

Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden

vom

Fachbereich Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Phys. Jürgen Will
aus Düsseldorf

Eingereicht am: 21. Juni 2004

Mündliche Prüfung: 18. Mai 2005

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner

2005

Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden

vom
Fachbereich Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Phys. Jürgen Will
aus Düsseldorf

Eingereicht am: 21. Juni 2004

Mündliche Prüfung: 18. Mai 2005

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner

2005

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig. Sie basiert auf Forschungsprojekten, die von verschiedenen Bundesministerien und Industrieunternehmen gefördert wurden.

Meinen besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Hosser aussprechen, der mir den Einstieg in den baulichen Brandschutz und durch die Betreuung und seine fachliche Unterstützung bei der Bearbeitung der Forschungsvorhaben das Gelingen der Arbeit ermöglicht hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Für die Berichterstattung, die kritische Durchsicht der Arbeit und die Diskussion bedanke ich mich bei Prof. Dr. techn. R. Leithner vom Institut für Wärme- und Brennstofftechnik (IWBT) der Technischen Universität Braunschweig.

Bei meinen ehemaligen Kollegen des iBMB und der MPA bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit während meiner Tätigkeit am Institut. Herrn Dr. R. Hass und Herrn Dr. M. Kiel danke ich dafür, dass ich während meiner jetzigen Tätigkeit die Arbeit abschließen konnte. Ein besonderer Dank gilt Willi Siegfried, Reinhold Dobbernack und Gary Blume, die stets als Ansprechpartner bereit standen und in jeder Phase wertvolle Unterstützung gegeben haben. Eine besondere Erwähnung gebührt Hans-Joachim Wolff für die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Meinen Eltern möchte ich mich aus tiefsten Herzen dafür danken, dass sie meinen Geschwistern und mir das Hochschulstudium und damit einen guten Start ins Berufsleben ermöglicht haben.

Der herzlichste Dank gilt meinem Sohn Alexander und meiner Ehefrau Annegrete. Durch Verständnis, viel Geduld und Aufmunterungen zum richtigen Zeitpunkt hat Annegrete wesentlich zum Gelingen beigetragen.

Braunschweig, im August 2005

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	V
Einleitung	1
Problemstellung	1
Ziel der Arbeit	2
A Sauerstoffkalorimetrische Verfahren zur Bestimmung von Brandparametern	A-1
A.1 Grundgedanke der Sauerstoffkalorimetrie	A-1
A.2 Oxidation und Energiefreisetzung	A-4
A.2.1 Heizwert und Verbrennungseffektivität	A-4
A.2.2 Betrachtung einer Einzelkomponente zur Bestimmung der Gesamtenergiefreisetzungsrates	A-7
A.2.3 Summation der Anteile der Energiefreisetzung bei der Entstehung von Kohlendioxid und Wasserdampf	A-13
A.2.4 Reduzierung der Energiefreisetzung durch eine unvollständige Verbrennung mit Kohlenmonoxidbildung	A-17
A.2.5 Bemerkungen	A-19
A.2.6 Luftbedarf und Zuluftverhältnis	A-20
A.3 Aufbereitung des Messgases	A-22
A.4 Berechnung der Gaszusammensetzung	A-25
A.5 Änderungen der Gasströme bei der Verbrennung eines Stoffes bekannter Zusammensetzung	A-31
A.5.1 Grundlage	A-31
A.5.2 Verbrennung in Umgebungsluft oder Atmosphäre bekannter Zusammensetzung	A-34
A.5.3 Verbrennung in kontrollierter Atmosphäre und nachträglicher Zumischung von Umgebungsluft	A-40
A.5.4 Benutzung eines zusätzlichen Brenners	A-42

A.6	Gasstromänderungen durch Sauerstoffbilanzierung	A-46
A.6.1	Voraussetzungen	A-46
A.6.2	Verbrennung ohne zusätzlichen Brenner	A-47
A.6.3	Benutzung eines zusätzlichen Brenners bei Sauerstoffbilanzierung	A-50
A.7	Anwendung und Vergleich mit den Herleitungen für genormte Prüfverfahren	A-51
A.8	Rauchgasvolumenstrom und Rauchgaszusammensetzung	A-62
A.9	Überprüfung der Rechengrundlagen für offene Systeme	A-64
A.9.1	Systematische Fehler bei den Materialparametern	A-65
A.9.2	Systematischer Fehler durch die festgelegte Dichte der Abluft	A-68
A.9.3	Systematischer Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate	A-74
A.9.4	Bewertung des systematischen Fehlers mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz	A-80
A.9.5	Anwendung der „falschen“ Auswertungsformel	A-83
A.9.6	Abweichungen durch das Auflösungsvermögen der Messgeräte	A-85
A.9.7	Auflösungsvermögen der Prüfverfahren	A-88
A.10	Zusammenfassung	A-91
	Literatur für Teil A	A-93
B	Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden	B-1
B.1	Aufgabenstellung	B-1
B.2	Grundlagen für die Entwicklung der Cone-Kammer	B-2
B.2.1	Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660	B-3
B.2.2	„Controlled-atmosphere“ Cone-Calorimeter	B-8
B.2.3	„Ventilation controlled“ Cone-Calorimeter	B-9
B.3	Cone-Kammer	B-11
B.3.1	Beschreibung der Cone-Kammer	B-12
B.3.2	Sauerstoffkalorimetrisches Messsystem und Auswertung	B-17

B.3.3	Kalibrierung und Funktionsprüfung der Cone-Kammer	B-30
B.4	Versuche mit PE-Granulat und Glykol	B-37
B.4.1	Stoffauswahl	B-37
B.4.2	Materialeigenschaften	B-38
B.4.3	Prinzipielle Versuchsdurchführung in der Cone-Kammer	B-41
B.4.4	Versuchsmatrix	B-43
B.5	Ergebnisse der Untersuchungen in der Cone-Kammer	B-45
B.5.1	Entzündungsverhalten	B-45
B.5.2	Relative Energiefreisetzungsrate	B-48
B.5.3	Brandverhalten in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis	B-60
B.6	Vergleich mit Raumbrandversuchen	B-75
B.6.1	Abbrandrate und Energiefreisetzungsrate	B-76
B.6.2	Verbrennungseffektivität und Ausbeute von Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid	B-79
B.6.3	Übertragbarkeit	B-83
B.7	Anwendung der experimentell bestimmten Brandparameter bei der numerischen Brandsimulation	B-84
B.7.1	Festlegung der Eingabedaten	B-85
B.7.2	Simulation eines Referenzversuchs	B-87
B.7.3	Durchführung einer Parametervariation	B-92
B.7.4	Vorzüge der in der Cone-Kammer ermittelten Brandparameter	B-97
Zusammenfassung		B-99
Ausblick		B-100
Literatur für Teil B		B-101
C	Anhang zu Teil A: Systematischer Fehler als Folge von Vereinfachungen in den Auswertungsverfahren	C-1
D	Anhang zu Teil A: Systematischer, relativer Fehler der Energiefreisetzungsrate gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz	D-1

