die Versuchslaufzeiten im Vergleich zu Feststoffen sehr gering, sodass mit relativ geringem Zeitaufwand mehr Versuche möglich waren.

**Tabelle 5-5:** *Versuchsübersicht Cone Calorimeter für Flüssigkeiten*

Untersuchtes Material	Volumen / Füllhöhe	Schale	Beaufschlagung	Anzahl
Benzin (E10)	30 ml 30 ml + 30 ml H <sub>2</sub> O	2 + 3	0, 10, 15, 20 kW/m <sup>2</sup> 0 kW/m <sup>2</sup>	30
n-Heptan (≥ 99,0%)	30 ml 30 ml + 30 ml H <sub>2</sub> O 5 / 7,5 mm 10 mm	1 – 4 2 – 4 1 – 3 1 + 2	0, 5 kW/m <sup>2</sup> 0 kW/m <sup>2</sup>	57
Ethanol (≥ 99,8%)	30 ml 5 / 7,5 mm 10 mm	1 – 4 1 – 3 2 + 3 1 – 3 1 + 2	0, 5, 10 kW/m <sup>2</sup> 15 kW/m <sup>2</sup> 20 kW/m <sup>2</sup> 0 kW/m <sup>2</sup>	75
Isopropanol (≥ 99,8%)	30 ml 5 / 7,5 mm 10 mm	1 – 4 1 – 3 1 + 2	0 kW/m <sup>2</sup>	36
<b>Summe Versuche</b>				<b>198</b>

Bei Flüssigkeiten wurde, abgesehen von ihren intrinsischen Eigenschaften, neben der Bestrahlungsstärke und der Probenhöhe anhand des Pooldurchmessers die Oberflächengröße

variiert. Eine weitere Modifikation entstand durch den Eintrag einer Wasserschicht unterhalb der Testflüssigkeit. So werden zum einen die Wärmeverluste über die Gefäßunterseite minimiert. Zum anderen wird eine Mindestfüllhöhe garantiert. Auf Grund der Löslichkeit der polaren Proben in Wasser kann dieser Versuchsaufbau lediglich für unpolare Flüssigkeiten verwendet werden.

### **5.2. Messung der Verbrennungseffizienz mittels modifiziertem Single Burning Item Test**

Versuche mittels Single Burning Item Test sind nach DIN EN 13823 „Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen“ [DINEN13823] standardisiert. Diese Prüfmethode entstand im Rahmen der europäischen Harmonisierung und wurde auf Grundlage des Room Corner Tests entwickelt [Ant11], [DINEN14390]. Wie bereits erwähnt, besteht eine Intention des SBI Tests in der kostensparenden Abbildung des RCT in kleinerem Maßstab [Mad08], insbesondere um Baumaterialien zu klassifizieren [Hir08]. Als weiteren damaligen Entscheidungsgrund für den SBI Test nennt [Mou06], wie beim Cone Calorimeter, die Vielfältigkeit der gleichzeitig messbaren Größen.

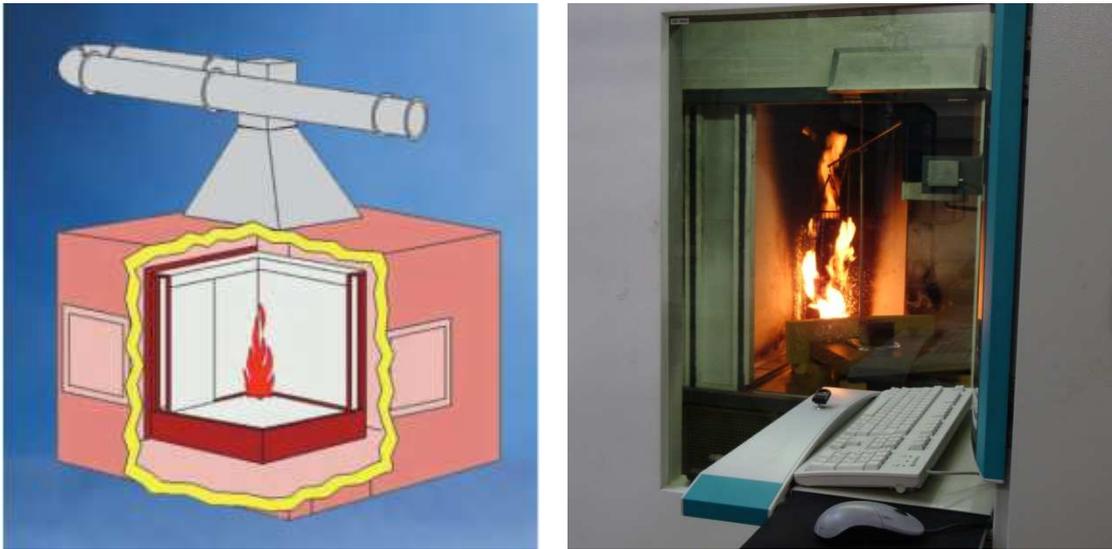
#### **5.2.1. Messregime**

Analog zum Cone Calorimeter wird am Single Burning Item Test auf Basis der Sauerstoffverbrauchsmethode die Wärmefreisetzungsrates bestimmt. Neben der Wärmefreisetzungsrates sind Entzündbarkeit, Flammenausbreitung, Rauchfreisetzung und brennendes Abtropfen weitere Zielgrößen. Sie münden in die maßgeblichen Normparameter FIGRA (Fire Growth Rate) und SMOGRA (Smoke Growth Rate) [Hir08]. Dabei werden Materialien, die schnell eine hohe HRR (beziehungsweise hohe Rauchausbeuten) erreichen, mittels großem FIGRA-beziehungsweise SMOGRA-Wert als gefährlicher bewertet [Hir08]. Für eine detaillierte Darstellung des Kalorimeters und des Messverfahrens sei auf [DINEN13823] und [Ant11] verwiesen. An dieser Stelle wird der Schwerpunkt auf die vorgenommene Modifizierung des Prüfstandes gelegt und ein allgemeiner Überblick gegeben.

Abbildung 5-5 zeigt die SBI Test Apparatur schematisch sowie den verwendeten Versuchstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Ausschnitt, siehe auch [Kna14], [Kus15]). Zu erkennen ist der Aufbau des Geräts: ein Prüfraum mit dem Prüfgerät (Probenträgerwagen, Gestell, Brenner, Abzugshaube, Kollektor und Abzugsrohr) sowie dem Rauchabzugssystem und der allgemeinen Messgeräteausstattung [DINEN13823]. Rechts sind der Einblick in die Kammer während eines Versuchs sowie der Rechner zur Datenerfas-

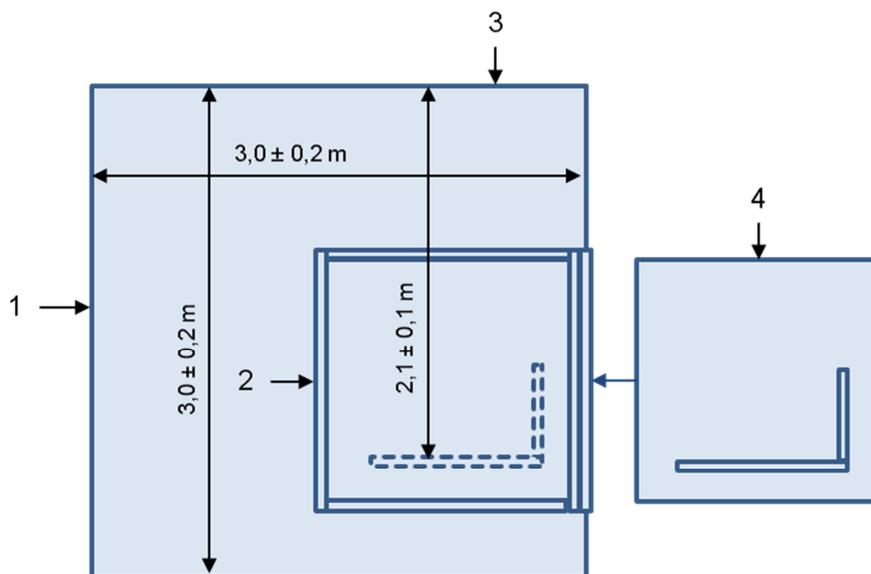
## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

sung und -analyse ersichtlich. Hinzu kommen eine Auswerte- und eine Kalibriereinheit (Gasanalyse und -regelung sowie Brennersteuerung).



**Abbildung 5-5:** Single Burning Item Test: links Schema [FTT13], rechts Einblick in die Brennkammer der modifizierten Apparatur an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Zur Verdeutlichung der Größenverhältnisse sind in Abbildung 5-6 die Maße dargestellt.



**Abbildung 5-6:** Draufsicht Prüfraum Single Burning Item Test nach [DINEN13823]: Sichtfenster (1), (3), feststehendes Gestell (2), Probenträgerwagen mit Probenflügeln (4)<sup>6</sup>

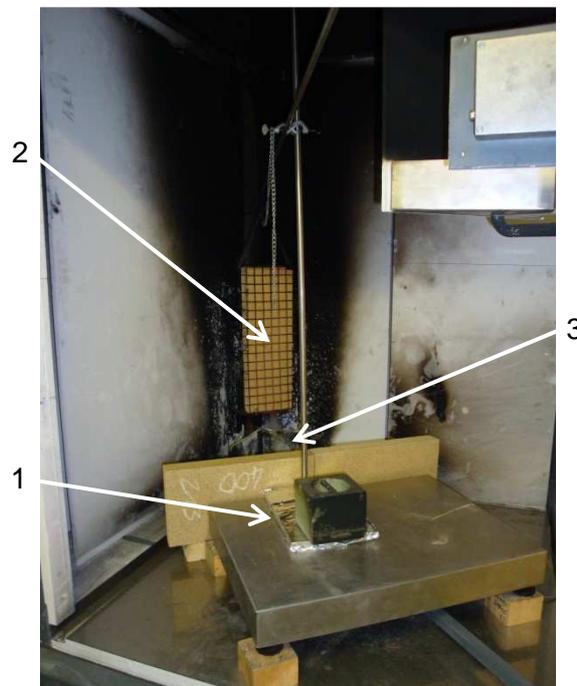
In der Regel werden Proben der Abmessungen 0,5 m mal 1,5 m am schmalen und 1 m mal 1,5 m am breiten Probenflügel, bei einer maximalen Dicke von 0,2 m, eingespannt. Die

<sup>6</sup> Wiedergegeben mit Erlaubnis von DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Am DIN Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

normgemäße Beaufschlagung der Proben erfolgt bei 31 kW durch einen mit Propan betriebenen Sandbettbrenner, der in der Ecke der Probenflügel angeordnet ist. Er simuliert den im Titel der Norm erwähnten einzelnen brennenden Gegenstand. Die für die Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate notwendigen Messsonden sind, wie beim Cone Calorimeter, im Abzugskanal angeordnet.

Zur Ermittlung der Verbrennungseffizienz wurde der Versuchsaufbau modifiziert (Abbildung 5-7). Dies ist insofern nicht ungewöhnlich, als auch laut der Literatur neben der herkömmlichen Variante des Tests alternative Aufbauten gebraucht werden [Mou06]. Die durchgeführte Modifikation stellt sich wie folgt dar: Auf dem Probenträgerwagen erfolgte die Installation einer Waage und einer Probenhalterung, um eine kontinuierliche Erfassung des Massenverlusts gewährleisten zu können (1). Die Proben wurden in einen Drahtkorb (2) eingefügt und in 25 cm Höhe (Unterkante Drahtkorb) über dem Sandbettbrenner (3) befestigt.



**Abbildung 5-7:** Modifizierter Aufbau des Single Burning Item Tests: eingebrachte Probenhalterung und Abbrandwaage (1), Probe im Drahtkorb (2), Sandbettbrenner (3)

Alle Untersuchungen erfolgten mit Proben der Abmessungen 166 mm mal 500 mm bei variabler Dicke (Tabelle 5-8), indem jeweils drei Probenstücke nebeneinander in den Drahtkorb eingebracht wurden. Dafür standen zwei Drahtkörbe unterschiedlicher Breite zur Verfügung, in die die Proben bündig eingepasst werden konnten. Mittels vier Metallstäben, die zwischen den Platten als Abstandshalter dienen, wurde die Ventilationszufuhr optimiert. Die Zeit der Flammenbeaufschlagung wurde so gewählt, dass möglichst die gesamte Kurve der Wärmefreisetzungsrate durchlaufen werden konnte. Dabei erfolgten die Messwerterfassung sowie

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

---

die Angabe hieraus berechneter Werte in Intervallen von drei Sekunden. Eine Ausnahme bildet die Abbrandwaage, die Werte im Sekundentakt aufzeichnet.

Auf Grund des brennenden Abtropfens von PS musste der Versuchsaufbau für diese Proben leicht verändert werden: Am Boden des Probenkorbes wurde eine Wanne eingebracht, in der sich das abgetropfte Material sammeln und verbrennen konnte. Für Flüssigkeiten fand eine Edelstahlschale nach Tabelle 5-6 Verwendung, die direkt auf die Abbrandwaage gestellt wurde.

**Tabelle 5-6:** Kenngrößen des Prüfgefäßes für Flüssigkeiten am modifizierten Single Burning Item Test

Schale	$d_i$	$d_a$	$A_i$	$h_{w,i}$	$h_{w,a}$	$h$
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]
I	195	203	30000	16	20	7

Vor der Probenbeaufschlagung erfolgte die Erfassung der Grundlinie des Brenners. Hierfür wurde gemäß [DINEN13823] ein Nebenbrenner verwendet, von dem nach einer 5-minütigen Vorlaufzeit auf den unterhalb der Probe befindlichen Hauptbrenner umgeschaltet wurde. Für die Auswertung der mittels modifiziertem SBI Test gewonnenen Daten wird im Folgenden der Zeitpunkt des Umschaltens vom Neben- auf den Hauptbrenner als Testbeginn bezeichnet. Dieser wird, wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, mit dem Zeitpunkt der Entzündung gleichgesetzt, da die Materialien nahezu zeitgleich mit der Beaufschlagung zündeten.

Für Feststoffe erfolgten Versuche zunächst bei einer Brennerleistung von 31 kW gemäß [DINEN13823]. Zeigten die Proben kein durchgehendes Brandverhalten, wurden Versuche bei 51 kW durchgeführt und die Tests bei niedrigerer Intensität verworfen. Die Entzündung der flüssigen Proben erfolgte abweichend hiervon mittels eines Stabfeuerzeugs (n-Heptan) beziehungsweise eines Handbrenners (Gemisch aus 35% Propan und 65% Butan). Eine weitere, kontinuierliche, externe Beaufschlagung fand bei diesen Tests nicht statt. Zur Verdeutlichung der Größenordnung der eingesetzten externen Wärmebeaufschlagung sind in Tabelle 5-7 Brandleistungen verschiedener Gegenstände dargestellt.

**Tabelle 5-7:** Richtwerte für Zündinitiale in Anlehnung an [Hos13]

Gegenstand	Brandleistung
	[kW]
Feuerzeug	ca. 0,125
Papierkissen, das heißt Knüllpapier einer Zeitung	ca. 10
Papierkorb	30 – 45
Schreibtischsessel	ca. 65

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

Es ist ersichtlich, dass die den einzelnen brennenden Gegenstand simulierende Wärmequelle im SBI Test mit einem Papierkorbbrand vergleichbar ist.

### 5.2.2. Versuchsübersicht

Je Material wurden drei Versuche durchgeführt, sodass sich eine Gesamtanzahl von 24 Versuchen ergibt (ohne Fehl- und nicht systematische Versuche). Tabelle 5-8 zeigt die Probenauswahl der Feststoffe sowie die Intensität der Materialbeaufschlagung.

**Tabelle 5-8:** Versuchsübersicht modifizierter Single Burning Item Test für Feststoffe

Untersuchtes Material	Plattenstärke / Beaufschlagung	Anzahl
Fichtenholz, sägerau	- 15 mm - 31 kW	3
Rohspan P2	- 16 mm - 31 kW	3
Polyurethan, Hartschaum B3	- 30 mm - 31 kW	3
Polyurethan, Hartschaum B1	- 30 mm - 51 kW	3
Polystyrol, Hartschaum B1	- 30 mm - 31 kW	3
<b>Summe Versuche</b>		<b>15</b>

Die mit Flüssigkeiten durchgeführten Versuche können Tabelle 5-9 entnommen werden.

**Tabelle 5-9:** Versuchsübersicht modifizierter Single Burning Item Test für Flüssigkeiten

Untersuchtes Material	Füllhöhe (Volumen) / Beaufschlagung	Anzahl
Benzin (Super)	- 7 mm (200 ml + 200 ml H <sub>2</sub> O) - 0 kW	3
Diesel	- 7 mm (200 ml) - 0 kW	3
n-Heptan (≥ 99,0%)	- 7 mm (200 ml + 200 ml H <sub>2</sub> O) - 0 kW	3
<b>Summe Versuche</b>		<b>9</b>

Analog zu den Flüssigkeitsversuchen am Cone Calorimeter wurde eine Wasserschicht unterhalb der Proben hinzugefügt. Für Versuche mit Diesel war dies nicht möglich, da die verzögerte Zündzeit in Verbindung mit den hohen Siedetemperaturen einiger Komponenten des Kraftstoffs zu einer starken Erhitzung der Wasserschicht führt. In der Konsequenz besteht die Gefahr, dass beim Sieden des Wassers brennende Dieseltropfen schlagartig aufgewirbelt und über das Probengefäß hinaus verteilt werden.

### 5.3. Einflussfaktoren bei der Bestimmung der Verbrennungseffizienz

Trotz des standardisierten Verfahrens für den Test von Feststoffen im Cone Calorimeter ist eine Reihe an Parametern nicht festgelegt. Die Intention dieses Abschnitts besteht daher in

Vorüberlegungen zur Ableitung geeigneter Versuchsbedingungen für die Ermittlung der Verbrennungseffizienz unter den durch das Cone Calorimeter vorgegebenen Bedingungen. Weiterhin ist es notwendig, charakteristische Unterschiede zwischen den im Labor- und den im Zwischenmaßstab durchgeführten Versuchen zu benennen und diese, soweit möglich, durch Anpassungen zu reduzieren, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Auslegung geeigneter Bedingungen für den Labormaßstab. Dementsprechend ist die folgende Diskussion auf die Versuche am Cone Calorimeter bezogen, denen am Ende jeden Unterabschnitts die Versuchsbedingungen am SBI gegenübergestellt werden. Da der Schwerpunkt der Arbeit bei der Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz von Feststoffen liegt, erfolgen auch die nachstehenden Überlegungen mit diesem Bezug.

Als Ziel von Versuchen im Labormaßstab gilt das Abbilden eines real interessierenden Szenarios. Hierbei muss der Anspruch einer möglichst genauen Abbildung mit dem konkurrierenden Ziel der einfachen Umsetzung abgewogen werden. Dies ergibt die Notwendigkeit, den unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Mittel bestmöglichen, hinreichend genauen und damit geeigneten Laborversuch zu definieren. Hieraus wiederum folgt, dass die entscheidenden Einflussfaktoren zu identifizieren und zu charakterisieren sind. In Bezug auf die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Laborversuche zur Ermittlung der Verbrennungseffizienz sind dies die Probenaufbereitung, die Probenbeaufschlagung sowie maßgebliche, das Brandverhalten bestimmende intrinsische Faktoren.

Ein besonderes Augenmerk ist darauf gerichtet, dass die Verbrennungseffizienz keine Stoffeigenschaft ist. Infolgedessen gilt es, die äußeren Parameter so einzustellen, dass ein möglichst allgemein gültiges und verwertbares Maß der Verbrennungseffizienz resultiert. Bei der Ableitung von Versuchsbedingungen wird daher die Einflussnahme der Parameter auf die charakteristischen Brandgrößen der Zündzeit, der Massenverlust- und der Wärmefreisetzungsrates bedacht. In der anschließenden Versuchsauswertung werden die in diesem Kapitel definierten Versuchsbedingungen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Verbrennungseffizienz und die genannten Brandgrößen geprüft.

### **5.3.1. Probenaufbereitung**

Bei der Verwendung der Verbrennungseffizienz zur Brandlastbewertung im Industriebau ist vorwiegend ihr Wert für Lagergüter von Interesse. Diese können in Form von „einfachen“ Materialien (Holz, Papier, Kunststoffe etc.) aber auch als Verbundwerkstoffe auftreten. Zum Teil sind weiterhin Verpackungsmaterialien in die Lagerhaltung integriert (beispielsweise Fertigteile aus Kunststoff in Pappkartons oder auf Paletten). Derartige Gegebenheiten sind gemeinhin bei der Probenaufbereitung zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden sie

dennoch zurückgestellt, um zunächst anhand einfacher Materialzusammensetzungen grundlegende Möglichkeiten zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz zu analysieren.

### 5.3.1.1. Spezifische Oberfläche, Probenhöhe und thermische Stoffeigenschaften

Wie bereits erwähnt, sind die Materialien neben der Zusammensetzung hinsichtlich ihrer Form und Verteilung zu differenzieren. So weisen beispielsweise Kanthölzer andere Brandeigenschaften als Holzwole auf. Ein charakteristisches Probenmerkmal ist demnach die spezifische Oberfläche beziehungsweise die (Schütt-) Dichte. Mit den thermischen Stoffeigenschaften findet sie sich im Wärmeeindringkoeffizienten beziehungsweise der Thermalträgheit wieder [Kur09]:

$$I = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (36)$$

I	Wärmeeindringkoeffizient (Thermalträgheit) [Ws <sup>0,5</sup> /(m <sup>2</sup> K)]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
$\rho$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p$	spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) [J/(kgK)]

Die Thermalträgheit ist ein Maß dafür, wie die (Oberflächen-) Temperatur eines Materials steigt, wenn es mit thermischer Energie beaufschlagt wird. Materialien mit hohem Wärmeeindringkoeffizienten sind durch hohe Wärmeleitfähigkeiten, Speichervermögen und Dichten gekennzeichnet. Sie sind bereits bei geringer Schichthöhe thermisch dick (halbunendlich), das heißt ankommende Wärme wird in das Probeninnere geleitet (zum Beispiel Stahl, der sich bei Kontakt kalt anfühlt). Zur Abgrenzung davon gelten Konstellationen mit einer Biot-Zahl  $< 0,1$  als thermisch dünn [Dry04]: Bei kleinen Wärmeeindringkoeffizienten entsteht ein Wärmestau und damit eine schnelle Oberflächentemperaturänderung (zum Beispiel Dämmstoffe, die sich bei Kontakt „warm“ anfühlen) [Dry08].

Diese Beobachtungen sind auf den Zündprozess übertragbar: Eine hohe Thermalträgheit bedeutet, dass die Wärme von der Oberfläche in beziehungsweise über das Probeninnere geleitet beziehungsweise abgeleitet wird, was zu einer großen Zündzeit führt [Mad08]. Eine geringe Thermalträgheit führt hingegen zum Wärmestau und damit zu einer hohen Oberflächentemperatur und einer kurzen Zündzeit. Das heißt eine geringe Dichte, eine geringe Wärmeleitfähigkeit sowie eine geringe spezifische Wärmekapazität führen zu einer schnellen Zündung. Durch unterschiedliches Absorptionsvermögen kann zu einem gewissen Maß ferner die Farbgebung das Zündverhalten beeinflussen.

Hinzukommend lässt die Thermalträgheit eine Aussage über den Verlauf eines Brandes zu [Dry04]. So werden neben dem Zündverhalten die HRR und die Massenverlustrate geprägt.

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

---

Grundsätzlich sind für thermisch dicke Proben geringere Verbrennungsraten als für dünne Proben zu erwarten. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn die Wärmeverluste auf der Rückseite der Probe groß sind [Dry04]. Sind Materialien mit geringer thermischer Trägheit einmal entzündet, resultiert hingegen eine starke Brandentwicklung [Dry04].

Vorausgesetzt, die Probenhöhe ist nicht in direkter Form durch das zu untersuchende Material vorgegeben, folgt daraus das Erfordernis, eine optimale Probenhöhe zu definieren. So wird sichergestellt, dass das Brandverhalten vielmehr durch die Materialeigenschaften als durch die Probenhöhe beeinflusst ist.

Den Einfluss der Probenhöhe in Verbindung mit der Bestrahlungsstärke verdeutlicht die empirische Gleichung, die Babrauskas für Spanplatten aufgestellt hat [Bab02]:

$$l = \frac{0,6 \cdot \rho}{\text{HFX}} \quad (37)$$

$l$  minimale Probenhöhe [mm]

$\rho$  Dichte der Probe [kg/m<sup>3</sup>]

HFX Wärmestromdichte [kW/m<sup>2</sup>]

Ab dieser Höhe ist nach [Bab02] für Versuche im Cone Calorimeter sichergestellt, dass insbesondere die Entzündungszeit unabhängig von der Probenhöhe ist. Die seitlichen Abmessungen sind durch die Versuchsapparatur vorgegeben und bleiben unberücksichtigt. Zwar kann nicht von einer generellen Übertragung auf alle untersuchten Materialien ausgegangen werden, als Richtwert wird die Gleichung jedoch herangezogen. Für weitere Informationen zum Entzündungsverhalten in Abhängigkeit der Probendicke sei an dieser Stelle auf [Dry04] verwiesen.

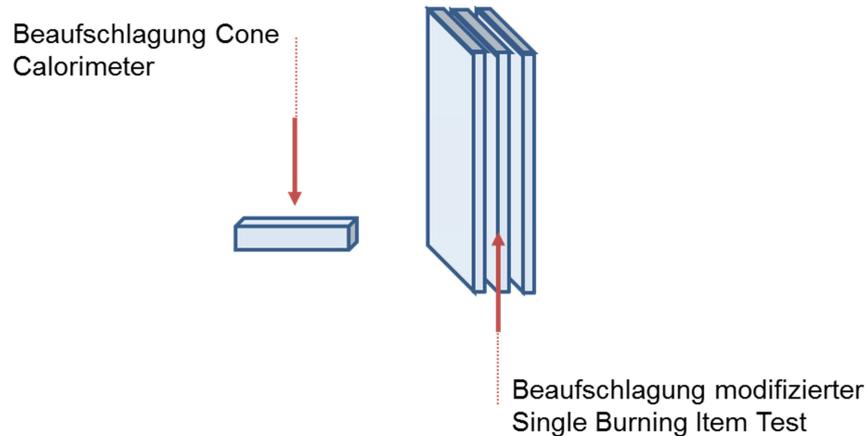
### 5.3.1.2. Umsetzung und Vergleich mit dem modifizierten Single Burning Item Test

Der labormaßstäblichen Untersuchung der in diesem Unterabschnitt genannten Einflussfaktoren wird im Rahmen der Arbeit mit einer weitgefächerten Materialauswahl, variierten Probenhöhen sowie verschiedenen Aufbereitungsarten, die spezifische Oberfläche, Form und Verteilung betreffend, nachgekommen. Beispielhaft sei die Aufbereitung des gängigen Lagerguts „Holz“ als Schnittholz, Hirnholz, Krippen und Späne verschiedener Probenstärken genannt.

Für den Vergleich mit Versuchen im Zwischenmaßstab musste sich auf die Wahl unterschiedlicher Materialien beschränkt werden. Eine Variation der Probenhöhe sowie der Form und Verteilung fand nicht statt; sie waren im Wesentlichen durch den Versuchsaufbau vorgegeben. Zu bemerken ist, dass die Proben im modifizierten SBI Test, im Gegensatz zum Cone Calorimeter, seitlich, an deren schmaler Kante, beaufschlagt wurden. Zudem wurden

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

drei Proben mit geringen Zwischenräumen nebeneinander geschichtet. Abbildung 5-8 verdeutlicht diesen Unterschied.



**Abbildung 5-8:** Probenorientierung und Richtung der Probenbeaufschlagung im Cone Calorimeter und modifizierten Single Burning Item Test

Die anders gerichtete Penetration des Materials muss besonders bei der Verbrennung inhomogener Materialien berücksichtigt werden (beispielsweise anisotroper Aufbau des Holzes).

### 5.3.2. Probenbeaufschlagung

Der messgerätechische Parameter der Beaufschlagungsintensität kann sowohl beim Cone Calorimeter als auch in gewissem Rahmen beim modifizierten SBI Test gewählt werden (siehe auch [Kus15]). Im Folgenden wird zunächst die Höhe der Beaufschlagungsintensität diskutiert. Dabei wird als erstes auf die Wahl einer geeigneten Bestrahlungsstärke am Cone Calorimeter eingegangen, wobei zentrale Inhalte auf [Bab95] zurückgehen. Informationen zur Einstellung des Propangasbrenners im modifizierten SBI Test schließen hieran an. In diesem Zusammenhang werden die unterschiedlichen Arten der Beaufschlagung mit Blick auf die beteiligten Wärmeübertragungsmechanismen Konvektion und Strahlung thematisiert.

#### 5.3.2.1. Bestrahlungsstärke

Prinzipiell ist mit zunehmender Wärmestromdichte ein Anstieg der HRR und der MLR zu erwarten. So wurde für einen Großteil an Materialien im Cone Calorimeter Test ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Wärmestromdichte und HRR gefunden; bei einigen Proben nahm die HRR ab ca.  $75 \text{ kW/m}^2$  jedoch sogar wieder ab. Für eine Reihe von Proben wurden weiterhin zwischen  $20$  und  $50 \text{ kW/m}^2$  vergleichbare Massenverluste festgestellt. Andere Proben zündeten zwar unter  $30 \text{ kW/m}^2$ , verbrannten bis zu dieser Wärmestromdichte jedoch mit großer Restmasse und erst bei höheren Bestrahlungsstärken mit geringerem Rückstand. Zum Teil konträr hierzu wurde zudem festgestellt, dass bei Wärmestromdichten  $\geq 35 \text{ kW/m}^2$  die Unterschiede zwischen den getesteten Materialien oftmals steigen. Als Bestrahlungsstärken zur Datenermittlung mittels Cone Calorimeter schlägt Babrauskas daher

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

---

35 und 50 kW/m<sup>2</sup> vor. [Mad08] nennt 50 bis 70 kW/m<sup>2</sup> für den Labormaßstab. Auch [Hir08] weist darauf hin, für bestmögliche Resultate die Testparameter, zum Beispiel die Bestrahlungsstärke, zu variieren. Jedoch ist nach Babrauskas die Definition der „besten“ Bestrahlungsstärke schon mit Schwierigkeiten verbunden, sodass die Bestimmung zweier charakteristischer Wärmestromdichten umso komplexer sei.

Ergänzend ist festzuhalten, dass bei Messungen im Cone Calorimeter Wärmestromdichten < 10 kW/m<sup>2</sup> kritisch sind, da hier der konvektive Anteil nicht mehr vernachlässigbar gering gegenüber dem Strahlungsanteil ist. Auch [Mik89] verweist darauf, dass bei geringen Bestrahlungsstärken, und demzufolge langen Zündzeiten, die konvektiven Wärmeverluste nicht mehr vernachlässigbar gering sind, sodass die Genauigkeit der Messung beeinträchtigt ist. Zudem wird konstatiert, dass für signifikante Messergebnisse die Wärmestromdichte mindestens 10 kW/m<sup>2</sup> oberhalb derjenigen Bestrahlungsstärke, ab der das Material zündet, liegen muss. Dies führt in der Regel zu Bestrahlungsstärken  $\geq 25$  bis 30 kW/m<sup>2</sup>.

Weiterhin wird in [Bab95] eine Studie beschrieben, bei der Polstermöbel im Cone Calorimeter sowie im Großversuch mittels Furniture Calorimeter unterschiedlichen Wärmestromdichten ausgesetzt wurden (siehe auch [Bab93]). Im Anschluss an die Versuche wurden unter Verwendung der Standardnormalverteilung mit der Methode der kleinsten Quadrate für 25 und 35 kW/m<sup>2</sup> annähernd gleiche Variationskoeffizienten und für 40 kW/m<sup>2</sup> ein geringfügig höherer Variationskoeffizient ermittelt. Als Bezugswert wurde jedoch meist die maximale Wärmefreisetzungsrate gewählt. Alternativ wurde in einigen Fällen auf die über 180 s gemittelte HRR zurückgegriffen. Auch [Pet94] beschreibt derartige Analysen und bezieht die Entzündungszeit ein. [Han02a] nimmt dagegen Bezug auf die Zeit bis zum Flash-over. Weitere Untersuchungen sind in [Hak01], [Hee02], [Sun98], [Sun07] zu finden. Sie legen als einen maßgeblichen Parameter den FIGRA-Wert zu Grunde.

Weitere Untersuchungen zum Verhalten von Materialien in Abhängigkeit der Wärmestromdichte, insbesondere im Zusammenhang mit der Entzündung, schildert Quintiere [Qui98]. Für thermisch dünne Materialien wird eine typische Grenze für die Entzündung von 10 kW/m<sup>2</sup>, für thermisch dicke Materialien von 20 kW/m<sup>2</sup> genannt. Weiterhin werden für eine Reihe an Materialien Entzündungszeiten und -temperaturen in Abhängigkeit der Wärmestromdichte als Kurven und Tabellen gegeben.

Abschließend ist anzumerken, dass die tatsächlich im Cone Calorimeter auf die brennende Probe einwirkende Wärmestromdichte höher als die gewählte Voreinstellung ist: Der gesamte Wärmeeintrag steigt naturgemäß mit der von der Probe freigesetzten Wärmefreisetzungsrate (siehe auch [Kus15]). Eine Untersuchung hierzu enthält [Kem13]. Bei der dort beschriebenen Messung wird auf Grund des Messgeräts jedoch lediglich der Strahlungsanteil erfasst,

konvektive Anteile bleiben unberücksichtigt beziehungsweise können das Messergebnis verfälschen.

### 5.3.2.2. Umsetzung und Vergleich mit dem modifizierten Single Burning Item Test

Als Konsequenz der geschilderten Ergebnisse von Babrauskas und Quintiere erfolgten im Rahmen dieser Arbeit Versuche mit Bestrahlungsstärken über ein Spektrum von 20 bis 70 kW/m<sup>2</sup>.

Im SBI Test ist für die Probenbeaufschlagung im Gegensatz zum CC ein Propangasbrenner vorgesehen. Bei einem Heizwert von 46,36 kJ/g für Propan [DINEN13823] folgt für die normierte Beaufschlagung mit 31 kW ein Propangasstrom von 0,67 g/s, sodass eine 0,5 m bis 0,7 m hohe Diffusionsflamme entsteht [Kem13]. Detailaufnahmen und Temperaturprofile der Flamme können [Kem13] entnommen werden. Der im modifizierten Versuchsaufbau verwendete Wärmestrom von 51 kW entspricht einem Massenstrom von 1,10 g/s Propangas und erzeugt damit etwas höhere Flammen. Mit der Probeninstallation 0,25 m oberhalb des Brenners werden so mindestens 50- bis 80% der Probenoberfläche durch die Flamme beaufschlagt.

Die Oberfläche des Propangasbrenners entspricht einem gleichschenkligen Dreieck mit einer Seitenlänge von 0,25 m. Für die Brennerleistung von 31 kW folgt daraus eine flächenbezogene Wärmeleistung von etwa 1000 kW/m<sup>2</sup>. Dieser hohe Wert wird jedoch durch den Einfallwinkel und durch Wärmeverluste relativiert. So wurden nach [Kem13] im Rahmen einer Round Robin Studie für den regulären SBI Test Aufbau maximale Wärmestromdichten auf die Proben von 55 ( $\pm 4$ ) kW/m<sup>2</sup> gemessen. Ein ähnlicher Wert ist mit 50 kW/m<sup>2</sup> in [Mou06] zu finden.

Maßgeblicher Unterschied zum Cone Calorimeter ist damit die Aufbringung von Strahlung durch den konischen Heizer im Gegensatz zur Beaufschlagung durch die Flamme des Propangasbrenners. Wie bereits erwähnt, ist der Konvektionsanteil gegenüber dem der Strahlung im CC vernachlässigbar. Im SBI Test sind hingegen beide Wärmearten zu berücksichtigen. Hierzu führt Kempel aus, dass der Strahlungsanteil einer Propanflamme in der Literatur mit Werten zwischen 3 und 33% angegeben wird und mit steigender Gasaustrittsgeschwindigkeit sinkt [Kem13]. Allgemein für turbulente Diffusionsflammen werden Strahlungsanteile von 17- bis 25% genannt [Kem13].

Auch ist zu bemerken, dass trotz gleicher Beaufschlagungsintensität die Einwirkungen auf das Material variieren und zu andersgearteten Resultaten führen können (zum Beispiel hinsichtlich der Zündzeiten) [Jön85]. Neben der Abgabe und Aufnahme unterschiedlicher Wellenlängen können die Wärmequellen verschiedenartige Strömungsverhältnisse / Verwirbelungen an der Materialoberfläche bewirken [Jön85]. Mögliche Auswirkungen sind abwei-

chende Temperaturprofile und infolgedessen unterschiedliche vorherrschende Reaktionen. In Bezug auf die Größe der Probenoberfläche gilt dies ebenso, wobei gemäß [Jön85] ab 100 cm<sup>2</sup> von vergleichbaren Effekten ausgegangen werden kann.

Im SBI Test sind ferner durch die Beaufschlagung der Proben von unten (vergleiche Abbildung 5-8) optimale Bedingungen für eine Flammenfortpflanzung gegeben, da die Brandausbreitungsgeschwindigkeit in Aufwärtsrichtung am höchsten ist. Im Cone Calorimeter wird dagegen die Probenoberfläche von oben beaufschlagt. Dieser Unterschied ist jedoch insofern von untergeordneter Bedeutung, als dass beim Cone Calorimeter mit der Entzündung stets die gesamte Probenoberfläche in Brand gesetzt wird. Durch den modifizierten Probenaufbau des SBI Tests ist die Zeit, bis die gesamte Probenoberfläche in den Verbrennungsprozess einbezogen ist, ebenso verringert. Eine Zunahme der Brandfläche mit der Zeit kann daher vernachlässigt werden (im Gegensatz zum normierten Versuchsaufbau, hier steigt die Brandfläche mit der Zeit).

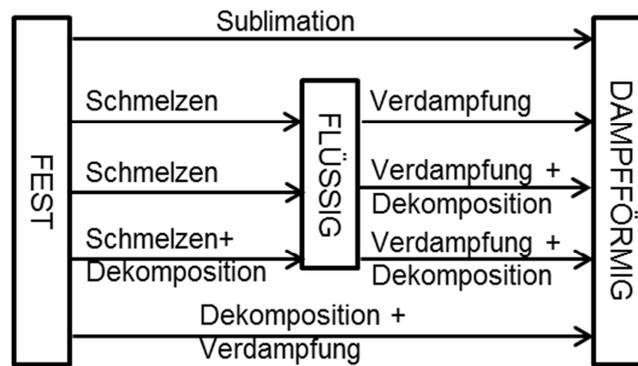
Abschließend sei darauf hingewiesen, dass infolge der unterschiedlichen Zündquellen (Funkenzünder / Propangasbrenner) Abweichungen entstehen können. Da vorwiegend das Brandverhalten bei durchgehender Flammerscheinung von Interesse ist, wird dieser Aspekt jedoch nicht vertieft.

### **5.3.3. Brandverhalten der Proben**

Die in Kapitel 4 beschriebene Materialauswahl wurde mit dem Ziel getroffen, ein weitgefächertes Spektrum möglichen Brandverhaltens zu erfassen. Maßgeblich wird das Brandverhalten zum einen durch den Aggregatzustand, zum anderen durch die Aggregatzustandsänderung der Probe beeinflusst. Als weiteren charakteristischen Parameter in Verbindung mit der Vollständigkeit der Verbrennung, und demzufolge der Verbrennungseffizienz, wird auf die Neigung zur Rauch- und Rußbildung eingegangen. Hinzukommend wird in diesem Zusammenhang die Wirkung von Flammschutzmitteln erläutert. Ein Vergleich von CC und SBI Test entfällt in diesem Abschnitt, da vielmehr denkbare Einflüsse der intrinsischen Eigenschaften der Versuchsmaterialien als die mögliche Einstellung von Parametern an der Versuchsanlage diskutiert werden.

#### **5.3.3.1. Aggregatzustandsänderung**

Ein entscheidender Bestandteil des Verbrennungsprozesses ist die Verflüchtigung. Grundsätzlich sind hierbei physikalische und chemische Zersetzungsprozesse zu unterscheiden, die in Interaktion stehen können (Abbildung 5-9).



**Abbildung 5-9:** Übergänge vom festen in den dampfförmigen Zustand nach [Dry04]

Aus physikalischer Sicht sind das Schmelzen, die Verdampfung und die Sublimation anzuführen. Als chemischer Prozess ist die Dekomposition (Zersetzung) zu nennen. Während die physikalischen Vorgänge durch das Lösen gleichartiger Moleküle (Überwindung intermolekularer Kräfte) gekennzeichnet sind, beschreibt die Dekomposition das Lösen molekularer Bindungen, das heißt die Überwindung intramolekularer Bindungskräfte. Je nach Umgebungsbedingungen, etwa der Temperatur, können die aus diesen Prozessen entstehenden Gemische unterschiedlich zusammengesetzt sein [Jön85]. Den Umwandlungsprozessen sind entsprechende energetische Größen zugeordnet, wie beispielsweise die Sublimations- oder die Verdampfungsenthalpie.

### 5.3.3.2. Tendenz zur Rauch- und Rußbildung

Ein weiteres Merkmal zur Abschätzung der Verbrennungseffizienz ist die Neigung der Materialien zu Produkten der unvollständigen Verbrennung, die stellvertretend durch ihre Tendenz zur Rauch- und CO-Bildung betrachtet werden kann. Sie ist im Wesentlichen durch die Zusammensetzung und den Aufbau der Moleküle bedingt. So wird bei der Verbrennung oxidierter Kohlenwasserstoffe (wie Holz oder PMMA) deutlich weniger Rauch freigesetzt als bei nicht oxidierten Grundsubstanzen; weiterhin steigern Kettenverzweigungen und ungesättigte sowie aromatische Verbindungen (vergleiche PS) die Neigung zur unvollständigen Verbrennung [Dry04]. Weitere Informationen und materialbezogene Daten zur Ruß- und Rauchtendenz von Materialien können beispielsweise [Dry04], [Qui98] entnommen werden. Darüber hinaus begünstigen äußerliche Gegebenheiten, wie eine verminderte Sauerstoffzufuhr, die Bildung von Produkten der unvollständigen Verbrennung. Hierauf wird nicht näher eingegangen, da zum einen die Bewertung der intrinsischen Eigenschaften der Materialien Ziel ist. Zum anderen kann bei den verwendeten Versuchsaapparaturen in der Regel von einer ausreichenden Sauerstoffzufuhr und einer brandlastgesteuerten Verbrennung ausgegangen werden.

### 5.3.3.3. Zusatz von Flammschutzmitteln

Flammschutzmittel können zu unterschiedlichen Phasen des Verbrennungsprozesses wirken und infolgedessen das Brandverhalten auf verschiedene Weise beeinflussen. Beispiele sind die Verzögerung der Entzündung oder die Reduzierung der Verbrennungsrate eines Materials. Während sich erstgenannter Effekt weniger auf die Verbrennungseffizienz auswirkt, unter Umständen durch die Vorheizung des Materials sogar zu höheren Werten führen kann, ist bei der Reduzierung der Verbrennungsrate tendenziell eine verringerte Verbrennungseffizienz zu erwarten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Polymere mit flammenhemmenden Zusätzen getestet, weshalb die nachstehenden Erläuterungen zur Entflammbarkeit von Materialien mit Bezug auf diese Stoffgruppe erfolgen. Wesentliche Inhalte sind [Kil14] und [Jön85] entnommen.

Hinsichtlich des Aufbaus der Materialien ist zunächst zwischen dem Einsatz additiver und reaktiver Flammhemmer zu differenzieren. Sie unterscheiden sich in der Vermischung mit dem jeweiligen Polymer: Während Additive dem „fertigen“ Polymer beigemischt werden, erfolgt die Zugabe reaktiver Substanzen bereits bei der Polymersynthese. Infolgedessen sind reaktive Flammschutzmittel, im Gegensatz zu additiven, weitgehend homogen in Form von kovalenten Bindungen in die Molekularstruktur integriert. Obwohl reaktiven Flammschutzmitteln in mancher Hinsicht eine bessere Wirkung zugeschrieben wird, werden insbesondere auf Grund ihrer vielfältigen Einsetzbarkeit sowie aus Kostengründen meist Additive verwendet.

Neben der strukturellen Integration von Flammhemmern in Polymere sind verschiedene Wirkmechanismen charakteristisch. Im Wesentlichen werden die Komponenten eines Brandes nach dem Branddreieck, das Brandstoffangebot, das Sauerstoffangebot und die (Wärme-) Energie, beeinflusst. Dies geschieht basierend auf physikalischen und chemischen Mechanismen sowohl in der Feststoff- als auch in der Gasphase.

Ausgehend von der festen Phase erfolgt die Reduzierung des Brandstoffangebots durch die Verringerung beziehungsweise Trennung des Brandstoffs von der Flamme: Indem die Polymerdegradation beschleunigt wird, tropft das Material ab<sup>7</sup>. Eine weitere, indirekte Art zur Reduktion des Brandstoffangebots ist die Bildung abschirmender Schichten. Dies geht mit der verringerten Freisetzung brennbarer Gase sowie einer verminderten Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe des Materials einher. In der Gasphase wird durch die Anhäufung von Inertgasen sowohl die Konzentration der brennbaren Gase als auch des Sauerstoffs verringert. Hinzu können der vermehrte Ablauf endothermer Reaktionen und das gezielte Abfangen von

---

<sup>7</sup> Durch die Trennung des Materials von der Verbrennungszone kann neben dem positiv zu bewertenden Effekt der Verminderung des Brandstoffangebots am Ursprungsort eine unerwünschte Brandausbreitung resultieren, wenn das Material brennend abtropft und dadurch nicht betroffene Bereiche erreicht und entzündet werden.

## 5. Messung der Verbrennungseffizienz

---

Radikalen kommen. So wird insbesondere die für den Brand zur Verfügung stehende Wärmeenergie reduziert. Zudem kann hierdurch die Verbrennungsrate des Materials gesenkt werden.

Die genannten Mechanismen können, wie bereits erwähnt, zu verschiedenen Zeitpunkten im Brandverlauf wirken. Oftmals treten sie kombiniert auf. Dies resultiert in einem komplexen Prozess, bei dem in der Regel eine der Wirkungsweisen vorherrscht.

---

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

In diesem Kapitel werden die am Cone Calorimeter gewonnenen Messergebnisse dargestellt und ausgewertet. Die Gliederung erfolgt analog zu Kapitel 4 anhand der Materialeigenschaften in die Abschnitte Holz / Holzwerkstoffe und Kunststoffe. Dabei werden die Ergebnisse für Kunststoffe in den Unterabschnitten 6.2.2. für Polyethylen und Polymethylmethacrylat und 6.2.3. für Polyurethan B3, Polyurethan B1 und Polystyrol B1 getrennt ausgewertet. Ziel dieser Untergliederung ist es, die Eignung des Verfahrens für den Test schwerentflammbarer Materialien gesondert zu betrachten. Für Flüssigkeiten sei auf [Sch14], [Sch15] verwiesen.

Am Ende der Abschnitte werden jeweils die Ergebnisse der Parametervariation zusammengefasst. Es werden sowohl die einzelnen Varianten der Verbrennungseffizienz als auch deren maßgebliche Eingangsgrößen beurteilt. Nähere Erläuterungen hierzu folgen in Zusammenhang mit der Auswertung der Versuche mit Hölzern in Unterabschnitt 6.1.4.

Es sei bemerkt, dass der Detailgrad der Auswertung zum Teil über das Erfordernis der Anwendung von Verbrennungseffizienzen hinausgeht. Die Überlegungen haben dennoch im Sinne einer umfassenden Betrachtung ihre Berechtigung. Eine Intention ist, für die vorliegende sowie weitere oder ähnliche Zielstellungen die ablaufenden Prozesse und Einflussfaktoren festzuhalten. In der Folge können sie bei der Planung weitergehender Untersuchungen oder Zielsetzungen bereits im Vorfeld berücksichtigt werden, etwa um Prüfaufbauten entsprechend anzupassen.

Soweit nicht anders vermerkt, sind alle angegebenen Größen arithmetische Mittelwerte aus drei Versuchen. Im Sinne der Übersichtlichkeit wird auf den Index „CC“ verzichtet.

### 6.1. Holz und Holzwerkstoffe

Einleitend wird kurz auf zentrale Merkmale des Verbrennungsvorgangs von Holz eingegangen. Hierauf aufbauend werden die Ergebnisse der Versuche mit Fichtenholz betrachtet. Teilergebnisse wurden bereits unter [Hah13a] veröffentlicht. Es schließt sich ergänzend die Auswertung der Versuche mit Spanplatten an, wobei wesentliche Inhalte übereinstimmend mit [Hah14a] wiedergegeben werden.

#### 6.1.1. Brandverhalten von Feststoffen der Brandklasse A am Beispiel von Holz

Der Verbrennungsprozess von Holz kann in vier Phasen eingeteilt werden [Cho08]: die Trocknung, die endotherme Pyrolyse, die exotherme Pyrolyse und die Verbrennung mit Flammerscheinung. (Eine Ausnahme stellt die sehr lange Erwärmung bei geringer Temperatur dar, die hier nicht näher betrachtet wird.)

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

Zum Aspekt der Trocknung ist zu bemerken, dass Holz in der Regel an der Luft gelagert wird. So stellt sich im Material eine Ausgleichsfeuchte von etwa 10% (Massenprozent) ein [Cho08]. Das im Holz enthaltene Wasser kann in drei Arten unterteilt werden [Cho08]:

- freies Wasser, das in der Zellstruktur lebenden Holzes absorbiert ist und fließen kann (es stellt den Nährstoffaustausch zwischen den Wurzeln und der Baumkrone sicher); bei geschlagenem Holz entweicht dieses Wasser größtenteils aus den Zellen und wird durch Luft ersetzt,
- gebundenes Wasser, das dampfförmig in der Zellstruktur adsorbiert ist und
- Kristallwasser, das in chemischen Verbindungen enthalten ist und beispielsweise die Bindungen zwischen den Zellulosemolekülen formt.

Neben dem freien Wasser werden bei der Trocknung Teile des gebundenen Wassers abgeschieden [Cho08]. Dementsprechend wird bei der Verbrennung weniger Verdampfungsenthalpie benötigt und eine höhere Wärmefreisetzungsrate erreicht [Cho08]. Auch die Zündzeit und die für die Entzündung minimal erforderliche Bestrahlungsstärke steigen mit der Materialfeuchte an, da zusätzliche Wärme für die Verdampfung des Wassers benötigt wird. In Verbindung mit der Entzündung unter Verwendung einer Pilotflamme haben Feuchtegehalte < 20% jedoch kaum Einfluss auf die Zündzeit [Jön85]. Auch die minimal zur Entzündung erforderliche Bestrahlungsstärke wird bis zu einem Feuchtegehalt von 40% nur gering beeinflusst [Jön85]. Vielmehr ist der Feuchtegehalt für die spontane Entzündung von Bedeutung [Jön85], sodass dieser Aspekt für die hiesigen Betrachtungen vernachlässigbar ist. Als minimale Bestrahlungsstärke für die Entzündung von Holz im Allgemeinen wird in [Dry04] ein Wert von 12 kW/m<sup>2</sup>, in [Cho08] fast übereinstimmend von 12,5 kW/m<sup>2</sup> genannt. Darüber hinaus werden in letztgenannter Literaturquelle 20 kW/m<sup>2</sup> für nicht näher quantifizierte „kurzzeitige“ Beaufschlagungen und 4,3 kW/m<sup>2</sup> für „langandauernde“ Bestrahlungszeiten angeführt. Die kritische Bestrahlungsstärke für die Entzündung von Spanplatten (12,7 mm) über einen Zeitraum > 5 min wird mit ca. 18 kW/m<sup>2</sup> angegeben [Qui98].