E	Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D	E-1
E.1	Übersicht PE-Granulat Lupolen 5021 D	E-1
E.2	Relative Energiefreisetzungsrate PE-Granulat Lupolen 5021 D	E-11
E.3	Relative Abbrandrate PE-Granulat Lupolen 5021 D	E-15
E.4	Effektive Verbrennungswärme PE-Granulat Lupolen 5021 D	E-19
E.5	Kohlendioxidausbeute PE-Granulat Lupolen 5021 D	E-23
E.6	Kohlenmonoxidausbeute PE-Granulat Lupolen 5021 D	E-27
F	Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48	F-1
F.1	Übersicht Glykol Glysantin G 48	F-1
F.2	Relative Energiefreisetzungsrate Glykol Glysantin G 48	F-10
F.3	Relative Abbrandrate Glykol Glysantin G 48	F-13
F.4	Effektive Verbrennungswärme Glykol Glysantin G 48	F-16
F.5	Kohlendioxidausbeute Glykol Glysantin G 48	F-19
F.6	Kohlenmonoxid Glykol Glysantin G 48	F-22

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Große lateinische Buchstaben

A	(effektive) Probenoberfläche	m^2
C_G	Gerätekonstante (Cone-Calorimeter)	
E	siehe Proportionalitätsfaktoren	
$\Delta H_{c,eff}$	effektive Verbrennungswärme	$kJ\ g^{-1}$
H_o	oberer Heizwert	$kJ\ g^{-1}$
$H_{o,mol}$	molarer oberer Heizwert	$kJ\ mol^{-1}$
H_u	unterer Heizwert	$kJ\ g^{-1}$
$H_{u,mol}$	molarer unterer Heizwert	$kJ\ mol^{-1}$
M	siehe chemische Zusammensetzung und Reaktion	
N_A	Avogadro Konstante, Loschmidt-Zahl	mol^{-1}
T_0	Nullpunkt der „Celsius-Skala“ (273,15 K)	K
T^s	Rauchgastemperatur	K
V	siehe Volumenstrom und Volumenstromänderung	
$V_{m,0}$	molares Normvolumen	$m^3\ mol^{-1}$
X	siehe Volumenanteile	
Y_{CO}	Kohlenmonoxidausbeute	$kg\ kg^{-1}$
Y_{CO_2}	Kohlendioxidausbeute	$kg\ kg^{-1}$
$Y_{Ru\beta}$	Rußausbeute	$kg\ kg^{-1}$
Z	siehe Volumenanteile	

Kleine lateinische Buchstaben

k_m	spezifischer Extinktionskoeffizient (Rauchpotential)	$m^2\ kg^{-1}$
$\dot{m}, \dot{m}_{Brennstoff}$	Abbrandrate	$kg\ s^{-1}$
$\Delta \dot{m}_i$	Änderung des Massenstroms der Komponente i	$kg\ s^{-1}$
\dot{m}''	relative Abbrandrate	$kg\ s^{-1}\ m^{-2}$
Δp	Differenzdruck	Pa
p	Luftdruck	Pa
$p_s(T)$	Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T	Pa
$\dot{q}, \dot{q}_M, \dot{q}_B$	Energiefreisetzungsrate, Leistung (des Materials, eines zusätzlichen Brenners)	kW
\dot{q}''	relative Energiefreisetzungsrate / Wärmefreisetzungsrate	$kW\ m^{-2}$
\dot{q}''_{rad}	Strahlungsflussdichte, Wärmestromdichte	$kW\ m^{-2}$
r	stöchiometrischer Luftbedarf	$kg\ kg^{-1}$
r_Q^V	Luftbedarf volumen- und energiebezogen	$m^3\ kJ^{-1}$

t_{ig}	Zündzeitpunkt	s
v	Strömungsgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$

Griechische Buchstaben

α	Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion, siehe Gleichung (7.1)	
β	molares Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff, siehe Gleichung (7.1)	
χ	Verbrennungseffektivität	
χ_{CO_2}	relative Kohlendioxidausbeute	
δ	Variationskoeffizient einer Größe	
Δ_{N_2}	Vereinfachung, siehe Volumenanteile	
ϕ, ϕ^t, ϕ^{Pa}	„oxygen depletion factor“, siehe Gleichung (7.6)	
φ	relative Feuchte der Luft	
κ	Vereinfachung, siehe Volumenanteile	
λ_{verd,H_2O}	Verdampfungswärme von Wasser	$kJ\ g^{-1}$
$\lambda_{verd,H_2O,mol}$	molare Verdampfungswärme von Wasser	$kJ\ mol^{-1}$
ρ_0^0	Dichte von Luft bei 0 °C	$kg\ m^{-3}$
ρ_0^s	Dichte des Rauchgase / der Abluft bei 0 °C	$kg\ m^{-3}$
$\rho^s(T)$	Dichte des Rauchgases / der Abluft bei der Temperatur T und Normaldruck	$kg\ m^{-3}$
Σ	Vereinfachung, siehe Gleichung (5.33)	
σ_f	spezifische Rauchentwicklung	$m^2\ kg^{-1}$

Chemische Symbole

Elemente

Br	Bromatom
C	Kohlenstoffatom
Cl	Chloratom
F	Fluoratom
H	Wasserstoffatom
N	Stickstoffatom
O	Sauerstoffatom
Y	Halogenatom

Moleküle

CO	Kohlenmonoxidmolekül
CO ₂	Kohlendioxidmolekül
H ₂ O	Wassermolekül
HCl	Wasserstoffchloridmolekül (Salzsäuregas)
HF	Wasserstofffluoridmolekül (Flußsäure)
HY	Wasserstoffhalogenidmolekül
N ₂	Stickstoffmolekül
O ₂	Sauerstoffmolekül

molare Anteile

a	molarer Kohlenstoffanteil	mol ⁻¹
b	molarer Wasserstoffanteil	mol ⁻¹
c	molarer Sauerstoffanteil	mol ⁻¹
d	molarer Stickstoffanteil	mol ⁻¹
e	molarer Halogenanteil	mol ⁻¹
h	molare Kohlenmonoxidausbeute / -entstehung	mol ⁻¹

Indizes

B	molarer Anteil bzw. molare Ausbeute eines Brennergases, bei Verwendung eines zusätzlichen Brenners
M ¹ M ¹ M ²	molarer Anteil bzw. molare Ausbeute eines Materials

Molmasse

M	Molmasse	g mol ⁻¹
---	----------	---------------------

Indizes

B	Brennegas, bei Verwendung eines zusätzlichen Brenners
Br	Brennstoff / Material
C	atomarer Kohlenstoff
Cl	Chlor
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
H	atomarer Wasserstoff
H ₂ O	Wasserdampf
HCl	Salzsäuregas

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

N	atomarer Stickstoff
N ₂	molekularer Stickstoff
O	atomarer Sauerstoff
O ₂	molekularer Sauerstoff
Y	Halogen

Volumenstrom und Volumenstromänderung

Volumenströme und Änderungen von Volumenströmen auf 298,15 K (entspricht 25 °C) normiert

\dot{V}_{298}^0	Zuluftvolumenstrom	m ³ s ⁻¹
$\dot{V}_{298,i}^0$	Zuluft-Teilvolumenstrom der Komponente i	m ³ s ⁻¹
\dot{V}_{298}^s	Rauchgas- / Abluftvolumenstrom	m ³ s ⁻¹
$\dot{V}_{298,i}^s$	Rauchgas- / Abluft-Teilvolumenstrom der Komponente i	m ³ s ⁻¹
$\Delta\dot{V}_{298}$	Änderung des Volumenstroms durch Verbrennung	m ³ s ⁻¹
$\Delta\dot{V}_{298,i}$	Änderung des Teil-Volumenstroms der Komponente i	m ³ s ⁻¹

Indizes

exakt	theoretischer Wert
Messung	theoretischer Messwert
B	Brennergas, bei Verwendung eines zusätzlichen Brenners
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
H ₂ O	Wasserdampf
HY	Wasserstoffhalogenid
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff

Volumenanteile

X_i	Volumenanteil der Komponente i
$Z_{i/j}$	Volumen-Verhältnis der Komponente i zu Komponente j
κ	Vereinfachung siehe Gleichung (5.6)
Δ_{N_2}	Vereinfachung siehe Gleichung (5.10)

Indizes

CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
H ₂ O	Wasserdampf
HCl	Salzsäuregas
HY	Wasserstoffhalogenid
K	kondensierbare Komponente
N ₂	Stickstoffgas
NK	nicht-kondensierbare Komponente
O ₂	Sauerstoffgas
0	Zuluft
am	eingemischte Umgebungsluft (modifiziertes Cone-Calorimeter)
in	zugeführtes Gas (modifiziertes Cone-Calorimeter)
Pa,	nach Wasserdampf- und zusätzlichem Kohlendioxid-Trapping
s	Rauchgas / Abluft
t,	nach Wasserdampf-Trapping

Proportionalitätsfaktoren

Volumen bezogen auf 298,15 K (entspricht 25 °C)

E^V	Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchtem Sauerstoff bzw. entstandenen Produkt (volumenbezogen)	kJ m^{-3}
E^M	Verhältnis von freigesetzter Energie zu verbrauchtem Sauerstoff (massenbezogen)	kJ kg^{-3}

Indizes

$O_{2,M,G}$	verbrauchter Sauerstoff, materialspezifisch
$O_{2,M}$	verbrauchter Sauerstoff, materialspezifisch
$O_{2,G}, O_2$	verbrauchter Sauerstoff, standardisiert

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

$i_{M,G}$	Produkt i, materialspezifisch, insgesamt freigesetzte Energie
i_G	Produkt i, standardisiert, insgesamt freigesetzte Energie
$CO_{2,M,G}$	Kohlendioxid, materialspezifisch
$CO_{2,G}$	Kohlendioxid, standardisiert
$H_2O_{M,G}$	Wasserdampf, materialspezifisch
H_2O_G	Wasserdampf, standardisiert
i_M	Produkt i, materialspezifisch, nur bei der Entstehung vom Produkt freigesetzte Energie
i	Produkt i, standardisiert, nur bei der Entstehung vom Produkt i freigesetzte Energie
$CO_{2,M}$	Kohlendioxid, materialspezifisch
CO_2	Kohlendioxid, standardisiert
H_2O_M	Wasserdampf, materialspezifisch
H_2O	Wasserdampf, standardisiert
CO_M	Kohlenmonoxid, materialspezifisch
$O_{2,C \rightarrow CO_{2,M}}$	für den Verbrauch von Sauerstoff bei der Umwandlung von Kohlenstoff in Kohlendioxid, materialspezifisch
$O_{2,C \rightarrow CO_M}$	für den Verbrauch von Sauerstoff bei der Umwandlung von Kohlenstoff in Kohlenmonoxid, materialspezifisch
$O_{2,CO \rightarrow CO_2}$	für den Verbrauch von Sauerstoff bei der Umwandlung von Kohlenmonoxid in Kohlendioxid

Einleitung

Problemstellung

Einerseits werden die brandschutztechnischen Anforderungen für Gebäude normaler Art und Nutzung durch die Landesbauordnungen und deren Durchführungsverordnungen geregelt. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass die Schutzziele für den Brandschutz – in § 14 der Musterbauordnung (MBO) – eingehalten werden. Andererseits können für Gebäude besonderer Art und Nutzung von den obersten Bauaufsichtsbehörden der Bundesländer besondere Anforderungen gestellt oder Erleichterungen gestattet werden. Dies kann auf Basis der Landesbauordnungen oder der in den Bundesländern eingeführten Sonderbauverordnungen geschehen. Abweichungen von den Landesbauordnungen können gestattet werden, wenn Bedenken wegen des Brandschutzes nicht bestehen. In der Regel ist dazu auf Basis der nationalen und internationalen Literatur, aktueller Forschungsergebnisse, wissenschaftlicher Methoden oder ingenieurmäßiger Modelle experimentell oder theoretisch nachzuweisen, dass die zugrundeliegenden Schutzziele erreicht werden.

Häufig basiert dieser Nachweis zur Einhaltung der Schutzziele auf der Annahme einer von dem Normbrand abweichenden thermischen Beanspruchung von Bauteilen und ggf. der zugehörigen Entstehung von Rauchgas. Beispielhaft für die Bauteilauslegung ist das Rechenverfahren DIN 18230-1 für den baulichen Brandschutz im Industriebau, bei dem die vorhandenen Brandlasten explizit eingehen und mit dem Abbrandfaktor m bewertet werden. Das von Blume [A-14] entwickelte Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bauteilbemessung ermöglicht eine auf die Risikosituation bezogene Auslegung von Bauteilen, indem die effektive Verbrennungswärme anstelle des Heizwerts angesetzt wird und zusätzlich die Lüftungsverhältnisse berücksichtigt werden.

Für eine numerische Simulation der Rauch- und Wärmeausbreitung, z. B. mit Hilfe von Mehrraum-Zonenmodellen oder Feldmodellen, ist der Brandverlauf durch Vorgabe der Energie- und Rauchfreisetzung zu definieren. Bei den gängigen Computerprogrammen wird die Abbrandrate direkt oder indirekt über die Energiefreisetzungsraten vorgegeben. Die Energiefreisetzungsraten und die Freisetzungsraten von Verbrennungsprodukten werden bei der numerischen Simulation mit Hilfe der Brandparameter effektive Verbrennungswärme bzw. Produkt aus Heizwert und Verbren-

nungseffektivität und der Ausbeuten von Ruß, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und anderer Verbrennungsprodukte berechnet. Dabei wird auch die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration berücksichtigt.

Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein experimentelles Verfahren weiterentwickelt, mit dem im Labormaßstab die Brandparameter effektive Verbrennungswärme, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute bei unterschiedlich ventilierten Bränden bestimmt werden können. Die Ventilationsrandbedingungen werden durch das Zuluftverhältnis beschrieben. Das Verfahren basiert auf dem Prinzip der Sauerstoffkalorimetrie. Bei der Laborapparatur kommen wesentliche Bestandteile des Cone-Calorimeters zum Einsatz. Die aus dem Cone-Calorimeter weiterentwickelte Cone-Kammer unterscheidet sich in einem wesentlichen Punkt von der ursprünglichen Untersuchungsmethode. Während beim Cone-Calorimeter als offenes System die Zuluft unkontrolliert zuströmen kann und der Abluftstrom bestimmt wird, kann bei der Cone-Kammer, die ein geschlossenes System darstellt, der Zuluftstrom geregelt werden. Das Cone-Calorimeter ist ausschließlich zur Untersuchung bei ausreichendem Sauerstoffangebot geeignet. Dagegen können mit der Cone-Kammer die Brandparameter sowohl bei der brandlastgesteuerten als auch bei der ventilationsgesteuerten Verbrennung bestimmt werden.