Über die Trocknung hinaus geht das Holz bei der endothermen und exothermen Pyrolyse schließlich direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über (Dekomposition und Verdampfung nach Abbildung 5-9). Entstehen dabei brennbare Gase in ausreichender Konzentration und liegt eine entsprechende Durchmischung mit Sauerstoff sowie genügend Energiezufuhr vor, kommt es nach erfolgreicher Zündung zur Verbrennung bei durchgehender Flammenerscheinung. Während dieses Prozesses werden die chemischen Bindungen innerhalb der Holzstrukturen aufgebrochen und entstehende Radikale reagieren (unter anderem) mit dem Sauerstoff der Luft, sodass Wärme freigesetzt wird. Es resultiert eine Vielzahl verschiedener Moleküle; neben den vollständig oxidierten Produkten H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> werden in

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

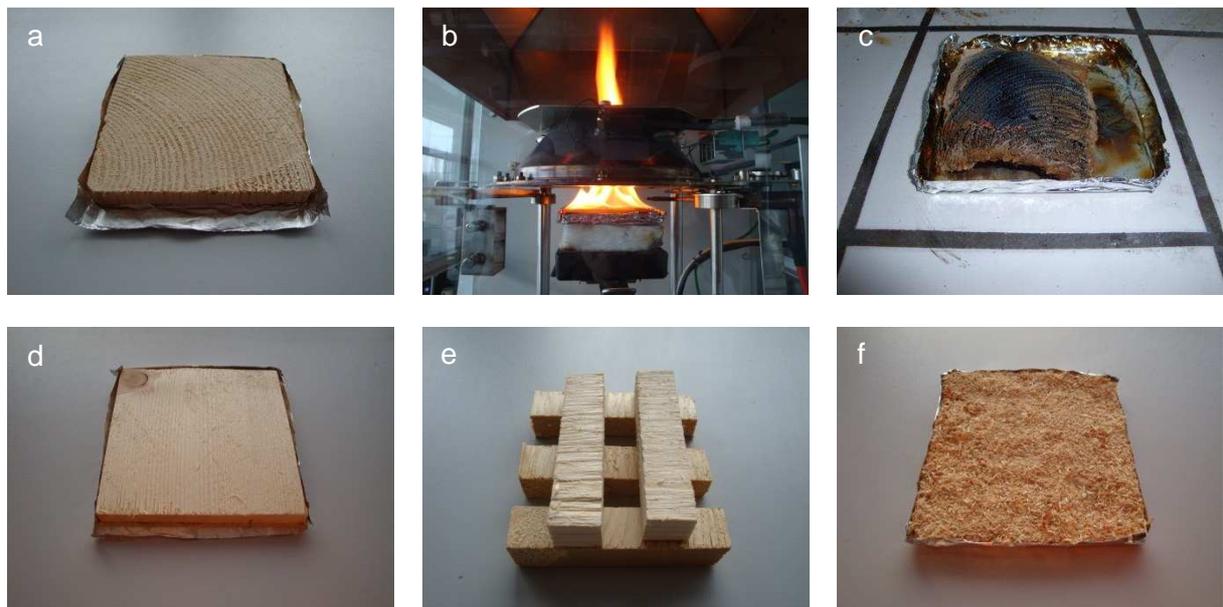
Folge der unvollständigen Verbrennung etwa CO und eine Reihe an Kohlenwasserstoffen gebildet.

Mit zunehmender Branddauer bildet sich letztlich eine Kohleschicht aus. Sie wirkt isolierend gegenüber darunterliegendem Material und mindert die Leistung des Feuers [Han02b]. Solange Pyrolysegase gebildet werden, ist diese Kohleschicht schwer „angreifbar“, da sie weitestgehend von Sauerstoff abgeschirmt ist. Auch können die flüchtigen Bestandteile nahe der Oberfläche eine Verringerung der ankommenden Wärmestrahlung bewirken [Qui98]. Dort ansetzende heterogene Verbrennungsvorgänge finden deshalb vorwiegend gegen Ende der Verbrennung statt [Bey02].

15 – 25% (Massenanteil) des ursprünglichen Holzes bleiben in der Regel als Kohle zurück; eine Übersicht zur Variation der Verkohlungsrate mit der Bestrahlungsstärke kann [Dry04] entnommen werden. Hier sind darüber hinaus weitere Informationen zum Verbrennungsprozess von Holz, insbesondere der Dekomposition, zu finden.

### 6.1.2. Fichtenholz

Neben Platten der Höhen 10 und 20 mm aus Schnittholz wurden Hirnholz, Späne und Krippen untersucht (vergleiche Abbildung 6-1). Die Krippen setzten sich aus je fünf Stäben der Abmessung 100 x 20 x 10 beziehungsweise 20 mm zusammen, wobei zwei Stäbe in einem Winkel von 90° auf drei weiteren angeordnet wurden. Hieraus ergab sich für Krippen die doppelte Probenhöhe von 20 beziehungsweise 40 mm.



**Abbildung 6-1:** Fichtenholz: oben Platte aus Hirnholz: a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 35 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter sowie unten weitere Fichtenholzproben: d) Schnittholz, e) Krippe und f) Späne

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

Tabelle 6-1 zeigt die ermittelten Energien und Leistungen für sägeraues Fichtenholz, wobei die Wärmefreisetzungsraten entsprechend dem Prüfprotokoll des Cone Calorimeters flächenbezogen sind. Neben der Probenhöhe und der Aufbereitungsart des Holzes ist die variierte Wärmestromdichte ersichtlich. Für die maximale Wärmefreisetzungsrate ist zudem der Zeitpunkt ihres Auftretens mit  $t_{\text{peak}}$  angegeben. Auf Grund der kurzen Branddauer wird bei Spänen der Verbrennungsprozess zu Beginn über 60 s nach der Entzündung anstatt über 180 s bewertet.

**Tabelle 6-1:** Versuchsergebnisse für Fichtenholz mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten

Versuch	HFX	$\Delta h_{c,\text{eff}}$	q	$\dot{Q}''_{180\text{s}}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{\text{mean}}$	$\dot{Q}''_{\text{peak}}$	$t_{\text{peak}}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[s]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippen (20 mm)</b>								
Platte	20	15,1	9,8	138,2	141,5	118,0	189,3	498
Platte	35	14,1	12,0	97,3	111,7	98,2	190,7	50
Platte (Hirnholz)	35	13,8	10,8	187,5	198,4	164,2	280,3	248
Krippe (5 Versuche)	35	15,1	13,2	163,6	161,9	115,6	201,2	149
Späne	35	15,4	13,6	164,7 <sup>a</sup>	153,5	103,1	213,0	20
Platte	50	13,3	11,4	115,2	129,2	118,5	209,0	138
Platte	70	13,6	11,7	141,0	153,4	137,6	246,2	27
<b>Probenhöhe 20 mm, ausgenommen Krippen (40 mm)</b>								
Platte	20	15,5	11,6	84,2	72,7	72,4	164,7	458
Platte	35	14,1	11,8	96,3	81,0	76,2	182,2	47
Krippe, Jahresringe oben	35	15,2	12,8	168,9	169,9	136,9	213,7	160
Krippe, Jahresringe Front / Seite	35	16,5	14,1	143,6	141,3	130,8	194,9	201
Platte	70	13,4	11,2	139,4	116,8	115,4	258,9	25

<sup>a</sup>Bezugszeitraum von der Entzündung bis 60 s hiernach

Zur Vervollständigung der Datengrundlage zeigt Tabelle 6-2 die zugehörigen massenbezogenen Größen und die charakteristischen Zeitwerte der Entzündung sowie des 10- und 90%igen Massenverlusts. Zudem ist der Zeitpunkt des Erlöschens (Flame-Out) mit  $t_{\text{fo}}$  angeführt.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

**Tabelle 6-2:** Versuchsergebnisse für Fichtenholz mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

Versuch	HFX	$m_s$	$\Delta m$	$\dot{m}_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$t_{ign}$	$t_{10}$	$t_{90}$	$t_{fo}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g]	[g]	[g/s]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[s]	[s]	[s]	[s]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippen (20 mm)</b>									
Platte	20	47,4	30,8	0,102	9,7	479	510	760	825
Platte	35	44,5	37,9	0,084	8,6	33	67	423	473
Platte (Hirnholz)	35	44,1	34,7	0,153	15,3	83	107	292	324
Krippe (5 Versuche)	35	41,8	36,5	0,132	12,5	55	81	339	373
Späne	35	12,5	11,3	0,125 <sup>a</sup>	10,9	6	15	103	123
Platte	50	46,2	39,6	0,102	10,3	19	50	357	403
Platte	70	47,1	40,3	0,121	11,9	9	35	305	360
<b>Probenhöhe 20 mm, ausgenommen Krippen (40 mm)</b>									
Platte	20	87,7	65,9	0,065	5,1	440	518	1553	1749
Platte	35	83,7	70,0	0,076	6,1	28	103	1025	1165
Krippe, Jahresringe oben	35	79,0	66,5	0,143	12,7	68	112	543	645
Krippe, Jahresringe Front / Seite	35	77,5	66,8	0,114	10,6	40	100	610	725
Platte	70	95,7	79,7	0,117	9,1	8	65	753	886

<sup>a</sup>Bezugszeitraum von der Entzündung bis 60 s hiernach

Die energetische Betrachtung ergibt, dass erwartungsgemäß für den Rückstand bildenden Feststoff Holz die Brennstoffbeladung  $q$  unterhalb der effektiven Verbrennungswärme  $\Delta h_{c,eff}$  liegt. Dies ist auf den unterschiedlichen Massenbezug zurückzuführen (verbrannte Masse im Gegensatz zur Masse zu Testbeginn). Die effektive Verbrennungswärme wiederum ist geringer als der Heizwert von Fichtenholz (16,39 kJ/g gemäß Eigenbestimmung / 17,28 kJ/g laut [DIN18230-3]). Da der Heizwert mit feinverteiltem Material in reinem Sauerstoff bei vollständiger Verbrennung bestimmt wird, beschreibt er, wie bereits erwähnt, das Maximum möglicher freiwerdender Energie. Es ist offensichtlich, dass für Krippen und Späne eine gesteigerte Energieausbeute folgt. Das Resultat ihrer erhöhten spezifischen Oberfläche und die damit verbesserte Sauerstoffzufuhr an eine größere Reaktionsfläche werden deutlich.

Die HRR der Proben steigt erwartungsgemäß mit zunehmender Bestrahlungsintensität. Dabei liegt die HRR  $\dot{Q}''_{10-90}$  stets oberhalb der mittleren HRR, da sie die Hauptbrandphase mit der naturgemäß höchsten Umsetzung bewertet. Aus den Versuchen ist weiterhin ersichtlich, dass die HRR zumeist in den ersten drei Minuten höher liegt als ihr über den gesamten Versuchsdurchlauf gemittelter Wert. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass in den ersten drei Minuten „unverbrauchtes“ Brennmaterial in ausreichender Menge und Aufbereitung zur Verfügung steht. Eine Ausnahme bilden die bei 20 kW/m<sup>2</sup> gemessenen Raten. Die späte

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

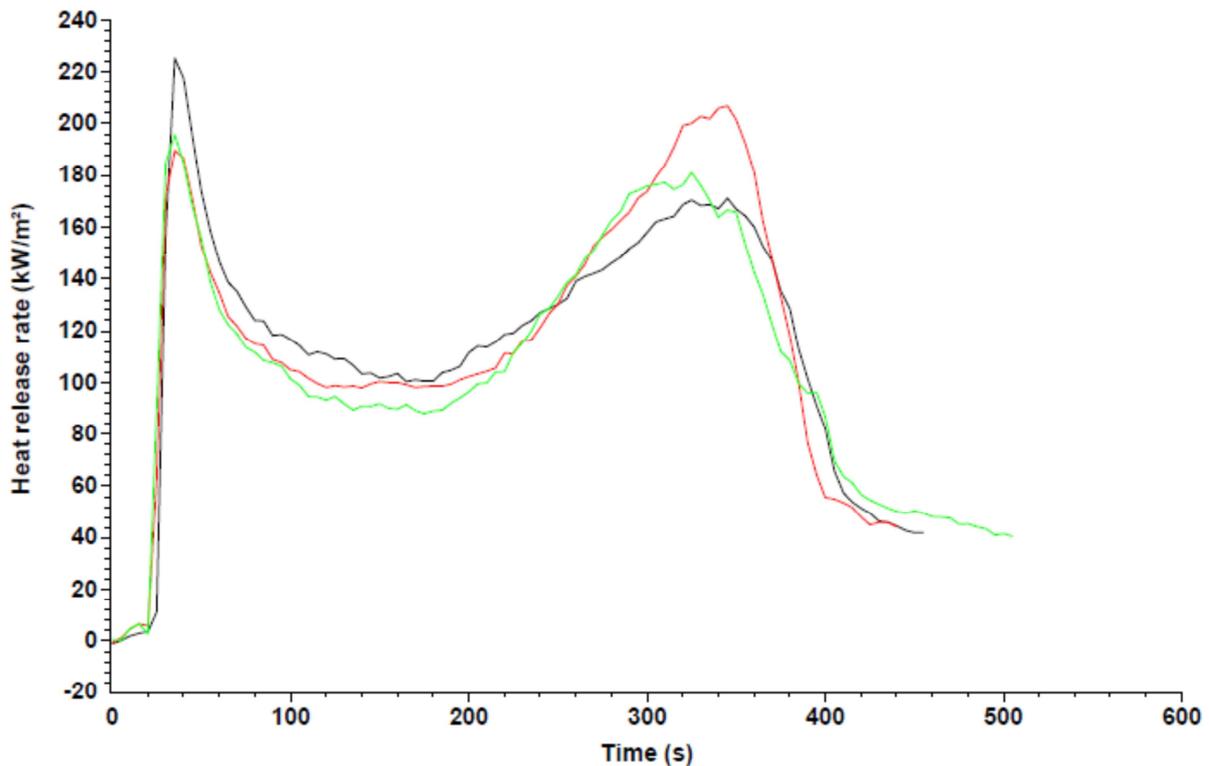
Zündzeit führt hier zu einer unverhältnismäßig großen Durchheizung der Probe vor dem eigentlichen Zeitraum der Messwerterfassung.

Wie bereits erwähnt, nehmen im Verlauf jedoch Verkohlungsprozesse zu, sodass eine trennende Schicht die Reaktion des Holzes mit Sauerstoff hemmt. Dies ist insbesondere für die Interpretation der mittleren Wärmefreisetzungsrate zu beachten: Bei Proben geringer Masse beziehungsweise kurzer Brenndauer erhält der Zeitraum des Nachglühens mit schwacher Flammenerscheinung und dementsprechend verringerter HRR größeres Gewicht. Zusätzlichen Einfluss kann die am Cone Calorimeter angewendete optische Bestimmung des Kriteriums „Flamme aus“ haben: In Abhängigkeit des Versuchsdurchführenden können Phasen sehr geringer Flammenerscheinung einbezogen oder als bereits erloschene Probe interpretiert werden. In der Folge fließen bei der Mittelwertbildung über die Zeit unterschiedlich viele Werte geringerer Höhe ein.

Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung und der maximalen HRR von Fichtenholz sind zwei charakteristische Brandverläufe zu unterscheiden:

- Verläufe, bei denen die maximale HRR bereits zu Beginn der Verbrennung erreicht wird und
- Verläufe, bei denen die maximale HRR erst gegen Ende der Verbrennung erreicht wird.

Dies ist der typischen Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate von Holz geschuldet, die ähnlich einem „M“ verläuft und damit zwei charakteristische Peaks aufweist, wie auch [Han02b] bemerkt. Beispielhaft ist in Abbildung 6-2 die gemessene HRR von Schnittholz bei 50 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke über die Zeit dargestellt. Zu erwähnen ist, dass dieser Verlauf durch den Versuchsaufbau des Cone Calorimeters geprägt ist. So kann durch eine von der Norm abweichende Wahl des Materials auf der Probenrückseite der zweite Spitzenwert der Kurve beeinflusst werden (die THR dagegen nicht) [Die99], [Hag04]. Da jedoch primär der Versuchsaufbau nach Norm von Interesse ist, sei für weitere Informationen zu diesem Thema auf die zitierte Literatur verwiesen.



**Abbildung 6-2:** Wärmefreisetzungsrate von sägerauem Fichtenholz im Cone Calorimeter (50 kW/m<sup>2</sup>, Schnittholzplatte 10 mm, 3 Versuche)

Die Betrachtung der Einzelversuche der Schnittholzplatten zeigt, dass mit Ausnahme eines Versuches (Probenhöhe 10 mm, Bestrahlungsintensität 50 kW/m<sup>2</sup>) der erste Peak maximal ist.

Bei Hirnholz fällt das lokale Minimum zwischen den Peaks geringer aus als bei Schnittholz; es brennt gleichmäßiger ab. Hirnholz verbrennt zudem schneller und erreicht höhere Wärmefreisetzungsraten. Hier ist stets der zweite Peak maßgebend.

Bekanntermaßen ermöglicht die „offene“ Struktur des Hirnholzes, das heißt die senkrecht stehenden, parallelen Fasern, ein einfacheres Eindringen zwischen einzelne Fasern. Dieser Effekt der reduzierten Belastbarkeit wird auch im Brandverhalten deutlich. Es wirken mehrere Faktoren, die sich zum Teil bedingen:

- die Holzverbindungen quer zur Faserrichtung sind weniger stark,
- die Durchlässigkeit gasförmiger Komponenten in Faserrichtung ist um ca. 10<sup>3</sup> mal größer als senkrecht hierzu [Dry04],
- die Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung ist in etwa doppelt so hoch wie orthogonal hierzu [Dry04],
- die spezifische Oberfläche ist größer.

Zudem brechen im Brandverlauf die Strukturen entlang der Fasern auf, sodass das Feuer noch bessere Angriffsmöglichkeiten hat. In der Folge steht mehr brennbares Material bei

weniger Energieaufwand zur Verfügung; es können mehr Reaktionen zur gleichen Zeit stattfinden. Dementsprechend wird mehr Energie je Zeiteinheit freigesetzt, die Wärmefreisetzungsrates ist höher und das Material schneller umgesetzt. Die Faserstruktur bewirkt weiterhin, dass Hirnholz später zündet als Schnittholz: Bei höherem Wärmeeindringkoeffizienten wird die eindringende Wärme besser abgeleitet, folglich wird der Wärmestau an der Oberfläche geringer und die Zündzeit steigt [Mad08], [Dry04].

Auch bei Spänen fällt das lokale Minimum zwischen den Peaks weniger tief aus als bei Platten; sie brennen noch gleichmäßiger ab. Sie verbrennen zudem schneller und erreichen höhere Wärmefreisetzungsrates als Schnittholz. Der Peak der HRR ist jedoch geringer als der des Hirnholzes. Stets ist der erste Peak maximal.

Späne stellen eine zwar gepresste, jedoch relativ lockere Verteilung vieler Holzstücke bei hoher spezifischer Oberfläche und guter Möglichkeit der Sauerstoffzufuhr dar. Hieraus folgt das gleichmäßigere Brandverhalten: Resultierend aus der größeren Anzahl gleichzeitig stattfindender Reaktionen kann die Verbrennung schneller erfolgen und das Tal der HRR ist kaum ausgebildet. Die Tatsache, dass die maximale HRR geringer ist als bei Hirnholz, kann durch die Lage des Peaks begründet werden. Bei einem Peak zu Beginn des Verbrennungsvorgangs muss die bereits erwähnte Verdampfungsenthalpie für im Holz enthaltenes Wasser aufgewendet werden. Da das Wasser mehr und mehr verdampft, nimmt die hierfür erforderliche Energie mit dem Verlauf der Verbrennung ab, sodass mehr Energie für die Reaktionen der „eigentlichen Verbrennung“ zur Verfügung steht. Neben der erhöhten Reaktionsfläche und der verbesserten Sauerstoffzufuhr kann bei Partikeln wie Spänen die Wärme nicht beziehungsweise nur sehr verringert in andere Bereiche abgeleitet werden. Hieraus kann weiterhin die kurze Zündzeit der Späne abgeleitet werden [Cho08].

Entsprechendes kann auf Krippen angewendet werden. Es gilt in Abhängigkeit davon, ob die Spalten der Krippe als Hirn- oder Schnittholz gewählt werden und wie sie zum konischen Heizer ausgerichtet sind. Erste Ergebnisse zu Untersuchungen in dieser Hinsicht können [Hec14] entnommen werden.

Um schließlich den Einfluss der Probenhöhe zu verdeutlichen, können die Versuchsergebnisse der Schnittholzplatten mit Gleichung (37) beurteilt werden. Hierauf wird im Folgenden in Verbindung mit den Faktoren der Verbrennungseffizienz eingegangen.

Zur Bestimmung der Verbrennungseffizienzen werden die Energien beziehungsweise Leistungen wie in Kapitel 3 beschrieben mit den Massenparametern und dem Heizwert kombiniert. Es ergeben sich die in Tabelle 6-3 dargestellten Faktoren der Verbrennungseffizienz. Für Schnittholzplatten wurden, in Abhängigkeit der Variante, mittlere Werte von 0,71 bis 0,84 ermittelt. Die Krippen lieferten mittlere Werte von 0,63 bis 0,91, Hirnholz von 0,65 bis 0,84 und Späne von 0,58 bis 0,84 (ohne die sehr schwankungsbehaftete Variante  $\chi_{HRR,mean}$  resul-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

tieren kleinere Spannweiten von 0,72 – 0,91 / 0,66 – 0,80 / 0,80 – 0,89). Zu bemerken ist, dass bei der Mittelwertbildung von Schnittholzplatten lediglich die Ergebnisse bei Bestrahlungsstärken von 35 bis 70 kW/m<sup>2</sup> einbezogen wurden. Auf Grund der Tatsache, dass sich bei 20 mm starken Platten auf die geringste und die höchste relevante Bestrahlungsstärke beschränkt wurde, ist das Ergebnis zwar in Richtung der 10 mm hohen Platten und der Bestrahlungsstärken von 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> gewichtet. Da die Werte jedoch ähnlich sind und keine klare Tendenz ersichtlich ist, wird dieser Effekt im Sinne einer breiteren Datengrundlage akzeptiert und der Gesamtmittelwert gebildet. Zu erwähnen ist weiterhin, dass die in der Tabelle angegebenen Werte höher als nach [Hah13a] sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht der in der Norm angegebene Heizwert von 17,28 kJ/g [DIN18230-3] verwendet wurde. Vielmehr ging der Wert der eigenen Heizwertbestimmung, das heißt des speziell untersuchten Baums, ein. Zum Vergleich sind die unter Verwendung des Heizwerts nach Norm berechneten Verbrennungseffizienzen in Anhang 3 enthalten.

In der Literatur nennt [Sch11] in Abhängigkeit der Baumart Werte zwischen 0,69 und 0,79 ohne Informationen zu deren Bestimmungsweise. Die Verbrennungseffizienz auf Basis der EHC für Holzkrippen im Room Corner Test gibt [Blu03] mit 0,7 an. Einen weiteren allgemeinen Wert für nicht näher spezifizierte Holzstapel enthält [Hes02] mit 0,63.

**Tabelle 6-3: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Fichtenholz mittels Cone Calorimeter**

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippen (20 mm)</b>						
Platte	20	0,92	0,60	0,74	0,89	0,83
Platte	35	0,86	0,73	0,70	0,79	0,71
Platte (Hirnholz)	35	0,84	0,66	0,65	0,79	0,75
Krippe (5 Versuche)	35	0,92	0,80	0,56	0,79	0,76
Späne	35	0,94	0,83	0,58	0,86	0,80 <sup>a</sup>
Platte	50	0,81	0,69	0,70	0,77	0,69
Platte	70	0,83	0,71	0,71	0,79	0,71
<b>Probenhöhe 20 mm, ausgenommen Krippen (40 mm)</b>						
Platte	20	0,94	0,71	0,87	0,87	0,79
Platte	35	0,86	0,72	0,76	0,81	0,77
Krippe, Jahresringe oben	35	0,93	0,78	0,66	0,82	0,72
Krippe, Jahresringe Front / Seite (4 Versuche)	35	0,89	0,76	0,66	0,81	0,68
Platte	70	0,82	0,68	0,77	0,78	0,72
Mittel Platten (35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup> )		0,84 (+0,02 -0,03)	0,71 (+0,02 -0,03)	0,73 (+0,04 -0,03)	0,79 (±0,02)	0,72 (+0,05 -0,03)

<sup>a</sup>Bezugszeitraum von der Entzündung bis 60 s hiernach

Um Kriterien zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz herauszuarbeiten, werden im Folgenden die Versuche der Schnittholzplatten ausgewertet. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der weiteren Proben betrachtet.

Es ist offensichtlich, dass die für 10 mm starke Platten bei 20 kW/m<sup>2</sup> erzielten Effizienzen wie ihre Eingangswerte infolge der langen Probenvorheizung außerordentlich hoch liegen. Somit wird Gleichung (37) bestätigt, nach der Proben bei einer Bestrahlungsstärke von 20 kW/m<sup>2</sup> mindestens 14 mm stark sein müssen. Für alle weiteren Proben ist Gleichung (37) eingehalten. Die Ergebnisse legen damit nahe, dass der Zusammenhang auch für Fichtenholz zur Abschätzung der Mindestprobenhöhe in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke angewendet werden kann. Es kann bestätigt werden, dass Wärmestromdichten größer 20 kW/m<sup>2</sup> gewählt werden sollten, um den Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Versuchsergebnisse gering zu halten. Die Abweichungen sind bei dieser geringen Bestrahlungsstärke, die eine Zündzeit von mehr als 5 min bewirkt, zum einen zwischen den unterschiedlichen Möglichkeiten zur Berechnung der Verbrennungseffizienz groß. Zum anderen weichen die erzielten Werte auffallend von denen höherer Bestrahlungsstärken ab. Im Folgenden werden daher die ab 35 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke ermittelten Werte, weiterhin zunächst für Schnittholz, herangezogen.

Hinsichtlich der Verbrennungseffizienzen auf Grundlage der Energien ist ersichtlich, dass für Fichtenholz die mittels EHC bestimmte Verbrennungseffizienz stets oberhalb der auf Basis der Brennstoffbeladung errechneten liegt. Im Mittel steht hier eine Verbrennungseffizienz von 0,84 einem Wert von 0,71 gegenüber. Dies resultiert aus dem, bereits erläuterten, unterschiedlichen Massenbezug. (Für Flüssigkeiten oder schmelzende Kunststoffe nähern sich die beiden Werte an beziehungsweise sind identisch, da eine annähernd rückstandslose Verbrennung erfolgt, vergleiche Abschnitt 6.2.) Durch den Bezug auf die Brennstoffbeladung wird so erwartungsgemäß Material, das unverbrannt fortbesteht und nicht in den Verbrennungsprozess eintritt, „positiv bewertet“ und in Form einer geringeren Verbrennungseffizienz berücksichtigt. Bei der verbrannten Masse als Basis bleibt dies hingegen unberücksichtigt. Schlussfolgernd wird durch den Bezug auf die EHC vielmehr die Effizienz hinsichtlich des Oxidationsgrads der entstehenden Verbrennungsprodukte bewertet. Es kann argumentiert werden, dass die höhere Verbrennungseffizienz im Sinne einer konservativen Vorgehensweise ist. Die potentiell höhere Unsicherheit bei der Bestimmung der Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{EHC}}$  (vergleiche Abschnitt 3.2.) bestätigt sich nicht; sowohl die Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{EHC}}$  als auch  $\chi_{\text{FL}}$  zeigen geringe Schwankungen.

Ein Vergleich der auf direkter Basis der HRR berechneten Varianten  $\chi_{\text{HRR,mean}}$  und  $\chi_{\text{HRR,10-90}}$  liefert für Schnittholzplatten mittlere Werte von 0,73 gegenüber 0,79. Im Einzelnen zeigen sich teilweise ähnliche, meist jedoch höhere Werte der Verbrennungseffizienz

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

$\chi_{HRR,10-90}$ . Die geringeren Resultate der Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  sind auf die unterschiedlichen zeitlichen Bezüge der Eingangswerte zurückzuführen: Wie bereits erwähnt, ist die hier einfließende mittlere HRR geringer, da sie die Phasen der Entzündung sowie des Erlöschens einbezieht. Darüber hinaus wird bei der Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  die HRR des gesamten Brandverlaufs der Massenverlustrate der Hauptbrandphase gegenübergestellt. Demzufolge wird eine im Verhältnis hohe Massenverlustrate im Nenner einer mittleren Wärmefreisetzungsrate im Zähler gegenübergestellt, was in der Konsequenz zu geringeren Werten führt. Wie erwartet wird dies insbesondere bei geringen Branddauern deutlich (vergleiche Späne). Bei der auf den 10- bis 90%igen Massenverlust bezogenen Verbrennungseffizienz sind hingegen beide Raten auf die Hauptbrandphase bezogen, was entsprechend zu höheren Faktoren der Verbrennungseffizienz führt. Außerdem zeigt die Variante  $\chi_{HRR,10-90}$  geringere Schwankungen. Dies kann ebenfalls auf den Bezug zur Hauptbrandphase zurückgeführt werden. Sie stellt zum einen den gleichmäßigsten Verlauf der Verbrennung dar. Zum anderen sind die Phasen größter Änderung und Unsicherheit, die Entzündungs- sowie die Abklingphase, „abgeschnitten“.

Betrachtet man weiterhin die mit Hirnholz durchgeführten Versuche, ist ersichtlich, dass Hirnholz weniger effektiv verbrennt als Schnittholz. Dies erscheint zunächst paradox. Schnittholz verbrennt jedoch über einen wesentlich längeren Zeitraum hinweg als Hirnholz. In der Konsequenz kann eine „gründlichere“ Verbrennung erfolgen. Die Umsetzung des Hirnholzes läuft dabei kaum unvollständiger hinsichtlich der entstehenden Verbrennungsprodukte. Vielmehr tritt weniger Material in den Verbrennungsvorgang ein. Die Effizienzen zeigen, dass die auf das verbrannte Material bezogene Energieausbeute ähnlich hoch ist, die auf die Gesamtmasse bezogene jedoch für Hirnholz geringer ausfällt. Demgemäß wird eine größere HRR bei kurzer Branddauer weniger gefährlich eingestuft als eine geringere HRR über einen längeren Zeitraum hinweg.

Krippen und Späne weisen meist eine erhöhte Verbrennungseffizienz auf, wenn die Werte auf Grundlage der Energien berechnet werden. Hierbei zeigt die Verbrennungseffizienz  $\chi_{FL}$ , dass im Vergleich zu Platten mehr Material umgesetzt wird. Der erhöhte Wert der Verbrennungseffizienz  $\chi_{EHC}$  gibt Auskunft darüber, dass der Sauerstoff besser an die Reaktionszonen gelangt und in der Folge weniger Produkte der unvollständigen Verbrennung entstehen. Beides entspricht den Erwartungen, erlaubt mit den ermittelten Werten jedoch darüber hinaus eine Quantifizierung. Wird stattdessen die Effizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  herangezogen, resultieren weitgehend ähnliche Werte der Verbrennungseffizienz von Platten, Krippen und Spänen. Bei der Variante  $\chi_{HRR,mean}$  bleiben die Werte für Krippen und Späne deutlich zurück, was auf eine hohe Massenverlustrate in der Hauptbrandphase und die bereits erwähnten differierenden Zeitbezüge zurückgeführt werden kann.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

Eine abschließende Betrachtung der auf die ersten 180 s nach der Entzündung bezogenen Verbrennungseffizienz zeigt über alle Aufbereitungsformen hinweg, dass die Verbrennung am Anfang meist geringfügig weniger effektiv verläuft. Dies gilt unabhängig davon, ob die HRR zu Beginn höher oder geringer als die gesamte Wärmefreisetzungsrate ist. Die anfänglichen Wärmefreisetzungsraten erreichen demnach nicht das Niveau der frühen Massenverlustraten, sodass der Verbrennungsprozess infolgedessen zu Beginn etwas unvollständiger verläuft. Naturgemäß ist die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,180s}$  nicht für die Bewertung des gesamten Brandverlaufs geeignet. Sie bietet jedoch eine Zusatzinformation über den Beginn des Verbrennungsprozesses.

### 6.1.3. Rohspan P2

Zur weiteren Untersuchung werden nachfolgend die Ergebnisse für Spanplatten dargestellt und ergänzend zu Fichtenholz ausgewertet. Neben Platten der Höhen 10, 19 und 2 x 10 mm wurden ebenso Versuche mit Krippen durchgeführt (vergleiche Abbildung 6-3). Die Probenhöhe der Platten von 2 x 10 mm ergibt sich aus zwei aufeinanderliegenden Platten. Die Krippen sind analog zu den bisherigen aus je fünf Stäben der Abmessungen 100 x 20 x 10 mm zusammengesetzt. Neben der Probenhöhe und der Aufbereitungsart des Holzes wurde erneut die Bestrahlungsstärke variiert.



**Abbildung 6-3:** Rohspan P2: oben Krippe a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit  $35 \text{ kW/m}^2$  sowie unten: d) Platte vor, e) 2 x Platte vor und f) 2 x Platte nach der Beaufschlagung mit  $35 \text{ kW/m}^2$  im Cone Calorimeter

Tabelle 6-4 zeigt die am Cone Calorimeter ermittelten Energien und Leistungen für Rohspan P2.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

**Tabelle 6-4:** Versuchsergebnisse für Rohspan P2 mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten

Versuch	HFX	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{peak}$	$t_{peak}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[s]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippe (20 mm)</b>								
Platte	20	13,1	10,1	116,6	114,7	97,7	192,5	613
Platte	35	13,2	10,4	140,3	149,4	123,0	218,0	78
Krippe	35	14,3	11,4	174,3	192,6	159,3	219,0	330
Platte	50	13,7	11,2	165,6	156,3	115,3	286,2	52
Platte	70	13,5	11,0	203,9	200,1	161,7	373,1	38
<b>Probenhöhe 2 x 10 mm</b>								
Platte	35	13,2	10,5	132,0	93,5	93,0	226,3	83
<b>Probenhöhe 19 mm</b>								
Platte	20	12,6	9,2	121,1	84,6	84,7	161,3	222
Platte	35	12,0	8,7	120,7	89,9	88,7	199,0	82

Die zugehörigen Massen- und zeitlichen Bezüge gibt Tabelle 6-5 wieder. Auffallend ist die spätere Zündzeit der Spanplatten. Sie ist begründbar durch unterschiedliche Wärmeeindringkoeffizienten: Zwar haben Fichtenholz und Spanplatten ähnliche spezifische Wärmekapazitäten und -leitfähigkeiten, die Spanplatten weisen jedoch eine deutlich höhere Dichte auf. In der Konsequenz wird die Wärme besser abgeleitet und der Wärmestau an der Probenoberfläche verringert. Ausgenommen sind Proben, die nach Gleichung (37) zu dünn gewählt sind und sich dementsprechend schnell sämtlich aufheizen. Die Anwendbarkeit von Gleichung (37) bei Spanplatten wird damit bestärkt.

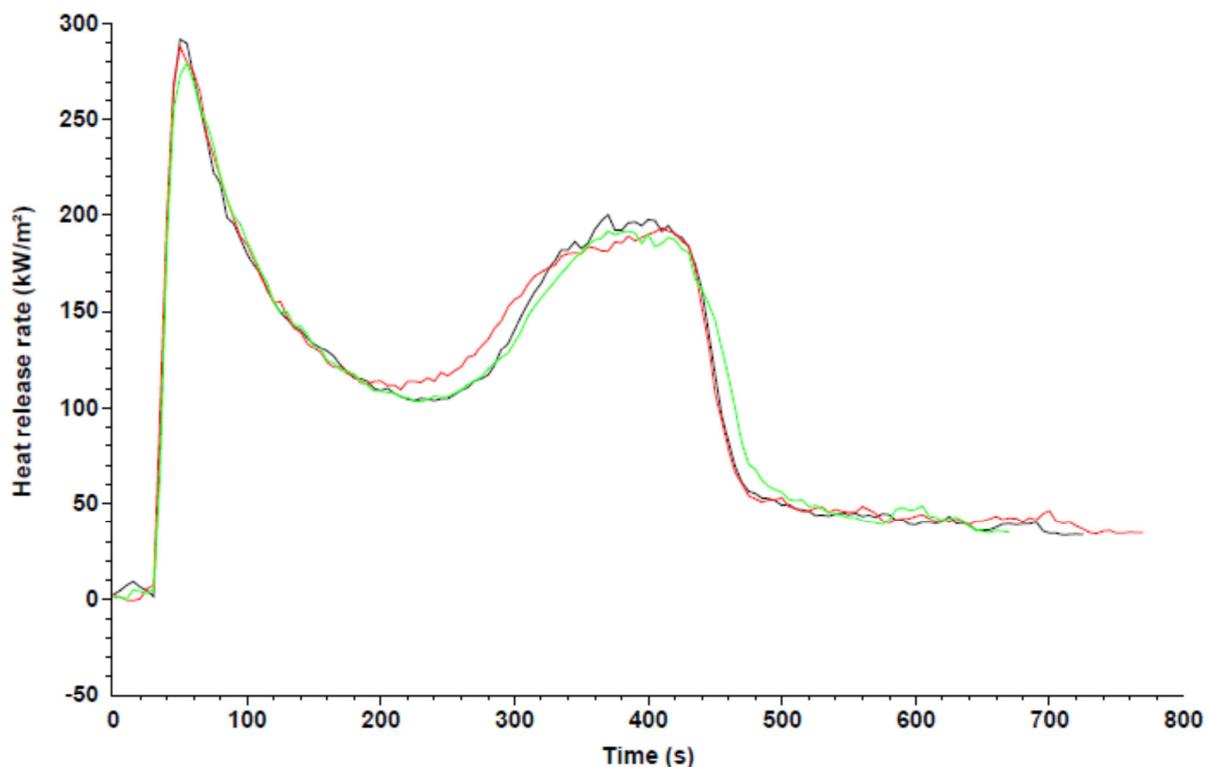
**Tabelle 6-5:** Versuchsergebnisse für Rohspan P2 mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

Versuch	HFX	$m_s$	$\Delta m$	$\dot{m}_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$t_{ign}$	$t_{10}$	$t_{90}$	$t_{fo}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g]	[g]	[g/s]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[s]	[s]	[s]	[s]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippe (20 mm)</b>									
Platte	20	70,4	54,2	0,107	9,5	169	212	672	778
Platte	35	69,7	54,8	0,123	11,1	47	87	483	591
Krippe	35	70,3	56,3	0,148	14,8	63	100	405	516
Platte	50	71,0	58,2	0,141	12,6	27	50	430	664
Platte	70	70,0	56,8	0,170	15,8	14	40	332	435
<b>Probenhöhe 2 x 10 mm</b>									
Platte	35	139,8	111,6	0,111	7,7	56	128	1288	1569
<b>Probenhöhe 19 mm</b>									
Platte	20	112,1	82,5	0,114	7,0	187	248	1200	1360
Platte	35	109,5	81,7	0,116	7,0	56	115	965	1139

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

Die Ergebnisse der energetischen Betrachtung sind analog zu Fichtenholz wie folgt zu interpretieren: Da Spanplatten, wie Fichtenholz, ein Rückstand bildender Feststoff sind, ist die auf die verbrannte Masse bezogene effektive Verbrennungswärme stets höher als die auf die Eingangsmasse bezogene Brennstoffbeladung. Beide Messgrößen sind geringer als der Heizwert von Spanplatten (gemäß Eigenbestimmung 16,02 kJ/g für 10 mm und 15,84 kJ/g für 19 mm starke Platten / 17,28 kJ/g laut [DIN18230-3]).

Auch die gemessenen Wärmefreisetzungsraten weisen erwartungsgemäß ähnliche Charakteristika wie die von Fichtenholz auf (siehe Abbildung 6-4) und sind sinngemäß begründbar. Die Versuche anhand von Platten zeigen, dass im Kurvenverlauf der Wärmefreisetzungsrate mit Ausnahme einer Bestrahlungsstärke (20 kW/m<sup>2</sup>, Probenhöhe 10 mm) der erste Peak maximal ist. Tests bei 20 kW/m<sup>2</sup> und 10 mm Probenhöhe können jedoch auch hier nicht als repräsentativ angesehen werden, da wie bei Fichtenholz die späte Zündzeit zu einer unverhältnismäßig großen Durchheizung der Probe vor dem eigentlichen Zeitraum der Messwerterfassung führt. Die Beeinträchtigung ist allerdings geringer als bei Fichtenholz, da der Zündzeitpunkt früher liegt (< 200 s im Gegensatz zu > 400 s). Somit wird Gleichung (37) erneut bestätigt.



**Abbildung 6-4:** Wärmefreisetzungsrate von Rohspan P2 im Cone Calorimeter (50 kW/m<sup>2</sup>, Platte 10 mm, 3 Versuche)

Ein Vergleich der Plattenhöhen zeigt über alle energie- und HRR-basierten Größen hinweg geringere Werte für größere Probenhöhen. Die für zwei aufeinanderliegende Platten ermittel-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

ten Werte liegen zwischen denen der 10 und 19 mm starken Platten. Neben der Probenhöhe kann dies jedoch durch die unterschiedliche Materialzusammensetzung und die Dichteunterschiede (vergleiche Kapitel 4) bedingt sein.

Wie bei Fichtenholz weisen Krippen auf Grund ihrer erhöhten spezifischen Oberfläche gesteigerte Energieausbeuten und größere Wärmefreisetzungsraten auf, deren Verlauf zudem gleichmäßiger ist, und verbrennen in der Konsequenz schneller.

Die auf Grundlage der erläuterten Größen bestimmten Faktoren der Verbrennungseffizienz zeigt Tabelle 6-6. Sie weichen von denen nach [Hah14a] ab, deren Ermittlung auf Grundlage des Heizwerts nach Norm erfolgt ist. Zum Vergleich sind diese Werte in Anhang 4 enthalten. In der Literatur ist für Spanplatten ein Wert von 0,81 zu finden [Kus15]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Werte von 0,66 ( $\chi_{HRR,mean}$ ) bis 0,84 ( $\chi_{EHC}$ ) ermittelt. Dabei ist die Mittelwertbildung auf Basis der Versuche mit Platten ab 35 kW/m<sup>2</sup> erfolgt. Die Versuche mit 19 mm starken Platten sind auf Grund ihrer deutlich abweichenden Dichte ausgenommen worden. Es sei erwähnt, dass die Verbrennungseffizienzen bei der Mittelwertbildung über andere Paarungen (alle Platten / Platten ohne 2 x 10 mm / nur 10 mm Platten) um maximal 0,03 von den berechneten Werten abweichen. Besonders robust zeigt sich die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$ , für die mit einer Ausnahme (Abweichung 0,01) über alle Paarungen der gleiche Mittelwert folgt. Erneut sind die bei 20 kW/m<sup>2</sup> gemessenen Werte kritisch.

**Tabelle 6-6:** Faktoren der Verbrennungseffizienz für Rohspan P2 mittels Cone Calorimeter

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippe (20 mm)</b>						
Platte	20	0,82	0,63	0,64	0,75	0,68
Platte	35	0,82	0,65	0,69	0,84	0,71
Krippe	35	0,89	0,71	0,67	0,81	0,73
Platte	50	0,86	0,70	0,57	0,77	0,73
Platte	70	0,84	0,68	0,64	0,79	0,75
<b>Probenhöhe 2 x 10 mm</b>						
Platte	35	0,82	0,65	0,75	0,76	0,74
<b>Probenhöhe 19 mm</b>						
Platte	20	0,79	0,58	0,76	0,76	0,67
Platte	35	0,76	0,55	0,80	0,81	0,66
<b>Mittel Platten (35, 50, 70 kW/m<sup>2</sup>; ohne 19 mm)</b>		0,84 (±0,02)	0,67 (+0,03 -0,02)	0,66 (±0,09)	0,79 (+0,05 -0,03)	0,73 (±0,02)

Wiederholt werden zur Auswertung der Ergebnisse im Folgenden zunächst die Versuche anhand von Platten bei Wärmestromdichten von 35 bis 70 kW/m<sup>2</sup> betrachtet. Ihren Basisgrößen entsprechend fallen die Verbrennungseffizienzen auf Grundlage der effektiven Verbren-

nungswärme höher als die auf Basis der Brennstoffbeladung aus. Vergleicht man weiterhin die für 19 und 10 mm starke Platten gemessenen Werte, sind auch hier die Ergebnisse analog der eingehenden Basisgrößen: Die bei 19 mm hohen Platten mittels der Energien berechneten Werte sind geringer als die für 10 mm starke Platten. Die dickeren Platten verbrennen demnach unvollständiger. Ein Grund hierfür kann die bereits erwähnte andersartige Durchheizung der Platten sein.

Bei den Effizienzen auf direkter Basis der HRR liefert die Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{HRR},180\text{s}}$ , im Unterschied zu den eingehenden Wärmefreisetzungsraten, für alle Konstellationen niedrigere Werte als die  $\chi_{\text{HRR},10-90}$ . Dies hat sich bereits bei den Versuchen mit Fichtenholz gezeigt und ist analog begründbar. Im Vergleich der Werte unterschiedlicher Probenhöhen fallen erhöhte Werte der Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{HRR,mean}}$  für 19 mm Platten auf. Demnach sinkt die Massenverlustrate  $\dot{m}''_{10-90}$  stärker mit der Probenhöhe als die mittlere HRR. Die Dichteunterschiede der Platten deuten jedoch, wie bereits erwähnt, ferner auf materialbedingte Unterschiede und hieraus resultierende Abweichungen hin. Bei Spanplatten kann trotz gleicher Kategorie und gleichem Lieferanten keine übereinstimmende Materialzusammensetzung garantiert werden. Auch in der Praxis müssen derartige Schwankungen der Materialzusammensetzung akzeptiert werden, sodass nur ein Mittelwert herangezogen werden kann. Im Rahmen der statistischen Analyse in Kapitel 8 werden diese Aspekte näher beleuchtet.

Eine abschließende Betrachtung der Versuche anhand von Spanplatten-Krippen zeigt wie bei Fichtenholz, dass die Verbrennungseffizienz erhöht ist, wenn die Werte auf Grundlage der Energien berechnet werden. Wird stattdessen die HRR  $\dot{Q}''_{10-90}$  herangezogen, resultieren ähnliche Werte der Verbrennungseffizienz.

### 6.1.4. Abschließende Betrachtung Holz- und Holzwerkstoffe

Stellvertretend für kohlebildende Materialien wurden zunächst Fichtenholz und Spanplatten untersucht. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Zeit bis zur Entzündung gering zu halten ist, indem die Probenhöhe und die Bestrahlungsstärke ausreichend hoch gewählt werden. So gelten Hölzer, in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke, bei 10 bis 20 mm Höhe als thermisch dick (bei geringerer Höhe sinkt die Zündzeit proportional zur Höhe) [Jön85]. Für die untersuchten Hölzer ist diese Forderung zur Minimierung des Einflusses der Zündzeit bei etwa 10 mm Probenhöhe und 35 kW/m<sup>2</sup> erfüllt.

Ferner ist zusammenfassend und ergänzend anhand der Versuche mit Holz festzuhalten, dass der Brandverlauf des Naturholzes Fichte ebenso für Spanplatten gilt. Auf Grund der im Wesentlichen identischen chemischen Zusammensetzung ist dies nicht unerwartet. Auch die Branddauern sind ähnlich. Spanplatten haben jedoch eine erheblich höhere Dichte; hier verbrennt mehr Material je Zeiteinheit. Die höhere Rate kann zum einen durch die die Späne

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

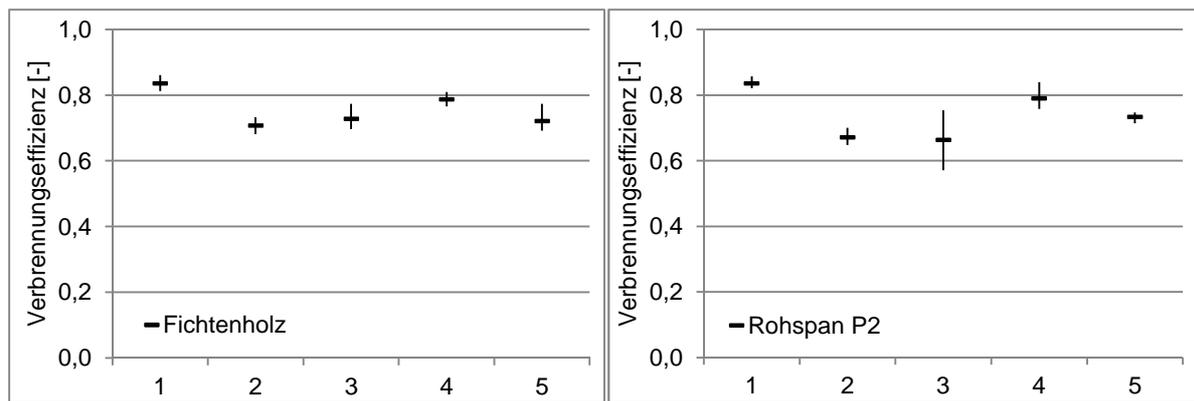
---

zusammenhaltende Verbindungsmasse, zum anderen durch die bereits erwähnte dichtere Packung gleichartiger Teilchen begründet sein. Hinsichtlich der energetischen Größen EHC und FL ist zu bemerken, dass ähnliche Energien freigesetzt werden. Die Energiefreisetzungsrate ist dagegen bei Spanplatten höher. Eine Übertragung dieses Zusammenhangs auf die Verbrennungseffizienzen ist nicht gegeben, sie zeigen weitestgehend ähnliche Werte. Demnach werden die höheren Wärmefreisetzungsraten durch hohe Massenverlusten kompensiert und nicht in den Verbrennungseffizienzen offenbar.

Abbildung 6-5 stellt abschließend die für Platten berechneten Mittelwerte der fünf untersuchten Varianten der Verbrennungseffizienz gegenüber (Datengrundlage Tabellen 6-3 und 6-6). Sie sind von links nach rechts wie folgt dargestellt: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$ . Darüber hinaus sind die maximalen und minimalen Abweichungen anhand von Balken angegeben. Beide Stoffe zeigen ähnliche Werte: Die Verbrennungseffizienz auf Basis der EHC (1) fällt am höchsten aus. Ihr großer Wert weist darauf hin, dass die Verbrennung unter den vorgegebenen Bedingungen tendenziell chemisch vollständig verläuft, das heißt unter ausreichendem Sauerstoffangebot und bei guter Vermischung überwiegend Produkte der vollständigen Verbrennung gebildet werden. Die geringere Verbrennungseffizienz auf Basis der FL (2) deutet darauf hin, dass jedoch nicht die gesamte Probe am Verbrennungsprozess teilnimmt. Demnach verbrennt zwar nur ein Teil des Materials, dieser jedoch bei recht vollständiger Verbrennung. Die Verbrennungseffizienz der Hauptbrandphase (4) liegt mit 0,79 etwas unterhalb derer auf Basis der EHC. Eine geringfügig weniger effiziente Verbrennung ergibt sich wiederum für den Brandbeginn mit dem enthaltenen Entzündungsprozess (5). Die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  (3) kann im Mittelfeld eingeordnet werden.