Im Teil A der Arbeit werden die Grundlagen der Sauerstoffkalorimetrie erklärt und die maßgeblichen Auswertungsverfahren hergeleitet. Zusätzlich zur international anerkannten Herleitung der Gasstromänderung bei bekannter Brennstoffzusammensetzung wird auch ein bisher nicht in der Literatur veröffentlichter Ansatz zur Herleitung über die Sauerstoffbilanzierung vorgestellt. Bei der Herleitung werden die Unterschiede zwischen geschlossenen Systemen, bei denen der Zuluftstrom geregelt wird, und offenen Systemen, bei denen die Zuluft unkontrolliert zuströmt und der Abluftstrom gemessen wird, herausgestellt. Diese Unterscheidung ist notwendig, da zur Bestimmung der Brandparameter bei ventilationsgesteuerten Bränden offene Systeme (z. B. Cone-Calorimeter, Room-Corner-Test) nicht geeignet sind.

Vereinfachende Annahmen bzw. Voraussetzungen für die Auswertungsverfahren werden möglichst spät eingeführt und bei der Zusammenstellung praktikabler Aus-

wertungsformeln ausdrücklich benannt. Die aus den vereinfachenden Annahmen und der Verwendung von standardisierten Parametern resultierenden systematischen Fehler, die in der Literatur bisher nicht ausreichend diskutiert wurden, werden analysiert. Daraus resultiert eine Bewertung der Empfindlichkeit der auf der Sauerstoffkalorimetrie beruhenden Materialprüfverfahren. Abschließend wird auf den Einfluss der Messgenauigkeit auf den Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate eingegangen. Die ausführliche Herleitung des sauerstoffkalorimetrischen Verfahren ist notwendig, da die bisher veröffentlichten Auswertungsverfahren die bei der ventilationsgesteuerten Verbrennung auftretenden Besonderheiten - reduzierte Verbrennungseffektivität und verstärkte Kohlenmonoxidbildung - nicht ausreichend berücksichtigen.

Die Konzeption der Cone-Kammer als Versuchsapparatur zur Bestimmung der Brandparameter bei unterschiedlich ventilierten Bränden wird im Teil B der Arbeit dargestellt. Aufbauend auf Teil A wird das Auswertungsverfahren im Hinblick auf die Besonderheiten der Cone-Kammer beschrieben. Anhand vorbereitender Untersuchungen wird die Funktionsfähigkeit der neuentwickelten Apparatur nachgewiesen. Die Brandparameter von Polyethylen und Glykol werden mit Hilfe der Cone-Kammer für unterschiedlich ventilierte Brände bestimmt. Durch Vergleich mit Ergebnissen aus Raumbrandversuchen wird die Übertragbarkeit der im Labormaßstab ermittelten Brandparameter auf praxisgerechte Verhältnisse überprüft. Die Verwendbarkeit der in der Cone-Kammer bestimmten Brandparametern für die numerische Brandsimulation wird am Beispiel der CFD-Simulation eines Raumbrandversuchs dargestellt. Dadurch kann gezeigt werden, dass die neuentwickelte Cone-Kammer geeignet ist, um die Brandparameter bei unterschiedlich ventilierten Bränden im Labormaßstab zu ermitteln. Die mit Hilfe der Cone-Kammer bestimmten Brandparameter können auch bei Ingenieurmodellen zur Bauteilbemessung verwendet werden.

A Sauerstoffkalorimetrische Verfahren zur Bestimmung von Brandparametern

A.1 Grundgedanke der Sauerstoffkalorimetrie

Für die Bewertung einer Risikosituation im baulichen, anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutz sind kalorimetrische Kenntnisse oder Annahmen zu einem möglichen Brandverlauf notwendig. Der Brandverlauf wird durch die Freisetzung von Energie und Rauch charakterisiert. Der Rauch besteht aus festem, unvollständig verbranntem Brennstoff und gasförmigen Verbrennungsprodukten, hauptsächlich Kohlendioxid und Wasserdampf. Die Freisetzung von Energie und die Menge und Zusammensetzung der Reaktionsprodukte sind zum einen von der chemischen Zusammensetzung (Art) des Brennstoffs abhängig und werden - grob betrachtet - durch den Heizwert charakterisiert. Zum anderen haben die Randbedingungen eines Schadenfeuers - Brandlastmenge und -dichte, Position der Brandlast innerhalb des Brandraums, geometrische Abmessungen des Brandraums, physikalische Eigenschaften der Bauteile und Ventilation – d. h. Zufuhr von Luft und Abfuhr von Rauchgasen - einen erheblichen Einfluss auf die Größe der brennenden Fläche und die Abbrandgeschwindigkeit bzw. relative Abbrandrate [A-1].

Zur Erfassung der bei der Verbrennung freigesetzten Wärme müssten alle Formen der Energie - Strahlung, Erwärmung von Gas und Festkörpern (z. B. Bauteile) – betrachtet werden. Vorteilhaft wäre eine zeitabhängige (zeitlich aufgelöste) Messung oder Berechnung der Energiefreisetzungsrates (Wärmemenge pro Zeiteinheit), gleichbedeutend mit der Brandleistung, um die thermische Wirkung eines Feuers in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Brandphasen zu bestimmen. Dabei wäre es auch noch wünschenswert, dass Einflüsse realistischer Randbedingungen auf die Energiefreisetzungsrates betrachtet werden könnten. Tatsächlich ist die direkte Messung der bei der Verbrennung freigesetzten Energie nur im Labormaßstab z. B. mit dem Bombenkalorimeter [A-2] möglich. Bei diesem Verfahren können aber keine für ein reales Schadenfeuer typischen Randbedingungen eingestellt werden. Vielmehr wird die maximal freisetzbare Energiemenge erfasst, indem innerhalb eines geschlossenen Systems ohne Massenaustausch mit der Umgebung der Brennstoff in einer Atmosphäre mit vorgegebenem Sauerstoffgehalt vollständig umgesetzt wird. Der Heizwert ergibt sich damit als Verhältnis der (bei der Oxidation) maximal freisetzbaren Energiemenge zur Brennstoffmasse als eine von brandtypischen Randbe-

dingungen unabhängige Materialeigenschaft. Damit ist der Heizwert ein Parameter, der sich für die Beschreibung eines maximalen Risikos bezüglich der thermischen Belastungen im Brandfall eignet. Hingegen ist mit diesem Parameter allein eine Beschreibung des Brandverlaufs für einen bestimmten Fall unter Berücksichtigung der Nutzung und der baulichen Randbedingungen nicht möglich, da zum einen keinerlei Informationen zum zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzung enthalten sind, zum anderen auch nicht berücksichtigt wird, dass in den meisten Fällen nicht die gesamte Energie freigesetzt wird, also eine unvollständige Verbrennung stattfindet.

Da die „klassischen“ Verfahren der Kalorimetrie, mit denen direkt oder indirekt die Menge der freigesetzten Energie bestimmt wird, nur eingeschränkt für die Untersuchung von Fragestellungen im Brandschutz geeignet scheinen, hat man sich bereits vor längerer Zeit auf eine alte Erfahrung bzw. Erkenntnis besonnen: Thornton [A-3] stellt fest, dass bei der Verbrennung (Oxidation, Reaktion mit Sauerstoff der Luft) einer organischen Flüssigkeit oder eines organischen Gases (Kohlenstoff und Wasserstoff als maßgebliche Bestandteile der chemischen Verbindung) die freigesetzte Energiemenge direkt mit der umgesetzten Sauerstoffmenge verknüpft ist. Diese Erfahrung konnte von Huggett [A-4] auch auf organische Feststoffe übertragen werden. Die freigesetzte Energie ist annähernd proportional zur verbrauchten Sauerstoffmenge. Gemäß Janssens und Parker [A-5] ergibt sich in engen Grenzen ($\pm 5\%$) für die meisten organischen Stoffe der Proportionalitätsfaktor (Sauerstoffverbrauchsfaktor, O_2 -Faktor) zu 13100 kJ g^{-1} bzw. 17200 kJ m^{-3} , bezogen auf die Masse bzw. das Volumen bei 25°C des verbrauchten Sauerstoffs. Dieser Zusammenhang dient als Grundlage für alle sogenannten sauerstoffkalorimetrischen Messverfahren.

Um das Prinzip der Sauerstoffkalorimetrie in der Brandschutzforschung anzuwenden, muss man nur die Menge des bei einem Brand verbrauchten Sauerstoffs ermitteln, also die Differenz zwischen der dem Brand zugeführten und der vom Brand abgeführten Sauerstoffmenge erfassen, und diese Menge mit dem für die Brandlast geltenden Proportionalitätsfaktor multiplizieren. Somit wäre die Erfassung der Energie über den Sauerstoffverbrauch der Bestimmung der Ausbeuten von gasförmigen Verbrennungsprodukten nahe gebracht. Tatsächlich gestaltet sich die Aufgabe dann aber schwieriger, da die bei der Verbrennung zu betrachtenden Sauerstoffströme nicht so einfach quantitativ erfasst werden können. Zum einen ist die gleichzeitige

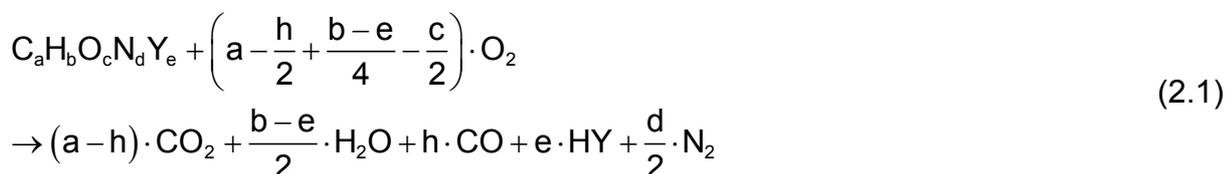
Messung zum Brand hin- und vom Brand abströmender Gasmengen im Experiment sehr aufwendig, zum anderen ist eine vollständiger Vermessung der Gaszusammensetzung von Zu- und Abluft aus technischen und/oder finanziellen Gründen nur selten realisierbar.

Das Prinzip der Sauerstoffkalorimetrie hat aber Einzug in die Forschung und auch in die Material- bzw. Baustoffprüfung gefunden, weil bei der praktischen Umsetzung des Prinzips der experimentelle Aufwand durch Einführung von diversen Vereinfachungen erheblich verringert werden konnte, ohne im gleichen Maße an Genauigkeit einzubüßen. Die physikalischen Zusammenhänge wurden zuerst von Parker [A-6] in der Formulierung mit dem normierten Volumenstrom und später von Janssens und Parker [A-5] mit dem Rauchgasmassenstrom veröffentlicht. Sie sind dann in verschiedene national und international angewandte Prüfnormen, z. B. für das Cone-Calorimeter ISO 5660 [A-7], den Room-Corner-Test ISO 9705 [A-8] bzw. dessen deutsche Fassung DIN 4102 Teil 19 [A-9] oder den SBI-Test DIN EN 13823 [A-10] eingeflossen. Im Folgenden werden die grundlegenden Zusammenhänge zusammen mit den dazugehörigen vereinfachenden Annahmen hergeleitet.

Bevor auf das Verfahren genauer eingegangen wird, muss noch eine bei einigen Anwendern vorhandene Unklarheit angesprochen werden. In der internationalen Literatur wird sowohl der Begriff der „oxygen consumption“ als auch der Begriff der „oxygen depletion“ für die gleiche Methodik verwendet. Da die sauerstoffkalorimetrischen Verfahren nicht allein auf der Verminderung des Sauerstoffgehalts (depletion), sondern auf der vollständigen Bilanzierung und dem mengenmäßigen Verbrauch (consumption) von Sauerstoff beruhen, scheint der englische Begriff „depletion“ weniger geeignet als der Begriff „consumption“ [A-5]. Demnach wäre hier die Übersetzung „Sauerstoffverbrauchskalorimetrie“ am besten geeignet, die Grundlagen der Methodik in einem Begriff zusammenzufassen. In der hier gewählten Abkürzung „Sauerstoffkalorimetrie“ geht der notwendige Hinweis auf den Verbrauch zwar verloren, damit verschwindet aber auch die bei einzelnen Anwendern (z. B. [A-11]) vorhandene Unsicherheit durch die gleichwertige Benutzung der englischen Begriffe „consumption“ (Verbrauch) und „depletion“ (Verminderung).

A.2 Oxidation und Energiefreisetzung

Die Umsetzung von Materialien bei der Verbrennung ist eine chemische Reaktion, bei der die Energie vornehmlich durch die Oxidation des im Brennstoff enthaltenen Kohlenstoffs und Wasserstoffs zu Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasserdampf freigesetzt wird. Im Weiteren soll davon ausgegangen werden, dass der Brennstoff neben Kohlenstoff und Wasserstoff zusätzlich noch Sauerstoff, Stickstoff und ein Halogen enthält. Bei der Umsetzung soll, wie oben erwähnt, der Kohlenstoff zu Kohlendioxid und Kohlenmonoxid und der Wasserstoff zu Wasser oxidiert werden. Der im Brennstoff enthaltene Sauerstoff wird bei der Oxidation vollständig umgesetzt und geht in die Verbrennungsprodukte ein. Der vorhandene Stickstoff soll bei der Verbrennung vollständig in molekularen Stickstoff umgewandelt werden und in die Gasphase übergehen. Die Entstehung von Stickoxiden wird somit vernachlässigt. Die im Brennstoff enthaltenen Halogenatome reagieren mit einem Teil des ebenfalls im Brennstoff vorhandenen Wasserstoffs zu der entsprechenden Verbindung ¹⁾ (z. B. Salzsäuregas HCl). Diese chemische Reaktion lautet mit den entsprechenden molaren Anteilen:



Die beschriebene chemische Reaktion (2.1) kann selbstverständlich vervollständigt werden, indem man auch die dabei freigesetzte Energie angibt. Die bei der Verbrennung freisetzbare Energie ist als Brennstoffeigenschaft durch den Heizwert bereits bekannt.