Die größten Schwankungsbreiten zeigt die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$ . Dies deutet auf eine Änderung des Verhältnisses von der ASMLR zur mittleren HRR mit der HFX hin. Alle weiteren Schwankungsbreiten sind vergleichbar gering und betragen maximal +0,05 / -0,03 (+7% / - 4%).

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter



**Abbildung 6-5:** Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabellen 6-3 und 6-6 im Vergleich: links Fichtenholz, rechts Rohspan P2. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$

Unter Berücksichtigung der Schwankungsbreiten wurden zur quantifizierten Auswertung der Parametervariation die in Tabelle 6-7 gezeigten Grenzwerte festgelegt. Während für die Verbrennungseffizienzen absolute Werte einfließen, wurden für die mit der Bestrahlungsstärke zum Teil erheblich auseinandergehenden Basisgrößen prozentuale Schranken gewählt.

**Tabelle 6-7:** Grundannahmen zur quantifizierten Auswertung der Parametervariation

Qualitative Darstellung		Quantifizierung	
Symbol	Bezeichnung	Verbrennungseffizienzen <sup>a</sup>	Basisgrößen <sup>b</sup>
o	unverändert	$\Delta\chi \leq 0,03$	$\Delta\chi \leq 5\%$
↗ ↘	leichte Tendenz	$0,03 < \Delta\chi \leq 0,05$	$5\% < \Delta\chi \leq 8\%$
↑ ↓	ausgeprägte Tendenz	$\Delta\chi > 0,05$	$\Delta\chi > 8\%$

<sup>a</sup> $\Delta\chi$  Differenz zwischen den jeweiligen verglichenen Mittelwerten der Verbrennungseffizienz, <sup>b</sup>Prozentsatz vom geringeren Wert berechnet

Die Ergebnisse der Variation von Bestrahlungsstärke, Probenhöhe, spezifischer Oberfläche und Dichte (nur Spanplatten) fassen die Tabellen 6-8 und 6-9 zusammen. Eine detaillierte Aufstellung der verglichenen Versuche ist den Anhängen 10 und 11 sowie 16 bis 19 zu entnehmen.

Die nachstehende Tabelle 6-8 zeigt zunächst die Ergebnisse für die Verbrennungseffizienzen auf Basis der Energien sowie deren maßgebliche Eingangsgrößen EHC und FL. Es ist ersichtlich, dass

- sich die Verbrennungseffizienzen erwartungsgemäß entsprechend ihren Basisgrößen verändern (die effektiven Energien werden lediglich durch den konstanten Heizwert dividiert),
- sich alle vier Größen annähernd simultan verändern,

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

- entsprechend dem vergleichbaren Brandverlauf sich die variierten Parameter bei Fichtenholz und Spanplatten sehr ähnlich auswirken.

**Tabelle 6-8:** Ergebnisse der Parametervariation für Holz- und Holzwerkstoffe für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie für deren Eingangsgrößen

Variierter Parameter	$\Delta h_{c,eff}$	$q$	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
	[kJ/g]	[kJ/g]	[-]	[-]
<b>Fichtenholz</b>				
HFX ↑	o	o	o	o
Spezifische Oberfläche ↑	↗	↑	↗	↑
Plattenhöhe ↓	o	o	o	o
<b>Rohspan P2</b>				
HFX ↑	o	↗	o	o
Spezifische Oberfläche ↑	↑	↑	↑	↑
Plattenhöhe <sup>a</sup> ↓	o	o	o	o
Rohdichte ↑	↑	↑	↑	↑

<sup>a</sup>bei der Änderung der Plattenhöhe wurden die Versuche von 10 mm auf 2 x 10 mm als maßgeblich eingestuft, da von 10 mm auf 19 mm zusätzlich eine Dichteänderung vorliegt

Es wird deutlich, dass die Bestrahlungsstärke und die Plattenhöhe innerhalb der gewählten Schranken keinen Einfluss auf die EHC und die FL ausgeübt haben. Dies gilt ebenso für die auf diesen Energien basierenden Faktoren der Verbrennungseffizienz. In Konsequenz einer erhöhten spezifischen Oberfläche als auch mit steigender Materialdichte nehmen die genannten Größen dagegen zu.

Tabelle 6-9 zeigt weiterhin die Ergebnisse für die Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie für deren Eingangsgrößen. Die in Klammern dargestellten Werte geben Tendenzen an. Es wird deutlich, dass

- sich die Verbrennungseffizienzen nicht entsprechend ihren Basisgrößen verändern,
- sich die Massenverlust- und Wärmefreisetzungsdaten weitestgehend simultan verändern,
- die Tendenzen bei Fichtenholz und Spanplatten vergleichbar sind.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

**Tabelle 6-9:** Ergebnisse der Parametervariation für Holz- und Holzwerkstoffe für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie für deren Eingangsgrößen

Variiert. Param.	$\dot{Q}''_{\text{mean}}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$\dot{Q}''_{10-90}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$\dot{Q}''_{180s}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$\dot{m}''_{10-90}$ [g/(sm <sup>2</sup> )]	$\dot{m}_{180s}$ [g/s]	$\chi_{\text{HRR,mean}}$ [-]	$\chi_{\text{HRR,10-90}}$ [-]	$\chi_{\text{HRR,180s}}$ [-]
<b>Fichtenholz</b>								
HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o
Spezif. Oberfl. ↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	o	↘
Plattenhöhe ↓	↑	↑	o	↑	↗	↓	o	↘
<b>Rohspan P2</b>								
HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	o (↘)	↘	o
Spezif. Oberfl. ↑	↑	↑	↑	↑	↑	↘	o (↗)	o
Plattenhöhe ↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↗	o (↗)
Rohdichte ↑	↗	↗	↑	↑	o (↗)	↓	o (↘)	↑

Hinsichtlich der Wärmefreisetzungsraten und der Massenverlustraten kann festgehalten werden, dass sie sowohl mit der spezifischen Oberfläche als auch mit der Bestrahlungsstärke steigen. Werden die Bestrahlungsstärken mit den gemessenen Wärmefreisetzungsraten in Bezug gesetzt, das heißt ihre Differenzen gebildet, fällt dieser Unterschied jedoch deutlich geringer aus. Ferner hat sich gezeigt, dass die Wärmefreisetzungs- sowie Massenverlustraten mit abnehmender Plattenhöhe steigen. Hingegen blieb die auf die ersten drei Minuten nach der Entzündung bezogene Wärmefreisetzungsrate von diesem Parameter unbeeinflusst (thermisch dickes Verhalten). Eine wachsende Dichte lief ebenso mit steigenden Raten einher.

Eine Übertragbarkeit auf die Verbrennungseffizienzen ist, wie bereits erwähnt, nicht gegeben: Während sich die Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{HRR,mean}}$  weitestgehend umgekehrt proportional zu ihren Eingangsgrößen verhält, werden die Verbrennungseffizienzen  $\chi_{\text{HRR,10-90}}$  und  $\chi_{\text{HRR,180s}}$  gering bis nicht beeinflusst. Eine Ausnahme bildet der Anstieg der Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{HRR,180s}}$  mit der Materialdichte (Einfluss Thermalträgheit).

### 6.2. Kunststoffe

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse von Polyethylen und Polymethylmethacrylat (Unterabschnitt 6.2.2.) sowie Polyurethan B3 / B1 und Polystyrol B1 (Unterabschnitt 6.2.3.) dargestellt und ausgewertet. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Proben gehören PE, PMMA und PS der Brandklasse B nach [DINEN2] an. Vor der Erläuterung der Messergebnisse wird daher kurz auf zentrale Merkmale des Verbrennungsvorgangs dieser Stoffe ein-

gegangen. Wesentliche Inhalte der Unterabschnitte 6.2.1. und 6.2.2. sind [Hah13a], [Hah14b] entnommen.

### **6.2.1. Brandverhalten von Feststoffen der Brandklasse B am Beispiel von Polyethylen und Polymethylmethacrylat**

Aus physikalischer Sicht liegt beim Verbrennungsprozess von Feststoffen der Brandklasse B eine Phasenänderung von fest über flüssig zu gasförmig vor. Im Gegensatz zu thermisch stabilen Flüssigkeiten, die unter Beibehaltung der Moleküle „lediglich“ verdampfen, wird bei obigen Stoffen beim Übergang ins Gasförmige jedoch neben der Aggregatzustandsänderung meist eine chemische Umwandlung vollzogen: Die langkettigen Moleküle werden in kleinere (verschiedenartige) Moleküle aufgespalten (Schmelzen und Dekomposition sowie Verdampfung und Dekomposition gemäß Abbildung 5-9) [Bey02]. Im Rahmen des chemischen Dekompositionsmechanismus' wird bei Thermoplasten wie PE und PMMA die Hauptpolymerkette auf unterschiedliche Art und Weise gespalten:

- „Angriff“ an den Kettenenden, resultierend in der vorwiegenden Bildung von Monomeren,
- „Angriff“ an zufälligen Punkten der Kette, resultierend in der Bildung von Monomeren, Oligomeren (Monomereinheiten mit zehn und weniger Monomeren [Bey02]) sowie diversen weiteren Molekülen.

Während der Monomeranteil bei der Dekomposition von PMMA bei 91 bis 98% liegt, ist er für PE mit 0,03% sehr gering [Bey02], [Dry04]. Infolge der zufälligen Kettenspaltung werden hier bis zu 70 unterschiedliche kleinere Moleküle (hauptsächlich Kohlenwasserstoffe) gebildet [Bey02]. Eine sehr detaillierte Darstellung der bei der Verbrennung von PMMA auftretenden Zwischenprodukte und -reaktionen kann [Zen02a] und [Zen02b] entnommen werden.

Die Resultate der Dekomposition zeigen sich in sinkenden Molmassen und der Entstehung flüchtiger Komponenten, die schließlich gezündet werden können. Die Temperatur, bei der der Dekompositionsmechanismus startet und sich die Kunststoffe zu zersetzen beginnen, wird dabei neben der Molmasse durch den Aufbau und die Interaktion der Ketten beeinflusst. Entsprechendes gilt für die erforderlichen Aktivierungsenergien. Hinsichtlich weiterer Faktoren, die die Schmelztemperatur beeinflussen sowie quantitativer Daten hierzu, sei auf [Bey02], [Dry04] verwiesen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich der Verbrennungsprozess wie folgt dar:

- teilweises Schmelzen des Kunststoffs an der Oberfläche in Verbindung mit einer zunehmenden Entwicklung von Pyrolysegasen und deren anschließender Zündung,
- Bildung einer einheitlichen, flüssigkeitsähnlichen Oberfläche über dem festen Anteil der Probe (Gleichgewichtszustand – GGW-Zustand),

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

- Fortschreiten der Verbrennung im GGW-Zustand bis der Feststoffvorrat auf der abgewandten Seite aufgebraucht ist, das heißt die restliche Probe flüssig ist, und
- (nahezu) rückstandslose Verbrennung und Erlöschen.

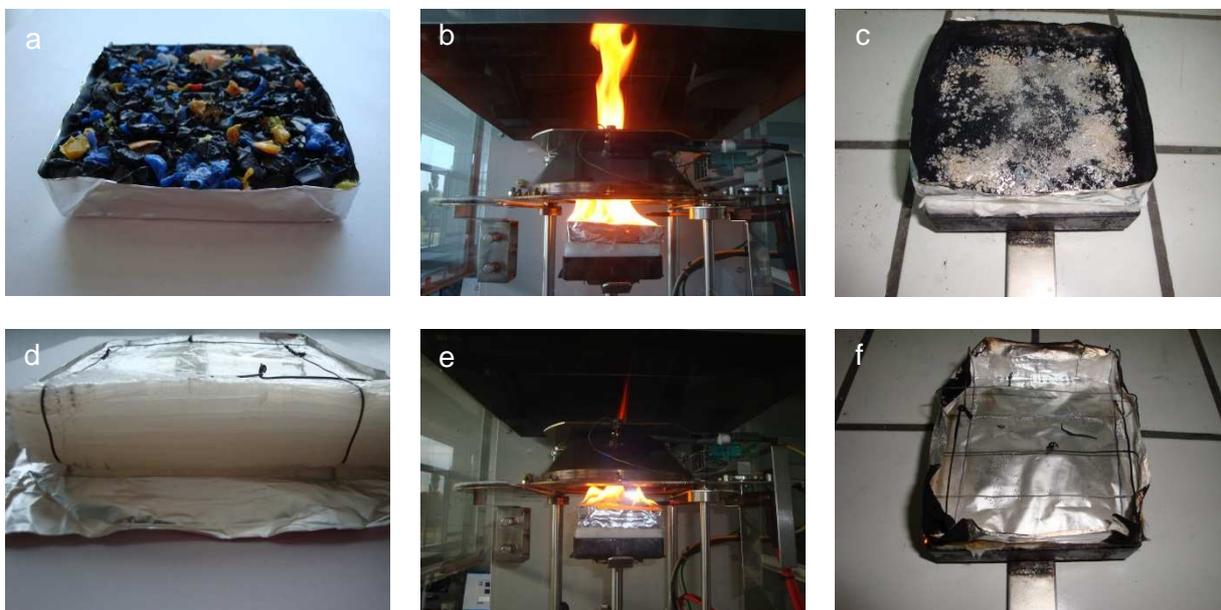
Zur Entzündung von PE im Allgemeinen wurden im Factory Mutual Flammability Apparatus  $15 \text{ kW/m}^2$  bestimmt [Tew02]. Darüber hinaus werden kritische Wärmestromdichten von  $10 \text{ kW/m}^2$  für PE-Granulat und  $15 \text{ kW/m}^2$  für PE-Platten genannt [Wil05]. Zur Entzündung von PMMA wurden im Factory Mutual Flammability Apparatus  $11 \text{ kW/m}^2$  gemessen [Tew02]. Gemäß [Qui98] liegt die minimale Bestrahlungsstärke für PMMA bei  $15 \text{ kW/m}^2$ . Hierbei ist der Feuchtegehalt für beide Stoffe auf Grund ihrer geringen Fähigkeit zur Wasseraufnahme vernachlässigbar [Aue13], [Leh01]. Für weitergehende Informationen zum Verbrennungsprozess sei an dieser Stelle auf die zitierte Literatur verwiesen.

### 6.2.2. Leicht- und normalentflammbare Kunststoffe der Brandklasse B

Den allgemeinen Erläuterungen zum Brandverhalten folgt die Auswertung der Versuche mit PE. Hierauf aufbauend werden die Versuchsergebnisse von PMMA analysiert.

#### 6.2.2.1. Polyethylen

Untersucht wurden Granulate der Schichthöhen 20 und 40 mm sowie PE-Folie (vergleiche Abbildung 6-6). Letztgenannte wurde gepresst und mit Draht auf eine Höhe von 21 mm fixiert.



**Abbildung 6-6:** Polyethylen: Granulat (oben, a) bis c)) und Folie (unten, d) bis e)) vor, während und nach der Beaufschlagung mit  $35 \text{ kW/m}^2$  im Cone Calorimeter

Die ermittelten Energien und Leistungen für PE enthält Tabelle 6-10. Neben der Probenhöhe und der Aufbereitungsart des Kunststoffs wurde auch hier die Beaufschlagungsintensität

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

variiert. Zu bemerken ist, dass die bei 20 kW/m<sup>2</sup> gemessenen Werte auf Grund der späten Zündzeit erneut nicht als repräsentativ angesehen werden können.

**Tabelle 6-10:** Versuchsergebnisse für Polyethylen mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten

Versuch	HFX	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{peak}$	$t_{peak}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[s]
<b>Probenhöhe 40 mm (soweit nicht anders angegeben)</b>								
Granulat	20	43,0	27,9	134,7	268,6	251,1	335,3	1077
Granulat	35	42,3	41,7	200,9	477,4	427,8	692,4	1377
Granulat	50	42,3	41,7	272,9	660,1	587,3	1062,9	1013
Granulat	70	42,5	42,2	397,3	881,0	790,8	1300,0	785
Granulat, 20 mm	35	42,4	42,0	204,5	617,5	443,4	1071,1	620
Folie, 21 mm (4 Vers.)	35	43,0	42,2	147,9	802,8	624,8	1373,6	1115

Tabelle 6-11 zeigt darüber hinaus die massenbezogenen Werte sowie ihre zeitlichen Bezüge.

**Tabelle 6-11:** Versuchsergebnisse für Polyethylen mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

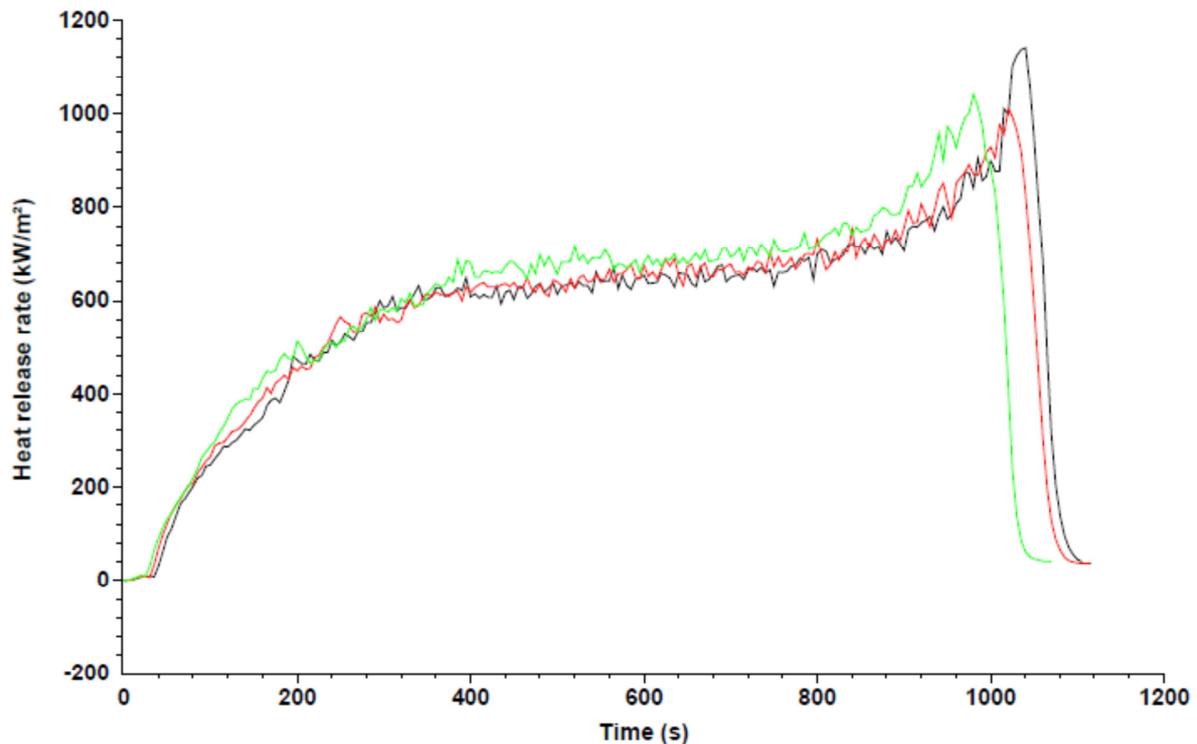
Versuch	HFX	$m_s$	$\Delta m$	$\dot{m}_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$t_{ign}$	$t_{10}$	$t_{90}$	$t_{fo}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g]	[g]	[g/s]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[s]	[s]	[s]	[s]
<b>Probenhöhe 40 mm (soweit nicht anders angegeben)</b>									
Granulat	20	162,1	105,0	0,031	6,3	194	482	1825	2849
Granulat	35	151,8	149,6	0,049	11,4	43	310	1360	1476
Granulat	50	151,4	149,4	0,075	16,0	21	213	960	1045
Granulat	70	160,2	157,9	0,125	21,7	10	153	737	812
Granulat, 20 mm	35	77,3	76,6	0,050	14,8	40	205	618	698
Folie, 21 mm (4 Vers.)	35	176,2	173,0	0,036	18,8	73	371	1118	1227

Beim nahezu rückstandslos verbrennenden PE zeigen sich, unabhängig von der Bestrahlungsstärke, annähernd identische Brennstoffbeladungen und effektive Verbrennungswärmen. Beide Energien sind etwas geringer als der Heizwert von PE (gemäß Eigenbestimmung 42,73 kJ/g für Granulat und 42,89 kJ/g für Folie / 43,90 kJ/g laut [DIN18230-3]). Hinsichtlich der Aufbereitungsart der Proben ist ersichtlich, dass die Energieausbeuten für Folie und Granulat ähnlich sind.

Die Wärmefreisetzungsraten steigen erwartungsgemäß mit der HFX an. In den ersten drei Minuten ist die HRR niedriger als ihr über den gesamten Versuchsdurchlauf gemittelter Wert. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass zu Versuchsbeginn noch viel Schmelzenergie bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes zwischen den Phasen aufgewendet werden

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

muss. Der Einfluss der für die Dekomposition notwendigen Wärmemenge wird auch am Verlauf der HRR deutlich, der beispielhaft für Granulat von 40 mm Probenhöhe bei 50 kW/m<sup>2</sup> in Abbildung 6-7 gezeigt ist. So steigt die Wärmefreisetzungsrate zunächst an, verharrt dann auf hohem Niveau, durchläuft am Ende der Verbrennung ein Maximum und fällt schließlich steil ab.



**Abbildung 6-7:** Wärmefreisetzungsrate von Polyethylen-Granulat im Cone Calorimeter (50 kW/m<sup>2</sup>, 40 mm, 3 Versuche)

Im Detail kann dieser Verlauf wie folgt mit dem beschriebenen charakteristischen Brandverhalten verknüpft werden:

- Anstieg der Kurve zum Plateau: bis zum Erreichen des Gleichgewichts zwischen den Phasen werden bedeutende Teile der verfügbaren Energie insbesondere für den Phasenübergang benötigt.
- Verharren auf hohem Niveau: die Schichtdicke der flüssigen Phase ist annähernd konstant, das heißt der GGW-Zustand ist erreicht. Ein eventueller geringfügiger Kurvenanstieg kann auf die zunehmende Vor- / Durchheizung der Probe zurückgeführt werden.
- Peak gegen Ende der Verbrennung: die feste Phase ist „aufgebraucht“, sodass hinsichtlich der Phasenumwandlung lediglich Energie zur Umsetzung der flüssigen Phase benötigt wird. Die verbleibende Schicht des Materials verhält sich thermisch dünn, woraus eine höhere Massenverlustrate resultiert [Mou06]. Dieser Effekt wird durch die Abnahme der langkettigen Moleküle bei gleichzeitiger Zunahme der kurz-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

kettigen Moleküle im flüssigen Zustand gesteigert, da letztgenannte weniger Energie zum Übergang ins Gasförmige benötigen. Der daraus folgende „Energieüberschuss“ wird für die Reaktionen der „eigentlichen Verbrennung“ verwendet.

- Steiles Abfallen: das Angebot an brennbarem Material sinkt rapide und die Probe erlischt.

Ähnliche Beobachtungen schildert [Tew02]. Hier wurde PE von 25 mm Höhe und 100 mm Durchmesser bei 50 kW/m<sup>2</sup> im Fire Propagation Apparatus nach [ASTME2058] untersucht. Demnach verweilte die Verbrennung zwischen 400 und 900 s im quasistationären Zustand, der sich durch einen dünnen Flüssigkeitsfilm an der Probenoberfläche auszeichnete (stationäre Zone). Gegen Ende der Verbrennung wurde ein schnelles Ansteigen des Films bei zunehmender HRR beobachtet bis die gesamte Probe flüssig war (Schmelz-Zone). Schließlich siedete die verbliebene Flüssigkeit bei exponentiell steigender HRR bis zur Umsetzung der gesamten Probe (Siede-Zone).

Für das im Rahmen dieser Arbeit weiterhin untersuchte Granulat von 20 mm Probenhöhe gilt der beschriebene Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bedingt. Ein Plateau der HRR-Kurve ist kaum erkennbar, da, vermutlich auf Grund der geringeren Probenmasse, der GGW-Zustand erst sehr spät und nur kurzzeitig beziehungsweise nicht erreicht wird. Vielmehr ist der Verlauf nach dem ersten steilen Ansteigen der Kurve von einer stetigen, leichten Steigung begleitet. Durch den quantitativen Vergleich der Wärmefreisetzungsraten von 20 und 40 mm starken Proben wird ein weiterer Einfluss ersichtlich: Der Abstand zum konischen Heizer, der im Versuchsverlauf steigt. Während bei zunächst gleichem und dann ähnlichem Abstand die Entzündungszeit und die HRR  $\dot{Q}''_{180s}$  annähernd identisch sind, fallen die mittleren sowie die maximale HRR bei 20 mm Probenhöhe größer aus. Auf Grund des aus dem Schmelzen und Verbrennen resultierenden „Zusammensackens“ der Probe wird der Abstand der Verbrennungszone zum Heizer insbesondere bei 40 mm hohem Granulat gegen Versuchsende beträchtlich und bringt neben kleineren Wärmefreisetzungsraten eine geringere ASMLR mit sich. Dieser Effekt ist auch im Vergleich mit den für Folie (21 mm) gewonnenen Werten ersichtlich.

Obwohl der qualitative Brandverlauf der Folie im Wesentlichen dem des 40 mm starken Granulats entspricht, zeigen sich einige weitere Unterschiede. So zündet das Material später und die Wärmefreisetzungsrate ist in den ersten 180 s nach der Entzündung geringer. Neben weiteren materialbedingten Faktoren kann dies vorwiegend durch die höhere Thermalträgheit der Folie (insbesondere höhere Dichte) und die andersgeartete Probenoberfläche begründet werden. Zudem fallen die mittleren HRR sowie ihr Peak bedeutend höher als bei Granulat aus (unter gleicher Strahlungsbeaufschlagung). Dies gilt sowohl für 20 als auch für 40 mm starkes Granulat.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

Festzuhalten ist, dass bei allen PE-Proben maßgeblich die Geschwindigkeit der Energieumsetzung variiert. Die Energieausbeuten sind nahezu identisch.

Zur Berechnung der Verbrennungseffizienzen werden, wie zuvor, die gemessenen Energien und Leistungen mit den Heizwerten und Massenparametern kombiniert. Unter Verwendung der selbst bestimmten Heizwerte ergeben sich so die in Tabelle 6-12 dargestellten Werte. Die Ergebnisse weichen von denen nach [Hah13b] ab, bei denen der Heizwert gemäß Norm [DIN18230-3] herangezogen wurde (siehe Anhang 5). Es resultieren mittlere Werte der Verbrennungseffizienz zwischen 0,85 und 0,99. Berechnete Effizienzen  $> 1$  sind physikalisch nicht möglich und müssen auf Messunsicherheiten zurückgeführt werden. In der Literatur werden allgemein für PE Werte zwischen 0,799 und 0,885 genannt [Sch11]. Die Verbrennungseffizienz auf Basis der EHC für PE-Granulat im Room Corner Test gibt [Blu03] mit 0,8 an.

**Tabelle 6-12:** Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyethylen mittels Cone Calorimeter

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 40 mm (soweit nicht anders angegeben)</b>						
Granulat	20	1,01	0,65	0,93	1,00	1,02
Granulat	35	0,99	0,98	0,88	0,98	0,95
Granulat	50	0,99	0,98	0,86	0,97	0,85
Granulat	70	0,99	0,98	0,85	0,95	0,75
Granulat, 20 mm	35	0,99	0,98	0,70	0,98	0,96
Folie, 21 mm (4 Versuche)	35	1,00	0,98	0,77	1,00	0,95
<b>Mittel Granulat (35, 50, 70 kW/m<sup>2</sup>; ohne 20 mm)</b>		0,99 ( $\pm 0,00$ )	0,98 ( $\pm 0,00$ )	0,86 (+0,02 -0,01)	0,97 (+0,01 -0,02)	0,85 ( $\pm 0,10$ )

Aus den bereits genannten Gründen liegt der Schwerpunkt der Auswertung bei den Versuchen mit 40 mm starkem Granulat ab 35 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke. Hier ist ersichtlich, dass die erzielten Werte mit Ausnahme der Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,180s}$  nur schwachen Schwankungen ( $\pm 0,02$ ) unterliegen. Es kann darauf zurückgeführt werden, dass PE im Gegensatz zu Holz, das aus verschiedenartigen Molekülgruppen zusammengesetzt ist, einen wesentlich homogenen Aufbau und infolgedessen ein einheitlicheres Verhalten bei Beanspruchung aufweist.

Die Verbrennungseffizienzen auf Grundlage der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sind, resultierend aus der nahezu rückstandslosen Verbrennung, sehr ähnlich. Die auf die Hauptbrandphase bezogene Verbrennungseffizienz weist vergleichbar hohe Werte auf. Hingegen ist die Verbrennungseffizienz auf Grundlage der mittleren HRR durch die Gegenüberstellung mit der verhältnismäßig großen ASMLR kleiner. Wie die HRR

$\dot{Q}''_{180s}$  ist die auf die ersten drei Minuten bezogene Verbrennungseffizienz angesichts der hohen, zur Phasenumwandlung fest-flüssig-gasförmig notwendigen Energie geringer. Warum diese Effizienz mit der Bestrahlungsstärke sinkt, ist nicht ersichtlich. Ein möglicher Zusammenhang kann zur verkürzten Entzündungszeit bei hohen Bestrahlungsstärken bestehen. Denkbar ist, dass ein Überangebot an brennbarem Material aufbereitet wird, für das die Sauerstoffzufuhr in Verbindung mit der Temperatur der Reaktionszone kurzzeitig zu gering ist.

Hinsichtlich der beim Granulat variierten Probenhöhe ist zu bemerken, dass die Verbrennungseffizienzen mit Ausnahme der Variante  $\chi_{HRR,mean}$  nahezu identisch sind. Damit spiegeln sich die weitestgehend ähnlichen Eingangsgrößen wieder. Auch die hiervon ausgenommenen Raten der Hauptbrandphase gleichen sich bei der Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  aus. Da die mittlere HRR im Unterschied zur Massenverlustrate  $\dot{m}''_{10-90}$  jedoch annähernd konstant bleibt, sinkt die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  mit der Probenhöhe. Bei gleicher Energieausbeute werden damit wiederum hohe Wärmefreisetzungsraten bei kurzer Branddauer weniger gefährlich bewertet als geringere Freisetzungen über einen längeren Zeitraum (in Form einer geringeren Verbrennungseffizienz). Insofern kann die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$ , im Vergleich mit den Varianten  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$ , als Indikator für die „Heftigkeit“ eines Brandes, das heißt die Schnelligkeit des Materialumsatzes, angesehen werden.

### 6.2.2.2. Polymethylmethacrylat

Zur weiteren Untersuchung werden die Ergebnisse für PMMA dargestellt und ergänzend zu PE ausgewertet. Vorab veranschaulicht Abbildung 6-8 den Verbrennungsvorgang von PMMA fotografisch.



**Abbildung 6-8:** Polymethylmethacrylat Platte a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit  $70 \text{ kW/m}^2$  im Cone Calorimeter

Die am Cone Calorimeter für geschwärztes PMMA ermittelten Energien und Leistungen gibt Tabelle 6-13 wieder. Hierbei wurde erneut die Wärmestromdichte variiert. Zu bemerken ist, dass die bei  $20 \text{ kW/m}^2$  gemessenen Werte auf Grund der späten Zündung abermals nicht als repräsentativ angesehen werden können.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

**Tabelle 6-13:** Versuchsergebnisse für Polymethylmethacrylat (geschwärzt) mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten

Versuch	HFX	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{peak}$	$t_{peak}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[s]
<b>Probenhöhe 18 mm</b>								
Platte	20	25,2	25,2	242,3	394,4	379,0	497,9	1388
Platte	35	24,7	24,7	420,2	538,4	514,9	626,0	893
Platte	50	24,7	24,7	570,0	703,1	669,3	813,9	630
Platte	70	25,3	25,3	797,7	928,5	822,2	1067,1	427

Die weiteren zur Berechnung der Verbrennungseffizienzen herangezogenen Daten enthält Tabelle 6-14.

**Tabelle 6-14:** Versuchsergebnisse für Polymethylmethacrylat (geschwärzt) mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

Versuch	HFX	$m_s$	$\Delta m$	$\dot{m}_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$t_{ign}$	$t_{10}$	$t_{90}$	$t_{fo}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g]	[g]	[g/s]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[s]	[s]	[s]	[s]
<b>Probenhöhe 18 mm</b>									
Platte	20	209,8	209,7	0,117	16,2	165	343	1370	1530
Platte	35	209,5	209,5	0,174	21,9	42	168	937	1055
Platte	50	215,4	215,4	0,239	28,7	21	117	723	812
Platte	70	203,6	203,4	0,327	37,3	12	83	523	591

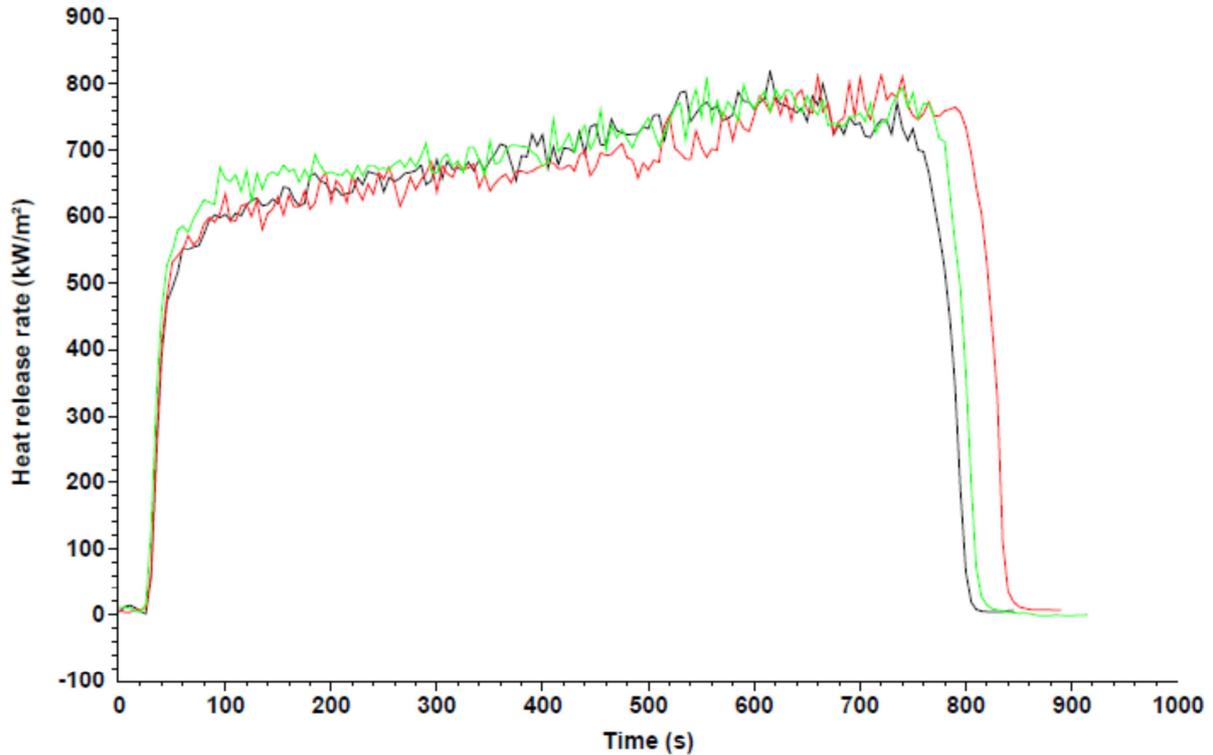
Die Ergebnisse sind fast analog zu PE: Für den rückstandslos verbrennenden Feststoff ist die Brennstoffbeladung gleich der effektiven Verbrennungswärme, welche ähnlich dem Heizwert ist. Er wurde für das untersuchte PMMA zu 24,47 kJ/g bestimmt (laut [DIN18230-3] 24,84 kJ/g). Hier gemessene, den Heizwert übersteigende Werte müssen auf Unsicherheiten in der Versuchsdurchführung zurückgeführt werden, da die EHC naturgemäß nicht größer als der Heizwert sein kann.

Erwartungsgemäß steigt die Wärmefreisetzungsrate von PMMA mit zunehmender HFX. Erneut ist zudem die HRR in den ersten drei Minuten niedriger als die über den Versuchsdurchlauf gemittelten Werte. Die Kurve der Wärmefreisetzungsrate ist ähnlich zu PE, jedoch ist das Plateau stärker ausgeprägt und von einem sehr steilen Anstieg der HRR zu Beginn sowie einem schwachen Peak gegen Ende der Verbrennung begleitet (vergleiche Abbildung 6-9). Trotz des deutlich geringeren Heizwerts<sup>8</sup> übersteigen die mittleren Wärmefreisetzungsraten

<sup>8</sup> Kohlenwasserstoffpolymere wie PE tendieren zu wesentlich höheren Heizwerten als oxidierte Derivate wie PMMA [Dry04].

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

raten die des Polyethylens. Die (punktuellen) maximalen Wärmefreisetzungsraten sind dagegen niedriger als bei PE.



**Abbildung 6-9:** Wärmefreisetzungsrate von Polymethylmethacrylat im Cone Calorimeter (50 kW/m<sup>2</sup>, 18 mm, 3 Versuche)

Die sehr viel einheitlichere Verbrennung von PMMA ist auf den variierenden Dekompositionsmechanismus zurückzuführen (vergleiche Unterabschnitt 6.2.1.). So verbrennt PMMA auf Grund seiner Molekülstruktur wesentlich gleichförmiger und erreicht schneller einen GGW-Zustand. Festzuhalten ist, dass analog zu PE mit der Bestrahlungsstärke maßgeblich die Geschwindigkeit der Energieumsetzung variiert, die Energieausbeuten jedoch nahezu identisch sind.

Bezüglich der Entzündungszeiten der untersuchten Thermoplasten zeigen sich ebenso nahezu identische Werte; hinsichtlich der Thermalträgheit wird der Einfluss der höheren Dichte von PMMA durch niedrigere Werte der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität kompensiert. Die Brenndauer von PMMA ist trotz einer höheren Probenmasse deutlich kürzer als die von PE (ca. Faktor drei bei Granulat beziehungsweise 1,5 bei Folie), da PMMA bei wesentlich höheren spezifischen Massenverlusten verbrennt.

Anhand der erzielten Versuchsergebnisse ergeben sich die in Tabelle 6-15 dargestellten Faktoren der Verbrennungseffizienz. Aus den genannten Gründen liegt der Schwerpunkt der Auswertung bei den ab 35 kW/m<sup>2</sup> gewonnenen Werten. Auch für PMMA wurden Effizienzen > 1 berechnet, die auf stets vorhandene Unsicherheiten zurückgeführt werden können. Die

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

Angabe einer Effizienz von zum Beispiel 1,02 ( $\pm 0,01$ ) ist daher lediglich als formeller Mittelwert zu betrachten. Letztlich wurden Werte von 0,94 bis zur vollständigen Umsetzung bestimmt. Die Schwankungsbreiten sind mit maximal +0,02 / -0,04 wie bei PE sehr gering. Zum Vergleich sind, entsprechend den zuvor untersuchten Materialien, die für PMMA unter Verwendung des Heizwerts nach Norm [DIN18230-3] berechneten Werte in Anhang 6 angegeben. Hier liegen die Mittelwerte bei maximal 1,00; eventuell wurde der Heizwert in Eigenregie zu niedrig bestimmt. In der Literatur ist für PMMA eine Verbrennungseffizienz von 0,96 genannt [Sch11].

**Tabelle 6-15:** Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polymethylmethacrylat (geschwärzt) mittels Cone Calorimeter

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 18 mm</b>						
<b>Platte</b>	<b>20</b>	1,03	1,03	0,96	0,99	0,84
<b>Platte</b>	<b>35</b>	1,01	1,01	0,96	1,00	0,99
<b>Platte</b>	<b>50</b>	1,01	1,01	0,95	1,00	0,97
<b>Platte</b>	<b>70</b>	1,03	1,03	0,90	1,02	1,00
<b>Mittel Platten (35, 50, 70 kW/m<sup>2</sup>)</b>		1,02 ( $\pm 0,01$ )	1,02 ( $\pm 0,01$ )	0,94 (+0,02 -0,04)	1,01 ( $\pm 0,01$ )	0,99 (+0,01 -0,03)

Die in Tabelle 6-15 dargelegten Verbrennungseffizienzen auf Grundlage der Energien sind aus dem bereits angeführten Argument der rückstandslosen Verbrennung identisch und mit 1 zu bewerten. Die leistungsbasierten Varianten reichen an die Ergebnisse der energiebasierten Verbrennungseffizienzen an. Lediglich die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  ist geringer, was im Vergleich mit den Varianten  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  auf einen schnellen Materialumsatz und in der Konsequenz verkürzte Branddauern hinweist. Im Vergleich mit PE zeigt sich, dass unabhängig von der Variante die Verbrennungseffizienz für PMMA höher liegt.

### 6.2.2.3. Abschließende Betrachtung leicht- und normalentflammbarer Kunststoffe der Brandklasse B

Im Folgenden werden zusammenfassend und ergänzend die Ergebnisse der Versuche mit Kunststoffen der Brandklasse B dargestellt. Dabei wird zum Teil auf die für Holzproben erzielten Resultate Bezug genommen.

Zunächst ist festzuhalten, dass der Brandverlauf der untersuchten Thermoplasten sehr ähnlich ist. Auf Grund der wesentlichen Eigenschaft des Schmelzens und der damit einhergehenden flüssigkeitsähnlichen Verbrennung ist dies nicht unerwartet. Dabei verbrennt das Material mit dem höheren Monomeranteil bei der Dekomposition infolge der Bildung vieler gleichartiger Moleküle gleichmäßiger. Es zeigt sich ein ausgeprägtes Plateau der HRR. Dies

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

gilt unter der Bedingung, dass während der Verbrennung ein Gleichgewichtszustand erreicht werden kann. Die Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende Branddauer, die bei Proben im Cone Calorimeter auf Grund der vorgegebenen seitlichen Abmaße neben der Probenhöhe entscheidend vom Probengewicht – und damit von der Probendichte – abhängig ist.

Mit Blick auf die Wärmefreisetzungsraten hat sich weiterhin gezeigt, dass bei PE und PMMA die Erhöhung der äußeren Bestrahlungsstärke nahezu vollständig in eine höhere Leistung des Feuers umgesetzt wird. Bei den Hölzern konnte dagegen nur ein Teil der größeren Energiezufuhr genutzt werden, sodass etwa die  $HRR \dot{Q}''_{10-90}$  bei diesen vergleichsweise gering mit der HFX anstieg.

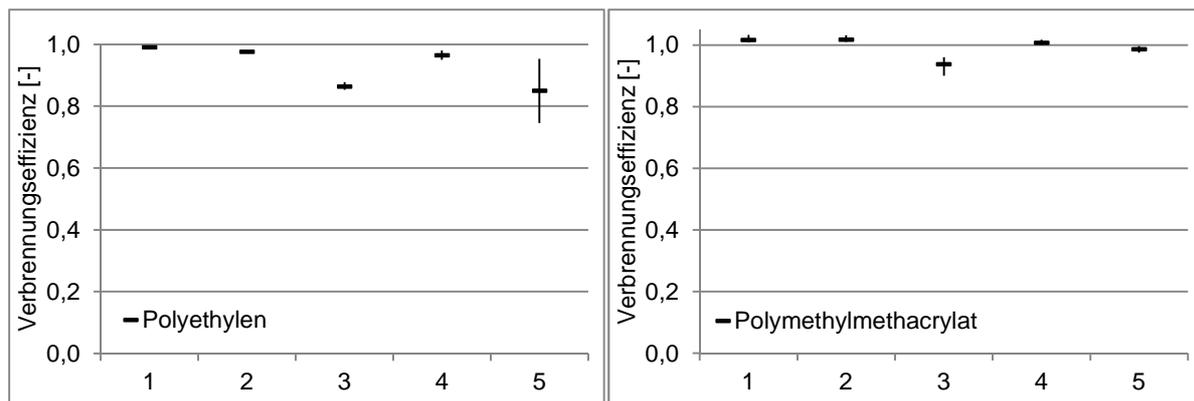
Die Versuche anhand von flüssig werdenden Kunststoffen bestätigen zudem, dass die Entzündungszeit für aussagekräftige Ergebnisse zu berücksichtigen und ihr Einfluss durch die richtige Wahl der Probenhöhe in Verbindung mit der Bestrahlungsstärke zu minimieren ist. Hinsichtlich der Probenhöhe kann die Anwendung von Formel (37) nicht ausreichend bestätigt werden. Bei PMMA ist sie zwar für die untersuchten Proben geringfügig oberhalb von 35 kW/m<sup>2</sup> eingehalten. Für PE-Granulat wird die zum Erreichen eines GGW-Zustandes erforderliche Probenhöhe jedoch unterschätzt. Die Bestrahlungsstärke betreffend haben sich erneut Versuche ab 35 kW/m<sup>2</sup> als geeignet herausgestellt.

Im Unterschied zu den Holzproben hat sich die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  stabiler gezeigt. So kann sie als Indikator für die „Heftigkeit“ eines Brandes, das heißt hohe Massenverlustraten und demzufolge kürzere Branddauern, hilfreich sein.

Abbildung 6-10 stellt abschließend die für PE-Granulat der Höhe 40 mm und für PMMA-Platten berechneten Mittelwerte der fünf untersuchten Varianten der Verbrennungseffizienz gegenüber (Datengrundlage Tabellen 6-12 und 6-15). Die Varianten sind analog zu Abschnitt 6.1. von links nach rechts wie folgt dargestellt: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$ . Darüber hinaus sind auch hier die maximalen und minimalen Abweichungen angegeben.

Wie bereits erwähnt, liegen die Verbrennungseffizienzen  $\chi_{EHC}$ ,  $\chi_{FL}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  (1, 2, 4) der beiden Stoffen etwa bei 1. Dies weist darauf hin, dass die Verbrennung sowohl hinsichtlich der entstehenden Verbrennungsprodukte vollständig verläuft, als auch dass die gesamte Probe am Verbrennungsprozess teilnimmt. Eine weniger effiziente Verbrennung ergibt sich für den Brandbeginn mit dem enthaltenen Entzündungsprozess bei Polyethylen (5), wobei diese Variante mit ( $\pm 0,10$ ) große Schwankungen aufweist. Die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  (3) bleibt bei beiden Stoffen hinter den weiteren Werten zurück. Mit Ausnahme der bereits erwähnten Schwankungshöhe sind die Abweichungen mit maximal +0,02 / -0,04 (+2% / -4%) sehr gering.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter



**Abbildung 6-10:** Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabellen 6-12 und 6-15 im Vergleich: links Polyethylen, rechts Polymethylmethacrylat. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$

Die detaillierte Aufstellung der verglichenen Versuche ist den Anhängen 12 und 13 sowie 16, 17 und 19 zu entnehmen. Eine Übersicht, wie sich die Verbrennungseffizienzen und ihre Basisgrößen mit den variierten Parametern verhalten, geben die Tabellen 6-16 und 6-17. Nachstehend zeigt zunächst Tabelle 6-16 die Ergebnisse für die Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie für deren Eingangsgrößen. Es ist ersichtlich, dass

- sich alle vier Größen gleich verhalten,
- die Bestrahlungsstärke, die Probenhöhe und die Rohdichte die energetischen Größen und die Verbrennungseffizienzen nicht beeinflussen.

**Tabelle 6-16:** Ergebnisse der Parametervariation für Kunststoffe der Brandklasse B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie für deren Eingangsgrößen

Variierter Parameter	$\Delta h_{c,eff}$ [kJ/g]	$q$ [kJ/g]	$\chi_{EHC}$ [-]	$\chi_{FL}$ [-]
<b>Polyethylen</b>				
HFX ↑	o	o	o	o
Probenhöhe <sup>a</sup> ↓	o	o	o	o
Rohdichte ↑	o	o	o	o
<b>Polymethylmethacrylat</b>				
HFX ↑	o	o	o	o

<sup>a</sup> bei der Änderung der Probenhöhe wurden die Versuche von 20 auf 40 mm mit Granulat als maßgeblich eingestuft, da bei 21 auf 40 mm zusätzlich eine Dichteänderung vorliegt

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

Tabelle 6-17 fasst weiterhin die Ergebnisse für die Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten sowie für deren Eingangsgrößen zusammen. Es wird deutlich, dass

- sich die Verbrennungseffizienzen nicht entsprechend ihren Basisgrößen verändern (Ausnahme:  $\chi_{HRR,180s}$  bei Änderung der Probenhöhe),
- sich die Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten mit gleichem Zeitbezug bei der Änderung eines Parameters simultan verändern,
- sich die Basisgrößen von Polyethylen und Polymethylmethacrylat mit der HFX simultan verändern, die Verbrennungseffizienzen jedoch zum Teil unterschiedliche Tendenzen zeigen.

**Tabelle 6-17:** Ergebnisse der Parametervariation für Kunststoffe der Brandklasse B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie für deren Eingangsgrößen

Variierter Parameter	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[g/s]	[-]	[-]	[-]
<b>Polyethylen</b>								
HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	↓
Probenhöhe ↓	o	↑	o	↑	o	↓	o	o
Rohdichte ↑	↑	↑	↓	↑	↓	o (↑↓)	o	o
<b>Polymethylmethacrylat</b>								
HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	↘	o	o

Wie bereits erwähnt, kann hinsichtlich der Wärmefreisetzungsraten und der Massenverlustraten festgehalten werden, dass sie – wie bei den Hölzern – mit der Bestrahlungsstärke steigen. Werden die Bestrahlungsstärken mit den gemessenen Wärmefreisetzungsraten in Bezug gesetzt, das heißt ihre Differenzen gebildet, fällt dieser Unterschied jedoch gering aus. Es ist ein annähernd linearer Anstieg mit der HFX zu beobachten. Sinkt die Probenhöhe, nehmen lediglich die auf die Hauptbrandphase bezogenen Raten zu. Mit wachsender Rohdichte steigen zwar die mittleren Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten, die auf den Beginn bezogenen Werte fallen jedoch. Eine Übertragbarkeit auf die Verbrennungseffizienzen ist, wie bereits erwähnt, nicht gegeben. Sie verhalten sich weitestgehend unabhängig und sinken zum Teil sogar. Sämtlich unbeeinflusst zeigt sich die Variante  $\chi_{HRR,10-90}$ .