A.2.1 Heizwert und Verbrennungseffektivität

Der Heizwert H_u wird als Energiemenge pro umgesetzter Masse des Brennstoffs angegeben, kann aber bei bekannter chemischer Zusammensetzung des Brennstoffs auch auf die molare Materialmenge bezogen werden. Bei der Bestimmung des Heizwertes wird eine vollständige Verbrennung, d. h. eine vollständige Oxidation des

¹⁾ Voraussetzung: b (molare Wasserstoffanteil) $\geq e$ (molarer Halogenanteil).

Kohlenstoffs C zu Kohlendioxid CO₂ ohne Kohlenmonoxidbildung CO, vorausgesetzt. Dies bedeutet, dass die molare Kohlenmonoxidausbeute h vernachlässigt werden kann. Wenn man einen Brennstoff gemäß der Reaktionsgleichung (2.1) annimmt, lautet die Umrechnung für den molaren (unteren) Heizwert H_{u,mol} bei bekannter Zusammensetzung, d. h. Molmasse M_{Brennstoff} :

$$H_{u,mol} = H_u \cdot M_{\text{Brennstoff}} \quad (2.2)$$

$$M_{\text{Brennstoff}} = a \cdot M_C + b \cdot M_H + c \cdot M_O + d \cdot M_N + e \cdot M_Y$$

Die Molmassen sind einem Periodensystem der Elemente zu entnehmen. Zur Übersicht sind in der folgenden Tabelle die Atom- bzw. Molmassen der für die chemische Reaktion gemäß (2.1) relevanten Elemente bzw. Moleküle zusammengestellt [A-12].

Tabelle A.1 Molmassen [A-12]

Element	Symbol	Molmasse [g mol ⁻¹]	Molekül	Symbol	Molmasse [g mol ⁻¹]	
Kohlenstoff	C	12,01115	Sauerstoff	O ₂	31,9988	
Wasserstoff	H	1,00797	Stickstoff	N ₂	28,0134	
Sauerstoff	O	15,9994	Kohlendioxid	CO ₂	44,00995	
Stickstoff	N	14,0067	Kohlenmonoxid	CO	28,01055	
Chlor	Cl	Y 35,453	Wasser	H ₂ O	18,01534	
Fluor	F		18,9984	Salzsäuregas	HCl	36,46097
Brom	Br		79,909	Flusssäuregas	HF	20,00637

Beim Heizwert wird zwischen dem unteren und dem oberen Heizwert unterschieden. Der obere Heizwert H_o gibt die insgesamt bei der Verbrennung freisetzbare Energie an. Beim unteren Heizwert - auch Brennwert genannt - wird der Energieanteil von der Gesamtenergiemenge abgezogen, der benötigt wird, um das bei der Verbrennung entstehende Wasser von der flüssigen in die gasförmige Phase zu überführen (Verdampfungswärme).

Die Verdampfungswärme von Wasser λ_{verd.,H₂O} kann z. B. [A-12] entnommen werden:

$$\lambda_{\text{verd.,H}_2\text{O}} = 2256,015 \text{ J g}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1} \Leftrightarrow \lambda_{\text{verd.,H}_2\text{O,mol}} = 40642 \text{ J mol}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$$

([A-12]: λ_{verd.,H₂O} = 538,84 cal g⁻¹, 1 cal = 4,18680 J)

Der obere molare Heizwert $H_{o,mol}$ lässt sich mit Kenntnis der Verdampfungswärme von Wasser und der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs leicht berechnen. Umgekehrt lässt sich mit der in (2.2) enthaltenen Molmasse des Brennstoffs aus dem molaren oberen Heizwert auch der massenbezogene obere Heizwert bestimmen.

$$H_{o,mol} = H_{u,mol} + \frac{b-e}{2} \cdot \lambda_{verd.,H_2O,mol} \Leftrightarrow H_o = H_u + \frac{b-e}{2} \cdot \frac{\lambda_{verd.,H_2O,mol}}{M_{Brennstoff}} \quad (2.3)$$

Im Gegensatz zum Heizwert, bei dessen Bestimmung eine vollständige Oxidation gewährleistet sein muss, stellt die effektive Verbrennungswärme $\Delta H_{c,eff}$ die massenbezogene Energiemenge dar, die unter praxisgerechten Bedingungen freigesetzt werden kann. Heizwert und effektive Verbrennungswärme sind über die dimensionslose Verbrennungseffektivität χ miteinander verknüpft:

$$\chi = \frac{\Delta H_{c,eff}}{H_u} \quad (2.4)$$

Die effektive Verbrennungswärme und damit auch die Verbrennungseffektivität sind stark von den Randbedingungen bei der Verbrennung abhängig. Die Verbrennungseffektivität, genauer der Maximalwert der Verbrennungseffektivität, wird bei dem von Hosser et al. [A-13, A-14] entwickelten „Vereinfachten Verfahren zur brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen“ im Regelwerk für kerntechnische Anlagen angewendet. In diesem Verfahren hat die Verbrennungseffektivität als Korrekturwert für die Brandlast (als Energiemenge, Produkt von Heizwert und Brennstoffmasse) eine ähnliche Funktion wie der Abbrandfaktor m (m -Faktor) in Bemessungsverfahren nach DIN 18230-1 [A-15] für den Industriebau. Während allerdings die Verbrennungseffektivität im direkten physikalischen Zusammenhang zum eigentlichen Verbrennungsvorgang steht, soll über den Abbrandfaktor die Bauteilerwärmung bei der Umsetzung einer bestimmten Brandlast bewertet werden. Dementsprechend erfolgt die Bestimmung des Abbrandfaktors gemäß DIN 18230-2 [A-16] indirekt über die Erwärmung eines Referenzbauteils (m -Faktor-Platte), wodurch der Abbrandfaktor m eine starke Abhängigkeit von den Versuchsrandbedingungen aufweisen kann.

A.2.2 Betrachtung einer Einzelkomponente zur Bestimmung der Gesamtenergiefreisetzungsrates

Über die chemische Reaktion (2.1) sind nicht nur der Verbrauch von Sauerstoff und die Entstehung von Reaktionsprodukten verknüpft, sondern zusammen mit dem Heizwert auch die Freisetzung von Energie. Die freiwerdende Wärmemenge bzw. die Energiefreisetzungsrates ist somit bei idealen Verbrennungsbedingungen proportional zur verbrauchten Sauerstoffmenge oder zur Menge eines der entstandenen Reaktionsprodukte bzw. zu deren Volumen- oder Massenstromänderungen:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= E_{i,G}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298,i} & i = \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} \\ \dot{q} &= E_{i,G}^M \cdot \Delta \dot{m}_i \end{aligned} \quad (2.5)$$

Bei der folgenden Darstellung wird die Energiefreisetzungsrates aus der Änderung eines Volumenstroms berechnet. Damit muss bei Voraussetzung eines idealen Gases auch die Gastemperatur angegeben werden. Es wird hier im Weiteren, wie auch in der internationalen Literatur, z. B. bei Parker [A-6], und einigen Prüfnormen, z. B. Room-Corner-Test [A-8, A-9], vorausgesetzt, dass alle Volumina bzw. Volumenströme auf eine festgelegte Temperatur von 25 °C normiert werden. Damit sind auch die Proportionalitätsfaktoren, die den Sauerstoffverbrauch oder die Kohlendioxid- bzw. Wasserdampfentstehung und die Energiefreisetzung miteinander verknüpfen, auf die Gastemperatur von 25 °C bezogen.