### 6.2.3. Schwerentflammbare Kunststoffe der Brandklassen A und B

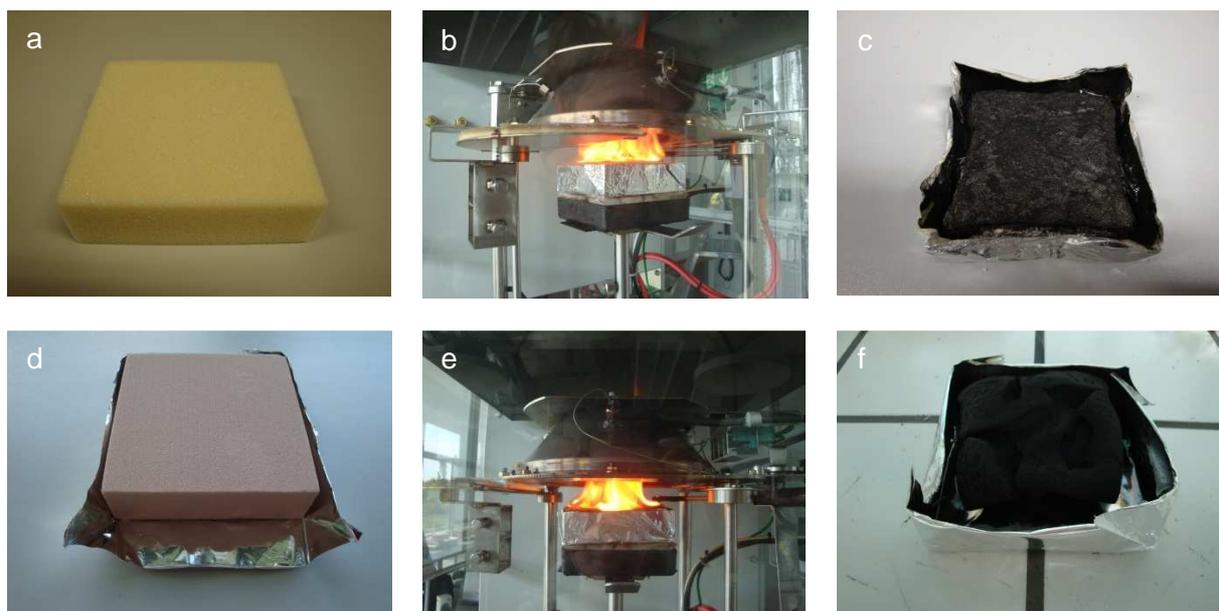
Nach der allgemeinen Betrachtung der Verbrennungseffizienzen von Materialien der Brandklassen A und B ist im Folgenden ein besonderes Augenmerk auf die Schwerentflammbarkeit gelegt. Zunächst werden die am Cone Calorimeter gemessenen Ergebnisse für leicht-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

und schwerentflammbare Polyurethan-Hartschäume dargestellt und ausgewertet. Sie gehören wie die untersuchten Hölzer der Brandklasse A an [DINEN2]. Es schließt sich ergänzend die Auswertung der Versuche mit schwerentflammbarem Polystyrol-Hartschaum an, der als Vertreter für schwerentflammbare Materialien der Brandklasse B gewählt wurde. Sowohl das charakteristische Brandverhalten von Stoffen der Brandklassen A und B als auch die Wirkung von Flammschutzmitteln wurden bereits im Vorfeld erläutert (siehe Unterabschnitte 6.1.1. und 6.2.1. beziehungsweise 5.3.3.3.). Zu bemerken ist, dass es nicht Ziel der Untersuchung ist, den Einfluss von Flammschutzmitteln als solchen darzulegen. Vielmehr sind die Auswirkungen eines derartigen Zusatzes im Hinblick auf die Methode zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz mittels Cone Calorimeter von Interesse.

### 6.2.3.1. Polyurethan B1 und B3

Abbildung 6-11 zeigt die untersuchten PUR-Schäume vor, während und nach der Beaufschlagung. Mit einer Höhe von 30 mm wurde die erforderliche Probenhöhe von 3 bis 6 mm gemäß Gleichung (37) deutlich eingehalten. Indes ist zu vermuten, dass die Gleichung die notwendige Probenhöhe unterschätzt.



**Abbildung 6-11:** Polyurethan: Hartschaum B3 (oben, a) bis c)) und B1 (unten, d) bis e)) vor, während und nach der Beaufschlagung mit  $70 \text{ kW/m}^2$  im Cone Calorimeter

Im Rahmen der Tests wurde wie zuvor die Wärmestromdichte variiert. Da die Auswertung der vorherigen Versuche gezeigt hat, dass bei  $20 \text{ kW/m}^2$  gemessene Werte nicht als repräsentativ angesehen werden können, beginnt die Messwerterfassung bei einer Bestrahlungsintensität von  $35 \text{ kW/m}^2$ . Im Zuge der geringen Probenmasse und Brenndauer wird statt der 180-Sekunden-Mittel eine Zeitspanne von 60 s nach der Entzündung zur Bewertung der Anfangsphase gewählt. Als minimale Bestrahlungsstärken sind für PUR-Schäume im Fire Pro-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

pagation Apparatus Werte mit einer großen Schwankungsbreite von 10 bis zu 40 kW/m<sup>2</sup> angegeben [Qui98], [Tew02].

Die ermittelten Energien und Leistungen für Polyurethan enthält Tabelle 6-18. Zu bemerken ist, dass auf Grund der geringen Brenndauer die Ergebnisse mit höheren Unsicherheiten belastet sein können (laut [ISO5660-1] sollte die Testdauer  $\geq 5$  min sein). Bei Bestrahlungsstärken von 35 und 50 kW/m<sup>2</sup> hat sich bei PUR B1 zudem keine durchgehende Flammerscheinung eingestellt. Im Unterschied zu den anderen Versuchen ist daher der Funkenzünder weitestgehend oberhalb der Probe verblieben, um aufsteigende Pyrolysegase stets neu zu entzünden. Weitere Unsicherheiten fließen dadurch ein, dass für schwerentflammables PUR der Berechnungszeitraum zum Teil weit über den Zeitpunkt  $t_{fo}$  hinausgeht.

**Tabelle 6-18:** Versuchsergebnisse für Polyurethan mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten

Versuch	HFX	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\dot{Q}''_{60s}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{peak}$	$t_{peak}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[s]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>								
Platte B3	35	23,3	19,1	257,7	262,6	142,9	300,1	23
Platte B3	50	22,2	19,3	295,1	335,1	168,5	382,8	18
Platte B3	70	22,4	20,5	312,4	392,6	178,7	502,4	15
Platte B1	35	8,2	2,7	21,6	11,2	12,5	68,3	13
Platte B1	50	8,5	4,6	45,9	20,3	10,8	74,2	15
Platte B1	70	19,5	18,0	57,5	35,3	27,0	121,7	15

Tabelle 6-19 gibt ergänzend die ermittelten massenbezogenen Werte sowie ihre zeitlichen Bezüge wieder.

**Tabelle 6-19:** Versuchsergebnisse für Polyurethan mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

Versuch	HFX	$m_s$	$\Delta m$	$\dot{m}_{60s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$t_{ign}$	$t_{10}$	$t_{90}$	$t_{fo}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g]	[g]	[g/s]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[s]	[s]	[s]	[s]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>									
Platte B3	35	9,9	8,4	0,126	13,6	1	8	62	88
Platte B3	50	10,2	9,0	0,145	17,2	1	10	53	73
Platte B3	70	10,0	9,1	0,141	19,1	0	8	45	66
Platte B1	35	9,8	4,0	0,025	1,8	2	10	200	70
Platte B1	50	9,8	6,3	0,045	2,2	3	10	183	91
Platte B1	70	9,8	9,3	0,076	1,9	1	10	410	147

Es ist ersichtlich, dass sich Polyurethan als glutbildender Feststoff ähnlich wie Fichtenholz und Spanplatten verhält: Die Brennstoffbeladung ist etwas geringer als die effektive Ver-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

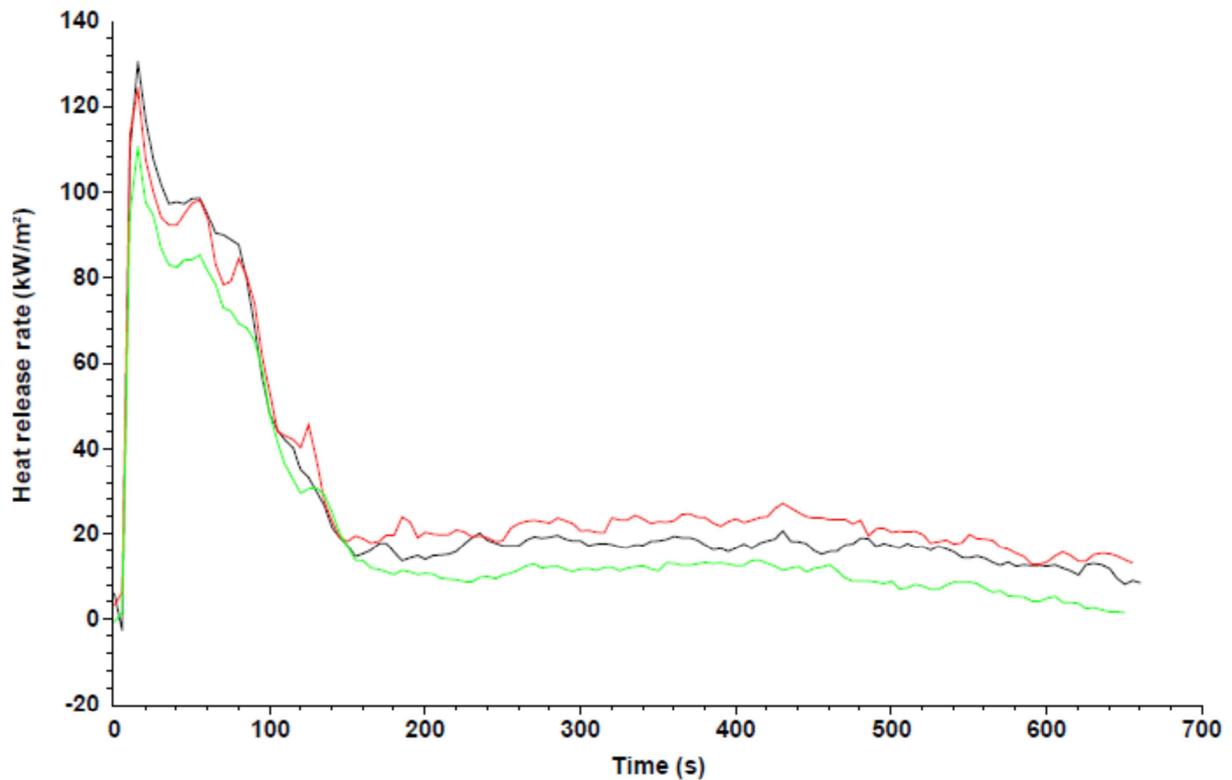
brennungswärme, die wiederum geringer als der Heizwert ist (PUR B3 27,36 kJ/g / PUR B1 25,56 kJ/g [Kna14]; [DIN18230-3] enthält für PUR-Hartschaum B3 keine Angabe / PUR B1 24,12 kJ/g). Dabei ist die Änderung mit der Bestrahlungsstärke nur schwach ausgeprägt. Auf Grund der fehlenden Flammenerscheinung bleiben die Werte von PUR B1 bei 35 und 50 kW/m<sup>2</sup> stark zurück.

Für die Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten der PUR-Schäume zeigt sich qualitativ ein ähnliches Bild: Die Raten steigen mit der HFX an. Sie sind jedoch für PUR B1 bei allen Bestrahlungsstärken deutlich geringer.

Der Einfluss des flammenhemmenden Zusatzstoffs liegt damit maßgeblich in der Reduzierung der Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten. Eine Beeinträchtigung der schwerentflammaren Eigenschaften zeigt sich bei den getesteten Intervallen ab 70 kW/m<sup>2</sup>: Hier ist die freigesetzte Energie ähnlich der von PUR B3, die Leistung des Feuers jedoch weiterhin gering. Insofern bleibt die Wirksamkeit des Flammschutzmittels bei 70 kW/m<sup>2</sup> in der Hinsicht erhalten, dass die Wärme über einen langen Zeitraum, bei geringer HRR und MLR, abgegeben wird.

Letztlich variiert insbesondere beim leichtentflammaren Material mit der HFX wiederum maßgeblich die Geschwindigkeit der Umsetzung, die Energieausbeuten sind dagegen vergleichbar.

Der Verlauf der HRR ist in Abbildung 6-12 beispielhaft für PUR B1 bei 70 kW/m<sup>2</sup> veranschaulicht. Es ist erkennbar, dass das Material, allein auf Grund der geringen Ausgangsmasse vergleichsweise kurz brennt. Die HRR durchläuft zu Beginn ihr Maximum und fällt im Anschluss bis zum Erlöschen relativ steil ab. Erstgenanntes spiegeln auch die hohen Werte der HRR  $\dot{Q}''_{60s}$  wieder.



**Abbildung 6-12:** Wärmefreisetzungsrate von Polyurethan B1 im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, 30 mm, 3 Versuche)

Die Kurve des leichtentflammbaren PUR verläuft ähnlich. Sie ist jedoch auf Grund der kürzeren Brandzeiten gestaucht und hat bei geringeren Wärmestromdichten ein kleines Plateau. Ein ausgeprägtes lokales Minimum wie bei Hölzern ist nicht ersichtlich. Dies kann aus dem geringeren Probengewicht resultieren; ein weiterer Faktor scheint die deutlich andersgeartete Thermalträgheit zu sein (hohes Isolationsvermögen der Hartschäume). Darüber hinaus kann der verschiedenartige Zersetzungsmechanismus Einfluss nehmen. So hat Polyurethan im Vergleich zu Holz einen wesentlich einfacheren Molekülaufbau und setzt fast keine Flüchtigen frei.

Unter Verwendung der in den Tabellen 6-18 sowie 6-19 genannten Werte und den für die Materialien bestimmten Heizwerten von 27,36 kJ/g für PUR B3 beziehungsweise 25,56 kJ/g für PUR B1 ergeben sich die Verbrennungseffizienzen in Tabelle 6-20. Die mit dem Heizwert nach Norm berechneten Werte enthält zum Vergleich Anhang 7. Für PUR B3 wurden mittlere Werte von 0,72 bis 0,83 mit einer Schwankungsbreite von maximal +0,04 / -0,02 (Ausnahme:  $\chi_{HRR,mean}$  mit 0,36) und von 0,33 bis 0,45 für PUR B1 ermittelt. Die Schwankungen bei PUR B1 sind mit maximal +0,37 / -0,23 erwartungsgemäß beträchtlich und die Konsequenz der Wirkweise des Flammschutzzusatzes. Sie geben damit weniger eine Auskunft über die Genauigkeit der Versuchsergebnisse, sondern vielmehr über den Effekt der unterschiedlichen Bestrahlungsstärken. So können höhere Beaufschlagungsintensitäten ein „Aufbrechen“ der

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

chemischen Bindungen bewirken, in denen die Inhibitoren gebunden sind. Ein Vergleich der Werte bei geringeren Bestrahlungsstärken, bei denen das Flammschutzmittel seine volle Wirksamkeit entfaltet, zeigt kleinere Schwankungen (siehe Anhang 20).

In der Literatur sind für PUR im Allgemeinen Werte zwischen 0,599 und 0,707 genannt [Sch11]. Generell für schwerentflammbare Materialien enthält [Dry02] Werte von 0,3 bis 0,4. In [Tew80] wird für schwerentflammbare Substanzen ebenso eine Verbrennungseffizienz von maximal 0,4 genannt.

**Tabelle 6-20:** Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyurethan mittels Cone Calorimeter

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,60s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>						
<b>Platte B3</b>	<b>35</b>	0,85	0,70	0,38	0,71	0,75
<b>Platte B3</b>	<b>50</b>	0,81	0,71	0,36	0,71	0,75
<b>Platte B3</b>	<b>70</b>	0,82	0,75	0,34	0,75	0,81
<b>Mittel B3</b>		0,83 (±0,02)	0,72 (+0,03 -0,01)	0,36 (±0,02)	0,72 (+0,03 -0,01)	0,77 (+0,04 -0,02)
<b>Platte B1</b>	<b>35</b>	0,32	0,10	0,28	0,25	0,34
<b>Platte B1</b>	<b>50</b>	0,33	0,18	0,20	0,37	0,40
<b>Platte B1</b>	<b>70</b>	0,76	0,70	0,56	0,73	0,47
<b>Mittel B1</b>		0,47 (+0,29 -0,15)	0,33 (+0,37 -0,23)	0,34 (+0,22 -0,14)	0,45 (+0,28 -0,20)	0,40 (+0,07 -0,06)

Für PUR B3 zeigt Tabelle 6-20 bei den Verbrennungseffizienzen auf Basis der Energien, den Eingangswerten entsprechend, höhere Werte der Variante  $\chi_{EHC}$ . Ein Vergleich der Effizienzen  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{FL}$  bezeugt, dass das Material den Beobachtungen entsprechend sowohl chemisch unvollständig verbrennt, als auch in der Hinsicht, dass nicht das gesamte Material am Verbrennungsprozess beteiligt ist. Die auf die Hauptbrandphase bezogene Verbrennungseffizienz erreicht den Wert der Variante  $\chi_{FL}$ . Etwas hierüber liegende Werte der Effizienz  $\chi_{HRR,60s}$  verdeutlichen, dass die Verbrennung zunächst effektiver verläuft. Die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  bleibt auffallend hinter den weiteren Werten zurück. Hier werden erneut die unterschiedlichen Bezugszeiträume der mittleren HRR und der ASMLR offenbar.

Für PUR B1 sind die Ergebnisse in qualitativer Hinsicht ähnlich, die Verbrennungseffizienzen sind jedoch, wie bereits die Eingangsgrößen, geringer. Ab 70 kW/m<sup>2</sup> zeigt sich in jeglicher Hinsicht eine deutlich vollständigere Verbrennung und damit, wie zuvor, die nachlassende Wirkung des Flammschutzzusatzes. Es entstehen sowohl mehr oxidierte Produkte, als auch nimmt ein größerer Teil der Probe am Verbrennungsprozess teil. Für die Hauptbrandphase sind die Verbrennungseffizienzen des leicht- und schwerentflammbaren Materials fast identisch. Die sehr viel geringeren Werte der Wärmefreisetzung- sowie Massenverlusten bei

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

70 kW/m<sup>2</sup> sind aus den Verbrennungseffizienzen nicht ersichtlich, sondern stehen im Verhältnis zueinander und gleichen sich aus. Daher ist es wichtig, bei der Beurteilung eines solchen Materials ein Spektrum an Bestrahlungsstärken einzubeziehen.

### 6.2.3.2. Polystyrol B1

Zur weiteren Untersuchung werden nachfolgend die Ergebnisse für PS B1 dargestellt. Im Sinne der Vermeidung von Wiederholungen und auf Grund der verminderten Variationsbreite erfolgt die Auswertung bereits in direktem Vergleich zu den anderen untersuchten Kunststoffen. Vorab veranschaulicht Abbildung 6-13 den Verbrennungsvorgang von PS B1 fotografisch.



**Abbildung 6-13:** Polystyrol B1 a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter

Er läuft im Wesentlichen wie folgt ab:

- Die Zellstruktur des PS kollabiert nach dem Beginn der Beaufschlagung innerhalb weniger Sekunden.
- Als Resultat der geringen Dichte und der dementsprechend kleinen Ausgangsmasse verbleibt lediglich eine sehr dünne flüssige Schicht.
- Der Abstand der Probe zum Heizer wird dadurch bereits zu Beginn des Versuchs beträchtlich (voreingestellter Abstand zwischen Heizer und Probenoberfläche von in der Regel 25 mm [ISO5560-1] plus nahezu die Probenhöhe des Ausgangsmaterials).
- Die Entzündung findet im Anschluss mit deutlicher Verzögerung statt.
- Es folgt eine stark rußende, kurzzeitige Verbrennung bei kleinen Rückständen.

Auch [Bab02], [Cle91] beschreiben diesen Vorgang und weisen darauf hin, dass bei aufgeschäumten Materialien der Brandklasse B auf Grund deren geringer Dichte in der Regel kein quasistationäres Brandverhalten, wie bei PE und PMMA, zu beobachten ist. Als minimale Bestrahlungsstärke für die Entzündung von PS-Schäumen werden 10 bis 15 kW/m<sup>2</sup> (Fire Propagation Apparatus) genannt [Tew02].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unter Variation der Beaufschlagungsintensität Platten der Höhe 30 mm untersucht. Die gemäß Gleichung (37) geforderte Probenhöhe von 1 bis 2 mm

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

ist damit eingehalten; vielmehr führt die Gleichung infolge der geringen Dichte von EPS zu einer deutlichen Unterbemessung. Tabelle 6-21 fasst die gemessenen Energie- und Leistungsparameter zusammen. Auf Grund der geringen Brenndauer ist wiederum das 60-Sekunden-Mittel für den Brandbeginn angegeben.

**Tabelle 6-21:** Versuchsergebnisse für Polystyrol mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten

Versuch	HFX	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\dot{Q}''_{60s}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{peak}$	$t_{peak}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kJ/g]	[kJ/g]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[s]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>								
Platte B1	35	28,5	28,3	204,4	240,9	195,3	340,6	75
Platte B1	50	28,8	27,7	203,9	372,2	199,2	500,9	47
Platte B1	70	27,7	28,8	210,4	414,3	231,3	703,0	30

Die zugehörigen massenbezogenen Werte und ihre zeitlichen Bezüge gibt Tabelle 6-22 wieder.

**Tabelle 6-22:** Versuchsergebnisse für Polystyrol mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

Versuch	HFX	$m_s$	$\Delta m$	$\dot{m}_{60s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$t_{ign}$	$t_{10}$	$t_{90}$	$t_{fo}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g]	[g]	[g/s]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[s]	[s]	[s]	[s]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>									
Platte B1	35	4,1	4,1	0,072	11,7	49	55	87	115
Platte B1	50	4,3	4,2	0,077	15,2	24	30	50	67
Platte B1	70	4,3	4,3	0,089	21,5	12	18	35	51

Es ist ersichtlich, dass sich Polystyrol B1 bedingt ähnlich zu PE und PMMA verhält: Die Brennstoffbeladung ist zwar vergleichbar der effektiven Verbrennungswärme. Beide Größen sind jedoch deutlich geringer als der Heizwert von PS B1, der mit 35,6 kJ/g angegeben wird [Din02]<sup>9</sup>. (Die die EHC übersteigende Brennstoffbeladung bei 70 kW/m<sup>2</sup> ist auf Messfehler bei der Massenbestimmung zurückzuführen.) Die Änderung der energetischen Größen mit der Bestrahlungsstärke ist wie bei den anderen untersuchten Stoffen der Brandklasse B nur sehr gering. Hingegen steigen die Wärmefreisetzung- und Massenverlustraten mit der HFX an. Dies ist insbesondere beim Maximum  $\dot{Q}''_{peak}$  und bei den Raten der Hauptbrandphase ersichtlich, wo sich zudem die höchsten Werte zeigen. Die Wärmefreisetzungsraten  $\dot{Q}''_{mean}$  und  $\dot{Q}''_{60s}$  steigen dagegen nur geringfügig. Ursächlich hierfür ist der Bezugszeitraum: Ab 50

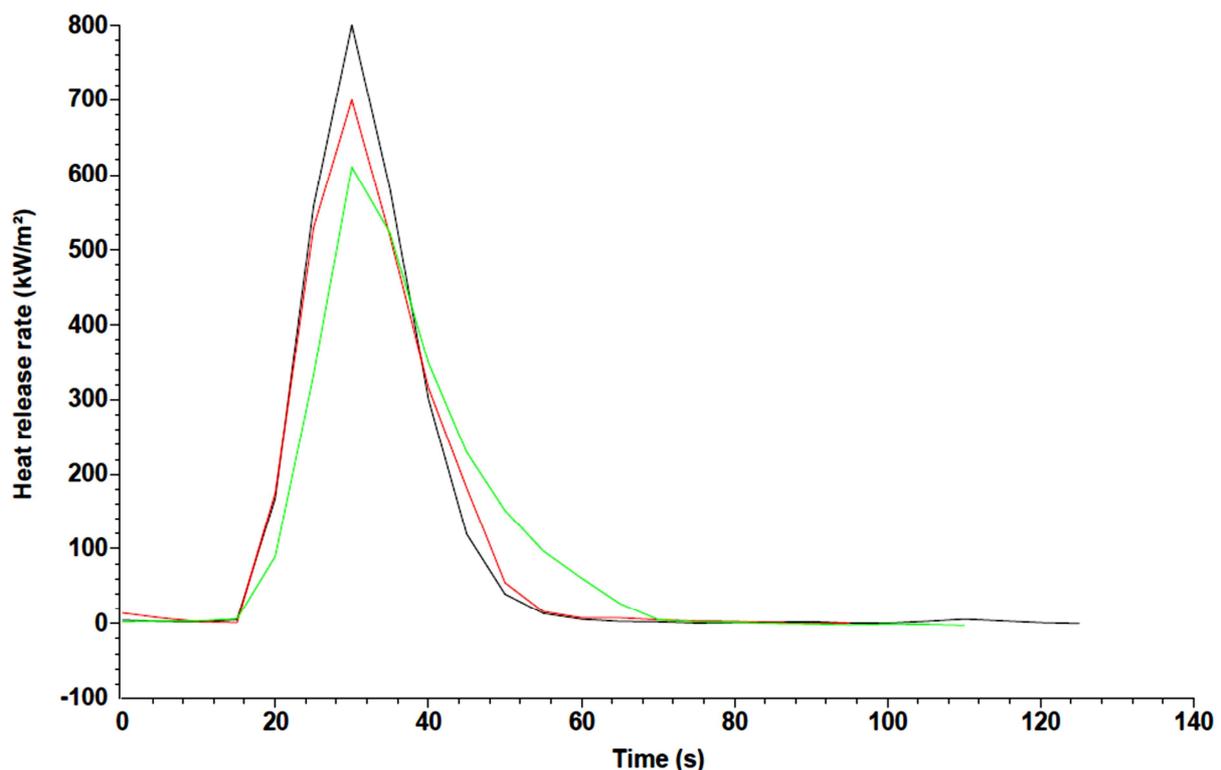
<sup>9</sup> Wie bereits erwähnt, konnte für das untersuchte PS B1 lediglich der Brennwert mit 37,22 kJ/g bestimmt werden (vergleiche Kapitel 4). Der Heizwert nach Norm liegt mit 39,6 kJ/g oberhalb dessen. Es wird daher der Heizwert von 35,6 kJ/g nach [Din02] herangezogen.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

kW/m<sup>2</sup> umfassen die über 60 s gemittelten Raten neben dem eigentlichen Verbrennungsvorgang Zeiten ohne Flammenerscheinung. Darüber hinaus gewinnen bei Proben geringen Gewichts, wie bereits erwähnt, die Phasen der Entzündung und des Abklingens einen großen Einfluss auf das Ergebnis und senken so die HRR  $\dot{Q}''_{\text{mean}}$ . Erneut variiert damit maßgeblich die Geschwindigkeit der Energieumsetzung bei ähnlichen Energieausbeuten.

Auch ohne den direkten Vergleich zu leichtentflammbarem Polystyrol kann auf Grund der in Relation zu PUR B1 hohen Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten angenommen werden, dass das Flammschutzmittel unabhängig von der Bestrahlungsstärke nach der einmal erfolgten Entzündung der Probe seine wesentliche Wirkung einbüßt. Die vergleichsweise hohe Differenz zwischen EHC und FL zum Heizwert mag dementsprechend vielmehr durch den Stoff an sich als durch den Flammschutzzusatz verursacht sein.

Die Entwicklung der HRR von Polystyrol B1 ist in Abbildung 6-14 beispielhaft bei 70 kW/m<sup>2</sup> veranschaulicht. Es ist ersichtlich, dass die Wärmefreisetzungsrate lediglich einen steilen Peak durchläuft.



**Abbildung 6-14:** Wärmefreisetzungsrate von Polystyrol B1 im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, 30 mm, 3 Versuche)

Die Kurven bei geringerer Bestrahlungsstärke verlaufen ähnlich, sind jedoch weniger spitz zulaufend, sondern breiter gestreckt. Ein Plateau wie bei PE und PMMA ist nicht ersichtlich. Dies kann, wie bereits erwähnt, auf die deutlich geringere Dichte und die demzufolge kleine Probenmasse zurückgeführt werden. Resultierend ist auch der Einfluss des Monomeranteils

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

bei der Dekomposition von PS kaum erkennbar; er liegt mit 40,6% [Dry04] zwischen dem von PE und PMMA.

Unter Verwendung der in den Tabellen 6-21 sowie 6-22 genannten Werte und des Heizwerts von 35,6 kJ/g [Din02] ergeben sich die in Tabelle 6-23 dargestellten Faktoren der Verbrennungseffizienz. Zum Vergleich sind die Verbrennungseffizienzen mit dem Heizwert nach Norm in Anhang 8 enthalten. Es wurden mittlere Werte von 0,58 bis 0,80 mit einer Schwankungsbreite von maximal +0,06 / -0,08 (Ausnahme:  $\chi_{HRR,mean}$  mit 0,38 bei +0,09 / -0,08) ermittelt. Die Schwankungen sind damit, im Unterschied zu denen von Polyurethan B1, mit den Ergebnissen der normal- beziehungsweise leichtentflammaren Stoffe vergleichbar. In der Literatur sind für PS im Allgemeinen Effizienzen zwischen 0,65 und 0,691 genannt [Blu03], [Sch11]. Speziell für PS B1 wurde ein Wert von 0,69 bestimmt [Kus15].

**Tabelle 6-23:** Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polystyrol mittels Cone Calorimeter

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,60s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>						
<b>Platte B1</b>	<b>35</b>	0,80	0,80	0,47	0,58	0,80
<b>Platte B1</b>	<b>50</b>	0,81	0,78	0,37	0,61	0,75
<b>Platte B1</b>	<b>70</b>	0,78	0,81	0,30	0,54	0,66
<b>Mittel B1</b>		0,80 (+0,01 -0,02)	0,79 (+0,02 -0,01)	0,38 (+0,09 -0,08)	0,58 (+0,03 -0,04)	0,74 (+0,06 -0,08)

Wie ihre Eingangsgrößen sind die Verbrennungseffizienzen basierend auf den Energien mit ca. 0,80 ähnlich. Bei den auf direkter Basis der HRR berechneten Varianten ist die Effizienz  $\chi_{HRR,60s}$  mit 0,74 am höchsten: Die nur gering mit der HFX ansteigende HRR  $\dot{Q}''_{60s}$  wird offensichtlich durch zum Teil sehr kleine MLR ausgeglichen. Die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  liegt mit 0,58 im Mittelfeld. Am geringsten fällt die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  aus: Hier wird erneut die Konsequenz der Gegenüberstellung von ASMLR und mittlerer HRR deutlich. Die Tatsache, dass die Varianten  $\chi_{HRR,60s}$  und  $\chi_{HRR,mean}$  mit der Bestrahlungsstärke sinken, ist vermutlich auf die erwähnte verkürzte Branddauer zurückzuführen.

Wie bei den Basisgrößen ist mit der Variation der Bestrahlungsstärke keine Änderung der Wirksamkeit des Flammenschutzmittels ersichtlich. Dies bestärkt, dass der Verlust der Struktur zu Beginn der Probenbeaufschlagung den Austritt des Flammenschutzmittels begünstigt. Infolgedessen verbrennt das Material nach der Entzündung vergleichbar leichtentflammarem Material. Der hohe Peak der HRR stützt diese These. PS B1 unterscheidet sich damit von PUR B1, das bis 50 kW/m<sup>2</sup> keine dauerhafte eigenständige Verbrennung gezeigt hat.

Im Vergleich mit PE und PMMA sind die Verbrennungseffizienzen von PS B1 unabhängig von der Variante niedriger. Die Werte sind ähnlich zu PUR B3 und höher als für PUR B1.

### **6.2.3.3. Abschließende Betrachtung schwerentflammbarer Kunststoffe der Brandklassen A und B**

Abschließend werden im Folgenden die Ergebnisse der Versuche mit schwer- und leichtentflammbaren Kunststoffen der Brandklassen A und B zusammenfassend und ergänzend dargestellt. Dabei wird zum Teil auf die bereits erläuterten Resultate des weiteren Probenmaterials Bezug genommen.

Zunächst ist zu bemerken, dass die Schwerentflammbarkeit neben dem Flammschutzzusatz durch die thermische Stabilität der beiden Materialien, resultierend aus einem hohen Vernetzungsgrad sowie aromatischen Ringen in der Hauptpolymerkette, begünstigt wird [Dry04]. In den Flüchtigen enthaltene Aromaten, wie Styrol beziehungsweise Phenylgruppen, bewirken rußhaltige Flammen und rußhaltigen Rauch [Dry04]. So resultieren bereits in dieser Hinsicht reduzierte Verbrennungseffizienzen. Auch innerhalb der Brandklassen sind Unterschiede zu den anderen Versuchsmaterialien vorhanden, die zum Teil weniger auf die Schwerentflammbarkeit, sondern vielmehr auf die typischen Eigenschaften als (Hart-) Schäume zurückgeführt werden können. Maßgeblicher Faktor ist deren geringe Dichte, die zu einer anders gearteten Thermalträgheit und, in Verbindung mit dem vorgegebenen Versuchsaufbau, zu geringen Probenmassen führt. Ein weiterer Aspekt, der aus der kleinen Dichte der Hartschäume folgt, ist, dass die Zündzeit in Verbindung mit der Probenhöhe und der Bestrahlungsstärke von untergeordneter Bedeutung ist. Die Anwendung von Gleichung (37) ist daher weitestgehend unerheblich. Bei Schäumen, die wie PS B1 vor der Entzündung schmelzen, wird die Entzündungszeit vielmehr durch den sich einstellenden, unter Umständen beträchtlichen Abstand zum Heizer determiniert. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Polymere durch eine lange Beaufschlagung vor der Entzündung „ausgasen“ und so ihre schwerentflammbaren Eigenschaften verlieren können [Dry89].

Abbildung 6-15 stellt abschließend die für PUR B3 und B1 berechneten Mittelwerte der fünf Varianten der Verbrennungseffizienz gegenüber (Datengrundlage Tabelle 6-20). Abbildung 6-16 zeigt dies für PS B1 auf der Grundlage von Tabelle 6-23. Die Varianten sind, wie zuvor, von links nach rechts wie folgt dargestellt: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,60s}$ . Desgleichen sind die maximalen und minimalen Abweichungen angegeben.

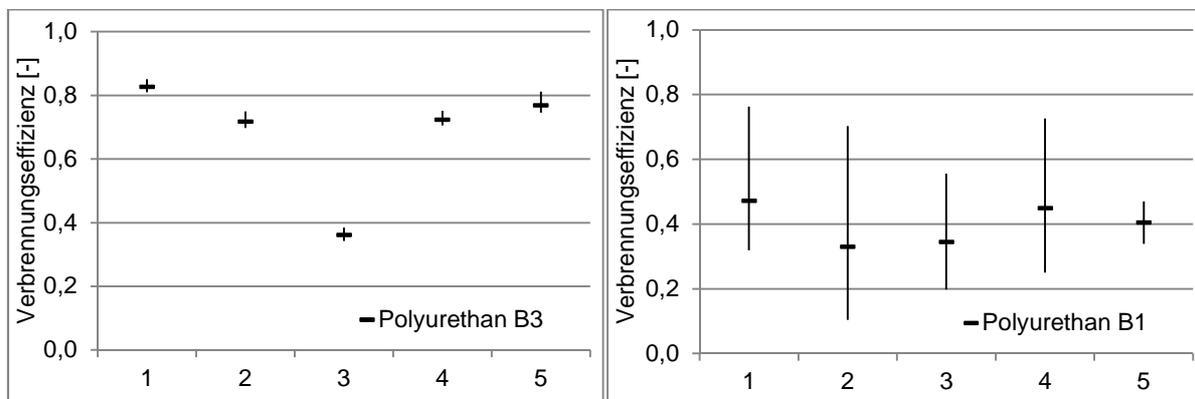
Auf den ersten Blick fallen in Abbildung 6-15 die bereits erwähnten hohen Schwankungen um den Mittelwert von PUR B1 mit maximal +0,37 beziehungsweise +112% und -0,23 beziehungsweise -70% für mittlere Verbrennungseffizienzen von 0,33 bis 0,47 auf. Sie veranschaulichen den erläuterten Einfluss des Flammschutzzusatzes, der bei niedriger Bestrahlungsstärke die Verbrennungseffizienz senkt, mit zunehmender HFX jedoch seine Wirksam-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

keit einbüßt und somit höhere Werte der Verbrennungseffizienz resultieren. Es ist ersichtlich, dass die Maxima der Verbrennungseffizienzen  $\chi_{EHC}$ ,  $\chi_{FL}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  (1, 2, 4) der beiden Polyurethane ähnlich sind. Dagegen bleibt die Verbrennung am Brandbeginn auch bei hoher Bestrahlungsstärke beim schwerentflammaren Material weniger effizient (5). Die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  (3) ist bei beiden Stoffen am kleinsten. Zum weitergehenden Vergleich sind die mittleren Verbrennungseffizienzen von PUR B1 ohne die bei 70 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke gemessenen Werte in Anhang 20 gesondert dargestellt. Unabhängig davon bleibt zur umfassenden Beurteilung des Brandverhaltens die Mittelwertbildung über alle Bestrahlungsstärken sinnvoll.

Im Unterschied zum schwerentflammaren Polyurethan sind die Schwankungsbreiten des leichtentflammaren Materials gering. Sie liegen bei maximal +0,04 / -0,02 (+5% / -3%).

Wie bei PE und PMMA hat sich die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  stabil gezeigt, sodass auch diese Verbrennungseffizienz einen Beitrag zur Charakterisierung des Abbrandverhaltens leisten kann. Ihr vergleichsweise kleiner Wert bei PUR B3 deutet auf einen schnellen Materialumsatz, das heißt hohe Abbrandraten und demzufolge kurze Branddauern, hin. Für das schwerentflammare Material liegt diese Effizienz näher bei den Werten der anderen Varianten: Das Material verbrennt erwartungsgemäß weniger heftig.



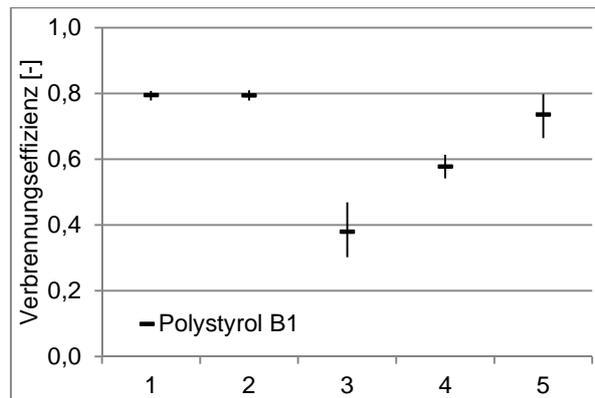
**Abbildung 6-15:** Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 6-20 im Vergleich: links Polyurethan B3, rechts Polyurethan B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,60s}$

Das Bild der Verbrennungseffizienzen von PS B1 (Abbildung 6-16) ähnelt dem des leichtentflammaren PUR. Abweichend sind jedoch die Varianten  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{FL}$  gleich hoch, die Effizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  liegt etwas unterhalb dessen. Demnach nimmt nahezu die gesamte Probe am Verbrennungsprozess teil und die Unvollständigkeit der Verbrennung ist vielmehr aus chemischer Sicht, das heißt durch Produkte der unvollständigen Verbrennung, begründbar. Die vergleichsweise geringe Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,mean}$  deutet darüber hinaus auf ei-

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

nen schnellen Materialumsatz, das heißt eine „heftige“ Verbrennung mit hoher Massenverlustrate, hin.

Die Schwankungsbreiten von Polystyrol liegen bei maximal +0,06 / -0,08 (+8% / -11%). Eine Ausnahme bildet die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  mit +0,09 / -0,08 (+24% / -21%). Im Unterschied zu PUR B1 scheint die höhere Schwankungsbreite jedoch weniger auf die Schwerentflammbarkeit zurückzuführen zu sein. Hierfür spricht, dass die Varianten  $\chi_{EHC}$ ,  $\chi_{FL}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  nur sehr geringe Änderungen mit der HFX durchlaufen. Darüber hinaus war dieser Effekt auch bei Spanplatten zu beobachten. Neben Messunsicherheiten kann eine Änderung des Verhältnisses von der ASMLR zur mittleren HRR mit der HFX ursächlich sein.



**Abbildung 6-16:** Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 6-23 für Polystyrol B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,60s}$

Eine Übersicht, wie sich die Verbrennungseffizienzen von Polyurethan und Polystyrol sowie ihre Basisgrößen mit den variierten Parametern verhalten, zeigen die Tabellen 6-24 und 6-25. Zunächst sind wiederum die Ergebnisse für die Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie für deren Eingangsgrößen dargestellt. Es wird veranschaulicht, dass

- sich die Verbrennungseffizienzen naturgemäß wiederum entsprechend ihren Basisgrößen verhalten,
- die Bestrahlungsstärke die energetischen Größen und die Verbrennungseffizienzen von Polystyrol nicht beeinflusst,
- die Bestrahlungsstärke einen unterschiedlich starken Einfluss auf die energetischen Größen und die Verbrennungseffizienzen von Polyurethan hat, der sich vorwiegend beim schwerentflammaren Material zeigt.

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

**Tabelle 6-24:** Ergebnisse der Parametervariation für leicht- und schwerentflammbare Kunststoffe der Brandklassen A und B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie für deren Eingangsgrößen

Variierter Parameter	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
	[kJ/g]	[kJ/g]	[-]	[-]
<b>Polyurethan</b>				
PUR B3, HFX ↑	o	↗	o	↗
PUR B1, HFX ↑	↗	↑	↗	↑
<b>Polystyrol</b>				
PS B1, HFX ↑	o	o	o	o

Tabelle 6-25 zeigt weiterhin die Ergebnisse für die Wärmefreisetzungs- und Massenverlusten sowie für die auf Basis dessen berechneten Verbrennungseffizienzen. Es ist erkennbar, dass

- die Wärmefreisetzungs- und Massenverlusten tendenziell mit der Bestrahlungsstärke steigen (Ausnahme:  $\dot{Q}''_{60s}$  bei PS B1),
- die Verbrennungseffizienzen von PUR B3 kaum von der HFX beeinflusst werden,
- die Verbrennungseffizienzen von PUR B1 wie ihre Basisgrößen mit der HFX steigen,
- die Verbrennungseffizienzen von Polystyrol entgegen ihren Basisgrößen mit der HFX sinken.

**Tabelle 6-25:** Ergebnisse der Parametervariation für leicht- und schwerentflammbare Kunststoffe der Brandklassen A und B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlusten sowie für deren Eingangsgrößen

Variiert. Param.	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{60s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}_{60s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,60s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[g/(sm <sup>2</sup> )]	[g/s]	[-]	[-]	[-]
<b>Polyurethan</b>								
PUR B3, HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↗	o	o	↗
PUR B1, HFX ↑	↗	↑	↑	↗	↑	↗	↑	↑
<b>Polystyrol</b>								
PS B1, HFX ↑	↗	↑	o	↑	↑	↓	↘	↓

Wie bei den anderen Proben kann hinsichtlich der wachsenden Wärmefreisetzungs- und Massenverlusten festgehalten werden, dass durch Differenzbildung mit den Beaufschlagungsintensitäten ein geringerer Unterschied folgt. Anhand der sinkenden Verbrennungseffizienzen von PS B1 wird die Reduzierung der schwerentflammaren Eigenschaften durch eine längere Beaufschlagung vor der Entzündung in Verbindung mit der „Ausgasung“ des

## 6. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am Cone Calorimeter

---

Flammschutzzusatzes deutlich: In der Konsequenz folgen höhere Verbrennungseffizienzen bei niedrigen Bestrahlungsstärken.

Mit Blick auf den Test schwerentflammbarer Materialien ist zusammenfassend festzuhalten, dass ein entscheidender Einfluss von der Brandklasse ausgeht. In der Brandklasse A wurden die schwerentflammbaren Eigenschaften mit steigender HFX verringert und führten zu einer deutlichen Erhöhung der Verbrennungseffizienz. Hingegen resultierte aus dem Schmelzen von Materialien der Brandklasse B vor der Entzündung eine Verflüchtigung des Zusatzstoffs, die zu ähnlichen oder sogar verringerten Verbrennungseffizienzen bei höheren Bestrahlungsstärken führte. Um diesem Brandverhalten gerecht zu werden, ist es sinnvoll, gerade auf Grund der großen Abweichungen die Mittelwertbildung über alle Bestrahlungsstärken durchzuführen.

---

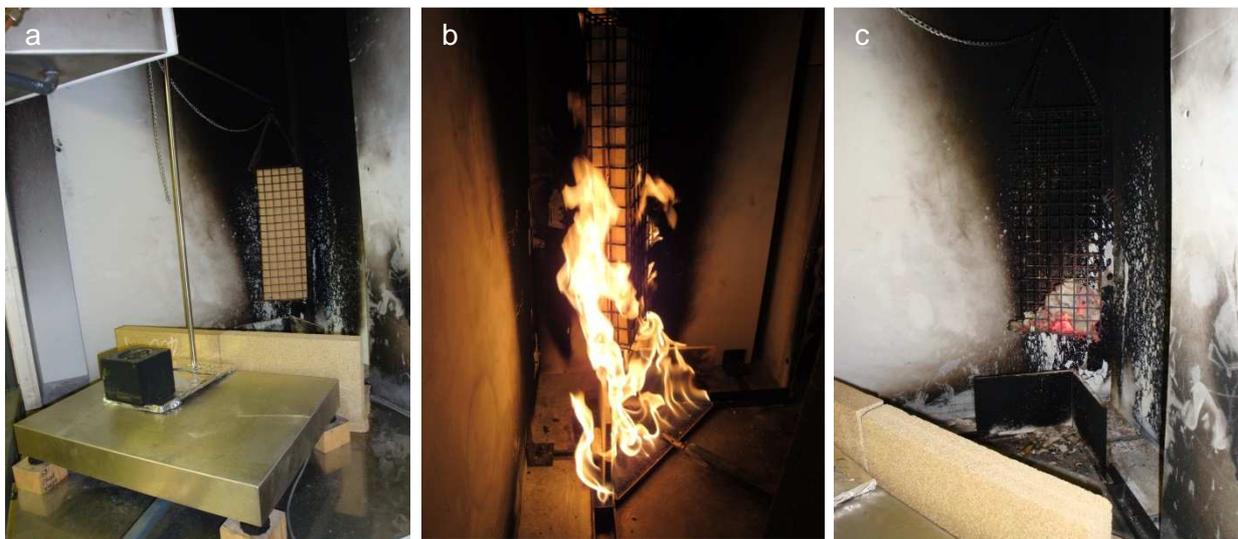
## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test

Im Folgenden werden die am modifizierten Single Burning Item Test gewonnenen Messergebnisse dargestellt und ausgewertet (siehe auch [Kna14], [Kus15]). Die Gliederung erfolgt entsprechend Kapitel 6 anhand der Materialeigenschaften in die Abschnitte Holz und Holzwerkstoffe sowie Kunststoffe. Die angegebenen Größen sind auch hier das arithmetische Mittel von drei Einzelversuchen, wobei im Sinne der Übersichtlichkeit auf den Index „SBI“ verzichtet wird.

Auch in Bezug auf diese Daten sei bemerkt, dass die vergleichsweise detaillierte Auswertung zur Bestimmung von Verbrennungseffizienzen nicht zwangsläufig erforderlich ist. Wie bereits erwähnt, werden die Überlegungen vielmehr vor dem Hintergrund angestellt, die ablaufenden Prozesse und Einflussfaktoren festzuhalten, um beispielsweise bei ähnlichen Fragestellungen die Prüfaufbauten bereits im Vorhinein entsprechend modifizieren zu können.

### 7.1. Holz und Holzwerkstoffe

Bevor auf die Ergebnisse von Fichtenholz und Rohspan P2 eingegangen wird, zeigt Abbildung 7-1 beispielhaft Aufnahmen vor, während und nach einem Test mit Fichtenholz.



**Abbildung 7-1:** Fichtenholz a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 31 kW im modifizierten Single Burning Item Test

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test

Untersucht wurden Platten der Dicken 15 beziehungsweise 16 mm (vergleiche Kapitel 5), die mit einer Brennerleistung von 31 kW für rund 60 min beaufschlagt wurden. Die ermittelten Wärmefreisetzungsraten und Energien sind in Tabelle 7-1 zusammengestellt<sup>10</sup>.

**Tabelle 7-1:** Versuchsergebnisse für Fichtenholz und Rohspan P2 mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten

Messgröße		Fichtenholz	Rohspan P2
$\Delta h_{c,eff}$	[kJ/g]	15,77	16,89
$q$	[kJ/g]	15,74	16,03
$\dot{Q}_{180s}$	[kW]	4,73	8,07
$\dot{Q}_{10-90}$	[kW]	10,89	16,02
$\dot{Q}_{mean}$	[kW]	7,49	11,64
$\dot{Q}_{peak}$	[kW]	15,78	29,78
$t_{peak}$	[s]	542	443

Tabelle 7-2 gibt weiterhin die gemessenen Massenparameter und Bezugszeiten wieder.

**Tabelle 7-2:** Versuchsergebnisse für Fichtenholz und Rohspan P2 mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

Messgröße		Fichtenholz	Rohspan P2
$m_s$	[g]	1697	2620
$\Delta m$	[g]	1693	2487
$\dot{m}_{180s}$	[g/s]	0,72	1,00
$\dot{m}_{10-90}$	[g/s]	0,75	1,04
$t_{10}$	[s]	223	245
$t_{90}$	[s]	2036	2151

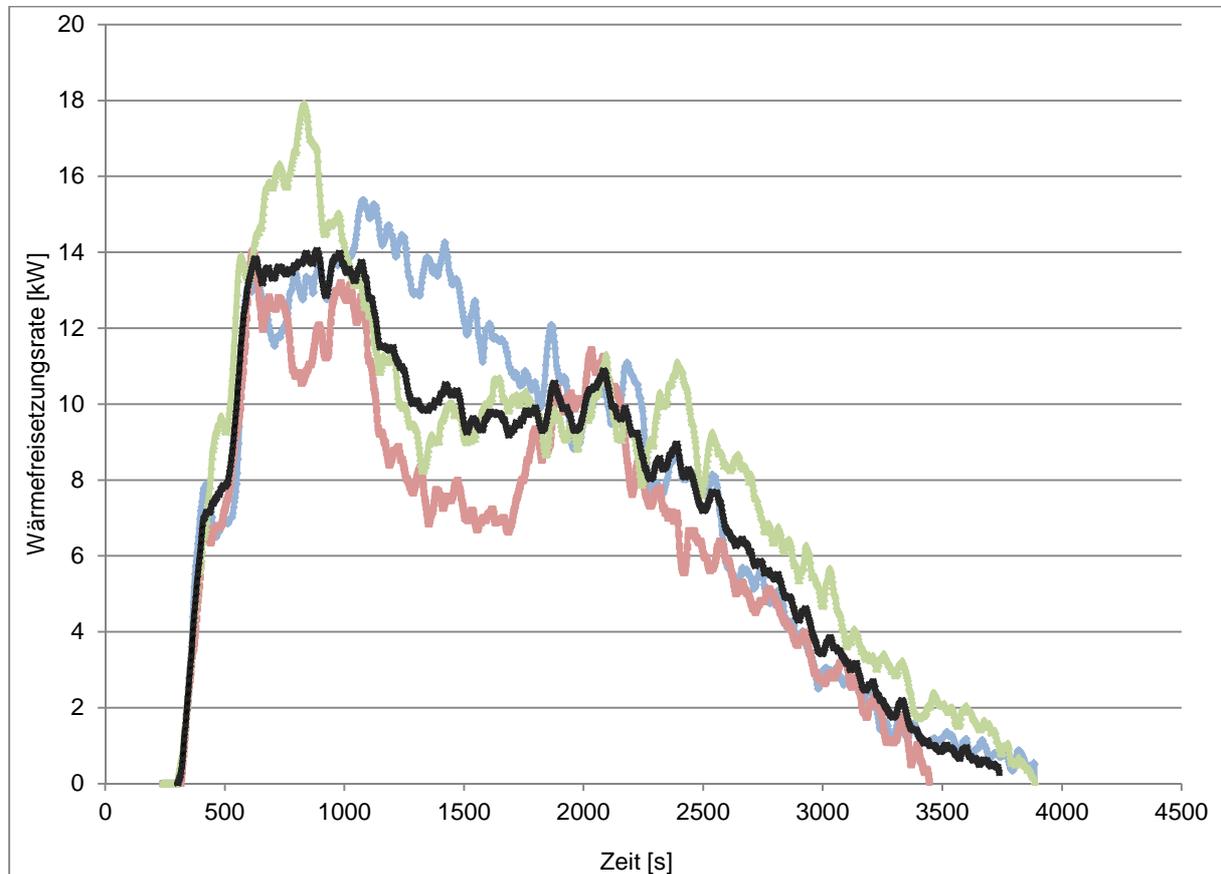
Erwartungsgemäß sind wie bei den Versuchen am Cone Calorimeter die Brennstoffbeladungen geringer als die effektiven Verbrennungswärmen, die wiederum unterhalb der Heizwerte liegen. Die Werte der Spanplatten liegen sowohl für die Energien als auch für die Raten höher als diejenigen von Fichtenholz. Bei ähnlichen Materialbestandteilen liegt ein Grund hierfür in der höheren Dichte von Spanplatten, die, wie bereits erwähnt, einen Anstieg der HRR fördert (vergleiche auch [Cho08]). In Kombination mit größeren Massenverlustraten resultieren so trotz höherem Probengewicht vergleichbare Branddauern. Diese Beobachtung wurde auch im Labormaßstab gemacht (siehe Abschnitt 6.1.).

<sup>10</sup> Bei den Ergebnissen am modifizierten SBI Test ist wie beim Cone Calorimeter der Bezugszeitpunkt mit  $t = 0$  der Beginn der Beaufschlagung, das heißt die Vorlaufzeit des Nebenbrenners von 300 s wird nicht berücksichtigt (vergleiche Kapitel 3).

Da die angegebenen Werte Mittelwerte der in drei Versuchen bestimmten Einzelgrößen sind, müssen sie nicht zwangsläufig mit den im Folgenden dargestellten mittleren Kurven der HRR übereinstimmen (vergleiche beispielsweise Abbildung 7-2). So ist etwa bei Fichtenholz der Peak der HRR der mittleren Kurve kleiner, da die jeweiligen Peaks zu unterschiedlichen Zeiten erreicht wurden und somit durch niedrigere Werte ausgeglichen werden.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test

Die Verläufe der HRR der Einzelversuche zeigt Abbildung 7-2 zunächst für Fichtenholz. Zudem ist der mittlere Verlauf der HRR ersichtlich. Bedingt durch den Versuchsaufbau des SBI Tests erfolgte die Beaufschlagung der Proben, wie bereits erwähnt, nach einer Vorlaufzeit des Nebenbrenners von 300 s.



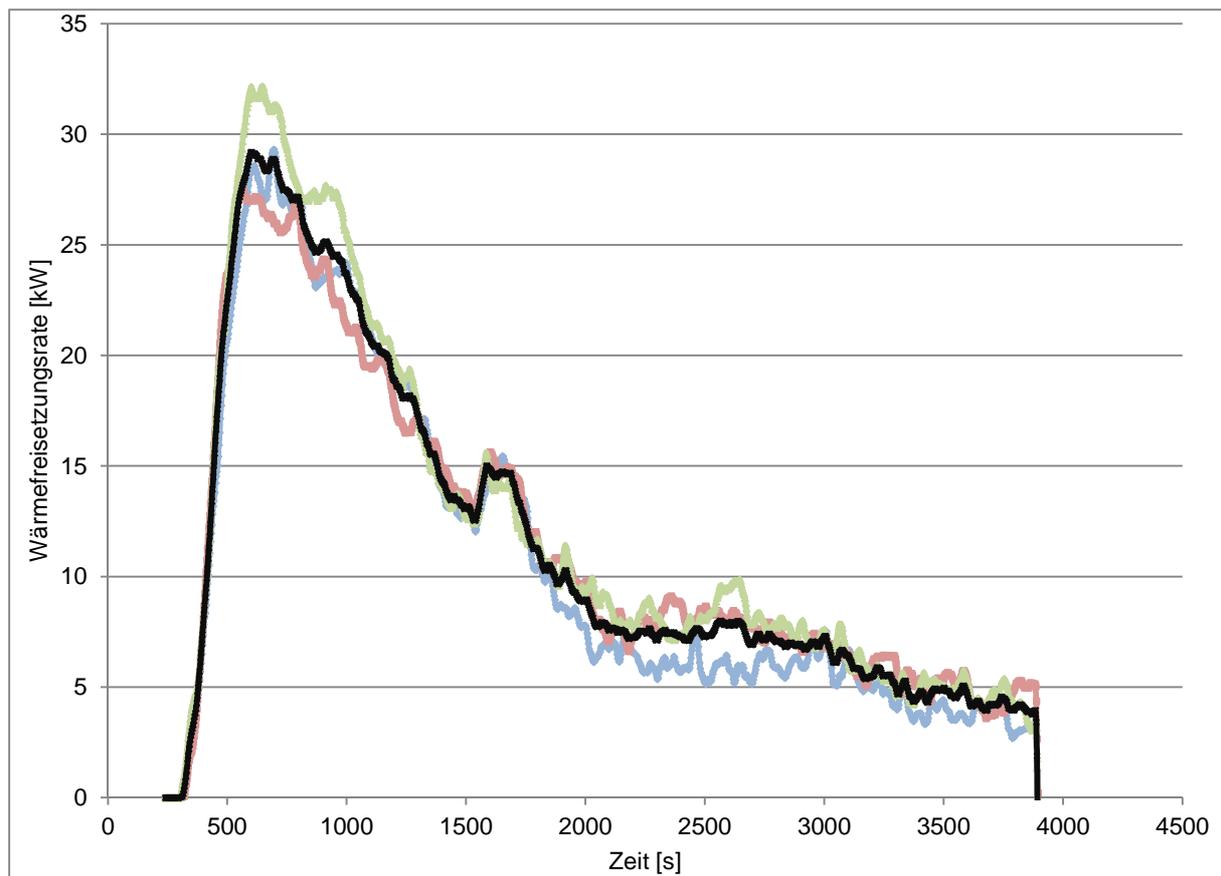
**Abbildung 7-2:** Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Schnittholzplatte 15 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz)

Die Kurven der Wärmefreisetzungsraten der Einzelversuche sind zu Beginn und im letzten Drittel des Verbrennungsprozesses gleichartig. Darüber hinaus zeigen die Einzelversuche unterschiedliche Brandverläufe: Während die HRR bei der roten Kurve zwei Peaks durchläuft, ist für die grüne ein hoher Peak zu Versuchsbeginn mit anschließendem Plateau ersichtlich. Die HRR der blauen Kurve weist ein späteres Maximum auf, worauf ein annähernd stetiger Abfall der HRR folgt. Diese sehr unterschiedlichen Verläufe der HRR, im Anschluss an die Entzündungsphase bis etwa 30 min hiernach, können durch die Struktur der Fichtenholzproben erklärt werden. Zum einen ist der Aufbau des Fichtenholzes naturgemäß gewissen Schwankungen unterworfen. Zum anderen wurde zwar das Holz eines Baums verwendet. Um die erforderliche Probengröße zu erreichen, musste es jedoch zugeschnitten und verleimt werden. So kann die Anzahl und Lage der Leimnähte den Brandverlauf beeinflussen. Darüber hinaus ist eine Aufteilung in drei Probenstücke erfolgt. In der Folge können die

einzelnen Platten zu unterschiedlichen Zeitpunkten in unterschiedlicher Art am Verbrennungsprozess teilnehmen. Ein Beispiel ist das Zerschlagen der Platten in mehrere Teilstücke während der Beaufschlagung. So können infolge der Verbrennung, insbesondere bei der Bildung von Teilstücken, die Proben(-teile) unterschiedliche Positionen zueinander einnehmen. Es resultieren beispielsweise eine höhere spezifische Oberfläche, andersgeartete Wärmeübertragungen und Angriffsmöglichkeiten der Flammen sowie verschiedenartige Temperatur- und Luftverhältnisse. Auch können die unterschiedlichen Zeitpunkte des Auf- und Auseinanderbrechens der Probe (und der Kohleschicht) ein kurzzeitiges „frisches“ Brennstoffangebot in Kombination mit einer verbesserten Angriffsmöglichkeit für das Feuer einen Anstieg der HRR bewirken. Diese Phänomene spiegeln das natürliche Brandverhalten der Hölzer wieder und finden in der Mittelwertbildung Berücksichtigung.

Die untersuchten Spanplatten weisen hingegen fast übereinstimmende Brandverläufe auf, was Abbildung 7-3 veranschaulicht. Ähnlich wie bei Fichtenholz ist stets der erste Peak der HRR maximal. Dem steilen Anstieg zu Beginn des Verbrennungsvorgangs folgt ein zunächst schnelles, dann verzögertes Abklingen. Das Brandverhalten ist demnach gleichmäßiger als bei Fichtenholz. Dies kann durch den im Gegensatz zu Fichtenholz homogenen, dicht gepackten Aufbau der Spanplatten, die eine gepresste Verteilung vieler gleicher Holzstücke darstellen, begründet werden. Zudem neigen sie weniger dazu, in Teilstücke zu brechen. Auffällig ist ein kleiner zweiter Peak der HRR nach etwa 20 minütiger Brenndauer, der bei allen Proben aufgezeichnet wurde. Eine Erklärung kann das Aufbrechen der Proben beziehungsweise Kohleschichten mit den bereits erläuterten Folgen sein.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test



**Abbildung 7-3:** Wärmefreisetzungsrate von Rohspan P2 im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Platte 16 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz)

Zur Bestimmung der Verbrennungseffizienz werden die Energien beziehungsweise Wärmefreisetzungsraten und Massenparameter mit den für die Materialien bestimmten Heizwerten nach [Kna14] kombiniert. Hieraus resultieren die in Tabelle 7-3 dargelegten Werte. Die mit dem Heizwert nach Norm [DIN18230-3] berechneten Verbrennungseffizienzen enthält zum Vergleich Anhang 9.

**Tabelle 7-3:** Faktoren der Verbrennungseffizienz für Fichtenholz und Rohspan P2 mittels Single Burning Item Test (modifiziert)

Material	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Fichtenholz	0,95	0,95	0,60	0,88	0,40
Rohspan P2	1,00	0,95	0,66	0,91	0,48

Es zeigt sich für die beiden Materialien ein ähnliches Bild: Während die auf Basis der Energien berechneten Werte bei 1 liegen, weisen die auf die ersten 180 s nach Versuchsbeginn bezogenen Verbrennungseffizienzen sehr geringe Werte auf. So stehen am Brandbeginn zwar ausreichend Material und Energie zur Verfügung, die Aufbereitung des Materials in Verbindung mit der Sauerstoffzufuhr scheint jedoch unzureichend zu sein (etwa zu geringe spezifische Oberfläche, zu geringe Durchheizung der Probe auf Grund sehr kurzer Vorlauf-

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test

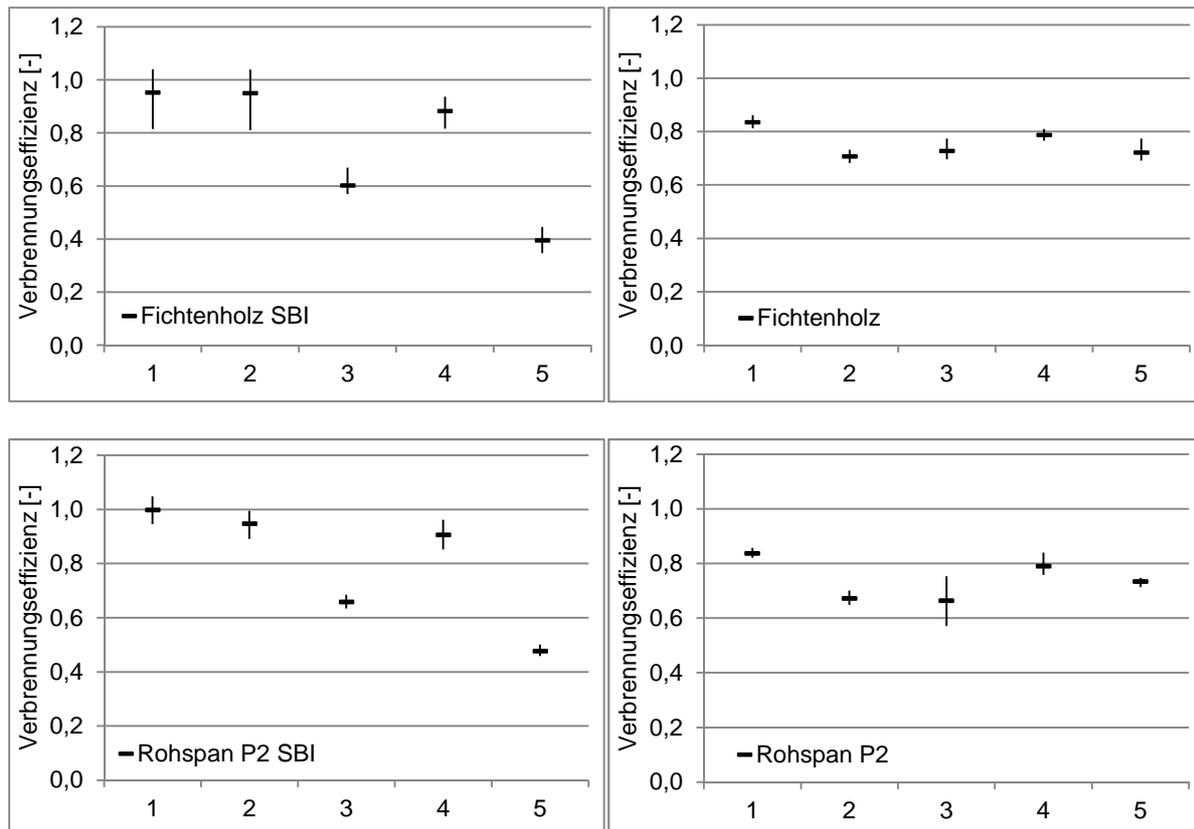
---

zeit). Die weiteren Faktoren der Verbrennungseffizienz auf Basis der HRR liegen zwischen denen des Beginns und denen der Energien. Spanplatten verbrennen etwas effektiver als Fichtenholz. Wie im Labormaßstab werden demnach die deutlich höheren Wärmefreisetzungsraten von Spanplatten weitgehend durch hohe Massenverlustraten ausgeglichen und bleiben bei den Verbrennungseffizienzen verborgen.

Abbildung 7-4 veranschaulicht die Verbrennungseffizienzen aus Tabelle 7-3 mit ihren maximalen und minimalen Abweichungen anhand von Balken. Wie bei den am Cone Calorimeter ermittelten Werten sind sie von links nach rechts wie folgt dargestellt: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$ . Die Schwankungsbreiten bei Spanplatten von maximal  $\pm 0,06$  ( $\pm 6\%$ ) für Verbrennungseffizienzen von 0,48 bis 1,00 sind vergleichbar dem Labormaßstab. Hingegen sind die Schwankungsbreiten bei Fichtenholz mit maximal  $+0,09$  /  $-0,14$  ( $+9\%$  /  $-15\%$ ) bei mittleren Werten der Verbrennungseffizienz von 0,40 bis 0,95 größer. Die errechneten Verbrennungseffizienzen  $> 1$  können einerseits aus Unsicherheiten bei den Versuchen am modifizierten SBI Test, andererseits aus der Heizwertbestimmung, das heißt einem zu niedrig bestimmten Heizwert, resultieren.

Im Unterschied zum Labormaßstab sind sich die Verbrennungseffizienz auf Basis der EHC (1) und der FL (2) sehr ähnlich und liegen nahe 1. Dies weist darauf hin, dass die Verbrennung unter den vorgegebenen Bedingungen sowohl chemisch außerordentlich vollständig verläuft, als auch nahezu die gesamte Probe am Verbrennungsprozess teilnimmt. Es gilt jedoch insbesondere für die Effizienz  $\chi_{FL}$  eingeschränkt, da teilweise Probenmaterial aus dem Träger gefallen ist und somit nicht mehr durch die Abbrandwaage erfasst war. Die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  (3) liegt, im Gegensatz zum mittels CC bestimmten Wert, deutlich unterhalb der Varianten  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$ . Im Zwischenmaßstab verbrennen die Hölzer demnach schneller, das heißt mit vergleichsweise hoher Massenverlustrate in der Hauptbrandphase. Auch im Vergleich zum Labormaßstab ergibt sich für den Brandbeginn mit dem enthaltenen Entzündungsprozess eine deutlich weniger effiziente Verbrennung (5). Ein Grund hierfür kann in der Relation des 3-minütigen Bewertungszeitraums zur Branddauer liegen: Bezogen auf die gesamte Branddauer hat diese Zeitspanne im Zwischenmaßstab einen deutlich geringeren Anteil am Verbrennungsprozess. Der Fokus auf die Entzündungsphase ist demnach stärker. Denkbar ist, dass ein verlängerter Bezugsraum dem Labormaßstab vergleichbarere Werte liefert.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test



**Abbildung 7-4:** Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 7-3 im Vergleich mit den im Labormaßstab gewonnenen Daten (rechts): oben Fichtenholz, unten Rohspan P2. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$

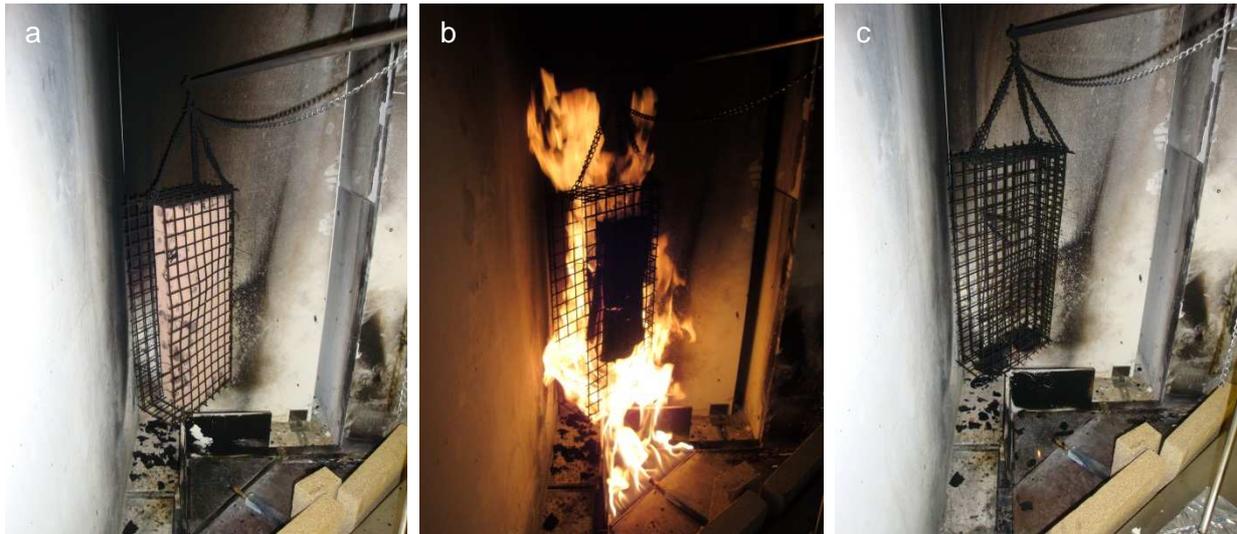
Hinsichtlich des maßstäblichen Vergleichs kann für die Hölzer damit zusammenfassend festgehalten werden, dass

- im Zwischenmaßstab gewonnene Verbrennungseffizienzen meist höher sind als im Labormaßstab (ausgenommen:  $\chi_{HRR,180s}$  bei beiden Materialien geringer,  $\chi_{HRR,mean}$  für Spanplatten identisch),
- die Tendenzen der Verbrennungseffizienzen im Labor- und Zwischenmaßstab vergleichbar sind.

### 7.2. Kunststoffe

Zur weiteren Untersuchung werden im Folgenden die Ergebnisse für Polyurethan B1 und B3 sowie für Polystyrol B1 dargestellt und ausgewertet. Beispielhaft zeigt Abbildung 7-5 zunächst Aufnahmen vor, während und nach einem Versuch mit Polyurethan B1.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test



**Abbildung 7-5:** Polyurethan B1 a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 51 kW im modifizierten Single Burning Item Test

Getestet wurden Platten der Dicke 30 mm bei einer Beaufschlagung von 31 kW beziehungsweise 51 kW (PUR B1). Die Beaufschlagungszeiten lagen bei 15 – 20 min für PS B1, 20 – 30 min für PUR B3 und 45 – 65 min beim schwerentflammbaren PUR. Zu bemerken ist, dass auf Grund der geringeren Abbrandraten bei PUR B1 nur zwei Versuche verwertbare Datensätze bereitstellen konnten. Die resultierenden Wärmefreisetzungsraten und Energien fasst Tabelle 7-4 zusammen.

**Tabelle 7-4:** Versuchsergebnisse für Polyurethan und Polystyrol mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbelastungen und Wärmefreisetzungsraten

Messgröße		Polyurethan B3	Polyurethan B1	Polystyrol B1
$\Delta h_{c,eff}$	[kJ/g]	27,15	15,94	34,32
$q$	[kJ/g]	26,77	15,33	34,13
$\dot{Q}_{180s}$	[kW]	26,10	1,47	15,18
$\dot{Q}_{10-90}$	[kW]	13,12	2,41	21,93
$\dot{Q}_{mean}$	[kW]	6,32	1,11	5,26
$\dot{Q}_{peak}$	[kW]	41,08	4,58	43,08
$t_{peak}$	[s]	158	551	158

Tabelle 7-5 gibt weiterhin die gemessenen Massenparameter und ihre Bezugszeiten wieder.

**Tabelle 7-5:** Versuchsergebnisse für Polyurethan und Polystyrol mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte

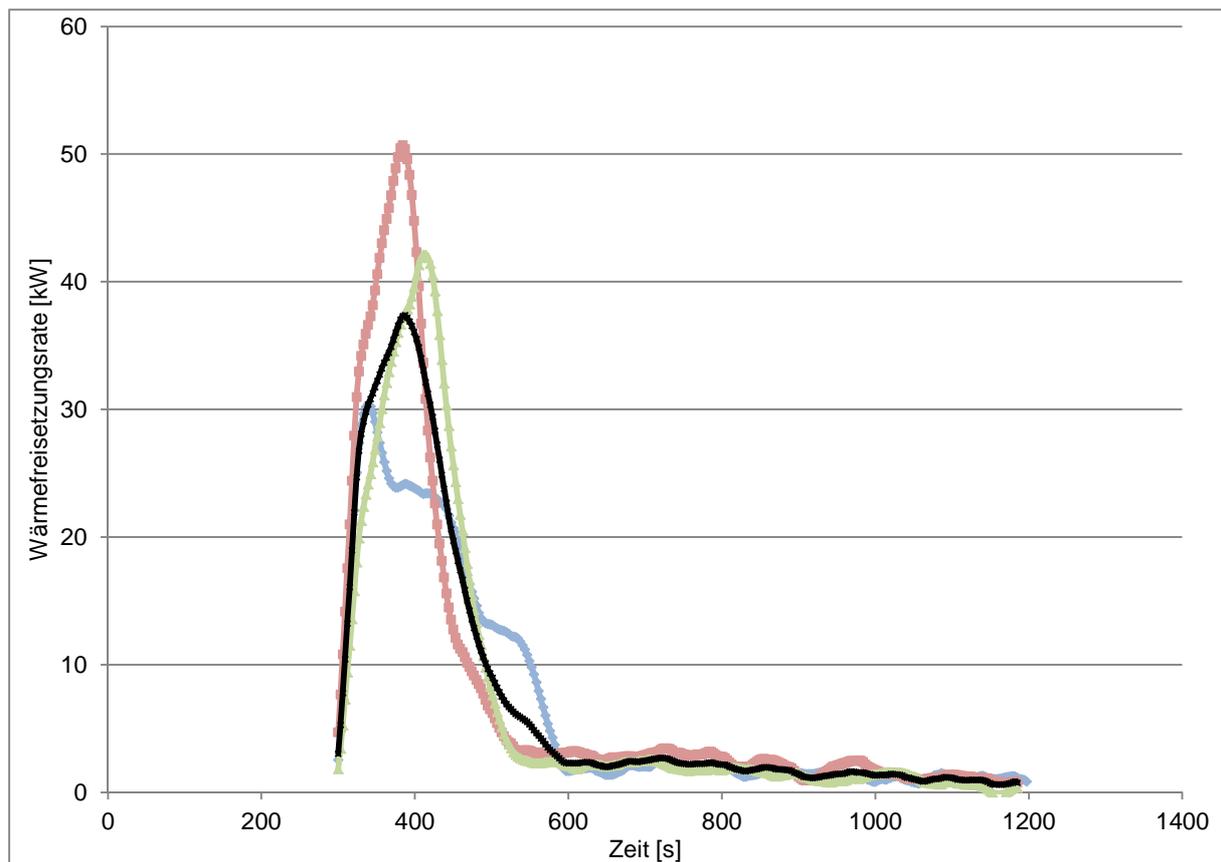
Messgröße		Polyurethan B3	Polyurethan B1	Polystyrol B1
$m_s$	[g]	247	242	107
$\Delta m$	[g]	244	240	106
$\dot{m}_{180s}$	[g/s]	1,07	0,52	0,55
$\dot{m}_{10-90}$	[g/s]	0,60	0,19	0,87
$t_{10}$	[s]	20	39	62
$t_{90}$	[s]	445	1040	166

Erneut sind entsprechend den Erwartungen und wie bei den Versuchen am Cone Calorimeter die Brennstoffbeladungen etwas geringer als die effektiven Verbrennungswärmen, die wiederum unterhalb der Heizwerte liegen. Die für schwerentflammables Polyurethan ermittelten Werte sind trotz wesentlich höherer Beaufschlagung deutlich kleiner als die des leichtentflammabaren Materials. Die energetischen Größen von PS B1 liegen entsprechend dem größeren Heizwert höher.

Bei den Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten bleiben die Werte von PUR B1 noch deutlicher zurück. Eine verminderte Wirksamkeit des Flammschutzzusatzes, wie bei 70 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke am Cone Calorimeter, ist trotz der höher gewählten Brennerleistung von 51 kW nicht ersichtlich. Das Polystyrol zeigt im Vergleich mit Polyurethan geringere Raten zu Beginn der Verbrennung. In der Hauptbrandphase verbrennt es dagegen bei wesentlich höheren Raten. Demnach zeigt der Flammschutzzusatz des Polystyrols zunächst seine Wirkung, büßt sie jedoch schnell ein.

Zur Veranschaulichung der Brandverläufe sind in Abbildung 7-6 die Wärmefreisetzungsraten von PUR B3 dargestellt. Der Verlauf ist vergleichbar dem des Polyurethans im Labormaßstab bei hohen Bestrahlungsstärken: Die HRR steigt zu Beginn steil an, durchläuft ihr Maximum und fällt im Anschluss bis zum Erlöschen neuerlich steil ab. Abweichend hiervon weist ein Kurvenverlauf einen zweistufigen Abfall auf. Er kann durch das Zerschneiden der Probe in Teilstücke resultieren.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test

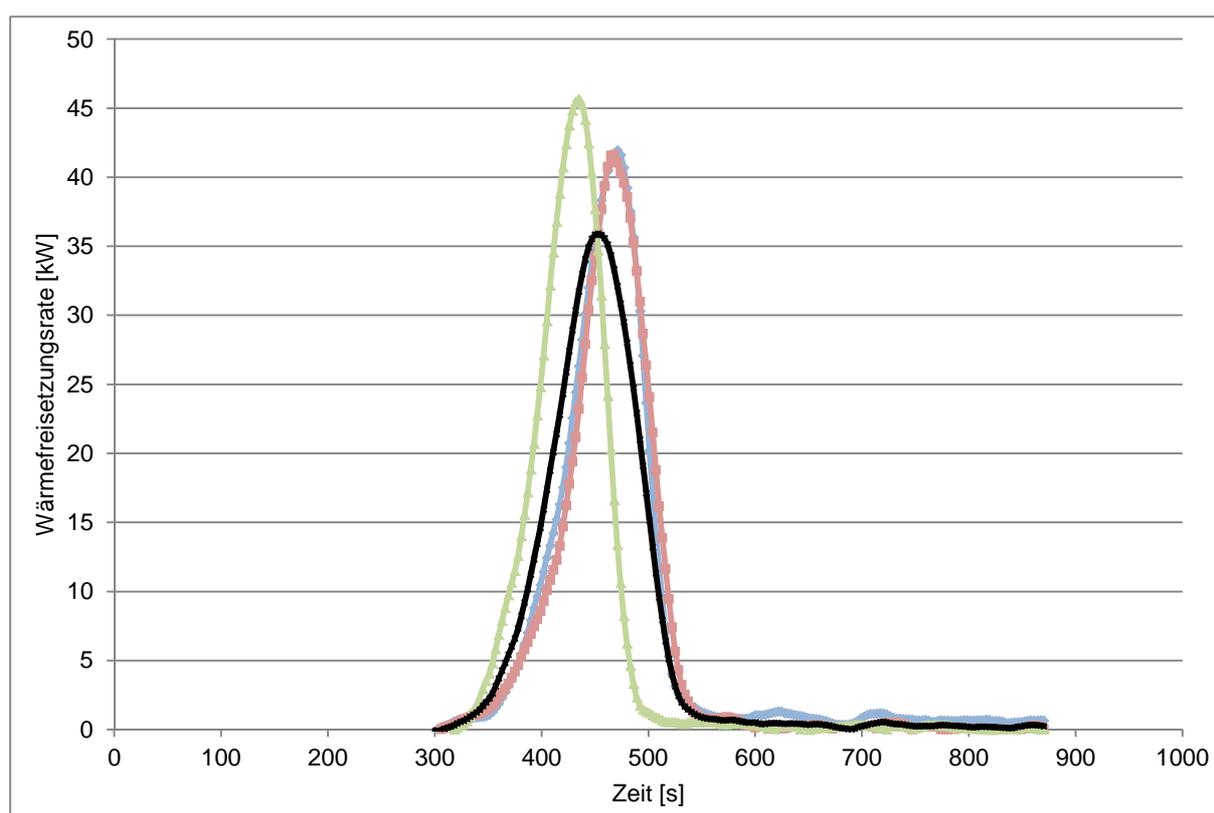


**Abbildung 7-6:** Wärmefreisetzungsrate von Polyurethan B3 im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Platte 30 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz)

Im Gegensatz zum gleichmäßigen Verlauf von PUR B3 schwankt die HRR des schwerentflammbaren PUR deutlich: Wie bei den Versuchen am Cone Calorimeter bei 35 und 50 kW/m<sup>2</sup> verläuft die Verbrennung auf Grund des Flammschutzmittels unregelmäßig und bei sehr niedriger Wärmefreisetzungsrate (vergleiche Tabelle 7-4).

Die Entwicklung der HRR des Polystyrols illustriert Abbildung 7-7: Ähnlich zu PUR B3 zeigt sich lediglich ein ausgeprägter Peak mit steilem An- und Abstieg. In qualitativer Sicht stimmt der Verlauf mit dem des Labormaßstabs (insbesondere für höhere HFX) überein. Die Kurven der Einzelverläufe sind nahezu identisch, was auf das Schmelzen der Probe mit anschließender flüssigkeitsähnlicher, gleichmäßiger Verbrennung zurückgeführt werden kann.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test



**Abbildung 7-7:** Wärmefreisetzungsrate von Polystyrol B1 im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Platte 30 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz)

Werden die Energien beziehungsweise Wärmefreisetzungsraten und Massenparameter mit den für die Materialien bestimmten Heizwerten [Kna14] kombiniert, resultieren die Verbrennungseffizienzen in Tabelle 7-6. Da für Polyurethan B1 in der Norm ein abweichender Heizwert angegeben ist [DIN18230-3], sind die hiermit berechneten Werte zum Vergleich in Anhang 9 enthalten.

**Tabelle 7-6:** Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyurethan und Polystyrol mittels Single Burning Item Test (modifiziert)

Material	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Polyurethan B3</b>	0,99	0,98	0,38	0,98	0,89
<b>Polyurethan B1</b>	0,62	0,60	0,23	0,51	0,11
<b>Polystyrol B1</b>	0,87	0,86	0,15	0,64	0,69

Wie Tabelle 7-6 zeigt, verbrennt Polyurethan B3 vollständiger als Polystyrol B1, das wiederum effizienter als das schwerentflammbare PUR reagiert. Diese Reihenfolge ist nur bei der Variante  $\chi_{HRR,mean}$  nicht eingehalten. Es ergeben sich, wie für die Hölzer, die höchsten Werte bei den auf Basis der Energien berechneten Verbrennungseffizienzen. Die Verbrennungseffizienzen der Hauptbrandphase reichen nur zum Teil hieran an, während die auf den Versuchsbeginn bezogenen Verbrennungseffizienzen meist kleinere Werte aufweisen. Die Fak-

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test

---

toren der Verbrennungseffizienz auf Basis der mittleren HRR und der Massenverlustrate der Hauptbrandphase sind am geringsten. Eine Ausnahme bildet PUR B1: Hier ist die Verbrennung am Brandbeginn sehr ineffizient, was den Einfluss des flammenhemmenden Zusatzstoffs hervorhebt. Bei PS B1 wird vergleichbar zu Spanplatten die deutlich höhere Wärme-freisetzungsrates in der Hauptbrandphase durch hohe Massenverlustraten ausgeglichen und ist bei den Verbrennungseffizienzen nicht ersichtlich.

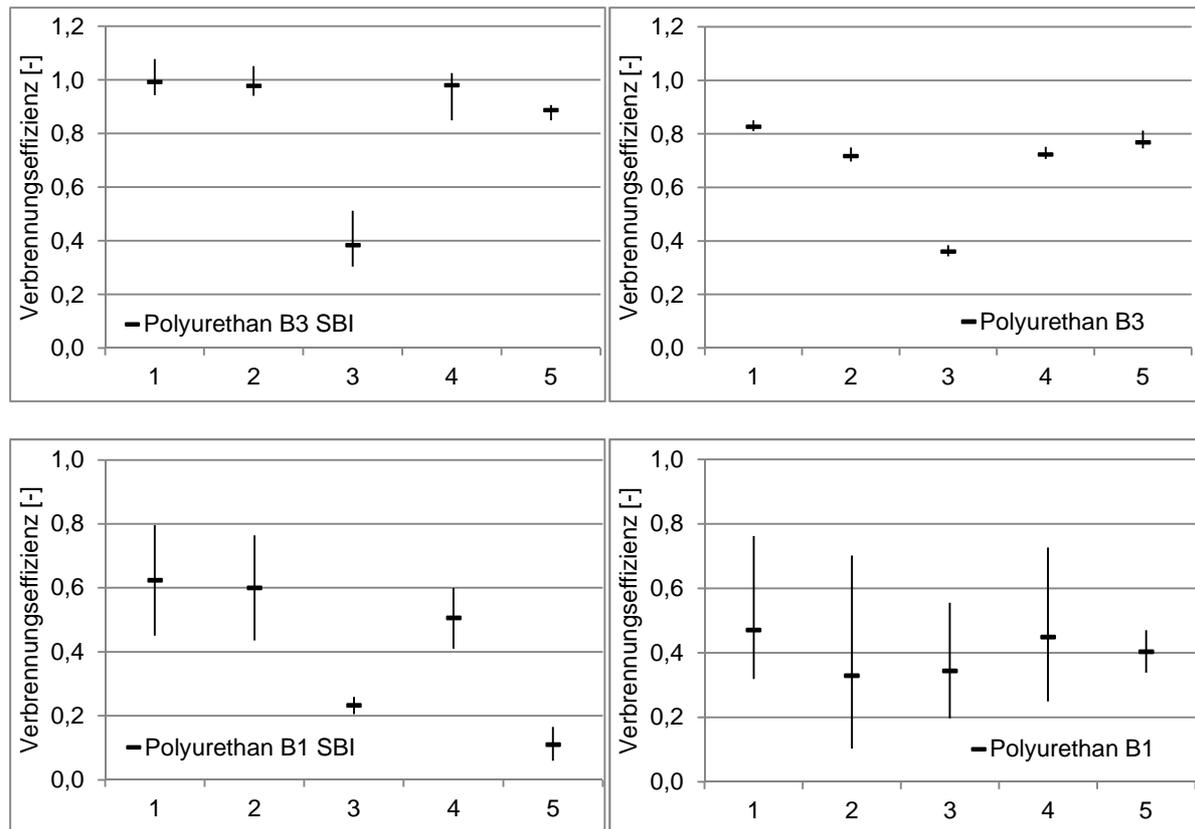
Abschließend werden auch die Verbrennungseffizienzen der Kunststoffe mit ihren maximalen und minimalen Abweichungen im Maßstabsvergleich veranschaulicht (Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9). Die Effizienzen von Polyurethan B3 und Polystyrol B1 zeigen zwar weitestgehend höhere Werte als im Labormaßstab, weisen jedoch jeweils ein ähnliches Bild auf. Für PUR B1 ist ein aussagekräftiger Maßstabsvergleich auf Grund der unterschiedlich beeinträchtigten Wirkung des Flammschutzmittels mit den resultierenden Schwankungsbreiten kritisch. Erneut zeigen sich vereinzelt Verbrennungseffizienzen  $> 1$ , was auf die bereits genannten Ursachen zurückgeführt werden kann.

Die Abweichungen bei PUR B3 sind mit maximal  $+0,09 / -0,13$  ( $+9\% / -13\%$ ) für mittlere Verbrennungseffizienzen von  $0,89$  bis  $0,99$  höher als am Cone Calorimeter (ausgenommen  $\chi_{HRR,mean}$  von  $0,38$  mit  $+0,13 / -0,08$  ( $+34\% / -21\%$ )). Bei PUR B1 liegen die Schwankungsbreiten mit maximal  $+0,18 / -0,17$  ( $+23\% / -27\%$ ) sehr viel geringer als im Labormaßstab. Dies sowie mittlere Verbrennungseffizienzen von  $0,11$  bis  $0,62$  verdeutlichen wiederum das Wirken des Flammschutzzusatzes. Zurückzuführen sind die hohen Schwankungen vermutlich auch auf die bereits erwähnten Unsicherheiten, die infolge der Teilstückbildung entstehen.

Ein Vergleich der Varianten von PUR B3 gemäß Abbildung 7-8 zeigt wie bei den Hölzern, dass sich die Verbrennungseffizienzen auf Basis der EHC (1) und der FL (2) im Zwischenmaßstab ähnlicher sind als im Labormaßstab. Der unvollständige Anteil der Verbrennung ist demnach maßgeblich auf entstehende Produkte der unvollständigen Verbrennung ( $CO$ , fortgetragene Rußpartikel etc.) zurückzuführen. Die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  (3) liegt, ähnlich zum mittels CC bestimmten Wert, deutlich unterhalb der Varianten  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  und weist auf eine schnelle Verbrennung hin. Wie bei den Hölzern ist die Effizienz am Brandbeginn kleiner (5). Denkbar ist auch hier, dass die Bewertung eines weiter gefassten Zeitraums nach der Entzündung dem Labormaßstab vergleichbarere Werte liefert.

Für PUR B1 zeigt sich qualitativ ein ähnliches Bild wie für PUR B3. Lediglich die Verbrennungseffizienz zu Brandbeginn fällt deutlich ab.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test

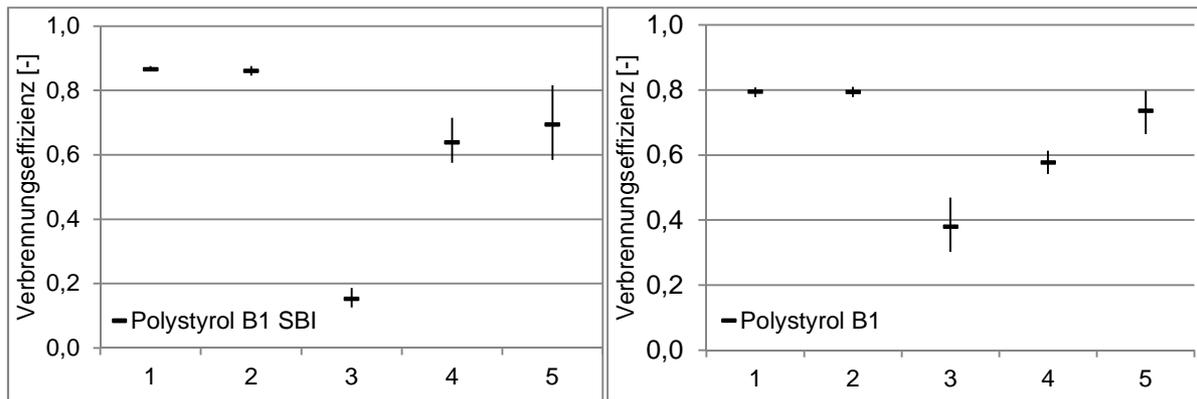


**Abbildung 7-8:** Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 7-6 im Vergleich mit den im Labormaßstab gewonnenen Daten (rechts): oben Polyurethan B3, unten Polyurethan B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$  ( $\chi_{HRR,60s}$  im Labormaßstab)

Wie Abbildung 7-9 darlegt, waren bei PS B1 – im Unterschied zu den getesteten Materialien der Brandklasse A – die Verbrennungseffizienzen auf Basis der EHC (1) und der FL (2) bereits im Labormaßstab vergleichbar hoch. Darüber hinaus zeigte sich schon am Cone Calorimeter die Verbrennung am Brandbeginn (5) effizienter als in der Hauptbrandphase (4). Die Variante  $\chi_{HRR,mean}$  (3) liegt noch deutlicher unterhalb der Effizienzen  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$ . PS B1 verbrennt demnach im Zwischenmaßstab etwas schneller.

Die Schwankungsbreiten bei PS B1 sind mit maximal +0,13 / -0,11 (+19% / -16%) für mittlere Verbrennungseffizienzen von 0,15 bis 0,87 größer als im Labormaßstab. Sie sind am stärksten bei der auf den Beginn bezogenen Effizienz ausgeprägt, was für das hier wirkende Flammenschutzmittel als maßgebliche Ursache spricht.

## 7. Ergebnisse und Auswertung der Versuche am modifizierten Single Burning Item Test



**Abbildung 7-9:** Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 7-6 im Vergleich mit den im Labormaßstab gewonnenen Daten (rechts): Polystyrol B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,180s}$  ( $\chi_{HRR,60s}$  im Labormaßstab)

Damit liegen die im Zwischenmaßstab gewonnenen Verbrennungseffizienzen auch bei den Kunststoffen oftmals höher als im Labormaßstab. Dies kann etwa aus der stärkeren Beaufschlagung im modifizierten SBI resultieren; auch stehen die Proben stets in direktem Kontakt zur Brennerflamme. Beim Cone Calorimeter kommt es im Versuchsverlauf hingegen zwangsläufig zu einer Vergrößerung des Abstandes der Probe zum Heizer, das heißt zur Wärmequelle. Die Tendenzen sind dessen ungeachtet in vielen Punkten den am Cone Calorimeter erzielten Ergebnissen vergleichbar.

Abschließend ist im Maßstabsvergleich für alle mittels modifiziertem SBI getesteten Materialien für die Varianten der Verbrennungseffizienz festzuhalten:

- Es resultieren höhere Werte im Zwischenmaßstab bei den Verbrennungseffizienzen  $\chi_{EHC}$ ,  $\chi_{FL}$ , und  $\chi_{HRR,10-90}$ .
- Es resultieren in der Regel höhere Werte im Labormaßstab bei der auf den Brandbeginn bezogenen Verbrennungseffizienz.
- Es resultieren sehr unterschiedliche Vergleichswerte bei der Variante  $\chi_{HRR,mean}$ : Sie ist im Zwischenmaßstab bei den schwerentflammbaren Materialien geringer, bei PUR B3 und Spanplatten vergleichbar und bei Fichtenholz höher.

---

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

Zur weitergehenden Untersuchung werden die Verbrennungseffizienzen des Labor- und Zwischenmaßstabs im Folgenden anhand statistischer Methoden verglichen. In Abschnitt 8.1. werden vorab die für die Materialien in Plattenform mittels Cone Calorimeter und modifiziertem SBI Test gewonnenen mittleren Verbrennungseffizienzen gegenübergestellt. Hieraus werden materialübergreifende Maßstabsfaktoren berechnet. Diese für jede Variante der Verbrennungseffizienz bestimmten Multiplikatoren finden im anschließenden Maßstabsvergleich mittels statistischer Tests Verwendung.

Für den statistischen Maßstabsvergleich wurden ferner 42 zusätzliche Versuche mit Spanplatten bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke durchgeführt. Ziel dessen waren

- die Gewinnung von Informationen über eine angemessene Grundgesamtheit im Labormaßstab für den Maßstabsvergleich und
- der Vergleich dieser Grundgesamtheit mit der Grundgesamtheit<sup>11</sup> des Zwischenmaßstabs.

Zur Zielerreichung wird wie folgt vorgegangen:

- Testen der Datensätze auf Normalverteilung (NV),
- Vergleich der Datensätze
  - o des Labormaßstabs bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken,
  - o des Labormaßstabs bei einer Bestrahlungsstärke mit dem Zwischenmaßstab,
  - o des Labormaßstabs bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken mit dem Zwischenmaßstab,
- Implementierung der Multiplikatoren, berechnet aus den Resultaten unterschiedlicher Materialien und Bestrahlungsstärken.

In Abschnitt 8.2. wird zunächst die Methodik vorgestellt. Sie basiert darauf, dass die Ähnlichkeit der Datensätze anhand vergleichender Tests überprüft wird. Dies geschieht in Abhängigkeit davon, ob die Daten normalverteilt sind oder einer (beliebigen) anderen Verteilung unterliegen. Basierend auf den Ergebnissen der vergleichenden Tests werden in Abschnitt 8.3. verschiedene Auswertungsmöglichkeiten vorgestellt.

### 8.1. Tabellarische Gegenüberstellung und Generierung von Maßstabsfaktoren

Eine Zusammenstellung der mittleren Verbrennungseffizienzen für die sowohl im Labor- als auch im Zwischenmaßstab getesteten Materialien zeigt Tabelle 8-1 (Datengrundlage Kapitel

---

<sup>11</sup> Wie bereits erwähnt, waren die zur Verfügung stehenden Daten des Zwischenmaßstabs limitiert. Zur statistischen Absicherung der Daten sollten auch hier weitere Versuche erfolgen.

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

6 und Kapitel 7). Die Tabelle lässt eine Reihe an Vergleichen zu, insbesondere betrachtet werden:

- die Rangfolge der Materialien bei gleichbleibendem Maßstab unter Variation der Berechnungsweise,
- die Rangfolge der Materialien bei gleichbleibender Berechnungsweise unter Variation des Maßstabs,
- das Maßstabsverhältnis charakterisiert durch SBI / CC,

wobei die Rangfolge durch die Höhe der Verbrennungseffizienz festgelegt wird.

**Tabelle 8-1: Überblick mittlerer Verbrennungseffizienzen des Labor- und Zwischenmaßstabs**

Material	Small-scale (CC)	Mid-scale (SBI)	Relation SBI / CC
$\chi_{EHC}$ [-]			
<b>Polyurethan B3</b>	0,83	0,99	1,20
<b>Rohspan P2</b>	0,84	1,00	1,19
<b>Fichtenholz</b>	0,84	0,95	1,14
<b>Polystyrol B1</b>	0,80	0,87	1,09
<b>Polyurethan B1</b>	0,47	0,62	1,32
$\chi_{FL}$ [-]			
<b>Polyurethan B3</b>	0,72	0,98	1,36
<b>Rohspan P2</b>	0,67	0,95	1,41
<b>Fichtenholz</b>	0,71	0,95	1,34
<b>Polystyrol B1</b>	0,79	0,86	1,08
<b>Polyurethan B1</b>	0,33	0,60	1,82
$\chi_{HRR,mean}$ [-]			
<b>Polyurethan B3</b>	0,36	0,38	1,06
<b>Rohspan P2</b>	0,66	0,66	0,99
<b>Fichtenholz</b>	0,73	0,60	0,83
<b>Polystyrol B1</b>	0,38	0,15	0,40
<b>Polyurethan B1</b>	0,34	0,23	0,68
$\chi_{HRR,10-90}$ [-]			
<b>Polyurethan B3</b>	0,72	0,98	1,36
<b>Rohspan P2</b>	0,79	0,91	1,15
<b>Fichtenholz</b>	0,79	0,88	1,12
<b>Polystyrol B1</b>	0,58	0,64	1,11
<b>Polyurethan B1</b>	0,45	0,51	1,13
$\chi_{HRR,180s}$ [-]			
<b>Polyurethan B3</b>	0,77 <sup>a</sup>	0,89	1,16
<b>Rohspan P2</b>	0,73	0,48	0,65
<b>Fichtenholz</b>	0,72	0,40	0,55
<b>Polystyrol B1</b>	0,74 <sup>a</sup>	0,69	0,94
<b>Polyurethan B1</b>	0,40 <sup>a</sup>	0,11	0,27

<sup>a</sup> $\chi_{HRR,60s}$  statt  $\chi_{HRR,180s}$

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

---

Im Labormaßstab sind meist die Verbrennungseffizienzen der Hölzer am höchsten, gefolgt von PUR B3 über Polystyrol B1 zu PUR B1. Eine Ausnahme bilden die auf den Brandbeginn bezogene Verbrennungseffizienz sowie die Variante  $\chi_{FL}$ : Hier liegen die Hölzer hinter PUR B3 und PS B1. Dies ist nicht unerwartet, da erstgenannte unter Bildung vergleichsweise großer Kohle- und Ascherückstände verbrennen. Zur Effizienz  $\chi_{HRR,180s}$  ist zu bemerken, dass die Werte dennoch sehr nah beieinander liegen. Dies gilt darüber hinaus für die Variante  $\chi_{EHC}$ . Mit Blick auf die ermittelten Schwankungsbreiten (vergleiche Kapitel 6) ist die Signifikanz der Reihenfolge in diesen Fällen begrenzt.

Im Zwischenmaßstab ist die Rangfolge der Materialien im Wesentlichen vom leichtentflammbaren PUR B3 über die Holzwerkstoffe zu den schwerentflammbaren Baustoffen PS B1 und PUR B1 gegeben. Die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,180s}$  zeigt eine Abweichung hiervon: Die Effizienz des Polystyrols liegt an zweiter Stelle vor Rohspan und Fichtenholz. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Polystyrol unmittelbar nach dem Beginn der Bestrahlung schmilzt, das Flammenschutzmittel ausgast und PS daher nach erfolgter Zündung wie eine Flüssigkeit vergleichsweise effektiv verbrennt. Zu bemerken ist, dass die Werte von PUR B3, Rohspan und Fichtenholz teilweise sehr ähnlich sind. Infolgedessen wird auch hier die Signifikanz der Reihenfolge zum Teil eingeschränkt.