Der Zusammenhang zwischen Energiefreisetzungsrates und Erzeugung bzw. Verbrauch von Reaktionsteilnehmern in (2.5) ist nur dann gültig, wenn die Verbrennung gleichmäßig erfolgt, d. h. die Mengen der entstehenden Reaktionsprodukte und des verbrauchten Sauerstoffs stets in idealem Verhältnis zueinander stehen. Der notwendige Proportionalitätsfaktor berechnet sich aus dem Heizwert und der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs in Abhängigkeit vom betrachteten Bestandteil der Abluft, z. B. Sauerstoff, Kohlendioxid oder Wasserdampf. Bei der Bestimmung des Heizwertes wird eine vollständige Verbrennung, d. h. eine vollständige Oxidation des Kohlenstoffs zu Kohlendioxid ohne Bildung von Kohlenmonoxid, vorausgesetzt. Dies bedeutet, dass die molare Kohlenmonoxidausbeute h vernachlässigt werden kann ($h = 0$). Bei der Berechnung ist zusätzlich zu beachten, dass die Pro-

proportionalitätsfaktoren auf Volumina bei 25 °C, das molare Normvolumen ($V_{m,0} = 0,0224136 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ [A-12]) aber auf 0 °C bezogen ist. Daraus ergibt sich in den folgenden Gleichungen jeweils der Korrekturfaktor für die Umrechnung des molaren Normvolumens auf das Volumen der Menge von einem Mol bei 25 °C.

$$E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}} = E_{\text{O}_2, \text{M}, \text{G}}^{\text{V}} = \frac{H_{\text{u}} \cdot M_{\text{Brennstoff}}}{-\left(a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2}\right)} \cdot \frac{1}{V_{m,0}} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K} + 25 \text{ K}} \quad (2.6)$$

$$E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{M}} = \frac{H_{\text{u}} \cdot M_{\text{Brennstoff}}}{-\left(a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2}\right) \cdot M_{\text{O}_2}} = 0,76456 \cdot E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}}$$

Bei der Betrachtung der Volumen- bzw. Teilchenströme erhält man per Definition bei der Zunahme des Stroms (z. B. Kohlendioxid) ein positives, bei Abnahme (Sauerstoff) ein negatives Vorzeichen. Der Sauerstoffverbrauchsfaktor (O_2 -Faktor) ergibt sich daraus im Gegensatz zur üblichen Darstellung mit negativem Vorzeichen. Das Produkt aus O_2 -Faktor und Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und damit auch die Energiefreisetzungsrates ist dann aber wieder positiv.

Entsprechend dem Sauerstoffverbrauchsfaktor lässt sich auch ein Kohlendioxid- bzw. Wasserdampfentstehungsfaktor bestimmen:

$$E_{\text{CO}_2, \text{M}, \text{G}}^{\text{V}} = \frac{H_{\text{u}} \cdot M_{\text{Brennstoff}}}{a} \cdot \frac{1}{V_{m,0}} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K} + 25 \text{ K}} \quad (2.7)$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}, \text{M}, \text{G}}^{\text{V}} = \frac{H_{\text{u}} \cdot M_{\text{Brennstoff}}}{\frac{b-e}{2}} \cdot \frac{1}{V_{m,0}} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K} + 25 \text{ K}} \quad (2.8)$$

Mit Hilfe von (2.6), (2.7) und (2.8) werden für die Materialien aus Tabelle A.2 die Faktoren berechnet und in Tabelle A.3 zusammengestellt. Mit Hilfe dieser Faktoren lässt sich die insgesamt freigesetzte Energie aus der verbrauchten Menge Sauerstoff bzw. der entstandenen Menge von Kohlendioxid oder Wasserdampf berechnen. Es wäre aber falsch, die Energiefreisetzung als Summe der numerischen Produkte von entstandenem Verbrennungsprodukt (CO_2 , H_2O) und entsprechendem Faktor zu berechnen. Will man die Energiefreisetzungsrates auf diese Weise bestimmen, dann

sind andere Proportionalitätsfaktoren anzusetzen (vgl. Abschnitt A.2.3 „Betrachtung einer Einzelkomponente zur Bestimmung der Gesamtenergiefreisetzungsrates“).

Anhand der in Tabelle A.3 aufgeführten Mittelwerte und Standardabweichungen sieht man für die zur Kohlendioxid- und Wasserdampfentstehung gehörenden Faktoren eine starke Abhängigkeit vom Material, betont durch den Variationskoeffizienten (Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert). Der Faktor, der den Sauerstoffverbrauch und die Gesamtenergiefreisetzung verknüpft (Diagramm A.1 und Diagramm A.2), zeigt dagegen erheblich geringere Schwankungen, insbesondere für die im ersten Teil zusammengestellten Stoffe. Durch die Auswahl der Stoffe in ISO 9705 [A-8] ergibt sich ein erheblich geringerer Variationskoeffizient für den O₂-Faktor im ersten Teil Tabelle A.3 (Materialindex 1 - 16) gegenüber dem zweiten Teil (Materialindex 19 - 32): Durch den geringeren Variationskoeffizienten für den Sauerstoffverbrauchsfaktor wird ein höheres Vertrauen impliziert.

Tabelle A.2 Materialzusammensetzung und Heizwert

1. Teil gemäß Table F.1 aus [A-8]		Zusammensetzung					Summenformel	Heizwert [kJ g ⁻¹]
Index	Material	C	H	O	N	Cl		
		a	b	c	d	e		H _u
1	Methan	1	4	0	0	0	CH ₄	50,00
2	Propan	3	8	0	0	0	C ₃ H ₈	46,40
3	Polyethylene	2	4	0	0	0	-(C ₂ H ₄)-	43,28
4	Polypropylene	3	6	0	0	0	-(C ₃ H ₆)-	43,31
5	Polyisobutylene	4	8	0	0	0	-(C ₄ H ₈)-	43,71
6	Polybutadiene	4	6	0	0	0	-(C ₄ H ₆)-	42,75
7	Polystyrene	8	8	0	0	0	-(C ₈ H ₈)-	39,85
8	Poly(vinylchloride)	2	3	0	0	1	-(C ₂ H ₃ Cl)-	16,43
9	Poly(vinylidene chloride)	2	2	0	0	2	-(C ₂ H ₂ Cl ₂)-	8,99
10	Poly(methyl methacrylate)	5	8	2	0	0	-(C ₅ H ₈ O ₂)-	24,89
11	Polyacrylonitrile	3	3	0	1	0	-(C ₃ H ₃ N)-	30,80
12	Polyoxymethylene	1	2	1	0	0	-(CH ₂ O)-	15,46
13	Poly(ethylene terephthalate)	10	8	4	0	0	-(C ₁₀ H ₈ O ₄)-	22,00
14	Polycarbonate	16	14	3	0	0	-(C ₁₆ H ₁₄ O ₃)-	29,72
15	Cellulose triacetate	12	16	8	0	0	-(C ₁₂ H ₁₆ O ₈)-	17,62
16	Nylon 6.6	6	11	1	1	0	-(C ₆ H ₁₁ NO)-	29,58
2. Teil gemäß Table 1.13 aus [A-1]								
18	Kohlenmonoxid	1	0	1	0	0	CO	10,10
19	Methan	1	4	0	0	0	CH ₄	50,00
20	Ethan	2	6	0	0	0	C ₂ H ₆	47,45
21	Ethen	2	4	0	0	0	C ₂ H ₄	50,35
22	Ethyn	2	2	0	0	0	C ₂ H ₂	48,20
23	Propan	3	8	0	0	0	C ₃ H ₈	46,45
24	n-Butan	4	10	0	0	0	-(C ₄ H ₁₀)-	45,69
25	n-Pentan	5	12	0	0	0	-(C ₅ H ₁₂)-	45,27
26	n-Oktan	8	18	0	0	0	-(C ₈ H ₁₈)-	44,77
27	c-Hexan	6	12	0	0	0	-(C ₆ H ₁₂)-	43,81
28	Benzen	6	6	0	0	0	C ₆ H ₆	40,00
29	Methanol	1	4	1	0	0	CH ₃ OH	19,83
30	Ethanol	2	6	1	0	0	C ₂ H ₅ OH	26,78
31	Aceton	3	6	1	0	0	(CH ₃) ₂ CO	30,79
32	d-Glucose	6	12	6	0	0	C ₆ H ₁₂ O ₆	15,40