Mit Blick auf die Relation SBI / CC ist ersichtlich, dass bei den Varianten  $\chi_{EHC}$ ,  $\chi_{FL}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  das Verhältnis zwischen den am modifizierten SBI Test und am Cone Calorimeter gewonnenen Werten stets  $> 1$  ist. Die Werte des Zwischenmaßstabs sind demnach bei diesen Varianten beständig höher. Bei den weiteren Varianten wechselt das Verhältnis dagegen. Auf Grund dieser Tatsache sowie den bereits erläuterten kritischen Aspekten die Effizienzen  $\chi_{HRR,mean}$  und  $\chi_{HRR,180s}$  betreffend, liegt der Schwerpunkt der tiefergehenden statistischen Auswertung bei den Varianten  $\chi_{EHC}$ ,  $\chi_{FL}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$ .

Zur Berechnung der mittleren Maßstabsfaktoren werden die Mittelwerte der Relationen SBI / CC mit

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^5 x_i}{5} \quad (38)$$

$\bar{x}$	empirischer Mittelwert (arithmetisch) [-]
$n$	Anzahl eingehender Werte (hier: 5 Materialien) [-]
$i$	(erster) laufender Parameter [-]
$x_i$	$i$ -te Merkmalsausprägung [-]

für jede Variante der Verbrennungseffizienz gebildet. Es resultieren die in Tabelle 8-2 dargestellten Werte.

**Tabelle 8-2:** Mittlere variantenspezifische Faktoren berechnet aus den Versuchsergebnissen unterschiedlicher Material- und Bestrahlungsstärken

Variante		Mittlerer Faktor
$\chi_{EHC}$	[-]	1,19
$\chi_{FL}$	[-]	1,40
$\chi_{HRR,mean}$	[-]	0,79
$\chi_{HRR,10-90}$	[-]	1,17
$\chi_{HRR,180}$	[-]	0,71

Sie werden nachfolgend im Rahmen der statistischen Auswertung des Maßstabsvergleichs integriert. Auffallend ist, dass die Faktoren der Effizienzen  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  mit 1,19 und 1,17 sehr ähnlich sind. Darüber hinaus weisen sie mit +0,13 / -0,10 und +0,19 / -0,06 die geringsten Schwankungsbreiten auf.

## 8.2. Statistische Methode

Bevor die angewendeten statistischen Methoden zum Test der Daten auf Normalverteilung (Unterabschnitt 8.2.2.) sowie auf deren Vergleichbarkeit (Unterabschnitt 8.2.3.) vorgestellt werden, wird in Unterabschnitt 8.2.1. auf die Vertrauenswahrscheinlichkeit derartiger Tests eingegangen.

### 8.2.1. Vertrauenswahrscheinlichkeit

Statistische Tests haben gemein, dass sie keine deterministischen Aussagen treffen, sondern die Ergebnisse mit einer gewissen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  behaftet sind. (Umgekehrt wird das Vertrauensniveau mit  $1 - \alpha$  angegeben.) Die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  gibt dabei lediglich Auskunft darüber, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, eine vorab aufgestellte Testhypothese zu verwerfen, obwohl sie korrekt ist (Fehler 1. Art). Dies verdeutlicht Tabelle 8-3. Der Fehler 2. Art bleibt unbekannt und kann nur durch die Bestimmung einer Gütefunktion näher quantifiziert werden [Har09].

**Tabelle 8-3:** Fehlerarten bei der Durchführung statistischer Tests am Beispiel der Nullhypothese „Die Daten sind normalverteilt.“ in Anlehnung an [Har09]

	Hypothese nicht verworfen (nv)	Hypothese verworfen (v)
Daten tatsächlich normalverteilt	Korrekte Entscheidung	Entscheidung falsch, Fehler 1. Art „ $\alpha$ -Fehler“
Daten tatsächlich nicht normalverteilt	Entscheidung falsch, Fehler 2. Art „ $\beta$ -Fehler“	Korrekte Entscheidung

Wenn  $\alpha$  die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Hypothese abgelehnt wird, obwohl eine Normalverteilung vorliegt, folgt

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

---

- für hohe  $\alpha$  eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass abgelehnt wird, obwohl eine NV vorliegt,
- für kleine  $\alpha$  eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass abgelehnt wird, obwohl eine NV vorliegt.

Jedoch ist es bei kleinen  $\alpha$  wahrscheinlicher, dass eine NV angenommen wird, obwohl tatsächlich keine vorliegt. Es wird in diesem Fall ein sehr hoher Vertrauensbereich gewählt, in dessen Folge die Gefahr einer fehlerhaften positiven Entscheidung steigt.

Mit dem Ziel, den Fehler 1. Art klein zu halten, ist daher die Wahl eines geringen  $\alpha$ -Werts sinnvoll. Hiermit wird jedoch eine höhere Wahrscheinlichkeit für den Fehler 2. Art akzeptiert. Um darüber hinaus den Fehler 2. Art zu verringern, ist es sinnvoll, weitere Tests bei hohem  $\alpha$  durchzuführen und so den akzeptierten Vertrauensbereich klein zu halten.

Es folgt weiterhin, dass bei der Annahme der Hypothese kein Fehler 1. Art vorliegen kann. Durch die Durchführung weiterer Tests mit hohem  $\alpha$  kann in diesem Fall auch der Fehler 2. Art minimiert werden. Umgekehrt gilt: Wird die These abgelehnt, kann kein Fehler 2. Art vorliegen. Weitere Tests bei kleinem  $\alpha$  können hier den Fehler 1. Art verringern.

In der Konsequenz kann festgehalten werden, dass die höchste Sicherheit einer korrekten Entscheidung bei der Ablehnung der Hypothese bei geringem  $\alpha$  vorliegt. Wird die Hypothese angenommen, kann der Fehler 2. Art noch immer hoch sein. Er ist umso geringer, desto höher  $\alpha$  ist. Um beide Fehlerarten zu minimieren, wird daher das Signifikanzniveau variiert.

### 8.2.2. Testen der Daten auf Normalverteilung

Bei der wiederholten, gleichartigen Messung einer Größe sind in der Regel normalverteilte Ergebnisse mit dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  zu erwarten. Da diese Parameter meist unbekannt sind, werden sie aus den Versuchsdaten geschätzt und dann als  $\bar{x}$  und  $s$  gekennzeichnet. Um zu überprüfen, ob die Vermutung normalverteilter Daten tatsächlich zutrifft, können in Abhängigkeit des Ausgangswissens verschiedene Anpassungstests verwendet werden (beispielsweise für bekannte oder unbekannte Stichprobenvarianz). Bei großen Datensätzen wird oftmals der Chi-Quadrat-Anpassungstest angewendet; für kleinere Datensätze wird bevorzugt auf den Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest (KS-Anpassungstest) zurückgegriffen [Har09].

Zur Überprüfung, ob die bestimmten Verbrennungseffizienzen einer Normalverteilung unterliegen, wird der Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest auf nicht näher spezifizierte Normalverteilung angewendet. Durch die Verwendung der  $L_n^{\text{norm}}$ -Verteilung bietet er die Möglichkeit, bei unbekanntem Mittelwert und unbekannter Standardabweichung, wie im vorliegenden Fall, diese Größen aus der Stichprobe zu schätzen. So kann auf die allgemein gehaltene Nullhypothese einer beliebigen Normalverteilung hin getestet werden. Bei der Anwendung

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

---

auf die Datensätze der Verbrennungseffizienz erfolgt damit die material- und maßstabsbezogene Prüfung der Nullhypothese:

$H_0$  „Die Verteilung der Grundgesamtheit der bestimmten Verbrennungseffizienzen des Materials ist eine (beliebige) Normalverteilung.“

Die Alternativhypothese  $H_1$  besagt, dass die bestimmten Verbrennungseffizienzen nicht normalverteilt sind. Es wird zu den Niveaus von

$$\alpha = 0,01; 0,05; 0,1$$

getestet. Die Hypothese der Normalverteilung wird verworfen, wenn

$$L_n^{\text{norm}} \cdot \sqrt{n} > I_{n,1-\alpha}^{\text{norm}} \quad (39)$$

$L_n^{\text{norm}}$  aus den Grunddaten der Variante der Verbrennungseffizienz für das Material berechnetes Supremum [-]

$n$  Anzahl der Werte eines Datensatzes, hier: Anzahl der für das Material, den Maßstab und die Variante bestimmten Verbrennungseffizienzen [-]

$I_{n,1-\alpha}^{\text{norm}}$  tabellierter kritischer Wert zum Test auf nicht spezifizierte Normalverteilung bei  $n$  Werten zum Niveau  $\alpha$  [-]

Zur detaillierten Vorgehensweise sei an dieser Stelle auf das Beispiel in Anhang 21 sowie auf [Har09] verwiesen. In [Har09] sind darüber hinaus die Vergleichswerte der nicht spezifizierten Normalverteilung  $I_{n,1-\alpha}^{\text{norm}}$  zu finden.

### 8.2.3. Testen der Daten auf Vergleichbarkeit

Im vorherigen Unterabschnitt wurde die Prüfung auf Normalverteilung erläutert. Es wurde gezeigt, dass die hierbei gewonnenen Ergebnisse mit unterschiedlichen, nicht näher quantifizierbaren Wahrscheinlichkeiten tatsächlich richtig sind. Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass diese erzielten Ergebnisse tatsächlich richtig sind.

Ziel ist nun, die Verbrennungseffizienzen, maßgeblich die des Labor- und Zwischenmaßstabs, zu vergleichen. Ein Datensatz besteht dabei aus jeweils zwei Untersätzen, die die gemessenen Effizienzen eines Materials, beispielsweise im Labormaßstab bei 35 kW/m<sup>2</sup> und im Zwischenmaßstab, von je einer Variante der Verbrennungseffizienz bilden.

Wurde bei einem solchen Datensatz die Hypothese der Normalverteilung angenommen, erfolgt der Vergleich anhand einer Variante des t-Tests. Für Datensätze, bei denen eine Normalverteilung verworfen wurde, wird der Kolmogoroff-Smirnov-Test (KS-Test) verwendet. Er bietet den Vorteil, auch bei unbekanntem Verteilungsfunktionen der Grundgesamtheiten gültig zu sein. Als Variante wird der KS-Test bei ungleichen Reihenlängen vorgestellt, da die zu vergleichenden Versuchsreihen oftmals unterschiedlich umfangreich waren. Nachstehend

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

---

wird zunächst die Vorgehensweise mittels t-Test kurz erläutert. Es schließen Ausführungen zum KS-Test an.

Beim t-Test für unabhängige Stichproben mit ungleichen Varianzen wird die Nullhypothese materialbezogen für jede Variante der Verbrennungseffizienz untersucht. Sie lautet:

$H_0$  „Die Differenz der bestimmten mittleren Verbrennungseffizienzen des Materials ist  $\mu_1 - \mu_2 = d = 0$ .“

(Alternativhypothese  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq d$ ). Es wird zu den Niveaus von

$$\alpha = 0,01; 0,05; 0,1$$

getestet. Die Hypothese der Gleichheit der Mittelwerte wird verworfen, wenn

$$|t| > t_{k;1-\frac{\alpha}{2}} \quad (40)$$

$t$  aus den Grunddaten der Variante der Verbrennungseffizienz für das Material berechnete Realisation der standardisierten, approximativ t-verteilten Zufallsvariable [-]

$k$  Anzahl der Freiheitsgrade [-]

$t_{k;1-\frac{\alpha}{2}}$  tabelliertes Quantil der t-Verteilung bei  $k$  Freiheitsgraden zum Niveau  $\frac{\alpha}{2}$  [-]

(zweiseitiges Testproblem) [Har09]. Neben der beispielhaften Berechnung in Anhang 22 sei zur detaillierten Vorgehensweise auf [Har09] verwiesen. Hier sind darüber hinaus die Quantile der t-Verteilung zu finden.

Beim Kolmogoroff-Smirnov-Test wird die Nullhypothese ebenso materialbezogen für jede Variante der Verbrennungseffizienz untersucht. Sie lautet:

$H_0$  „Die Verteilungen der bestimmten Verbrennungseffizienzen des Materials stimmen überein:  $F_1(x) = F_2(x)$ .“

(gegen  $H_1: F_1(x) \neq F_2(x)$  für mindestens ein  $x$ ).

Es wird zu den Niveaus von

$$\alpha = 0,05; 0,1; 0,2$$

getestet. Für ungleiche Reihenlängen wird die Hypothese der Gleichheit verworfen, wenn

$$K_{n_1, n_2} > k_{n_1, n_2; 1-\alpha} \quad (41)$$

mit

$$K_{n_1, n_2} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \cdot D_{n_1, n_2}(1, 2) \quad (42)$$

$K_{n_1, n_2}$	aus den Grunddaten der Variante der Verbrennungseffizienz für das Material berechnete Realisation bei ungleichen Reihenlängen [-]
$n_1, n_2$	Anzahl der Werte der Reihe 1 beziehungsweise der Reihe 2, hier: Anzahl der für das Material und die Variante je Reihe bestimmten Verbrennungseffizienzen [-]
$k_{n_1, n_2; 1-\alpha}$	tabellierter kritischer Wert zum KS-Test bei den Reihenlängen $n_1$ und $n_2$ zum Niveau $\alpha$ [-]
$D_{n_1, n_2}(1, 2)$	größter vertikaler Abstand zwischen den empirischen Verteilungsfunktionen der Reihen 1 und 2 der Variante der Verbrennungseffizienz des Materials [-]

(zweiseitiges Testproblem) [Har09]. Neben der beispielhaften Berechnung in Anhang 23 sei zur detaillierten Vorgehensweise auf [Har09] verwiesen. Hier sind darüber hinaus die Berechnungsweise bei gleichen Reihenlängen und die kritischen Werte zum KS-Test enthalten.

### 8.3. Vergleich der Ergebnisse des Labor- und Zwischenmaßstabs

Nachdem die Methode dargelegt wurde, erfolgt nun die statistische Auswertung der am Cone Calorimeter und am modifizierten SBI Test bestimmten Varianten der Verbrennungseffizienz. Vorab wird auf das erweiterte Testregime des Labormaßstabs eingegangen.

#### 8.3.1. Testen der Daten auf Normalverteilung

Wie bereits erwähnt, unterliegen die am Cone Calorimeter bei unterschiedlichen Beaufschlagungsintensitäten gewonnenen Daten nicht zwangsläufig identischen Verteilungen. Um genauere Informationen hierzu zu erhalten, wurden 42 zusätzliche Versuche mit Rohspan P2 der Höhe 10 mm bei Bestrahlungsstärken von 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> durchgeführt. Das Ziel des Testregimes war es, eine Konstellation bereitzustellen, die größtmögliche Abweichungen erwarten lässt. Dies wird zum einen durch die inhomogene Materialzusammensetzung von Spanplatten erreicht: Über die erwartungsgemäßen Schwankungsbreiten hinaus wurden bei den Tests bereits für die Probenzuschnitte aus einer Spanplatte zum Teil erhebliche Dichteunterschiede festgestellt, die vermutlich auf das Herstellungsverfahren zurückgehen. Zum anderen gehen mit 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> die geringste und die höchste der berücksichtigten Bestrahlungsstärken ein. Die so bestimmten Faktoren der Verbrennungseffizienz sind in Anhang 24 hinterlegt. Sie bilden die Datenbasis der labormaßstäblichen statistischen Auswertung dieses Unterabschnitts. Zum besseren Vergleich sind neben den Mittelwerten und den

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

Standardabweichungen als normierte Größen die Variationskoeffizienten angegeben. Es zeigen sich maximale Schwankungen von  $\pm 0,04$  beziehungsweise  $\pm 5\%$  (Ausnahme:  $\chi_{HRR,mean}$  mit  $+11\%$  /  $-5\%$ ). Dies bestärkt [Wil05] in seiner Aussage, dass die in der Norm angegebenen Unsicherheiten [ISO5660-1] deutlich unterschritten werden können. Seitens des Zwischenmaßstabs werden die Daten aus Kapitel 7 herangezogen.

Vorab sei bemerkt, dass bei allen Datensätzen die Mediane und Mittelwerte jeweils nahezu identisch sind. Dies gilt über alle untersuchten Varianten und Bestrahlungsintensitäten hinweg. Ein erster Anhaltspunkt auf normalverteilte Daten ist somit gegeben.

Die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung zeigt Tabelle 8-4. Für den Labormaßstab ist ersichtlich, dass bei den Varianten  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  die Hypothese normalverteilter Daten bei allen getesteten Vertrauensniveaus angenommen wurde. Zur Effizienz auf Basis der FL sei bemerkt, dass die These der Normalverteilung bei  $35 \text{ kW/m}^2$  nur sehr knapp verworfen werden musste. Die Verbrennungseffizienzen  $\chi_{HRR,mean}$  und  $\chi_{HRR,180s}$  unterliegen scheinbar keiner Normalverteilung, wobei der Grund hierfür zunächst nicht ersichtlich ist. Im Zwischenmaßstab wird die Hypothese der Normalverteilung stets angenommen. Basierend auf drei Tests am modifizierten SBI ist die Aussagekraft zur Verteilung der Ergebnisse des Zwischenmaßstabs jedoch begrenzt.

**Tabelle 8-4:** Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung für Rohspan P2 bei 35 und 70  $\text{kW/m}^2$  im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche) sowie im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche)

Variante	Prüfung auf NV mit $\alpha$ , CC 35 $\text{kW/m}^2$			Prüfung auf NV mit $\alpha$ , CC 70 $\text{kW/m}^2$			Prüfung auf NV mit $\alpha$ , SBI (modifiziert)		
	0,01	0,05	0,10	0,01	0,05	0,10	0,01	0,05	0,10
$\chi_{EHC}$	nv	nv	nv	nv	nv	nv	nv	nv	nv
$\chi_{FL}$	nv	v	v	nv	nv	nv	nv	nv	nv
$\chi_{HRR,mean}$	nv	nv	v	nv	nv	v	nv	nv	nv
$\chi_{HRR,10-90}$	nv	nv	nv	nv	nv	nv	nv	nv	nv
$\chi_{HRR,180s}$	nv	v	v	nv	v	v	nv	nv	nv

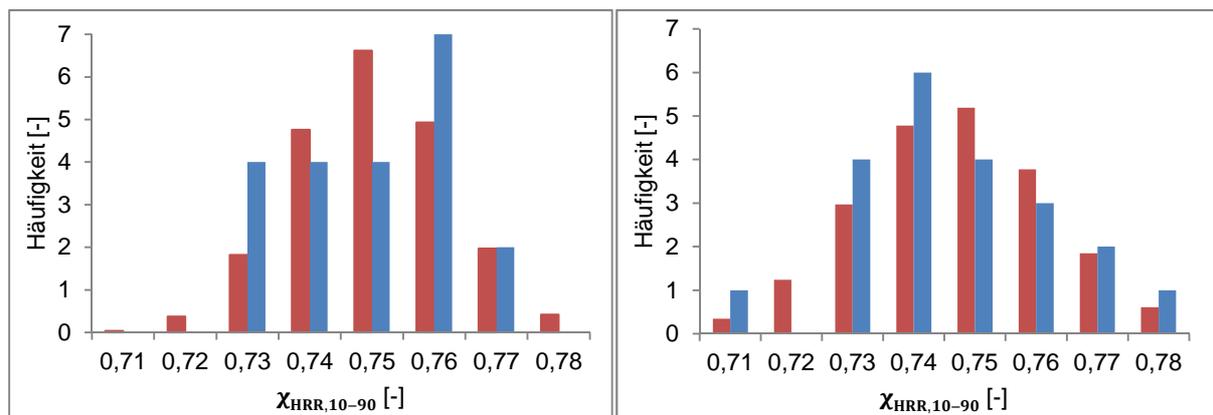
Neben den statistischen Tests werden zur Veranschaulichung Histogramme sowie Quantil-Quantil-Plots (Rankit Q-Q-Plots) erstellt. Sie bieten den Vorteil, dass eventuelle Abweichungen von der Normalverteilung unmittelbar in ihrer Ausprägung ersichtlich werden. Hierzu werden die Daten transformiert und den zu erwartenden Quantilen der Standardnormalverteilung gegenübergestellt. Für normalverteilte Daten folgt die Winkelhalbierende  $y = x$ : eine Gerade mit der Steigung der Standardabweichung der Standardnormalverteilung von  $\sigma = 1$  und dem Achsenabschnitt des Mittelwerts dieser Verteilung von  $\mu = 0$ .

In den Abbildungen 8-1 und 8-2 sind die Histogramme und Q-Q-Plots beispielhaft für die Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  dargestellt. Entsprechende Diagramme für die Verbren-

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

nungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbelastung enthalten die Anhänge 25 bis 28. Die Varianten  $\chi_{HRR,mean}$  und  $\chi_{HRR,180s}$  unterliegen offensichtlich keiner Normalverteilung, zur Illustration der Form der Abweichung wurden daher lediglich Q-Q-Plots erstellt. Sie sind in den Anhängen 29 und 30 zu finden. Mit Blick auf die Effizienz  $\chi_{FL}$ , bei der die Hypothese der Normalverteilung nur sehr knapp verworfen wurde, sei bemerkt, dass auch der Q-Q-Plot tendenziell normalverteilte Werte vermuten lässt.

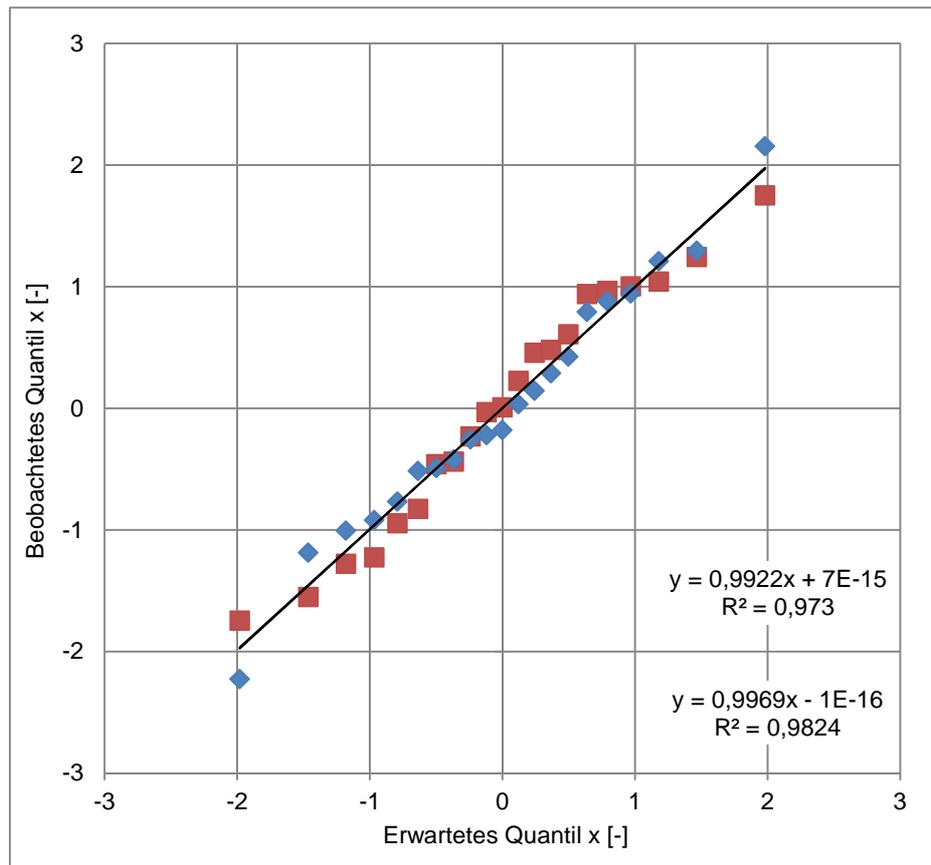
Abbildung 8-1 zeigt zunächst die Histogramme der Versuche bei 35 kW/m<sup>2</sup> (links) und 70 kW/m<sup>2</sup> (rechts). Die gemäß Normalverteilung zu erwartenden Häufigkeiten sind rot, die tatsächlichen Häufigkeiten blau gekennzeichnet.



**Abbildung 8-1:** Histogramme zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  von Rohspan P2 im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; links 35 kW/m<sup>2</sup>, rechts 70 kW/m<sup>2</sup>; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung)

Es ist eine größere Schwankungsbreite bei höherer Beaufschlagungsintensität ersichtlich. Darüber hinaus zeigt sich eine gewisse Tendenz zu geringeren Werten der Verbrennungseffizienz bei 70 kW/m<sup>2</sup> als bei 35 kW/m<sup>2</sup>.

In Abbildung 8-2 ist weiterhin das Q-Q-Diagramm der Daten ersichtlich, zunächst für getrennte Bestrahlungsstärken. Die bei 35 kW/m<sup>2</sup> gemessenen Werte sind rot, die bei 70 kW/m<sup>2</sup> bestimmten sind blau gekennzeichnet.



**Abbildung 8-2:** Quantil-Quantil-Plots und lineare Regressionsgeraden zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  von Rohspan P2 bei 35 (rot, Gleichung oben) und 70 kW/m<sup>2</sup> (blau, Gleichung unten) im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)

Es ist ersichtlich, dass die beiden Regressionsgeraden mit Steigungen von etwa Eins sowie Achsenabschnitten von nahezu Null bei hohen Bestimmtheitsmaßen dem idealen Q-Q-Plot normalverteilter Daten sehr ähnlich sind.

### 8.3.2. Testen der Daten auf Vergleichbarkeit

Im Folgenden werden zunächst die labormaßstäblichen Datensätze verglichen. Hieran schließt der maßstabsübergreifende Vergleich an. Im Zuge dessen wird die bereits in Abschnitt 8.1. entwickelte Idee des materialübergreifenden Maßstabsfaktors aufgegriffen und getestet.

#### 8.3.2.1. Vergleich der Datensätze des Labormaßstabs bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken

Tabelle 8-5 zeigt die Testergebnisse des Vergleichs der beiden Bestrahlungsstärken. Es ist ersichtlich, dass bei den Varianten  $\chi_{EHC}$ ,  $\chi_{HRR,10-90}$  und  $\chi_{HRR,180s}$  die Gleichheit bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken angenommen wird.

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

**Tabelle 8-5:** Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)

Variante	Gleichheit bei NV mit $\alpha$			Gleichheit ohne NV mit $\alpha$		
	0,01	0,05	0,10	0,05	0,10	0,20
$\chi_{EHC}$	nv	nv	nv	-	-	-
$\chi_{FL}$	nv	v	v	-	v	v
$\chi_{HRR,mean}$	v	v	-	-	-	v
$\chi_{HRR,10-90}$	nv	nv	nv	-	-	-
$\chi_{HRR,180s}$	(nv)	-	-	-	nv	nv

Allein die Varianten  $\chi_{EHC}$  und  $\chi_{HRR,10-90}$  zeigen ein positives Testergebnis auf Gleichheit der Mittelwerte bei normalverteilten Werten. Die Bildung der Grundgesamtheit bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken und deren Überprüfung auf NV beschränkt sich daher auf diese Verbrennungseffizienzen. Tabelle 8-6 zeigt die Testergebnisse dieser kumulierten Auswertung.

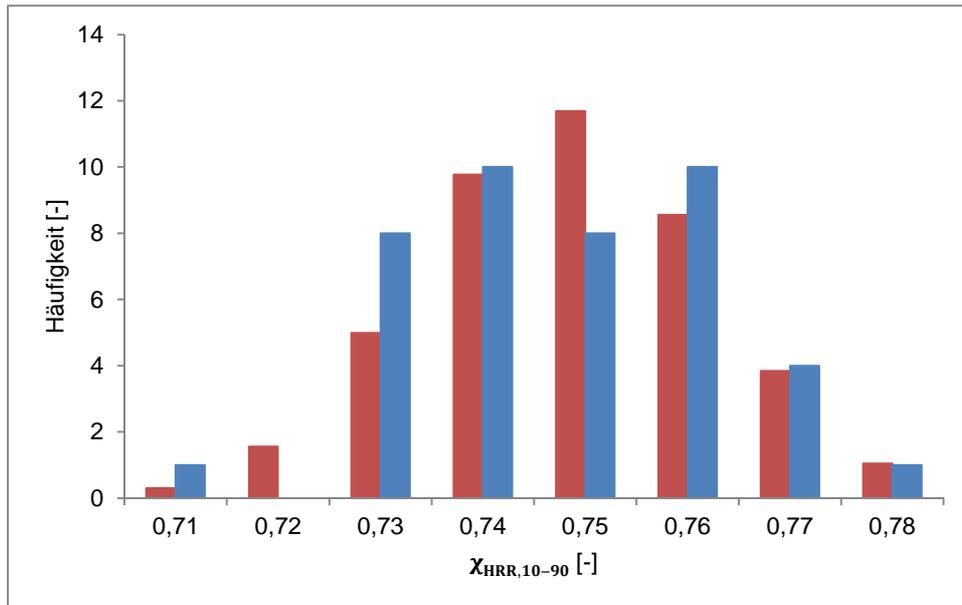
**Tabelle 8-6:** Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung für Rohspan P2 bei der Zusammenfassung der Ergebnisse von 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)

Variante	Prüfung auf NV mit $\alpha$ , CC 35 und 70 kW/m <sup>2</sup>		
	0,01	0,05	0,10
$\chi_{EHC}$	nv	v	v
$\chi_{HRR,10-90}$	nv	v	v

Gemäß dem KS-Anpassungstest wird die Hypothese der Normalverteilung bei den gemischten Datensätzen nur beim geringsten  $\alpha$ -Niveau angenommen. Um Aufschluss über die Ausprägungen der Abweichungen von der Normalverteilung zu gewinnen, sind die Verbrennungseffizienzen im Folgenden grafisch der Normalverteilung gegenübergestellt. Dies geschieht in Abbildung 8-3 zunächst in Form eines Histogramms, in Abbildung 8-4 als Q-Q-Plot. Erneut sind die Ergebnisse der Effizienz der Hauptbrandphase dargestellt; für die Variante  $\chi_{EHC}$  sei auf die Anhänge 25 und 27 verwiesen.

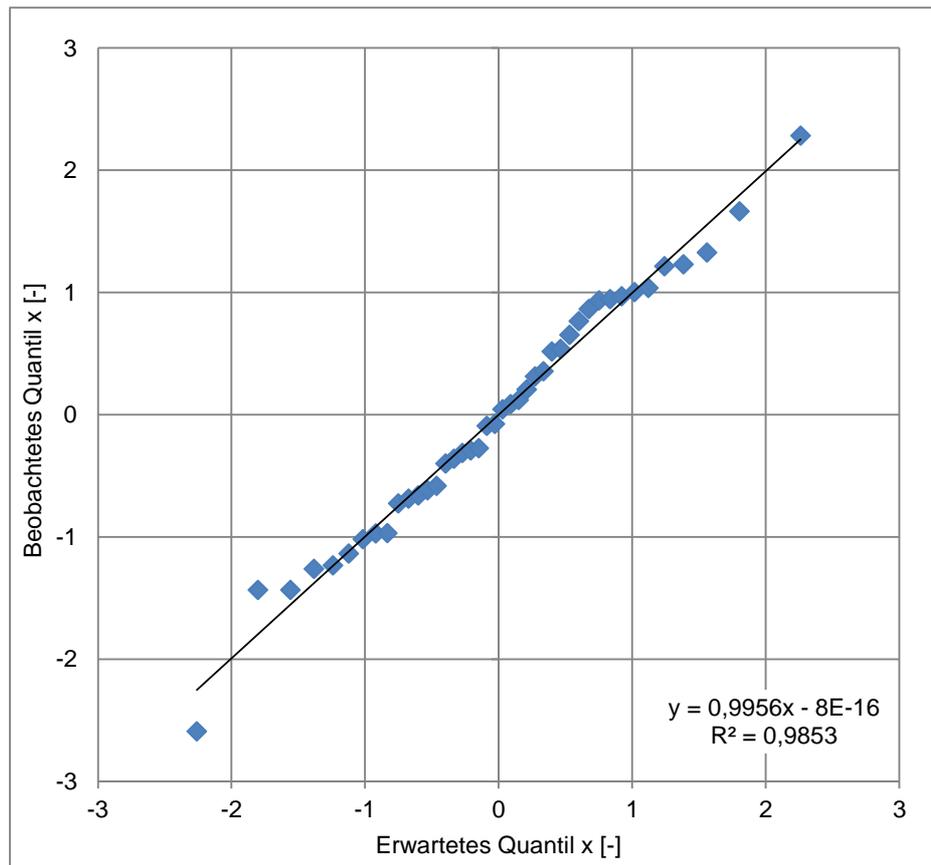
Auch in Abbildung 8-3, die die kumulierten Häufigkeiten von 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> darstellt, werden die mit der Bestrahlungsstärke leicht unterschiedlichen Tendenzen deutlich: Es ergeben sich zwei Peaks bei 0,74 und 0,76.

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab



**Abbildung 8-3:** Histogramm zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  von Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung)

Abbildung 8-4 zeigt weiterhin den Q-Q-Plot für den gemischten Datensatz.



**Abbildung 8-4:** Quantil-Quantil-Plot und lineare Regressionsgerade zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  von Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)

Auch dieses Diagramm lässt, wie das Histogramm, kleine Abweichungen vom Idealfall normalverteilter Daten erkennen. Dennoch stimmt die Regressionsgerade sehr gut mit der Winkelhalbierenden  $y = x$  überein, sodass die vorliegenden Abweichungen aus wenigen Ausreißern resultieren können. Ein Test der Daten auf Ausreißer im Vorfeld der Untersuchungen gemäß [Har09] war hingegen negativ.

### 8.3.2.2. Vergleich der Datensätze des Labormaßstabs bei einer Bestrahlungsstärke mit dem Zwischenmaßstab

Die Ergebnisse des Maßstabsvergleichs mit 35 beziehungsweise 70 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke fassen die Tabellen 8-7 und 8-8 zusammen. Da eine Gleichheit nur bei identischen Verteilungsarten vorliegen kann, war sie für die Varianten  $\chi_{HRR,mean}$  und  $\chi_{HRR,180s}$  im Vorhinein ausgeschlossen. Diese Effizienzen sind daher nicht dargestellt. Auch bei der Verbrennungseffizienz  $\chi_{FL}$  musste bei 35 kW/m<sup>2</sup> die Hypothese normalverteilter Werte im Labormaßstab verworfen werden, sodass Entsprechendes gilt.

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

**Tabelle 8-7:** Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 35 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, 21 Versuche) und im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche)

Variante	Gleichheit bei NV mit $\alpha$			Gleichheit ohne NV mit $\alpha$		
	0,01	0,05	0,10	0,05	0,10	0,20
$\chi_{EHC}$	nv	v	v	-	-	-
$\chi_{EHC}$ mit Faktor 1,19	nv	nv	nv	-	-	-
$\chi_{FL}$	(v)	-	-	-	v	v
$\chi_{FL}$ mit Faktor 1,40	(nv)	-	-	-	v	v
$\chi_{HRR,10-90}$	nv	v	v	-	-	-
$\chi_{HRR,10-90}$ mit Faktor 1,17	nv	nv	nv	-	-	-

Es zeigt sich für den Vergleich mit der niedrigen Bestrahlungsstärke, dass durch die Einführung der materialübergreifenden Maßstabsfaktoren sowohl bei der Effizienz  $\chi_{HRR,10-90}$  als auch bei der Variante auf Basis der EHC eine Vergleichbarkeit der Werte des Labor- und Zwischenmaßstabs angenommen werden kann.

**Tabelle 8-8:** Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, 21 Versuche) und im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche)

Variante	Gleichheit bei NV mit $\alpha$			Gleichheit ohne NV mit $\alpha$		
	0,01	0,05	0,10	0,05	0,10	0,20
$\chi_{EHC}$	nv	v	v	-	-	-
$\chi_{EHC}$ mit Faktor 1,19	nv	nv	nv	-	-	-
$\chi_{FL}$	nv	v	v	-	-	-
$\chi_{FL}$ mit Faktor 1,40	nv	nv	nv	-	-	-
$\chi_{HRR,10-90}$	nv	v	v	-	-	-
$\chi_{HRR,10-90}$ mit Faktor 1,17	nv	nv	nv	-	-	-

Auch für die höhere Bestrahlungsstärke bewirkt die Implementierung des Faktors, dass die Werte maßstabsübergreifend vergleichbar sind. Neben den Effizienzen  $\chi_{HRR,10-90}$  und  $\chi_{EHC}$  gilt dies für die Variante basierend auf der FL.

### 8.3.2.3. Vergleich der Datensätze des Labormaßstabs bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken mit dem Zwischenmaßstab

Für die kumulierten Datensätze des Labormaßstabs gibt Tabelle 8-9 die Ergebnisse des Maßstabsvergleichs wieder. Während die Hypothese vergleichbarer Daten des Labor- und Zwischenmaßstabs bei  $\alpha = 0,01$  angenommen wurde, muss sie bei höheren Werten auf Grund der Ablehnung normalverteilter Daten im Labormaßstab bei der Gegenüberstellung mit normalverteilten SBI-Daten zwangsläufig verworfen werden.

## 8. Vergleich von Labor- und Zwischenmaßstab

**Tabelle 8-9:** Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche) und im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche)

Variante	Gleichheit bei NV mit $\alpha$			Gleichheit ohne NV mit $\alpha$		
	0,01	0,05	0,10	0,05	0,10	0,20
$\chi_{EHC}$	nv	-	-	-	(v)	(v)
$\chi_{EHC}$ mit Faktor 1,19	nv	-	-	-	(v)	(v)
$\chi_{HRR,10-90}$	nv	-	-	-	(v)	(v)
$\chi_{HRR,10-90}$ mit Faktor 1,17	nv	-	-	-	(v)	(v)

Wie jedoch bereits das Q-Q-Diagramm des gemischten Datensatzes gezeigt hat, kann eine zusammenfassende Auswertung der Daten über mehrere Bestrahlungsstärken hinweg dennoch sinnvoll sein.

### 8.3.3. Abschließende Betrachtung Maßstabsvergleich

Am Beispiel von Spanplatten wurde zum einen anhand jeweils einer Bestrahlungsstärke ein maßstabsübergreifender Vergleich durchgeführt. Zum anderen wurden kumulierte Daten unterschiedlicher Bestrahlungsstärken des Labormaßstabs den Ergebnissen des Zwischenmaßstabs gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen weitgehend normalverteilte Größen, wobei die Gleichheit der Effizienzen meist erst nach Einführung des stoffübergreifenden Faktors angenommen wird.

Es bleibt abzuwägen, ob die Ableitung von Versuchen aus dem Labormaßstab bei nur einer oder mehreren Bestrahlungsstärken sinnvoll ist. Vorteil der Verwendung unterschiedlicher Bestrahlungsstärken ist, dass ein größerer Untersuchungsbereich eine umfassendere Beschreibung des Brandverhaltens gestattet. Dem steht der Vorteil gegenüber, dass aus statistischer Sicht bei der Verwendung nur einer Bestrahlungsstärke formal korrekt vorgegangen wird, da nur bei der Beibehaltung der äußeren Bedingungen unterschiedliche Realisationen der gleichen Zufallsgrößen erfolgen können. Dies wirft jedoch die Frage auf, welche Bestrahlungsstärke gewählt werden muss (vergleiche [Bab95]). Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob durch die Präzision einer Bestrahlungsstärke der Vergleich mit der andersgearteten Beaufschlagung der Materialien im Zwischenmaßstab im modifizierten SBI Test an Wert gewinnt.

Letztlich ist die Grundgesamtheit „Brand“ eine inhomogene Menge an Wärmestromdichten. Zur Abbildung eines Brandes wurde dieser Tatsache Rechnung getragen, indem Versuche bei 35, 50 und 70 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke durchgeführt wurden und im Rahmen der statistischen Auswertung zur Generierung eines weitgehend von der Material- und Bestrahlungsstärke unabhängigen Multiplikators zusammengefasst wurden. Wie bereits erwähnt, unterlagen die Versuchsdaten der unterschiedlichen Beaufschlagungsintensitäten zwar formal nicht

zwangsläufig vollständig identischen Verteilungen. Abgesehen von der Änderung der Bestrahlungsstärke wurden die Datensätze jedoch unter gleichartigen Bedingungen gewonnen. Im Sinne des praktischen Untersuchungsziels scheint es daher gerechtfertigt, die Daten gemeinsam zu betrachten, um ein möglichst breites Spektrum an Brandbedingungen erfassen zu können. Wie bereits erwähnt, weist auch [Hir08] darauf hin, für bestmögliche Resultate die Testparameter zu variieren. Ebenso schlagen [Bab95], [Mad08] zur Datenermittlung am Cone Calorimeter Versuche bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken vor (siehe Abschnitt 5.3.).

Um Informationen über die Zulässigkeit der Zusammenfassung der bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken gewonnenen Datensätze zu erhalten, wurden vor dem Maßstabsvergleich die bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> mittels Cone Calorimeter bestimmten Verbrennungseffizienzen am Beispiel von Spanplatten verglichen und deren Unterschiede herausgestellt. Es zeigten sich weitgehende Übereinstimmungen. Auch [Bab95], der Versuche am Cone Calorimeter bei 25 und 40 kW/m<sup>2</sup> durchgeführt hat (vergleiche Abschnitt 5.3.), kam zu diesem Ergebnis. Als Basis seines Vergleichs zog er jedoch den Spitzenwert der Wärmefreisetzungsrate sowie ihren Anfangswert heran.

Darüber hinaus sei bemerkt, dass die vorgestellte Methodik unabhängig von der Wahl der Eingangsdaten ihre Gültigkeit behält. Mit der fortschreitenden Gewinnung an Datensätzen können anhand dessen fortlaufend Ergebnisse generiert und gesichert werden. Hier kann lediglich die mögliche Vorgehensweise erarbeitet und erprobt werden, deren Endgültigkeit die Praxis zeigen muss. Hinzukommend ist die Übertragung auf den Zwischenmaßstab lediglich ein Schritt, dem Realmaßstab näher zu kommen; er kann naturgemäß nicht vollends abgebildet werden. Die Annäherung hieran durch Großversuche ist ein Ziel weiterer Untersuchungen.

---

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl das Cone Calorimeter als auch der modifizierte SBI Test haben sich als geeignet zur Bestimmung von Faktoren der Verbrennungseffizienz erwiesen. Der Maßstabsvergleich hat darüber hinaus gezeigt, dass eine ausreichend genaue Bestimmung von Verbrennungseffizienzen im Labormaßstab erreichbar ist. Hierbei sind die Wahl der Bestrahlungsstärke und die Aufbereitungsform der Proben entscheidende Parameter.

Die Wärmestromdichte muss einen gewissen Schwellenwert übersteigen. Zu diesem Zweck haben sich 35 kW/m<sup>2</sup> als sinnvoll herausgestellt. Eine Erhöhung der Bestrahlungsstärke hatte bei den meisten Proben keine oder nur sehr geringe Auswirkungen auf die Verbrennungseffizienz. Ihre Variation hat sich jedoch für die umfassende Bewertung schwerentflammbarer Proben als sinnvoll gezeigt: Hier haben sich bedeutende Änderungen mit der Intensität der Materialbeaufschlagung ergeben. Es ist daher empfehlenswert, Versuche bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken durchzuführen, da nur so eine umfassende Beurteilung des Brandverhaltens schwerentflammbarer Stoffe gewährleistet ist. Als zu wählende Wärmestromdichten haben sich 35, 50 und 70 kW/m<sup>2</sup> als geeignet herausgestellt.<sup>12</sup>

Die Variation der Aufbereitungsform des Probenmaterials hat hinsichtlich der spezifischen Oberfläche gezeigt, dass diese maßgeblich den Anteil des an der Verbrennung teilnehmenden Materials und damit die Effizienz auf Basis der Brennstoffbeladung beeinflusst. Bei der vorliegenden brandlastgesteuerten Verbrennung haben sich die entstehenden Verbrennungsgase nur wenig mit der Aufbereitungsform verändert: Die Effizienz basierend auf der effektiven Verbrennungswärme und die der Hauptbrandphase zeigten zwar ebenso Veränderungen, die Änderungen bleiben jedoch weit hinter erstgenannten zurück. Mit Blick auf die ingenieurtechnische Abschätzung der Verbrennungseffizienz kann daher begründet angenommen werden, dass die Variation der Aufbereitungsart zur Bestimmung dieser Varianten nicht zwingend erforderlich ist.

Gleiches gilt in Bezug auf die Plattenhöhe. Sie ist lediglich ausreichend hoch in der Form zu wählen, dass eine gleichförmige Verbrennung erreicht werden kann. Bei Feststoffen der Brandklasse A ist dies durch ein thermisch dickes Verhalten und bei Proben der Brandklasse B durch den beschriebenen Gleichgewichtszustand zwischen fester und flüssiger Phase gekennzeichnet.

Hinsichtlich der Varianten der Verbrennungseffizienz haben sich vier als maßgebend herausgestellt: Durch die kumulierte Angabe der Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme, der Brennstoffbeladung, der Hauptbrandphase und des Brandbe-

---

<sup>12</sup> Letztlich ist die angegebene Größenordnung der Bestrahlungsstärken und nicht deren genauer Betrag von 35, 50 und 70 kW/m<sup>2</sup> entscheidend.

gins wird auf den ersten Blick eine Reihe an Informationen zum Abbrandverhalten eines Materials offenbar. Sie geben Aufschluss über

- die Vollständigkeit der Verbrennung in Bezug auf entstehende Verbrennungsprodukte,
- den Verbleib von Materialrückständen und damit über den tatsächlichen Beitrag (Energieeintrag) des Materials zum Brandgeschehen,
- eine gesonderte Information zum Beitrag des Materials in der Hauptbrandphase (Vollbrandphase) sowie zu Beginn des Verbrennungsprozesses (Entstehungsbrand).

Für die Bewertung von Brandlasten im Industriebau stellt sich demzufolge die Verbrennungseffizienz mit Bezug zur Vollbrandphase als geeignet dar. Die Verbrennungseffizienz auf Basis der effektiven Verbrennungswärme kann ihren Einsatz bei der Einschätzung von Rauchbildung und -zusammensetzung finden. Die Effizienz auf Basis der Brennstoffbelastung ist bei der Abschätzung der brennbaren beziehungsweise brandwirksamen Bestandteile eines Materials hilfreich. Die auf den Brandbeginn bezogene Effizienz mit Informationen zur frühen Brandphase kann beispielsweise bei Fragen zur Einrichtung von Brandmelde-technik oder Löschanlagen von Interesse sein. Darüber hinaus kann sie in Kombination mit der auf die Hauptbrandphase bezogenen Effizienz bei Berechnungen mit Simulationsprogrammen eingesetzt werden.

Die Verbrennungseffizienz der Hauptbrandphase hat sich weiterhin im Maßstabsvergleich, neben der auf Basis der effektiven Verbrennungswärme, als besonders konsistent herausgestellt. In diesem Rahmen wurde ein materialunabhängiger, hohe, mittlere und niedrige Beaufschlagungsintensitäten umfassender Faktor generiert und in die Auswertung mittels statistischer Methoden implementiert. Die Verwendung der Effizienz der Hauptbrandphase für die Brandlastbewertung im Industriebau, wobei letztlich der Realmaßstab entscheidend ist, kann daher auch in dieser Hinsicht bestärkt werden. Unabhängig davon ist die kombinierte Angabe der Varianten der Verbrennungseffizienz sinnvoll, da sie einen schnellen Überblick über das Brandverhalten eines Materials geben.

Letztlich ist zwischen der planungstechnischen Anwendung und der wissenschaftlichen, detaillierten Betrachtungsweise zu differenzieren. Für die Brandlastbewertung im Industriebau ist es nicht notwendig, die Verbrennungseffizienz auf zwei Nachkommastellen genau anzugeben. Vielmehr ist etwa die Zusammenfassung gleichartiger Materialien in „Abbrandklassen“ denkbar. Darüber hinaus wird so der Tatsache Rechnung getragen, dass Brände im Allgemeinen unter einem großen Einfluss unsicherer Parameter stehen. Durch die Implementierung der Verbrennungseffizienz in die Brandlastbewertung im Industriebau wird der Wirklichkeit lediglich ein Stück weit näher gekommen: Es kann der Weg vom Worst-Case-

Szenario hin zu einem (weiteren) auf der sicheren Seite liegenden Szenario bestritten werden.

Zur fortschreitenden Untersuchung und Skalierung sind Versuche im Groß- beziehungsweise Realmaßstab unerlässlich. Unter Beibehaltung des Messprinzips der Sauerstoffverbrauchs-kalorimetrie ist der Einsatz einer modifizierten Variante des Room Corner Tests (insbesondere Einbringung einer Wägeeinrichtung) empfehlenswert. Mittels der dargelegten Mess-, Berechnungs- und statistischen Auswerte- und Vergleichsverfahren können so Verbrennungseffizienzen im Groß- beziehungsweise Realmaßstab generiert und denen unter Verwendung des Cone Calorimeters und des modifizierten Single Burning Item Tests bemessenen Verbrennungseffizienzen gegenübergestellt werden.

Ein mittelfristiges Ziel neben der Verwendung großskaliger Versuchstechnik ist die Generierung weiterer Materialkennwerte. So kann eine umfassende Datenbank geschaffen werden, die als Grundlage zur Bildung von Abbrandklassen dienen kann.

Nachdem aufgezeigt wurde, unter welcher Maßgabe Faktoren der Verbrennungseffizienz bestimmt werden können, ist schließlich für die Anwendung zum einen die Festlegung des Messverfahrens in der Normung sinnvoll. Weiterhin gilt es, die Berechnungsweise der Verbrennungseffizienzen in die Normung zu integrieren und die auf Basis dessen bestimmten Effizienzen im Rechenverfahren zur Brandlastbewertung im Industriebau zu implementieren.

---

## 10. Verzeichnisse

### 10.1. Literaturverzeichnis

- [Ant11] Antonatus, E.: Kunststoffe und Brandschutz, Bauphysikkalender 2011, Fouad, N. A. (Hrsg.), Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, S. 65 – 84, 2011
- [ASTMD1322] ASTM D 1322-12e2: Standard Test Method for Smoke Point of Kerosine and Aviation Turbine Fuel, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2012
- [ASTME1354] ASTM E 1354-04a: Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2004
- [ASTME2058] ASTM E 2058-13a: Standard Test Methods for Measurement of Material Flammability Using a Fire Propagation Apparatus (FPA), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2013
- [Aue13] Auer Kunststofftechnik GmbH & Co. KG (Hrsg.): Werkstoffdatenblatt Polyethylen PE, abgerufen Mai 2013 unter <http://www.auer-kunststofftechnik.de/pdf/Datenblatt%20PE-HD%20natur.pdf>
- [Bab84] Babrauskas, V.: Development of the Cone Calorimeter – A Bench-scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption, Fire and Materials, Vol. 8, No. 2, S. 81 – 95, 1984
- [Bab92] Babrauskas, V.; Peacock, R. D.: Heat Release Rate – The Single Most Important Variable in Fire Hazard, Fire Safety Journal 18, S. 255 – 272, 1992
- [Bab93] Babrauskas, V.: Bench-scale Predictions of Mattress and Upholstered Chair Fires – Similarities and Differences, NISTIR 5152, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, Maryland, 1993
- [Bab95] Babrauskas, V.: Specimen Heat Fluxes for Bench-scale Heat Release Rate Testing, Fire and Materials, Vol. 19, S. 243 – 252, 1995
- [Bab02] Babrauskas, V.: The Cone Calorimeter, Society of Fire Protection Engineers – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, DiNenno, P. J. (Hrsg.), 3. Auflage, Quincy, Massachusetts, S. 3-63 – 3-81, 2002
- [Bab08] Babrauskas, V.: Upholstered Furniture and Mattresses, Fire Protection Handbook Volume I, Cote, A. E. (Hrsg.), NFPA, Quincy, Massachusetts, S. 6-103 – 6-128, 2008
- [Ben08] Benedetti, R. P.; Colonna, G. R.: Polymeric Materials, Fire Protection Handbook Volume I, Cote, A. E. (Hrsg.), NFPA, Quincy, Massachusetts, S. 6-209 – 6-231, 2008
- [Bey02] Beyler, C. L.; Hirschler, M. M.: Thermal Decomposition of Polymers, Society of Fire Protection Engineers – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, DiNenno, P. J. (Hrsg.), 3. Auflage, Quincy, Massachusetts, S. 1-110 – 1-131, 2002
- [Bli14] Blind, K.; Jungmittag, A.; Mangelsdorf, A.: Der gesamtwirtschaftliche Nutzen der Normung – Eine Aktualisierung der DIN-Studie aus dem Jahr 2000, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), abgerufen September 2014 unter [http://www.din.de/sixcms\\_upload/media/2896/DIN\\_GNN\\_2011\\_deutsch\\_akt\\_neu.pdf](http://www.din.de/sixcms_upload/media/2896/DIN_GNN_2011_deutsch_akt_neu.pdf)

- [Blu03] Blume, G. W.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf der Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten, Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2003
- [Boh09] Bohn, C.: Verwendung von biotechnologisch durch den Rotfäulepilz *Heterobasidion annosum* in vivo degradiertem Fichtenholz als Rohstoff für die Herstellung von Holzwerkstoffen, Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, 2009
- [Bou13] Bourier, G.: Beschreibende Statistik – Praxisorientierte Einführung mit Aufgaben und Lösungen, 11., aktualisierte Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden, 2013
- [Bun14] Die Bundesregierung (Hrsg.): Normungspolitisches Konzept der Bundesregierung, abgerufen September 2014 unter [http://www.din.de/sixcms\\_upload/media/2896/normungspolitisches-konzept-der-bundesregierung.pdf](http://www.din.de/sixcms_upload/media/2896/normungspolitisches-konzept-der-bundesregierung.pdf)
- [Car31] Carothers, W. H.: Polymerization, *Chemical Revue*, Vol. 8, No. 3, S. 353 – 426, 1931
- [Cho08] Cholin, J. M.: Wood and Wood-Based Products, *Fire Protection Handbook Volume I*, Cote, A. E. (Hrsg.), NFPA, Quincy, Massachusetts, S. 6-61 – 6-74, 2008
- [Cle91] Cleary, T. G.; Quintiere, J. G.: Flammability Characterization of Foam Plastic, NISTIR 4664, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 1991
- [Cus08] Custer, R. L. P.: Dynamics of Compartment Fire Growth, *Fire Protection Handbook Volume I*, Cote, A. E. (Hrsg.), NFPA, Quincy, Massachusetts, S. 2-49 – 2-58, 2008
- [Die99] Dietenberger, M.: Effect of Backing Board on the Heat Release Rate of Wood, *Proceedings of the 28th International Conference on Fire Safety*, S. 62 – 73, Columbus, Ohio, 1999
- [Din02] DiNenno, P. J. (Hrsg.): Appendix C – Fuel Properties and Combustion Data, *Society of Fire Protection Engineers – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3. Auflage, Quincy, Massachusetts, S. A-34 – A-42, 2002
- [DINEN2] DIN EN 2: Brandklassen, Ausgabe Januar 2005, Beuth, Berlin
- [DINEN312] DIN EN 312: Spanplatten – Anforderungen, Ausgabe Dezember 2010, Beuth, Berlin
- [DINEN1716] DIN EN ISO 1716: Prüfungen zum Brandverhalten von Produkten – Bestimmung der Verbrennungswärme (des Brennwertes), Ausgabe November 2010, Beuth, Berlin
- [DINEN1991-1-2] DIN EN 1991-1-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Ausgabe Dezember 2012, Beuth, Berlin
- [DINEN1991-1-2/NA] DIN EN 1991-1-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Ausgabe Dezember 2012, Beuth, Berlin

- [DIN4102-1] DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe Mai 1998, Beuth, Berlin
- [DIN4102-2] DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe September 1977, Beuth, Berlin
- [DINEN13823] DIN EN 13823: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen, Ausgabe Juni 2002, Beuth, Berlin
- [DINEN14390] DIN EN 14390: Brandverhalten von Bauprodukten – Referenzversuch im Realmaßstab an Oberflächenprodukten in einem Raum, Ausgabe April 2007, Beuth, Berlin
- [DIN18230-1] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Ausgabe September 2010, Beuth, Berlin
- [DIN18230-2] DIN 18230-2: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 2: Ermittlung des Abbrandverhaltens von Materialien in Lageranordnung – Werte für den Abbrandfaktor  $m$ , Ausgabe Januar 1999, Beuth, Berlin (zurückgezogen)
- [DIN18230-3] DIN 18230-3: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 3: Rechenwerte, Ausgabe August 2002, Beuth, Berlin
- [DIN51900-1] DIN 51900-1: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes – Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren, Ausgabe April 2000, Beuth, Berlin
- [DIN51900-2] DIN 51900-2: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes – Teil 2: Verfahren mit isoperibolem oder static-jacket Kalorimeter, Ausgabe Mai 2003, Beuth, Berlin
- [DIN51900-3] DIN 51900-3: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes – Teil 3: Verfahren mit adiabatischem Mantel, Ausgabe Januar 2005, Beuth, Berlin
- [Dry89] Drysdale, D. D.; Thomson, H. E.: Flammability of Plastics II: Critical Mass Flux at the Firepoint, Fire Safety Journal, Vol. 14, Iss. 3, S. 179 – 188, 1989
- [Dry02] Drysdale, D. D.: Thermochemistry, Society of Fire Protection Engineers – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, DiNenno, P. J. (Hrsg.), 3. Auflage, Quincy, Massachusetts, S. 1-90 – 1-98, 2002
- [Dry04] Drysdale, D. D.: An Introduction to Fire Dynamics, 2. Auflage, John Wiley & Sons, Chichester, 2004
- [Dry08] Drysdale, D. D.: Physics and Chemistry of Fire, Fire Protection Handbook Volume I, Cote, A. E. (Hrsg.), NFPA, Quincy, Massachusetts, S. 2-3 – 2-20, 2008
- [Eye08] Eyerer, P.: Synthese (Herstellung, Erzeugung) von Kunststoffen, Polymer Engineering – Technologien und Praxis, Eyerer, P.; Hirth, T.; Elsner, P. (Hrsg.), Springer, Berlin; Heidelberg, 2008

- [Fah07] Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik – Der Weg zur Datenanalyse, 6. überarbeitete Auflage, Springer, Berlin; Heidelberg, 2007
- [FTT13] Fire Testing Technology (Hrsg.): SBI – Single Burning Item – EN 13823, Produktdatenblatt, abgerufen November 2013 unter [www.fire-testing.com](http://www.fire-testing.com)
- [Gre11] Grellmann, W.; Seidler, S.: Kunststoffprüfung, 2. Auflage, Gert Hauser, München, 2011
- [Hag04] Hagge, M. J.; Kenneth, M. B.; Dietenberger, M. A.: Effects of Backing Board Materials on Wood Combustion Performance, Wood and Fire Safety, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Scientific Conference, Strbske Pleso, 2004
- [Hah13a] Hahn, S.-K.; Krause, U.; Rost, M.: Berücksichtigung des Abbrandverhaltens von Materialien bei der Brandlastberechnung im Industriebau, 2. vfdb Workshop Brandschutzforschung, Magdeburg, 2013
- [Hah13b] Hahn, S.-K.; Krause, U.; Rost, M.: Quantifizierung des Abbrandverhaltens von Materialien mittels Verbrennungseffektivität am Beispiel von Kunststoffen der Brandklasse B, Sborník přednášek, 22. ročníku mezinárodní konference, Ostrava, 2013
- [Hah14a] Hahn, S.-K.; Rost, M.; Krause, U.: Ermittlung von Faktoren der Verbrennungseffizienz unter Verwendung des Cone Calorimeters, 62. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., S. 627 – 640, Dortmund, 2014
- [Hah14b] Hahn, S.-K.; Rost, M.; Krause, U.: Quantifying the Combustion Behaviour of Polymers by the Combustion Efficiency with Regard to the Weighting of Fire Loads, Sborník vědeckých prací Vysoké Školy Báňské – Technické Univerzity Ostrava – Warsaw [u.a.] : De Gruyter, Versita Sborník vědeckých prací Vysoké Školy Báňské – Technické Univerzity Ostrava / Řada bezpečnostního inženýrství, Bd. 9, S. 10 – 15, 2014
- [Hah15] Hahn, S.-K.; Rost, M.; Krause, U.: Methoden zur Quantifizierung des Abbrandverhaltens mittels Verbrennungseffizienz, 4. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, Magdeburg, 2015
- [Hak01] Hakkarainen, T.: Rate of Heat Release and Ignitibility Indices in Predicting SBI Test Results, Journal of Fire Sciences, Vol. 19, S. 284 – 305, 2001
- [Hal61] Halpaap, W.: Vorbeugender baulicher Brandschutz im Industriebau nach Punkten, Zentralblatt für Industriebau, Heft 1, S. 18 – 30, Hannover, 1961
- [Han02a] Hansen, A. S.; Hovde, P. J.: Prediction of Time to Flashover in the ISO 9705 Room Corner Test based on Cone Calorimeter Test Results, Fire and Materials, Vol. 26, S. 77 – 86, 2002
- [Han02b] Hansen, A. S.: Prediction of Heat Release Rate in the Single Burning Item Test, Fire and Materials, Vol. 26, S. 87 – 97, 2002
- [Har09] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 15., überarbeitete und wesentlich erweiterte Auflage, Oldenbourg, München, 2009
- [Hec14] Heck, G.: Bewertung des Abbrandverhaltens von Feststoffen in Abhängigkeit von der Aufbereitungsart unter Verwendung des Cone Calo-

- rimeters, Masterthesis an der Hochschule Magdeburg-Stendal; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2014
- [Hee02] Hees, van P.; Hertzberg, T.; Hansen, A. S.; SINTEF: Development of a Screening Method for the SBI and Room Corner using the Cone Calorimeter, Nordtest Project 1479-00, SP Report 2002:11, SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, 2002
- [Hes02] Heskestad, G.: Fire Plumes, Flame Height, [!] and Air Entrainment, Society of Fire Protection Engineers – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, DiNenno, P. J. (Hrsg.), 3. Auflage, Quincy, Massachusetts, S. 2-1 – 2-17, 2002
- [Hir08] Hirschler, M. M.: Concepts and Protocols of Fire Testing, Fire Protection Handbook Volume I, Cote, A. E. (Hrsg.), NFPA, Quincy, Massachusetts, S. 6-35 – 6-60, 2008
- [Hos92] Hosser, D.; Siegfried, W.: Das Abbrandverhalten von Stoffen in realistischen Brandversuchen, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (TU Braunschweig): Weiterbildungsseminar Brandschutz im Industriebau – Kurzreferate, Heft 96, S. 97 – 116, Braunschweig, 1992
- [Hos13] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage, Altenberge; Braunschweig, 2013
- [Hug80] Huggett, C.: Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption, Journal of Fire and Materials, Vol. 4, Iss. 2, S. 61 – 65, 1980
- [Iqb94] Iqbal, N.; Quintiere, J.: Flame Heat Fluxes in PMMA Pool Fires, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 6, S. 153 – 162, 1994
- [ISO5660-1] ISO 5660-1(E): Reaction-to-fire Tests – Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate – Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method), 2. Auflage, Genf, 2002
- [ISO5660-1N] ISO 5660-1(E): 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), 3. Auflage, Genf, 2015
- [ISO5660-3] ISO/TR 5660-3: Reaction-to-fire Tests – Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate – Part 3: Guidance on Measurement, Genf, 2003 (zurückgezogen)
- [Jan91] Janssens, M. L.: Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption, Fire Technology, Vol. 27, Iss. 3, S. 234 – 249, 1991
- [Jön85] Jönsson, R.; Petterson, O.: Timber Structures and Fire – A Review of the Existing State of Knowledge and Research Requirements, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1985
- [Kai07] Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure – Von der Synthese bis zur Anwendung, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [Kan02] Kanury, A. M.: Flaming Ignition of Solid Fuels, Society of Fire Protection Engineers – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, DiNenno, P. J. (Hrsg.), 3. Auflage, Quincy, Massachusetts, S. 2-229 – 2-245, 2002
- [Kem13] Kempel, F.: Komplementäre Nutzung von Polymerwissenschaft und Brandsimulation: Vier Beispiele in den Dimensionen Kubikdekameter

- bis Kubikdezimeter, Dissertation, Fakultät III – Prozesswissenschaften, Technische Universität Berlin, Berlin, 2013
- [Kil14] Kiliaris, P.; Papaspyrides, C. D.: Polymers on Fire, Polymer Green Flame Retardants, Papaspyrides, C. D.; Kiliaris, P. (Hrsg.), 1. Auflage, Elsevier, Amsterdam; Oxford; Waltham, 2014
- [Kna14] Knaust, C.; Kusche, C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SF – 10.08.18.7-11.17 / II 3-F20-10-1-023, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014
- [Köl09] Kölling, C.; Knoke, T.; Schall, P.; Ammer, C.: Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels, Forstarchiv 80:2, S. 45 – 54, München, 2009
- [Kur09] Kurzweil, P.; Frenzel, B.; Gebhard, F.: Physik Formelsammlung, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg und Teuber, Wiesbaden, 2009
- [Kus13] Kusche, C.; Knaust, C.; Krause, U.: Experimentelle Untersuchungen zur Verbrennungseffektivität als Grundlage für Brandlastberechnungen der DIN 18230, 2. vfdb Workshop Brandschutzforschung, Magdeburg, 2013
- [Kus15] Kusche, C.; Knaust, C.; Hahn, S.-K.; Krause, U.: Experimental Investigations of the Combustion Efficiency for Fire Load Calculations, Materials Testing, Vol. 57, Iss. 10, S. 843 – 849, 2015
- [Lee85] Lee, B. T.: Standard Room Fire Test Development at the National Bureau of Standards, Fire Safety – Science and Engineering (ASTM STP 882), Harmathy, T. Z. (Hrsg.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985
- [Leh01] Lehmann, J.: Wasseraufnahme von PMMA und PC – Internationaler Rundversuch zu ISO 62:1999, KU Kunststoffe, Jahrgang 91, S. 80 – 83, München, 2001
- [Lei00] Leisewitz, A.; Schwarz, W.: Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel, Band II: Flammhemmende Ausrüstung ausgewählter Produkte – anwendungsbezogene Betrachtung: Stand der Technik, Trend, Alternativen, Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu), Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2000
- [Lyo04] Lyon, R. E.: Plastics and Rubber, Handbook of Building Materials for Fire Protection, Harper, C. A. (Hrsg.), McGraw-Hill, New York, S. 3.1 – 3.51, 2004
- [Mad08] Madrzykowski, D.; Stroup, W. S.: Flammability Hazard of Materials, Fire Protection Handbook Volume I, Cote, A. E. (Hrsg.), NFPA, Quincy, Massachusetts, S. 2-31 – 2-48, 2008
- [Max11] Max, U.; Schneider, U.: Erarbeitung von DIN 18230-4 – Nachweise durch Brandsimulation im Industriebau, Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011, 25. Fachtagung Brandschutz – Forschung und Praxis, Braunschweig, 2011
- [Mik89] Mikkola, E.; Wichman, I. S.: On the Thermal Ignition of Combustible Materials, Fire and Materials, Vol. 14, No. 3, S. 87 – 96, 1989
- [Mou06] Mouritz, A. P.; Gibson, A. G.: Fire Properties of Polymer Composite Materials, Springer, Dordrecht, 2006

- [NFPA557] NFPA 557: Standard for Determination of Fire Loads for Use in Structural Fire Protection Design, NFPA, Quincy, Massachusetts, 2012
- [Pet94] Petrella, R. V.: The Assessment of Full-Scale Fire Hazards from Cone Calorimeter Data, *Journal of Fire Sciences*, No. 12, S. 14 – 43, 1994
- [Qui98] Quintiere, J. G.: Principles of Fire Behavior, Delmar Publishers, Albany, New York, 1998
- [Rav12] Ravve, A.: Principles of Polymer Chemistry, 3. Auflage, Springer, New York; Heidelberg; Dordrecht; London, 2012
- [Rie13] Riese, U.: Brand, Lehrbuch der Bauphysik, Willems, W. M. (Hrsg.), 7., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 656 – 762, 2013
- [Röm13] Römpp Online, Version 4.0, Georg Thieme Verlag, 2013
- [Sac06] Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R, 12., vollständig neu bearbeitete Auflage, Springer, Berlin; Heidelberg, 2006
- [Sau14] Saupe, A.; Schubert, S.; Krause, U.: Brandszenarien jenseits des kritischen Wohnungsbrandes, 62. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., S. 57 – 73, Dortmund, 2014
- [Sch09] Schneider, U.; Schjerve, N.: Normentwurf DIN18230-4: Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzuges durch Brandsimulation, Braunschweiger Brandschutz-Tage '09, 23. Fachtagung Brandschutz – Forschung und Praxis, S.197 – 226, Braunschweig, 2009
- [Sch11] Schneider, U.; Schjerve, N.: Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz, Bauphysikkalender 2011, Fouad, N. A. (Hrsg.), Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, S. 555 – 592, 2011
- [Sch14] Schmöche, C.: Bewertung des Abbrandverhaltens von Flüssigkeiten unter Verwendung des Cone Calorimeters, Masterthesis an der Hochschule Magdeburg-Stendal; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2014
- [Sch15] Schmöche, C.; Hahn, S.-K.; Rost, M.; Krause, U.: Bestimmung von Brandparametern im Labormaßstab bei Flüssigkeiten, Technische Sicherheit, Bd. 5, S. 35 – 38, 2015
- [Söd91] Söderbom, J.: EURIFIC – Large Scale Tests According to ISO DIS 9705, Project 4 of the EURIFIC Fire Research Programme, SP Report 1991:27, Statens Provningsanstalt, Borås, 1991
- [Spe13] Spennes, G.: Stand der Normung und Anwendung von Methoden des Brandschutzingenieurwesens [!] im Industriebau, 61. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., S. 399 – 425, Weimar, 2013
- [Sta04] Stark, U.; Müller, A.: Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen – schnelle und effektive Methode zur Beurteilung, Ratgeber Abbruch & Recycling 2004, Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, Iffezheim, S. 78 – 84, 2004
- [Sun98] Sundström, B.; van Hees, P.; Thureson, P.: Results and Analyses from Fire Tests of Building Products in ISO 9705, the Room / Corner Test, The SBI Research Programme, SP Report 1998:11, SP Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, Borås, 1998

- [Sun07] Sundström, B.: The Development of a European Fire Classification System for Building Products – Test Methods and Mathematical Modelling, Doctoral Thesis, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, 2007
- [Tew76] Tewarson, A.; Pion, R. F.: Flammability of Plastics – I. Burning Intensity, Combustion and Flame, Vol. 26, S. 85 – 103, 1976
- [Tew80] Tewarson, A.: Heat Release in Fires, Fire and Materials, Vol. 4, No. 4, S. 185 – 191, 1980
- [Tew82] Tewarson, A.: Experimental Evaluation of Flammability Parameters of Polymeric Materials, Flame-Retardant Polymeric Materials Volume 3, Lewin, M.; Atlas, S. M.; Pearce, E. M. (Hrsg.), Plenum Press, New York, S. 97 – 153, 1982
- [Tew02] Tewarson, A.: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fire, Society of Fire Protection Engineers – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, DiNenno, P. J. (Hrsg.), 3. Auflage, Quincy, Massachusetts, S. 3-82 – 3-161, 2002
- [Tew04] Tewarson, A.; Chin, W.; Shuford, R.: Materials Specifications, Standards, [!] and Testing, Handbook of Building Materials for Fire Protection, Harper, C. A. (Hrsg.), McGraw-Hill, New York, S. 3.1 – 3.51, 2004
- [Tho17] Thornton, W.: The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds, Philosophical Magazine, Series 6, S. 196 – 203, 1917
- [Tsc13] Tschirschwitz, R.; Schröder, V.; Brandes, E.; Krause, U.: Bestimmungsverfahren sicherheitstechnischer Kenngrößen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen, 2. vfdB Workshop Brandschutzforschung, Magdeburg, 2013
- [Twi88] Twilley, W. H.; Babrauskas, V.: Users' Guide for the Cone Calorimeter, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1988 (NBS Special Publication)
- [Wil05] Will, J.: Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilerten Bränden, Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2005
- [Zen02a] Zeng, W. R.; Li, S. F.; Chow, W. K.: Preliminary Studies on Burning Behavior of Polymethylmethacrylate (PMMA), Journal of Fire Sciences, Vol. 20, S. 297 – 317, 2002
- [Zen02b] Zeng, W. R.; Li, S. F.; Chow, W. K.: Review on Chemical Reactions of Burning Poly(methyl methacrylate) PMMA, Journal of Fire Sciences, Vol. 20, S. 401 – 433, 2002

## 10.2. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2-1: Versuchseinrichtung zur Bestimmung des Abbrandfaktors (Schnitt) nach [DIN18230-2]: Differenzdruck-Messstelle (1), Entnahmestelle für O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>-, CO-Messungen (2), Rauchgaskanal zur Abgasreinigungsanlage (3).....5

## 10. Verzeichnisse

---

Abb. 2-2:	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit des Sauerstoffangebots am Beispiel von Polymethylmethacrylat [Tew02].....	7
Abb. 3-1:	Bezugszeiträume für Massenverlust und Energiefreisetzungsrate [Wil05] .....	16
Abb. 4-1:	Glukose .....	25
Abb. 4-2:	Hölzer a) sägeraues Fichtenholz und b), c) Rohspan P2 .....	25
Abb. 4-3:	Kunststoffe Polyethylen a) Granulat und b) Folie sowie c) geschwärztes Polymethylmethacrylat.....	27
Abb. 4-4:	Ethylen (Ethen).....	27
Abb. 4-5:	Polyethylen .....	27
Abb. 4-6:	Zusammensetzung des untersuchten Polyethylen-Granulats aus a) Produktionsrohstoff und b) -abfall .....	28
Abb. 4-7:	Nahaufnahme des untersuchten Polyethylen-Granulats (links Produktionsrohstoff, rechts Produktionsabfall).....	28
Abb. 4-8:	Partikelgrößenverteilungen von Polyethylen-Granulat (FERET-Durchmesser).....	30
Abb. 4-9:	Methylmethacrylat.....	30
Abb. 4-10:	Polymethylmethacrylat.....	30
Abb. 4-11:	Untersuchte leicht- und schwerentflammbare Kunststoffe a) Polyurethan-Hartschaum (links B1, rechts B3) und b) Polystyrol-Hartschaum B1 .....	31
Abb. 4-12:	Polyurethan .....	31
Abb. 4-13:	Styrol .....	32
Abb. 4-14:	Polystyrol.....	32
Abb. 5-1:	Cone Calorimeter der Hochschule Magdeburg-Stendal .....	34
Abb. 5-2:	Schematische Ansicht der charakteristischen Bestandteile des Cone Calorimeters (ohne Kalibrierungsequipment) [Din02] .....	35
Abb. 5-3:	Probenstand im Detail: „Probe“ (1), konischer Heizer (2), Funkenzünder (3), Probenhalterung und Wiegeeinheit (4).....	35
Abb. 5-4:	Prüfgefäße für Flüssigkeiten am Cone Calorimeter.....	36
Abb. 5-5:	Single Burning Item Test: links Schema [FTT13], rechts Einblick in die Brennkammer der modifizierten Apparatur an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung .....	40

Abb. 5-6:	Draufsicht Prüfraum Single Burning Item Test nach [DINEN13823]: Sichtfenster (1), (3), feststehendes Gestell (2), Probenträgerwagen mit Probenflügeln (4).....	40
Abb. 5-7:	Modifizierter Aufbau des Single Burning Item Tests: eingebrachte Probenhalterung und Abbrandwaage (1), Probe im Drahtkorb (2), Sandbettbrenner (3) .....	41
Abb. 5-8:	Probenorientierung und Richtung der Probenbeaufschlagung im Cone Calorimeter und modifizierten Single Burning Item Test.....	47
Abb. 5-9:	Übergänge vom festen in den dampfförmigen Zustand nach [Dry04].....	51
Abb. 6-1:	Fichtenholz: oben Platte aus Hirnholz: a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 35 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter sowie unten weitere Fichtenholzproben: d) Schnittholz, e) Krippe und f) Späne .....	56
Abb. 6-2:	Wärmefreisetzungsrate von sägerauem Fichtenholz im Cone Calorimeter (50 kW/m <sup>2</sup> , Schnittholzplatte 10 mm, 3 Versuche) .....	60
Abb. 6-3:	Rohspan P2: oben Krippe a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 35 kW/m <sup>2</sup> sowie unten: d) Platte vor, e) 2 x Platte vor und f) 2 x Platte nach der Beaufschlagung mit 35 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter.....	65
Abb. 6-4:	Wärmefreisetzungsrate von Rohspan P2 im Cone Calorimeter (50 kW/m <sup>2</sup> , Platte 10 mm, 3 Versuche) .....	67
Abb. 6-5:	Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabellen 6-3 und 6-6 im Vergleich: links Fichtenholz, rechts Rohspan P2. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 - $\chi_{EHC}$ , 2 - $\chi_{FL}$ , 3 - $\chi_{HRR,mean}$ , 4 - $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 - $\chi_{HRR,180s}$ .....	71
Abb. 6-6:	Polyethylen: Granulat (oben, a) bis c)) und Folie (unten, d) bis e)) vor, während und nach der Beaufschlagung mit 35 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter .....	75
Abb. 6-7:	Wärmefreisetzungsrate von Polyethylen-Granulat im Cone Calorimeter (50 kW/m <sup>2</sup> , 40 mm, 3 Versuche) .....	77
Abb. 6-8:	Polymethylmethacrylat Platte a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter .....	80
Abb. 6-9:	Wärmefreisetzungsrate von Polymethylmethacrylat im Cone Calorimeter (50 kW/m <sup>2</sup> , 18 mm, 3 Versuche) .....	82
Abb. 6-10:	Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabellen 6-12 und 6-15 im Vergleich: links Polyethylen, rechts Polymethylmeth-	

	acrylat. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 - $\chi_{EHC}$ , 2 - $\chi_{FL}$ , 3 - $\chi_{HRR,mean}$ , 4 - $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 - $\chi_{HRR,180s}$ .....	85
Abb. 6-11:	Polyurethan: Hartschaum B3 (oben, a) bis c)) und B1 (unten, d) bis e)) vor, während und nach der Beaufschlagung mit 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter ..	87
Abb. 6-12:	Wärmefreisetzungsrate von Polyurethan B1 im Cone Calorimeter (70 kW/m <sup>2</sup> , 30 mm, 3 Versuche) .....	90
Abb. 6-13:	Polystyrol B1 a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter.....	92
Abb. 6-14:	Wärmefreisetzungsrate von Polystyrol B1 im Cone Calorimeter (70 kW/m <sup>2</sup> , 30 mm, 3 Versuche) .....	94
Abb. 6-15:	Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 6-20 im Vergleich: links Polyurethan B3, rechts Polyurethan B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 - $\chi_{EHC}$ , 2 - $\chi_{FL}$ , 3 - $\chi_{HRR,mean}$ , 4 - $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 - $\chi_{HRR,60s}$ .....	97
Abb. 6-16:	Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 6-23 für Polystyrol B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 - $\chi_{EHC}$ , 2 - $\chi_{FL}$ , 3 - $\chi_{HRR,mean}$ , 4 - $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 - $\chi_{HRR,60s}$ .....	98
Abb. 7-1:	Fichtenholz a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 31 kW im modifizierten Single Burning Item Test.....	101
Abb. 7-2:	Wärmefreisetzungsrate von Fichtenholz im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Schnittholzplatte 15 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz) .....	103
Abb. 7-3:	Wärmefreisetzungsrate von Rohspan P2 im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Platte 16 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz) .....	105
Abb. 7-4:	Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 7-3 im Vergleich mit den im Labormaßstab gewonnenen Daten (rechts): oben Fichtenholz, unten Rohspan P2. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 - $\chi_{EHC}$ , 2 - $\chi_{FL}$ , 3 - $\chi_{HRR,mean}$ , 4 - $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 - $\chi_{HRR,180s}$ .....	107
Abb. 7-5:	Polyurethan B1 a) vor, b) während und c) nach der Beaufschlagung mit 51 kW im modifizierten Single Burning Item Test.....	108

Abb. 7-6:	Wärmefreisetzungsrate von Polyurethan B3 im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Platte 30 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz).....	110
Abb. 7-7:	Wärmefreisetzungsrate von Polystyrol B1 im modifizierten Single Burning Item Test (31 kW, Platte 30 mm, 3 Versuche: rot, blau, grün; resultierendes Mittel: schwarz) .....	111
Abb. 7-8:	Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 7-6 im Vergleich mit den im Labormaßstab gewonnenen Daten (rechts): oben Polyurethan B3, unten Polyurethan B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 - $\chi_{EHC}$ , 2 - $\chi_{FL}$ , 3 - $\chi_{HRR,mean}$ , 4 - $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 - $\chi_{HRR,180s}$ ( $\chi_{HRR,60s}$ im Labormaßstab) .....	113
Abb. 7-9:	Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 7-6 im Vergleich mit den im Labormaßstab gewonnenen Daten (rechts): Polystyrol B1. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 - $\chi_{EHC}$ , 2 - $\chi_{FL}$ , 3 - $\chi_{HRR,mean}$ , 4 - $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 - $\chi_{HRR,180s}$ ( $\chi_{HRR,60s}$ im Labormaßstab) .....	114
Abb. 8-1:	Histogramme zur Verbrennungseffizienz $\chi_{HRR,10-90}$ von Rohspan P2 im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; links 35 kW/m <sup>2</sup> , rechts 70 kW/m <sup>2</sup> ; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung) .....	124
Abb. 8-2:	Quantil-Quantil-Plots und lineare Regressionsgeraden zur Verbrennungseffizienz $\chi_{HRR,10-90}$ von Rohspan P2 bei 35 (rot, Gleichung oben) und 70 kW/m <sup>2</sup> (blau, Gleichung unten) im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche) .....	125
Abb. 8-3:	Histogramm zur Verbrennungseffizienz $\chi_{HRR,10-90}$ von Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung).....	127
Abb. 8-4:	Quantil-Quantil-Plot und lineare Regressionsgerade zur Verbrennungseffizienz $\chi_{HRR,10-90}$ von Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche).....	128
Abb. 11-1:	Empirische Verteilungsfunktionen der Verbrennungseffizienzen der Reihen 1 (blau) und 2 (rot) sowie deren maximaler Abstand (schwarz) gemäß Tabelle 11-3 .....	174

---

**10.3. Tabellenverzeichnis**

Tab. 2-1:	Verbrennungseffizienz in Abhängigkeit der Ruß-, Aschebildung und unvollständigen Verbrennung für Produktions-, Bau- und Lagerstoffe nach [Sch09] .7	
Tab. 4-1:	Stoffauswahl und eingesetzte Versuchsaapparaturen (x) .....	23
Tab. 4-2:	Dichten und Heizwerte der untersuchten Proben gemäß eigener Bestimmung und Literatur .....	24
Tab. 5-1:	Kenngößen der Prüfgefäße für Flüssigkeiten am Cone Calorimeter .....	37
Tab. 5-2:	Wärmestromdichten nach Brandszenarien [Gre11].....	37
Tab. 5-3:	Wärmestromdichten nach Ort und Zeit (Mittelwerte) .....	37
Tab. 5-4:	Versuchsübersicht Cone Calorimeter für Feststoffe .....	38
Tab. 5-5:	Versuchsübersicht Cone Calorimeter für Flüssigkeiten .....	38
Tab. 5-6:	Kenngößen des Prüfgefäßes für Flüssigkeiten am modifizierten Single Burning Item Test.....	42
Tab. 5-7:	Richtwerte für Zündinitiale in Anlehnung an [Hos13].....	42
Tab. 5-8:	Versuchsübersicht modifizierter Single Burning Item Test für Feststoffe .....	43
Tab. 5-9:	Versuchsübersicht modifizierter Single Burning Item Test für Flüssigkeiten...	43
Tab. 6-1:	Versuchsergebnisse für Fichtenholz mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten .....	57
Tab. 6-2:	Versuchsergebnisse für Fichtenholz mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte.....	58
Tab. 6-3:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Fichtenholz mittels Cone Calorimeter .....	62
Tab. 6-4:	Versuchsergebnisse für Rohspan P2 mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten .....	66
Tab. 6-5:	Versuchsergebnisse für Rohspan P2 mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte.....	66
Tab. 6-6:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Rohspan P2 mittels Cone Calorimeter .....	68
Tab. 6-7:	Grundannahmen zur quantifizierten Auswertung der Parametervariation.....	71

Tab. 6-8:	Ergebnisse der Parametervariation für Holz- und Holzwerkstoffe für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbelastung sowie für deren Eingangsgrößen.....	72
Tab. 6-9:	Ergebnisse der Parametervariation für Holz- und Holzwerkstoffe für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie für deren Eingangsgrößen .....	73
Tab. 6-10:	Versuchsergebnisse für Polyethylen mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbelastungen und Wärmefreisetzungsraten .....	76
Tab. 6-11:	Versuchsergebnisse für Polyethylen mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte.....	76
Tab. 6-12:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyethylen mittels Cone Calorimeter .....	79
Tab. 6-13:	Versuchsergebnisse für Polymethylmethacrylat (geschwärzt) mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbelastungen und Wärmefreisetzungsraten.....	81
Tab. 6-14:	Versuchsergebnisse für Polymethylmethacrylat (geschwärzt) mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte .....	81
Tab. 6-15:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polymethylmethacrylat (geschwärzt) mittels Cone Calorimeter .....	83
Tab. 6-16:	Ergebnisse der Parametervariation für Kunststoffe der Brandklasse B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbelastung sowie für deren Eingangsgrößen.....	85
Tab. 6-17:	Ergebnisse der Parametervariation für Kunststoffe der Brandklasse B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie für deren Eingangsgrößen.....	86
Tab. 6-18:	Versuchsergebnisse für Polyurethan mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbelastungen und Wärmefreisetzungsraten .....	88
Tab. 6-19:	Versuchsergebnisse für Polyurethan mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte.....	88

## 10. Verzeichnisse

---

Tab. 6-20:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyurethan mittels Cone Calorimeter .....	91
Tab. 6-21:	Versuchsergebnisse für Polystyrol mittels Cone Calorimeter – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten .....	93
Tab. 6-22:	Versuchsergebnisse für Polystyrol mittels Cone Calorimeter – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte.....	93
Tab. 6-23:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polystyrol mittels Cone Calorimeter .....	95
Tab. 6-24:	Ergebnisse der Parametervariation für leicht- und schwerentflammbare Kunststoffe der Brandklassen A und B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie für deren Eingangsgrößen .....	99
Tab. 6-25:	Ergebnisse der Parametervariation für leicht- und schwerentflammbare Kunststoffe der Brandklassen A und B für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie für deren Eingangsgrößen .....	99
Tab. 7-1:	Versuchsergebnisse für Fichtenholz und Rohspan P2 mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten .....	102
Tab. 7-2:	Versuchsergebnisse für Fichtenholz und Rohspan P2 mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte.....	102
Tab. 7-3:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Fichtenholz und Rohspan P2 mittels Single Burning Item Test (modifiziert) .....	105
Tab. 7-4:	Versuchsergebnisse für Polyurethan und Polystyrol mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – effektive Verbrennungswärmen, Brennstoffbeladungen und Wärmefreisetzungsraten .....	108
Tab. 7-5:	Versuchsergebnisse für Polyurethan und Polystyrol mittels Single Burning Item Test (modifiziert) – Eingangsmassen, Massenverluste und Massenverlustraten sowie charakteristische Zeitpunkte.....	109
Tab. 7-6:	Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyurethan und Polystyrol mittels Single Burning Item Test (modifiziert) .....	111

## 10. Verzeichnisse

---

Tab. 8-1:	Überblick mittlerer Verbrennungseffizienzen des Labor- und Zwischenmaßstabs.....	116
Tab. 8-2:	Mittlere variantenspezifische Faktoren berechnet aus den Versuchsergebnissen unterschiedlicher Material- und Bestrahlungsstärken .....	118
Tab. 8-3:	Fehlerarten bei der Durchführung statistischer Tests am Beispiel der Nullhypothese „Die Daten sind normalverteilt.“ in Anlehnung an [Har09].....	118
Tab. 8-4:	Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung für Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche) sowie im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche) .....	123
Tab. 8-5:	Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche) .....	126
Tab. 8-6:	Ergebnisse zum Test auf Normalverteilung für Rohspan P2 bei der Zusammenfassung der Ergebnisse von 35 und 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche).....	126
Tab. 8-7:	Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 35 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, 21 Versuche) und im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche).....	129
Tab. 8-8:	Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, 21 Versuche) und im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche).....	129
Tab. 8-9:	Ergebnisse zum Test auf Vergleichbarkeit für Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m <sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche) und im modifizierten Single Burning Item Test (Platten 15 mm, 3 Versuche) .....	130
Tab. 11-1:	Arbeitstabelle zum Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest.....	170
Tab. 11-2:	Arbeitstabelle zum t-Test für unabhängige Stichproben bei ungleichen Reihengängen.....	171
Tab. 11-3:	Arbeitstabelle zum Kolmogoroff-Smirnov-Test .....	173
Tab. 11-4:	Verbrennungseffizienzen von Rohspan P2 bei 35 kW/m <sup>2</sup> (Platten 10 mm, 21 Versuche) .....	175
Tab. 11-5:	Verbrennungseffizienzen von Rohspan P2 bei 70 kW/m <sup>2</sup> (Platten 10 mm, 21 Versuche) .....	176

---

## 11. Anhang

**Anhang 1: Elementaranalysen Holz- und Holzwerkstoffe**

<b>Zusammensetzung (Massen-%)<sup>a</sup></b>			
<b>Lufttrocken</b>	<b>Fichtenholz</b>	<b>Rohspan P2, 10 mm</b>	<b>Rohspan P2, 19 mm</b>
<b>Wasser</b>	10,33	9,10	7,37
<b>Asche</b>	0,20	0,55	0,00
<b>C</b>	46,80	44,97	45,42
<b>H</b>	5,46	5,51	5,78
<b>N</b>	0,23	2,49	2,29
<b>O</b>	36,87	37,31	39,08
<b>S</b>	0,10	0,07	0,06

<sup>a</sup>geringfügige Abweichungen von der Summe 100% können neben zusätzlichen, nicht bestimmten Anteilen auf die Verwendung unterschiedlicher Analysegeräte in Verbindung mit Messunsicherheiten zurückgeführt werden

**Anhang 2: Elementaranalysen Kunststoffe**

<b>Zusammensetzung (Massen-%)<sup>a</sup></b>			
<b>Lufttrocken</b>	<b>Polyethylen-Granulat</b>	<b>Polyethylen-Folie</b>	<b>Polymethylmethacrylat</b>
<b>Wasser</b>	0,17	0,83	0,73
<b>Asche</b>	-	-	-
<b>C</b>	85,21	85,63	59,87
<b>H</b>	13,16	13,70	8,10
<b>N</b>	-	-	-
<b>O</b>	-	-	ca. 31 - 32 <sup>b</sup>
<b>S</b>	-	-	-

<sup>a</sup>geringfügige Abweichungen von der Summe 100% können neben zusätzlichen, nicht bestimmten Anteilen auf die Verwendung unterschiedlicher Analysegeräte in Verbindung mit Messunsicherheiten zurückgeführt werden, <sup>b</sup>berechnet auf Grundlage der Differenz zu 100%; Abweichungen auf Grund nicht bestimmter Anteile möglich

**Anhang 3: Verbrennungseffizienzen mit Heizwert nach Norm für Fichtenholz**

Zum Vergleich mit Tabelle 6-3: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Fichtenholz mittels Cone Calorimeter mit Heizwert nach Norm [DIN18230-3] von 17,28 kJ/g (vergleiche [Hah13a])

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippen (20 mm)</b>						
Platte	20	0,87	0,57	1,24	0,84	0,79
Platte	35	0,82	0,69	0,66	0,75	0,67
Platte (Hirnholz)	35	0,80	0,63	0,62	0,75	0,71
Krippe (5 Versuche)	35	0,87	0,76	0,54	0,75	0,72
Späne	35	0,89	0,79	0,55	0,82	0,76 <sup>a</sup>
Platte	50	0,77	0,66	0,67	0,73	0,66
Platte	70	0,78	0,68	0,67	0,75	0,67
<b>Probenhöhe 20 mm, ausgenommen Krippen (40 mm)</b>						
Platte	20	0,89	0,67	0,82	0,82	0,75
Platte	35	0,81	0,68	0,72	0,77	0,73
Krippe, Jahresringe oben	35	0,88	0,74	0,62	0,77	0,69
Krippe, Jahresringe Front / Seite (4 Versuche)	35	0,84	0,72	0,63	0,77	0,64
Platte	70	0,78	0,65	0,73	0,74	0,69
Mittel Platten (35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup> )		0,79 (+0,03 -0,02)	0,67 (+0,03 -0,02)	0,69 (+0,04 -0,03)	0,75 (±0,02)	0,68 (+0,05 -0,02)

<sup>a</sup> Bezugszeitraum von der Entzündung bis 60 s hiernach

**Anhang 4: Verbrennungseffizienzen mit Heizwert nach Norm für Rohspan P2**

Zum Vergleich mit Tabelle 6-6: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Rohspan P2 mittels Cone Calorimeter mit Heizwert nach Norm [DIN18230-3] von 17,28 kJ/g (vergleiche [Hah14a])

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 10 mm, ausgenommen Krippe (20 mm)</b>						
Platte	20	0,76	0,59	0,59	0,70	0,63
Platte	35	0,76	0,60	0,64	0,78	0,66
Krippe	35	0,83	0,66	0,62	0,75	0,68
Platte	50	0,79	0,65	0,53	0,72	0,68
Platte	70	0,78	0,63	0,59	0,73	0,69
<b>Probenhöhe 2 x 10 mm</b>						
Platte	35	0,76	0,61	0,70	0,70	0,69
<b>Probenhöhe 19 mm</b>						
Platte	20	0,73	0,53	0,70	0,70	0,61
Platte	35	0,69	0,50	0,73	0,74	0,60
Mittel Platten (35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup> ; ohne 19 mm)		0,78 (+0,01 -0,02)	0,62 (+0,03 -0,02)	0,62 (+0,08 -0,09)	0,73 (+0,05 -0,03)	0,68 (+0,01 -0,02)

**Anhang 5: Verbrennungseffizienzen mit Heizwert nach Norm für Polyethylen**

Zum Vergleich mit Tabelle 6-12: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyethylen mittels Cone Calorimeter mit Heizwert nach Norm [DIN18230-3] von 43,90 kJ/g (vergleiche [Hah14b])

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 40 mm (soweit nicht anders angegeben)</b>						
Granulat	20	0,98	0,64	0,91	0,97	0,99
Granulat	35	0,96	0,95	0,85	0,95	0,93
Granulat	50	0,96	0,95	0,84	0,94	0,83
Granulat	70	0,97	0,95	0,83	0,92	0,73
Granulat, 20 mm	35	0,97	0,96	0,68	0,95	0,94
Folie, 21 mm (4 Versuche)	35	0,98	0,96	0,76	0,97	0,93
Mittel Granulat (35, 50, 70 kW/m <sup>2</sup> ; ohne 20 mm)		0,96 (+0,01 -0,00)	0,95 (±0,00)	0,84 (±0,01)	0,94 (+0,01 -0,02)	0,84 (±0,10)

**Anhang 6: Verbrennungseffizienzen mit Heizwert nach Norm für Polymethylmethacrylat**

Zum Vergleich mit Tabelle 6-15: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polymethylmethacrylat mittels Cone Calorimeter mit Heizwert nach Norm [DIN18230-3] von 24,84 kJ/g

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 18 mm</b>						
Platte	20	1,04	1,04	0,94	0,98	0,83
Platte	35	0,99	1,00	0,95	0,99	0,97
Platte	50	0,99	1,00	0,94	0,99	0,96
Platte	70	1,02	1,02	0,89	1,00	0,98
<b>Mittel Platten (35, 50, 70 kW/m<sup>2</sup>)</b>		1,00 (+0,02 -0,01)	1,00 (+0,02 -0,00)	0,92 (±0,03)	0,99 (+0,01 -0,00)	0,97 (±0,01)

**Anhang 7: Verbrennungseffizienzen mit Heizwert nach Norm für Polyurethan**

Zum Vergleich mit Tabelle 6-20: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polyurethan mittels Cone Calorimeter mit Heizwert nach Norm [DIN18230-3] von 24,12 kJ/g

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,60s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>						
Platte B1	35	0,34	0,11	0,30	0,27	0,36
Platte B1	50	0,35	0,19	0,21	0,39	0,43
Platte B1	70	0,81	0,74	0,59	0,77	0,50
<b>Mittel B1</b>		0,50 (+0,38 -0,16)	0,35 (+0,39 -0,24)	0,36 (+0,23 -0,38)	0,48 (+0,29 -0,21)	0,43 (+0,07 -0,09)

**Anhang 8: Verbrennungseffizienzen mit Heizwert nach Norm für Polystyrol**

Zum Vergleich mit Tabelle 6-23: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Polystyrol mittels Cone Calorimeter mit Heizwert nach Norm [DIN18230-3] von 39,60 kJ/g

Versuch	HFX	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,60s}$
	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Probenhöhe 30 mm</b>						
Platte B1	35	0,72	0,71	0,42	0,52	0,72
Platte B1	50	0,73	0,70	0,33	0,55	0,67
Platte B1	70	0,70	0,73	0,27	0,49	0,60
<b>Mittel B1</b>		0,72 (+0,01 -0,02)	0,71 (+0,02 -0,01)	0,34 (+0,08 -0,06)	0,52 (±0,03)	0,66 (±0,06)

**Anhang 9: Verbrennungseffizienzen mit Heizwert nach Norm für den Zwischenmaßstab**

Zum Vergleich mit Tabelle 7-3 und Tabelle 7-6: Faktoren der Verbrennungseffizienz für Fichtenholz, Rohspan P2 und Polyurethan B1 mittels Single Burning Item Test (modifiziert) mit Heizwert nach Norm [DIN18230-3] von 17,28 kJ/g beziehungsweise 24,12 kJ/g

<b>Material</b>	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Fichtenholz</b>	0,91	0,91	0,58	0,85	0,38
<b>Rohspan P2</b>	0,98	0,93	0,65	0,89	0,47
<b>Polyurethan B1</b>	0,66	0,64	0,25	0,54	0,12

**Anhang 10: Parametervariation - Zusammenstellung nach Materialien: Fichtenholz**

Übersicht der herangezogenen Versuche und variierten Parameter für Fichtenholz (soweit nicht anders angegeben Versuche bei 35 kW/m<sup>2</sup>). Die für die jeweilige Zusammenfassung berücksichtigten Versuche sind grau markiert.

Fichtenholz		Varierte Parameter		
Nr.	Mittelwert der Versuche	HFX	Höhe	Spezifische Oberfläche
1	10 → 20 mm Plattenhöhe bei 35 kW/m <sup>2</sup>	o	↑	o
2	10 → 20 mm Plattenhöhe bei 70 kW/m <sup>2</sup>	o	↑	o
3	35 → 50 kW/m <sup>2</sup> HFX bei 10 mm Plattenhöhe	↑	o	o
4	50 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX bei 10 mm Plattenhöhe	↑	o	o
5	35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX bei 10 mm Plattenhöhe	↑	o	o
6	35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX bei 20 mm Plattenhöhe	↑	o	o
7	20 mm Platte → Krippe 10 mm	o	o	↑
8	20 mm Platte → Krippe 20 mm, Hirnholz	o	↑	↑
9	20 mm Platte → Krippe 20 mm, Hirnholz Front / Seite	o	↑	↑

Parametervariation Fichtenholz für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbelastung sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
1: 10 → 20 mm, 35 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
2: 10 → 20 mm, 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
3: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup> , 10 mm	↘	↘	↘	↘
4: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup> , 10 mm	o	o	o	o
5: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup> , 10 mm	o	o	o	o
6: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup> , 20 mm	↘	↘	↘	↘
7: 20 mm → Krippe 10 mm	↗	↑	↗	↑
8: 20 mm → Krippe 20 mm, Hirnholz	↗	↑	↑	↑
9: 20 mm → Krippe 20 mm, Hirnholz Front / Seite	↑	↑	o	↗

## 11. Anhang

Parametervariation Fichtenholz für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\dot{Q}''_{\text{mean}}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}_{180s}$	$\chi_{\text{HRR,mean}}$	$\chi_{\text{HRR,10-90}}$	$\chi_{\text{HRR,180s}}$
1: 10 → 20 mm, 35 kW/m <sup>2</sup>	↓	↓	o	↓	↓	↑	o	↑
2: 10 → 20 mm, 70 kW/m <sup>2</sup>	↓	↓	o	↓	o	↑	o	o
3: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup> , 10 mm	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o
4: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup> , 10 mm	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o
5: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup> , 10 mm	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o
6: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup> , 20 mm	↑	↑	↑	↑	↑	↘	o	↘
7: 20 mm → Krippe 10 mm	↑	↑	↑	↑	↑	↑	o	o
8: 20 mm → Krippe 20 mm, Hirnholz	↑	↑	↑	↑	↑	↓	o	↘
9: 20 mm → Krippe 20 mm, Hirnholz Front / Seite	↑	↑	↑	↑	↑	↓	o	↓

### Anhang 11: Parametervariation - Zusammenstellung nach Materialien: Rohspan P2

Übersicht der herangezogenen Versuche und variierten Parameter für Rohspan P2 (soweit nicht anders angegeben Versuche bei 35 kW/m<sup>2</sup>). Die für die jeweilige Zusammenfassung berücksichtigten Versuche sind grau markiert.

Rohspan P2		Varierte Parameter			
Nr.	Mittelwert der Versuche	HFX	Höhe	Spezifische Oberfläche	Rohdichte
1	10 → 19 mm Plattenhöhe	o	↑	o	↓
2	10 → 2 x 10 mm Plattenhöhe	o	↑	o	o
3	2 x 10 → 19 mm Plattenhöhe	o	o	o	↓
4	35 → 50 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	o	o	o
5	50 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	o	o	o
6	35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	o	o	o
7	2 x 10 mm Platte → Krippe	o	o	↑	o
8	10 mm Platte → Krippe	o	↑	↑	o

## 11. Anhang

Parametervariation Rohspan P2 für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
1: 10 → 19 mm	↓	↓	↓	↓
2: 10 → 2 x 10 mm	o	o	o	o
3: 2 x 10 → 19 mm	↓	↓	↓	↓
4: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	o	↗	↑	↑
5: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
6: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	↗	o	o
7: 2 x 10 mm → Krippe	↑	↑	↑	↑
8: 10 mm → Krippe	↑	↑	↑	↑

Parametervariation Rohspan P2 für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
1: 10 → 19 mm	↓	↓	↓	↓	↘	↑	o	↘
2: 10 → 2 x 10 mm	↓	↓	↘	↓	↓	↑	↓	o
3: 2 x 10 → 19 mm	o	o	↓	↓	o	↗	↗	↓
4: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	↘	↗	↑	↑	↑	↓	↓	o
5: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	↑	o	o
6: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	↘	↘	↗
7: 2 x 10 mm → Krippe	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↗	o
8: 10 mm → Krippe	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o

**Anhang 12: Parametervariation - Zusammenstellung nach Materialien: Polyethylen**

Übersicht der herangezogenen Versuche und variierten Parameter für Polyethylen (soweit nicht anders angegeben Versuche bei 35 kW/m<sup>2</sup>). Die für die jeweilige Zusammenfassung berücksichtigten Versuche sind grau markiert.

Polyethylen		Varierte Parameter		
Nr.	Mittelwert der Versuche	HFX	Höhe	Rohdichte
1	20 → 40 mm Granulathöhe	o	↑	o
2	35 → 50 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	o	o
3	50 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	o	o
4	35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	o	o
5	20 mm Granulat → 21 mm Folie	o	o	↑
6	40 mm Granulat → 21 mm Folie	o	↑	↑

Parametervariation Polyethylen für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
1: 20 → 40 mm	o	o	o	o
2: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
3: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
4: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
5: 20 mm → Folie	o	o	o	o
6: 40 mm → Folie	o	o	o	o

Parametervariation Polyethylen für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
1: 20 → 40 mm	o	↓	o	↓	o	↑	o	o
2: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	↓
3: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	↓
4: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	↓
5: 20 mm → Folie	↑	↑	↓	↑	↓	↑	o	o
6: 40 mm → Folie	↑	↑	↓	↑	↓	↓	o	o

**Anhang 13: Parametervariation - Zusammenstellung nach Materialien: Polymethylmethacrylat**

Übersicht der herangezogenen Versuche und variierten Parameter für Polymethylmethacrylat. Die für die jeweilige Zusammenfassung berücksichtigten Versuche sind grau markiert.

Polymethylmethacrylat		Variierter Parameter
Nr.	Mittelwert der Versuche	HFX
1	35 → 50 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑
2	50 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑
3	35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑

Parametervariation Polymethylmethacrylat für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbelastung sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
1: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
2: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
3: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o

Parametervariation Polymethylmethacrylat für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
1: 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o
2: 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	↘	o	o
3: 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	↓	o	o

**Anhang 14: Parametervariation - Zusammenstellung nach Materialien: Polyurethan**

Übersicht der herangezogenen Versuche und variierten Parameter für Polyurethan. Die für die jeweilige Zusammenfassung berücksichtigten Versuche sind grau markiert.

Polyurethan		Varierte Parameter	
Nr.	Mittelwert der Versuche	HFX	Entflammbarkeit
1	B3, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	
2	B3, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	
3	B3, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	
4	B1, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	
5	B1, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	
6	B1, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑	
7	35 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3		↑
8	50 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3		↑
9	70 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3		↑

Parametervariation Polyurethan für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbelastung sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
1: B3, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	o	o	↘	o
2: B3, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	↗	o	↗
3: B3, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	↗	o	↗
4: B1, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	o	↑	o	↑
5: B1, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑
6: B1, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑
7: 35 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3	↑	↑	↑	↑
8: 50 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3	↑	↑	↑	↑
9: 70 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3	↑	↑	↑	↗ <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Sichtbarkeit der eingeschränkten Wirksamkeit des Flammschutzzusatzes

## 11. Anhang

Parametervariation Polyurethan für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\dot{Q}''_{\text{mean}}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{60s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}_{60s}$	$\chi_{\text{HRR,mean}}$	$\chi_{\text{HRR,10-90}}$	$\chi_{\text{HRR,60s}}$
1: B3, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o
2: B3, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↗	↑	↗	↑	o	o	o	↑
3: B3, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	↘	↗	↑
4: B1, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑
5: B1, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑
6: B1, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	↑	↗	↑	↑	↑	↑
7: 35 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
8: 50 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
9: 70 kW/m <sup>2</sup> , B1 → B3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	o <sup>a</sup>	↑

<sup>a</sup>Sichtbarkeit der eingeschränkten Wirksamkeit des Flammschutzzusatzes

### Anhang 15: Parametervariation - Zusammenstellung nach Materialien: Polystyrol

Übersicht der herangezogenen Versuche und variierten Parameter für Polystyrol. Die für die jeweilige Zusammenfassung berücksichtigten Versuche sind grau markiert.

Polystyrol		Variierter Parameter
Nr.	Mittelwert der Versuche	HFX
1	B1, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑
2	B1, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑
3	B1, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup> HFX	↑

Parametervariation Polystyrol für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie deren Eingangsgrößen

Nr.: Mittel Versuche	$\Delta h_{c,eff}$	q	$\chi_{\text{EHC}}$	$\chi_{\text{FL}}$
1: B1, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
2: B1, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o
3: B1, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	o	o	o	o

## 11. Anhang

Parametervariation Polystyrol für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

<b>Nr.: Mittel Versuche</b>	$\dot{Q}''_{\text{mean}}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{60s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{60s}$	$\chi_{\text{HRR,mean}}$	$\chi_{\text{HRR,10-90}}$	$\chi_{\text{HRR,60s}}$
<b>1:</b> B1, 35 → 50 kW/m <sup>2</sup>	o	↑	o	↑	↗	↓	o	↘
<b>2:</b> B1, 50 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	o	↑	↑	↓	↓	↓
<b>3:</b> B1, 35 → 70 kW/m <sup>2</sup>	↑	↑	o	↑	↑	↓	↘	↓

**Anhang 16: Parametervariation - Zusammenstellung nach Parametern: Beaufschlagungsintensität**

Variation der Beaufschlagungsintensität für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbelastung sowie deren Eingangsgrößen

	$\Delta h_{c,eff}$	$q$	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
<b>Fichtenholz,</b> HFX ↑	o (↘)	o (↘)	o (↘)	o (↘)
<b>Rohspan P2,</b> HFX ↑	o	↗	o	o
<b>PUR B3,</b> HFX ↑	o	↗	o	↗
<b>PUR B1,</b> HFX ↑	↗	↑	↗	↑
<b>PE,</b> HFX ↑	o	o	o	o
<b>PMMA,</b> HFX ↑	o	o	o	o
<b>PS B1,</b> HFX ↑	o	o	o	o

Variation der Beaufschlagungsintensität für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
<b>Fichtenholz,</b> HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	o
<b>Rohspan P2,</b> HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	o (↘)	↘	o
<b>PUR B3<sup>a</sup>,</b> HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↗	o	o	↗
<b>PUR B1<sup>a</sup>,</b> HFX ↑	↗	↑	↑	↗	↑	↗	↑	↑
<b>PE,</b> HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	o	o	↓
<b>PMMA,</b> HFX ↑	↑	↑	↑	↑	↑	↘	o	o
<b>PS B1<sup>a</sup>,</b> HFX ↑	↗	↑	o	↑	↑	↓	↘	↓

<sup>a</sup>statt Bezugszeitraum von der Entzündung bis 180 s Bezugszeitraum von der Entzündung bis 60 s hiernach

**Anhang 17: Parametervariation - Zusammenstellung nach Parametern: Probenhöhe**

Variation der Probenhöhe für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie deren Eingangsgrößen

	$\Delta h_{c,eff}$	$q$	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
<b>Fichtenholz, Probenhöhe ↓</b>	o	o	o	o
<b>Rohspan P2, Probenhöhe ↓</b>	o	o	o	o
<b>PE, Probenhöhe ↓</b>	o	o	o	o

Variation der Probenhöhe für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
<b>Fichtenholz, Probenhöhe ↓</b>	↑	↑	o	↑	↗	↓	o	↘
<b>Rohspan P2, Probenhöhe ↓</b>	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↗	o (↗)
<b>PE, Probenhöhe ↓</b>	o	↑	o	↑	o	↓	o	o

**Anhang 18: Parametervariation - Zusammenstellung nach Parametern: spezifische Oberfläche**

Variation der spezifischen Oberfläche für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie deren Eingangsgrößen

	$\Delta h_{c,eff}$	$q$	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
<b>Fichtenholz, spezifische Oberfläche ↑</b>	↗	↑	↗	↑
<b>Rohspan P2, spezifische Oberfläche ↑</b>	↑	↑	↑	↑

Variation der spezifischen Oberfläche für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlustraten sowie deren Eingangsgrößen

	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
<b>Fichtenholz, spezifische Oberfläche ↑</b>	↑	↑	↑	↑	↑	↓	o	↘
<b>Rohspan P2, spezifische Oberfläche ↑</b>	↑	↑	↑	↑	↑	↘	o (↗)	o

**Anhang 19: Parametervariation - Zusammenstellung nach Parametern: Rohdichte**

Variation der Rohdichte für Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme und der Brennstoffbeladung sowie deren Eingangsgrößen

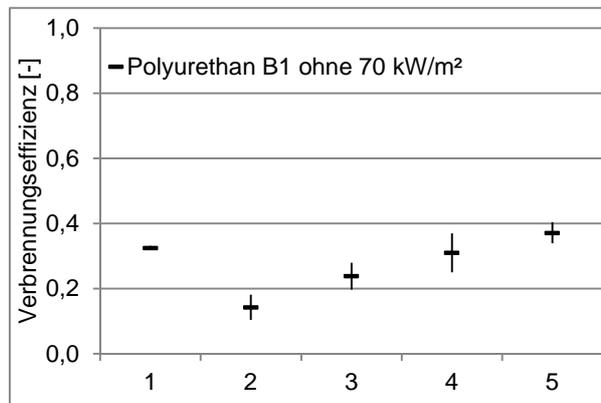
	$\Delta h_{c,eff}$	$q$	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$
<b>Rohspan P2, Rohdichte</b> ↑	↑	↑	↑	↑
<b>PE, Rohdichte</b> ↑	o	o	o	o

Variation der Rohdichte für Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungs- und der Massenverlusten sowie deren Eingangsgrößen

	$\dot{Q}''_{mean}$	$\dot{Q}''_{10-90}$	$\dot{Q}''_{180s}$	$\dot{m}''_{10-90}$	$\dot{m}''_{180s}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
<b>Rohspan P2, Rohdichte</b> ↑	↗	↗	↑	↑	o (↗)	↓	o (↘)	↑
<b>PE, Rohdichte</b> ↑	↑	↑	↓	↑	↓	o (↑↓)	o	o

**Anhang 20: Mittlere Verbrennungseffizienzen von Polyurethan B1 ohne 70 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke**

Mittlere Werte der Verbrennungseffizienzen mit Abweichungen gemäß Tabelle 6-20 für Polyurethan B1 ohne 70 kW/m<sup>2</sup> Bestrahlungsstärke. Die Werte 1 bis 5 geben die Varianten der Verbrennungseffizienz wieder: 1 -  $\chi_{EHC}$ , 2 -  $\chi_{FL}$ , 3 -  $\chi_{HRR,mean}$ , 4 -  $\chi_{HRR,10-90}$ , 5 -  $\chi_{HRR,60s}$



### Anhang 21: Beispielrechnung zum Test auf Normalverteilung mittels Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest gemäß [Har09]

Beispielhaft werden die in Tabelle 11-1 dargestellten 12 Verbrennungseffizienzen des Labormaßstabs auf Normalverteilung getestet. Dazu sind sie unter Angabe ihrer Häufigkeit nach steigender Höhe geordnet. Zunächst werden der Mittelwert mittels Gleichung (38) und die Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (43)$$

s empirische Standardabweichung [-]

zu

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{12} x_i}{12} = 0,73 \quad (38-1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (x_i - 0,73)^2}{12 - 1}} = 0,0504 \quad (43-1)$$

berechnet. Im Anschluss wird die empirische Verteilungsfunktion mit

$$S_n(x) = \begin{cases} 0, & \text{falls } x < x_i \text{ für alle } i = 1, \dots, n \\ \frac{z}{n}, & \text{falls } x \geq x_i \text{ für genau } z \text{ Beobachtungen } x_i \text{ aus } x_1, \dots, x_n \\ 1, & \text{falls } x \geq x_i \text{ für alle } i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (44)$$

$S_n(x)$  empirische Verteilungsfunktion [-]

z Anzahl der Beobachtungen [-]

bestimmt. Mittels

$$F_0(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (45)$$

mit

$F_0(x)$  hypothetische Verteilungsfunktion [-]

und

$$\mu = \bar{x} \quad (46)$$

$$\sigma = s \quad (47)$$

folgt unter Verwendung der Tabelle der Standardnormalverteilung die hypothetische Verteilungsfunktion  $F_0(x)$ . Durch Bildung der Differenzen der berechneten  $S_n(x)$  und  $F_0(x)$  sowie der Wahl des Supremums  $\sup_x$  auf Basis dessen folgt  $L_n^{\text{norm}}$ :

$$L_n^{\text{norm}} = \sup_x \left| S_n(x) - \Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right) \right| \quad (48)$$

zu

$$L_n^{\text{norm}} = 0,26 \quad (48-1)$$

Tabelle 11-1 gibt einen Überblick der Zwischenergebnisse.

**Tabelle 11-1: Arbeitstabelle zum Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest**

Häufigkeit $x_i$	$x_i$	$S_n(x)$	$F_0(x)$	$S_n(x) - \Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)$
1	0,68	0,08	0,15	-0,07
1	0,69	0,17	0,20	-0,04
2	0,70	0,33	0,26	0,07
2	0,71	0,50	0,33	0,17
2	0,72	0,67	0,41	0,26
1	0,73	0,75	0,49	0,26
1	0,76	0,83	0,71	0,12
1	0,82	0,92	0,96	-0,04
1	0,84	1,00	0,98	0,02

Entsprechend der Teststatistik gemäß Gleichung (39) resultiert ein Vergleichswert von

$$L_n^{\text{norm}} \cdot \sqrt{n} = 0,26 \cdot \sqrt{12} = 0,908 \quad (39-1)$$

Für 12 Eingangsdaten wird zur Gegenüberstellung das nächsthöhere angegebene Quantil von  $I_{n,1-\alpha}^{\text{norm}}$  für 20 Eingangsdaten verwendet, sodass beispielsweise für einen  $\alpha$ -Wert von 0,05 gemäß den tabellierten kritischen Werten zum Test auf nicht spezifizierte Normalverteilung 0,85 folgt. Da

$$0,908 > 0,85 \quad (39-2)$$

muss die Hypothese der Normalverteilung verworfen werden.

**Anhang 22: Beispielrechnung zum Test auf Gleichheit mittels t-Test für unabhängige Stichproben bei ungleichen Reihenlängen gemäß [Har09]**

Es werden 12 Verbrennungseffizienzen des Labormaßstabs (Reihe 1) mit drei im Zwischenmaßstab gewonnenen Werten (Reihe 2) verglichen. Der Mittelwert und die Standardabweichung der ersten Reihe sind identisch zum vorherigen Beispiel; es wird jedoch von normalverteilten Werten des Labor- und Zwischenmaßstabs ausgegangen. Die herangezogenen Ausgangswerte fasst Tabelle 11-2 zusammen.

**Tabelle 11-2:** Arbeitstabelle zum t-Test für unabhängige Stichproben bei ungleichen Reihenlängen

$n_1$	12
$n_2$	3
$\bar{x}_1$	0,73
$\bar{x}_2$	0,88
$s_1$	0,0504
$s_2$	0,0550

Hieraus wird die Prüfgröße

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \mu}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}} \quad (49)$$

berechnet. Zum Test auf Gleichheit der Mittelwerte wird

$$\mu = 0 \quad (50)$$

gesetzt. Es folgt ein Betrag von

$$|t| = \frac{(0,73 - 0,88) - 0}{\sqrt{\left(\frac{0,0504^2}{12} + \frac{0,0550^2}{3}\right)}} = 4,337 \quad (49-1)$$

Darüber hinaus werden die Freiheitsgrade

$$k = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{n_2 - 1} \cdot \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2} \quad (51)$$

zu

$$k = \frac{\left(\frac{0,0504^2}{12} + \frac{0,0550^2}{3}\right)^2}{\frac{1}{12 - 1} \cdot \left(\frac{0,0504^2}{12}\right)^2 + \frac{1}{3 - 1} \cdot \left(\frac{0,0550^2}{3}\right)^2} = 2,90 \quad (51-1)$$

## 11. Anhang

---

bestimmt und damit zur nächstkleineren ganzen Zahl zu 2 abgerundet. Es ergibt sich somit entsprechend der Teststatistik (40) für ein zweiseitiges Testproblem mit einem  $\alpha$ -Wert von 0,05 unter Verwendung der tabellierten Quantile der t-Verteilung:

$$4,337 > 1,886 \quad (40-1)$$

Die Hypothese der Gleichheit der Mittelwerte muss demnach verworfen werden.

**Anhang 23: Beispielrechnung zum Test auf Gleichheit mittels Kolmogoroff-Smirnov-Test für ungleiche Reihenlängen gemäß [Har09]**

Erneut werden die 12 Verbrennungseffizienzen des Labormaßstabs aus dem ersten Beispiel in Anhang 21 (Reihe 1) mit drei im Zwischenmaßstab gewonnenen Werten (Reihe 2) verglichen. Es wird wiederum das Supremum, in Form des maximalen Abstandes der Verteilungsfunktionen  $S_{n_1,1}$  und  $S_{n_2,2}$ , (analog Formel (44))

$$S_{n_i,i}(x) = \begin{cases} 0, & \text{falls } x < x_{ij} \text{ für alle } j = 1, \dots, n_i \\ \frac{z}{n_i}, & \text{falls } x \geq x_{ij} \text{ für genau } z \text{ der } j \text{ aus } \{1, \dots, n_i\} \\ 1, & \text{falls } x \geq x_{ij} \text{ für alle } j = 1, \dots, n_i \end{cases} \quad (52)$$

$S_{n_i,i}(x)$  empirische Verteilungsfunktion mit  $n_i$  Werten für Reihe  $i$  [-]

$j$  zweiter laufender Parameter [-]

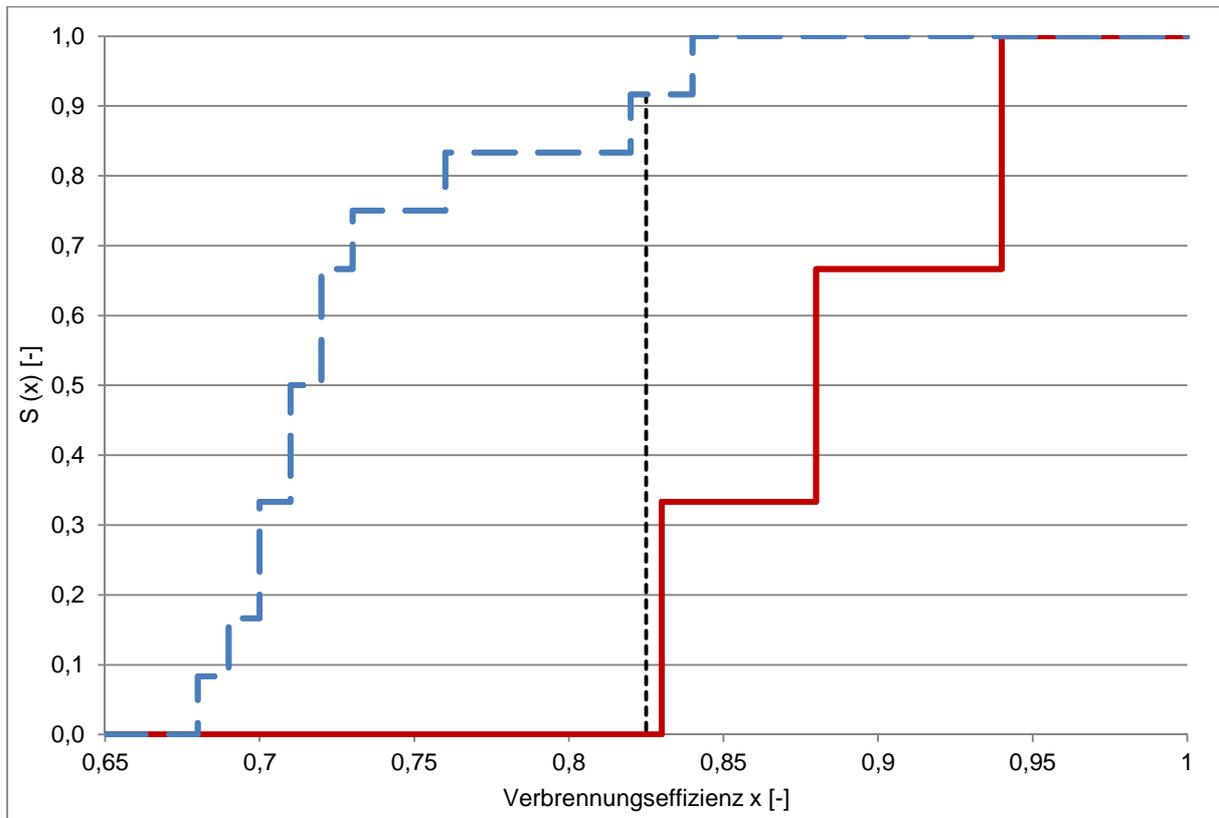
gesucht. Hierzu sind in Tabelle 11-3 alle Verbrennungseffizienzen nach aufsteigender Größe geordnet und mit den Werten der Verteilungsfunktionen  $S_{12,1}(x)$  und  $S_{3,2}(x)$  erfasst. Durch Differenzbildung folgen die Beträge der Abstände der beiden Verteilungen  $|S_{12,1}(x) - S_{3,2}(x)|$ .

**Tabelle 11-3: Arbeitstabelle zum Kolmogoroff-Smirnov-Test**

Häufigkeit $x_{1,j}$	$x_{1,j}$	Häufigkeit $x_{2,j}$	$x_{2,j}$	$S_{12,1}(x)$	$S_{3,2}(x)$	$ S_{12,1}(x) - S_{3,2}(x) $
1	0,68			$\frac{1}{12}$	0	$\frac{1}{12}$
1	0,69			$\frac{2}{12}$	0	$\frac{2}{12}$
2	0,70			$\frac{4}{12}$	0	$\frac{4}{12}$
2	0,71			$\frac{6}{12}$	0	$\frac{6}{12}$
2	0,72			$\frac{8}{12}$	0	$\frac{8}{12}$
1	0,73			$\frac{9}{12}$	0	$\frac{9}{12}$
1	0,76			$\frac{10}{12}$	0	$\frac{10}{12}$
1	0,82			$\frac{11}{12}$	0	$\frac{11}{12}$
		1	0,83	$\frac{11}{12}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{7}{12}$
1	0,84			1	$\frac{1}{3}$	$\frac{8}{12}$
		1	0,88	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{12}$
		1	0,94	1	1	0

## 11. Anhang

Zur Veranschaulichung sind die empirischen Verteilungsfunktionen in Abbildung 11-1 dargestellt. Es resultiert ein maximaler Abstand von  $\frac{11}{12}$ .



**Abbildung 11-1:** Empirische Verteilungsfunktionen der Verbrennungseffizienzen der Reihen 1 (blau) und 2 (rot) sowie deren maximaler Abstand (schwarz) gemäß Tabelle 11-3

Der Wert der Teststatistik  $K_{n_1, n_2}$  folgt gemäß Formel (42):

$$K_{n_1, n_2} = K_{12, 3} = \sqrt{\frac{12 \cdot 3}{12 + 3}} \cdot \frac{11}{12} = 1,42 \quad (42-1)$$

Für ein zweiseitiges Testproblem mit einem  $\alpha$ -Wert von 0,05 ergibt sich gemäß Gleichung (41) im Vergleich mit den tabellierten kritischen Werten  $k_{n_1, n_2; 1-\alpha}$ :

$$1,42 > 1,10 \quad (41-1)$$

Die Hypothese der Gleichheit der Verbrennungseffizienzen des Labor- und Zwischenmaßstabs muss demnach verworfen werden.

**Anhang 24: Datenbasis des Labormaßstabs zur statistischen Auswertung**

Die Tabellen 11-4 und 11-5 geben die Verbrennungseffizienzen des Labormaßstabs wieder, wobei die Variationskoeffizienten mittels

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \quad (53)$$

V Variationskoeffizient [-]

berechnet wurden.

**Tabelle 11-4:** Verbrennungseffizienzen von Rohspan P2 bei 35 kW/m<sup>2</sup> (Platten 10 mm, 21 Versuche)

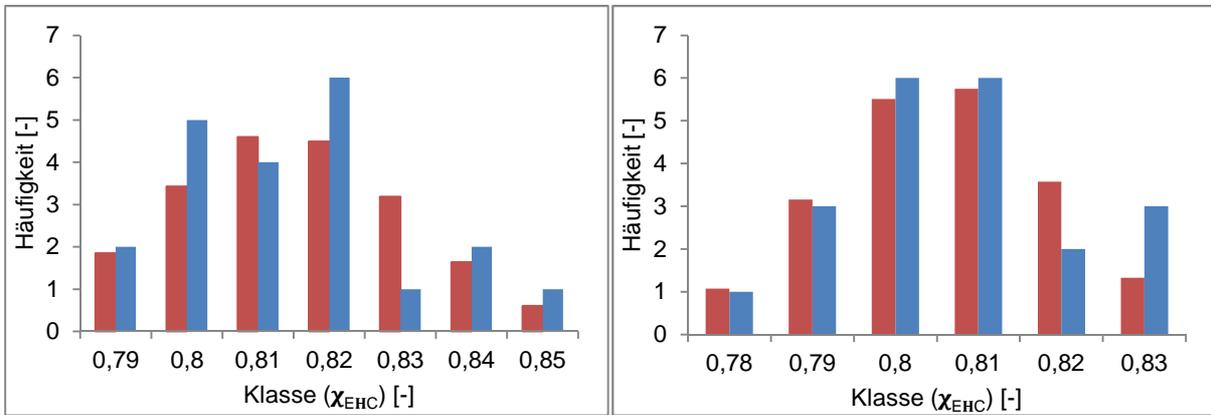
Versuchsnummer	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0,80	0,64	0,63	0,74	0,70
2	0,81	0,65	0,58	0,74	0,70
3	0,79	0,62	0,59	0,73	0,69
4	0,82	0,65	0,65	0,76	0,70
5	0,80	0,64	0,58	0,75	0,69
6	0,80	0,64	0,58	0,73	0,69
7	0,80	0,63	0,58	0,73	0,69
8	0,81	0,66	0,56	0,74	0,69
9	0,80	0,64	0,59	0,74	0,69
10	0,79	0,63	0,58	0,73	0,69
11	0,81	0,65	0,59	0,75	0,71
12	0,81	0,64	0,63	0,75	0,70
13	0,82	0,64	0,64	0,76	0,72
14	0,82	0,65	0,60	0,76	0,72
15	0,83	0,66	0,64	0,77	0,73
16	0,84	0,67	0,61	0,76	0,71
17	0,82	0,65	0,63	0,77	0,72
18	0,84	0,67	0,64	0,76	0,73
19	0,82	0,65	0,63	0,76	0,72
20	0,85	0,68	0,63	0,76	0,73
21	0,82	0,65	0,60	0,75	0,72
<b>Mittelwert</b>	0,81 (+0,04 -0,02)	0,65 (±0,03)	0,61 (+0,04 -0,03)	0,75 (±0,02)	0,71 (±0,02)
<b>Median</b>	0,81	0,65	0,60	0,75	0,70
<b>Standardabweichung</b>	0,0177	0,0148	0,0256	0,0127	0,0162
<b>Variationskoeffizient</b>	0,0217	0,0228	0,0422	0,0169	0,0229

**Tabelle 11-5:** Verbrennungseffizienzen von Rohspan P2 bei 70 kW/m<sup>2</sup> (Platten 10 mm, 21 Versuche)

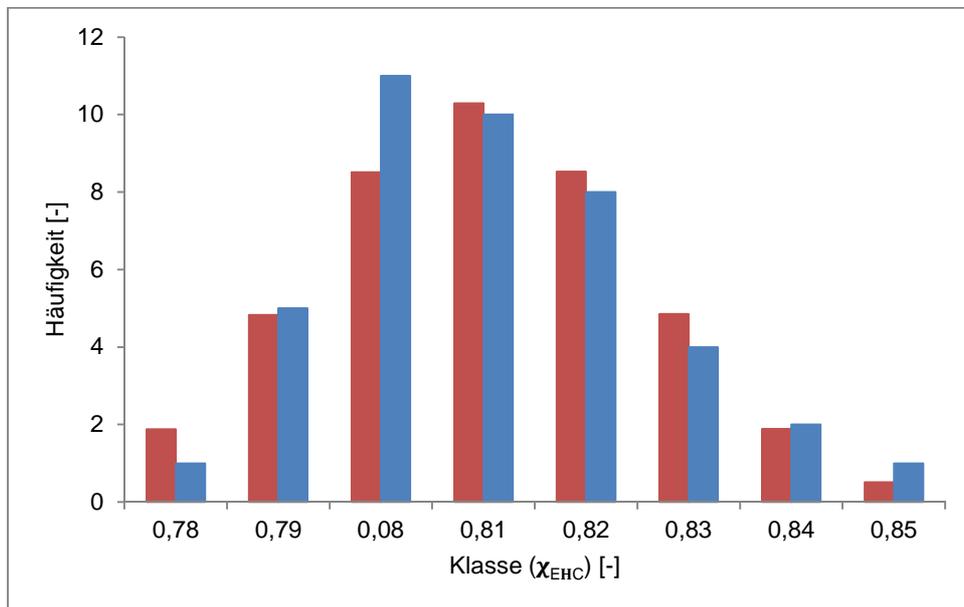
Versuchsnummer	$\chi_{EHC}$	$\chi_{FL}$	$\chi_{HRR,mean}$	$\chi_{HRR,10-90}$	$\chi_{HRR,180s}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0,80	0,65	0,56	0,74	0,71
2	0,81	0,66	0,56	0,75	0,71
3	0,83	0,69	0,58	0,73	0,71
4	0,80	0,65	0,56	0,75	0,70
5	0,81	0,67	0,57	0,74	0,71
6	0,80	0,66	0,56	0,74	0,70
7	0,83	0,69	0,57	0,76	0,71
8	0,78	0,64	0,55	0,74	0,69
9	0,81	0,66	0,58	0,75	0,70
10	0,79	0,64	0,56	0,73	0,70
11	0,82	0,67	0,59	0,74	0,70
12	0,80	0,65	0,57	0,75	0,71
13	0,80	0,65	0,56	0,73	0,70
14	0,80	0,66	0,59	0,71	0,69
15	0,79	0,64	0,56	0,74	0,70
16	0,79	0,64	0,54	0,73	0,69
17	0,81	0,66	0,58	0,77	0,73
18	0,81	0,66	0,63	0,76	0,71
19	0,81	0,67	0,58	0,76	0,73
20	0,82	0,67	0,59	0,77	0,71
21	0,83	0,68	0,60	0,78	0,72
<b>Mittelwert</b>	0,81 (+0,02 -0,03)	0,66 (+0,03 -0,02)	0,57 (+0,06 -0,03)	0,75 (+0,03 -0,04)	0,71 (±0,02)
<b>Median</b>	0,81	0,66	0,57	0,74	0,70
<b>Standardabweichung</b>	0,0139	0,0149	0,0190	0,0159	0,0097
<b>Variationskoeffizient</b>	0,0173	0,0225	0,0331	0,0212	0,0137

**Anhang 25: Histogramme der mittels Cone Calorimeter bestimmten Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme**

Histogramme zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{EHC}$  von Rohspan P2 im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; links 35 kW/m<sup>2</sup>, rechts 70 kW/m<sup>2</sup>; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung)

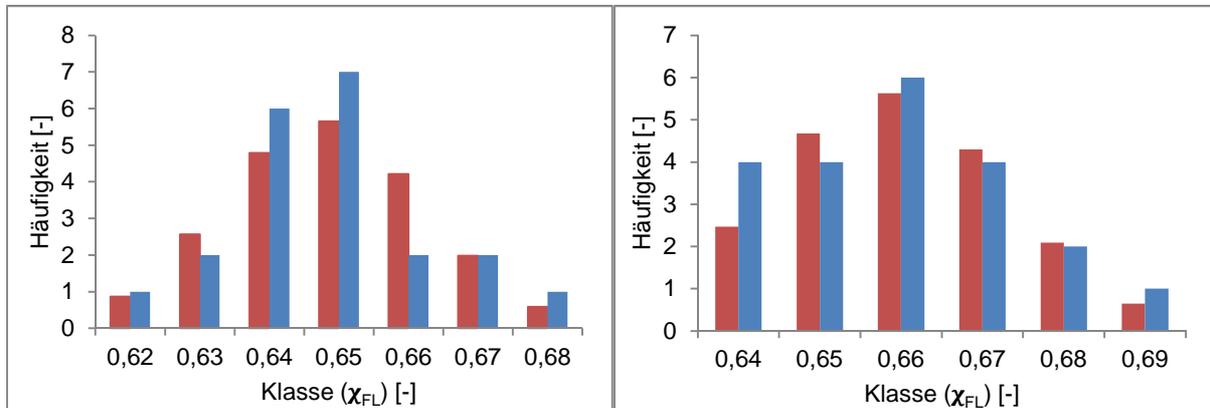


Histogramm zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{EHC}$  von Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung)

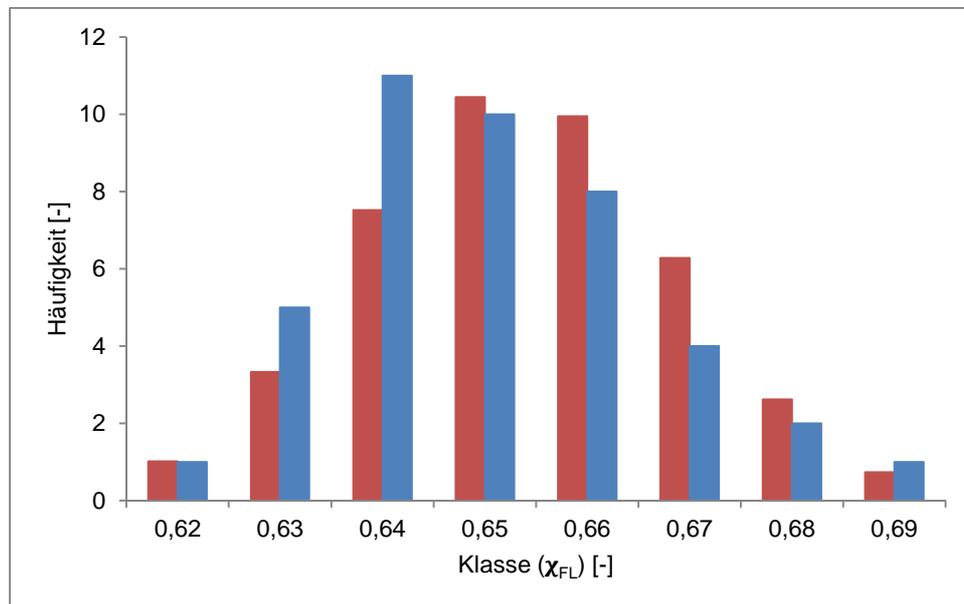


**Anhang 26: Histogramme der mittels Cone Calorimeter bestimmten Verbrennungseffizienzen auf Basis der Brennstoffbeladung**

Histogramme zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{FL}$  von Rohspan P2 im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; links 35 kW/m<sup>2</sup>, rechts 70 kW/m<sup>2</sup>; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung)

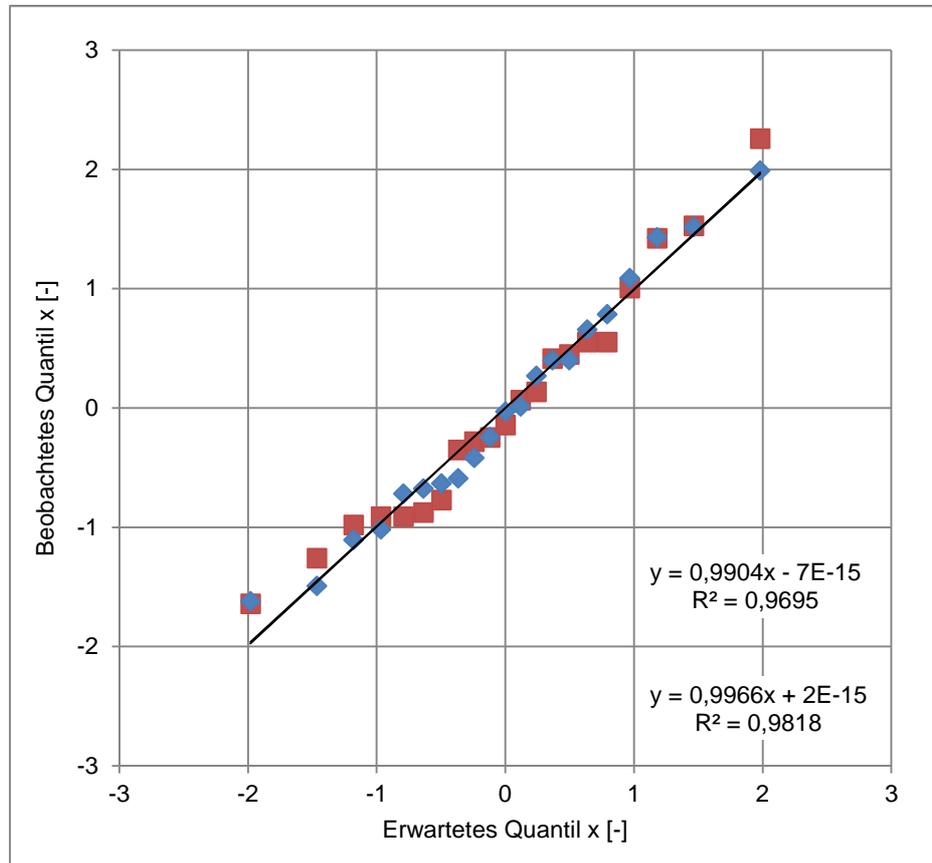


Histogramm zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{FL}$  von Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche; rot: zu erwartende Häufigkeitsverteilung bei normalverteilten Daten, blau: empirische Verteilung)



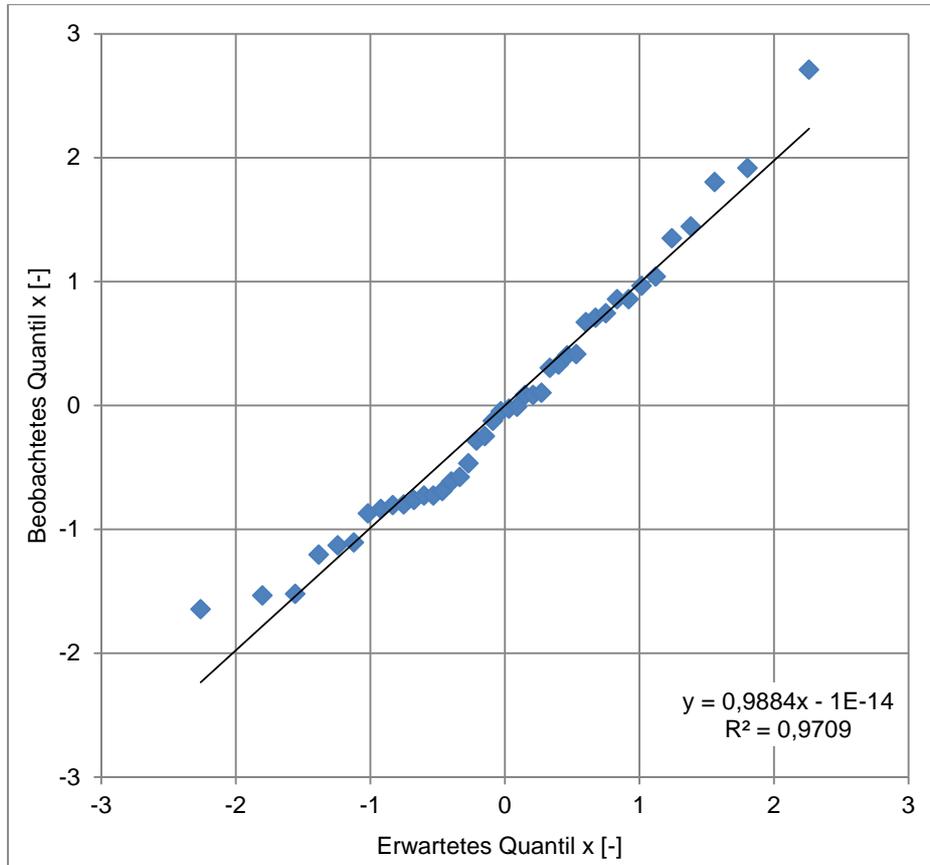
**Anhang 27: Quantil-Quantil-Plots der mittels Cone Calorimeter bestimmten Verbrennungseffizienzen auf Basis der effektiven Verbrennungswärme**

Quantil-Quantil-Plots und lineare Regressionsgeraden zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{EHC}}$  von Rohspan P2 bei 35 (rot, Gleichung oben) und 70 kW/m<sup>2</sup> (blau, Gleichung unten) im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)



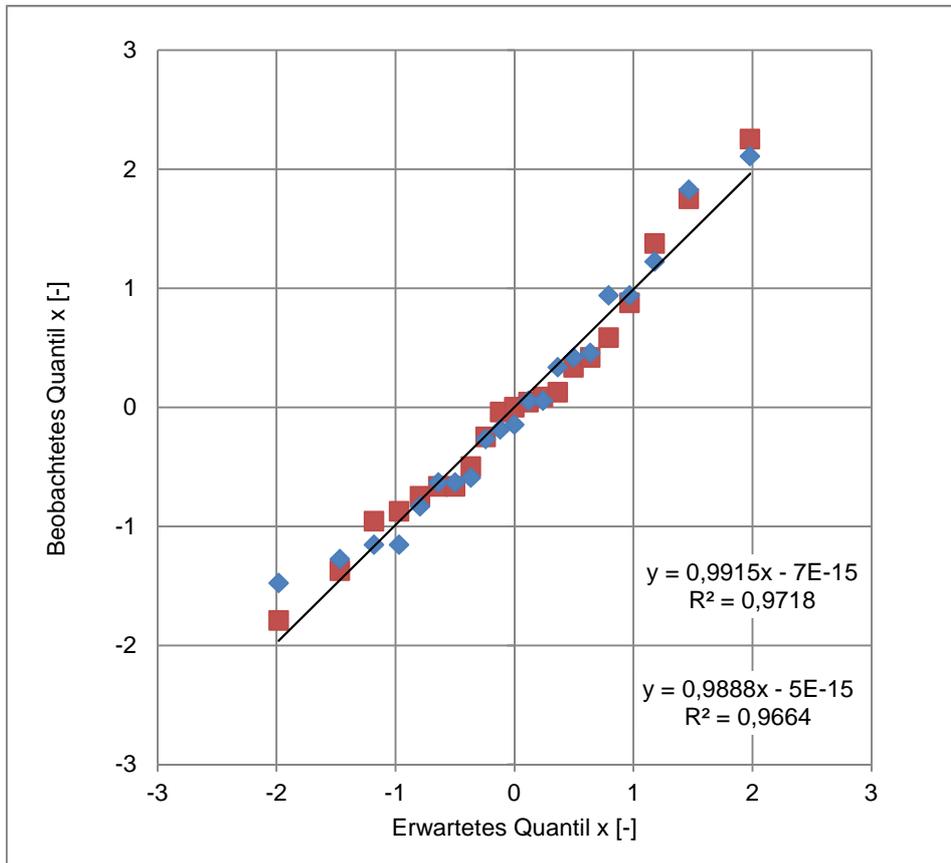
## 11. Anhang

Quantil-Quantil-Plot und lineare Regressionsgerade zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{EHC}$  von Rohspan P2 bei 35 und 70 kW/m<sup>2</sup> im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)



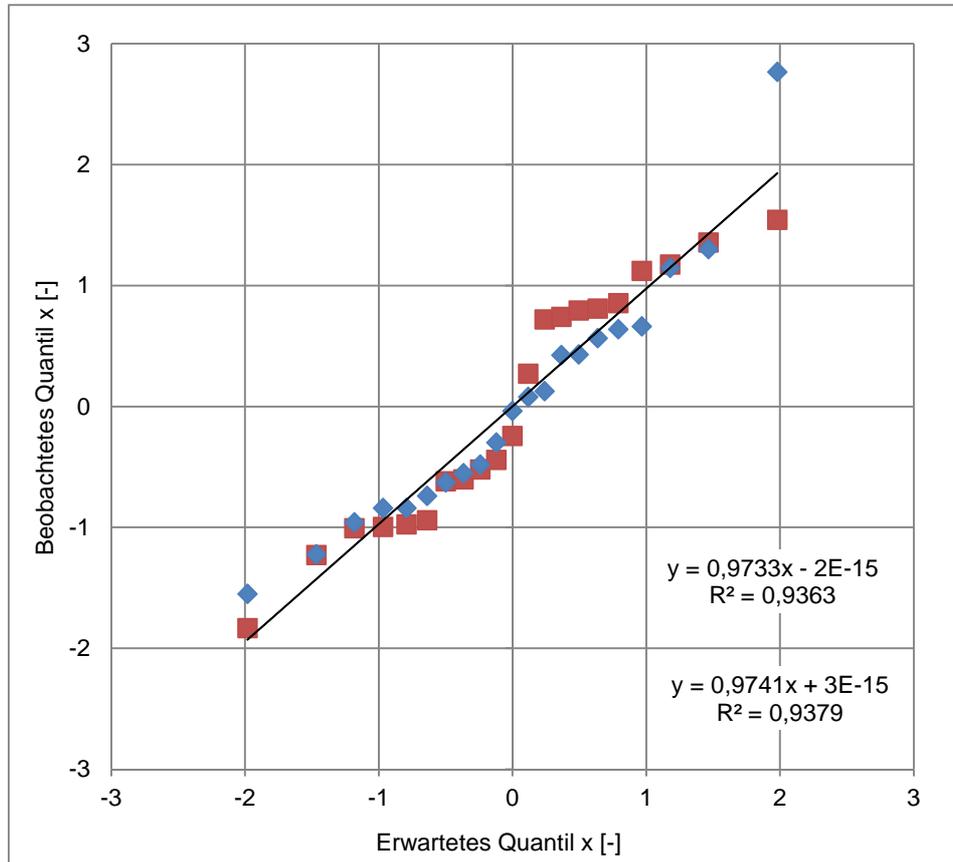
**Anhang 28: Quantil-Quantil-Plots der mittels Cone Calorimeter bestimmten Verbrennungseffizienzen auf Basis der Brennstoffbeladung**

Quantil-Quantil-Plots und lineare Regressionsgeraden zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{FL}$  von Rohspan P2 bei 35 (rot, Gleichung oben) und 70 kW/m<sup>2</sup> (blau, Gleichung unten) im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)



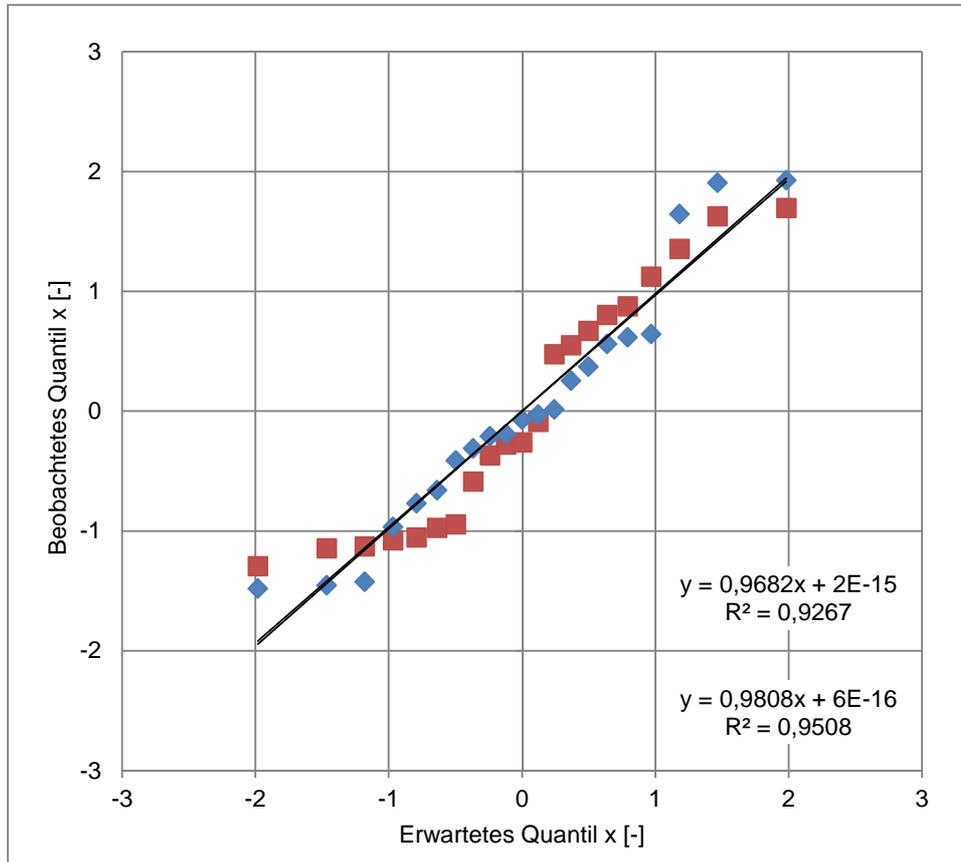
**Anhang 29: Quantil-Quantil-Plots der mittels Cone Calorimeter bestimmten Verbrennungseffizienzen auf Basis der mittleren Wärmefreisetzungsrate**

Quantil-Quantil-Plots und lineare Regressionsgeraden zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{HRR,mean}}$  von Rohspan P2 bei 35 (rot, Gleichung oben) und 70 kW/m<sup>2</sup> (blau, Gleichung unten) im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)



**Anhang 30: Quantil-Quantil-Plots der mittels Cone Calorimeter bestimmten Verbrennungseffizienzen auf Basis der Wärmefreisetzungsrate von der Entzündung bis 180 s hiernach**

Quantil-Quantil-Plots und lineare Regressionsgeraden zur Verbrennungseffizienz  $\chi_{\text{HRR},180\text{s}}$  von Rohspan P2 bei 35 (rot, Gleichung oben) und 70 kW/m<sup>2</sup> (blau, Gleichung unten) im Cone Calorimeter (Platten 10 mm, je 21 Versuche)



---

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name, Vorname      Hahn, Sarah-Katharina  
Geburtsdatum        24.05.1986  
Geburtsort           Hannover, Niedersachsen  
Familienstand        ledig  
Staatsangehörigkeit   deutsch

### Beruflicher Werdegang

September 2011 –      Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Sicherheit und Gefahrenabwehr am Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit an der Hochschule Magdeburg-Stendal  
September 2016  
November 2010 –      Ingenieurin bei der Niedersächsischen Gewerbeaufsicht, Staatliches  
August 2011            Gewerbeaufsichtsamt Cuxhaven

### Studium

April 2009 – Oktober 2010      Masterstudiengang Sicherheit und Gefahrenabwehr, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg / Hochschule Magdeburg-Stendal  
Oktober 2005 –      Bachelorstudiengang Sicherheit und Gefahrenabwehr, Otto-von-März 2009            Guericke-Universität Magdeburg / Hochschule Magdeburg-Stendal

### Schulbildung

1998 – 2005            Gymnasium Mellendorf

Sarah-K. Hahn, M. Sc.