Tabelle A.3 Faktoren für die Berechnung der Energiefreisetzung

1. Teil gemäß Table F.1 aus [A-8]		Summenformel	Faktoren [kJ m ⁻³] (bezogen auf 25 °C)		
Index	Material		E _{O₂,M} ^V	E _{CO₂,M,G} ^V	E _{H₂O,M,G} ^V
1	Methan	CH ₄	-16394	32787	16394
2	Propan	C ₃ H ₈	-16726	27877	20908
3	Polyethylene	-(C ₂ H ₄)-	-16543	24814	24814
4	Polypropylene	-(C ₃ H ₆)-	-16554	24831	24831
5	Polyisobutylene	-(C ₄ H ₈)-	-16707	25061	25061
6	Polybutadiene	-(C ₄ H ₆)-	-17185	23630	31506
7	Polystyrene	-(C ₈ H ₈)-	-16965	21206	42411
8	Poly(vinylchloride)	-(C ₂ H ₃ Cl)-	-16789	20986	41972
9	Poly(vinylidene chloride)	-(C ₂ H ₂ Cl ₂)-	-17811	17812	-
10	Poly(methyl methacrylate)	-(C ₅ H ₈ O ₂)-	-16976	20371	25464
11	Polyacrylonitrile	-(C ₃ H ₃ N)-	-17814	22268	44536
12	Polyoxymethylene	-(CH ₂ O)-	-18974	18974	18974
13	Poly(ethylene terephthalate)	-(C ₁₀ H ₈ O ₄)-	-17280	17280	43201
14	Polycarbonate	-(C ₁₆ H ₁₄ O ₃)-	-17161	19306	44128
15	Cellulose triacetate	-(C ₁₂ H ₁₆ O ₈)-	-17300	17300	25950
16	Nylon 6.6	-(C ₆ H ₁₁ NO)-	-16584	22803	24876
Mittelwert			-17110	22332	30335
Standardabweichung			654	4167	10049
Variationskoeffizient			3,8 %	18,7 %	33,1 %
2. Teil gemäß Table 1.13 aus [A-1]					
18	Kohlenmonoxid ²⁾	CO	-23127	11563	-
19	Methan	CH ₄	-16394	32787	16394
20	Ethan	C ₂ H ₆	-16663	29160	19440
21	Ethen	C ₂ H ₄	-19245	28868	28868
22	Ethyn	C ₂ H ₂	-20519	25649	51298
23	Propan	C ₃ H ₈	-16744	27907	20931
24	n-Butan	-(C ₄ H ₁₀)-	-16700	27137	21710
25	n-Pentan	-(C ₅ H ₁₂)-	-16688	26701	22251
26	n-Oktan	-(C ₈ H ₁₈)-	-16723	26130	23226
27	c-Hexan	-(C ₆ H ₁₂)-	-16745	25118	25118
28	Benzen	C ₆ H ₆	-17028	21286	42571
29	Methanol	CH ₃ OH	-17314	25971	12985
30	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	-16809	25214	16809
31	Aceton	(CH ₃) ₂ CO	-18274	24365	24365
32	d-Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	-18900	18900	18900
Mittelwert ²⁾			-17482	26085	24633
Standardabweichung ²⁾			1254	3356	10398
Variationskoeffizient ²⁾			7,2 %	12,9 %	42,2 %

²⁾ Kohlenmonoxid (Index 18) wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

A Sauerstoffkalorimetrische Verfahren zur Bestimmung von Brandparametern

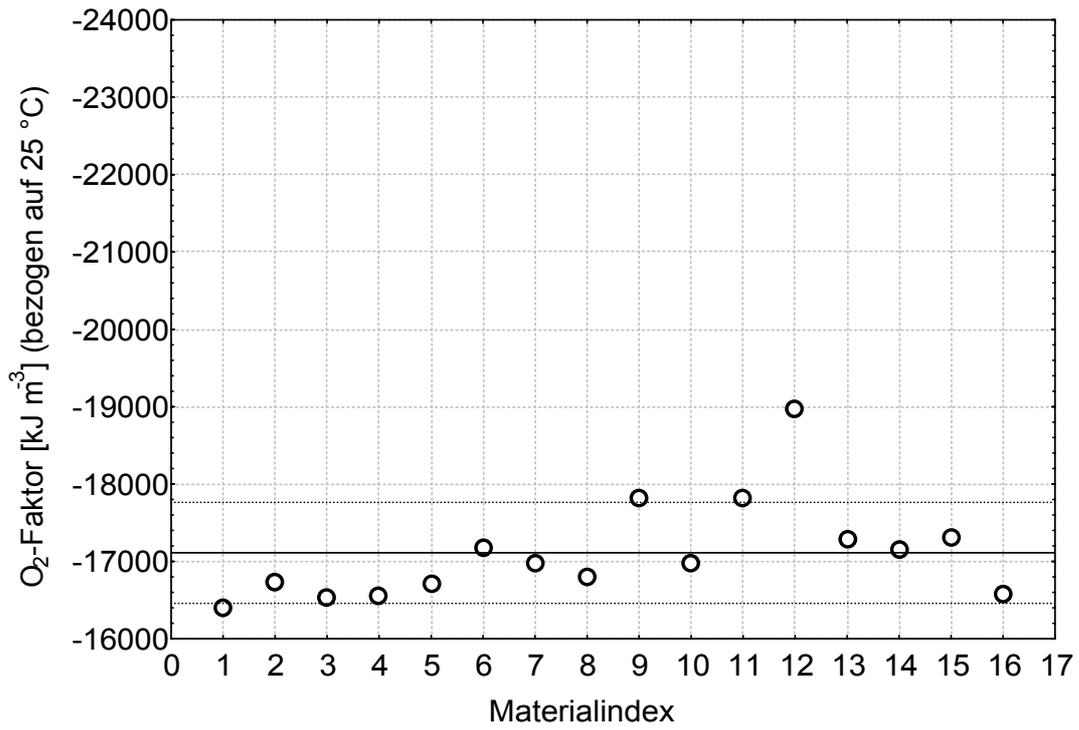


Diagramm A.1 O₂-Faktor verschiedener Stoffe gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

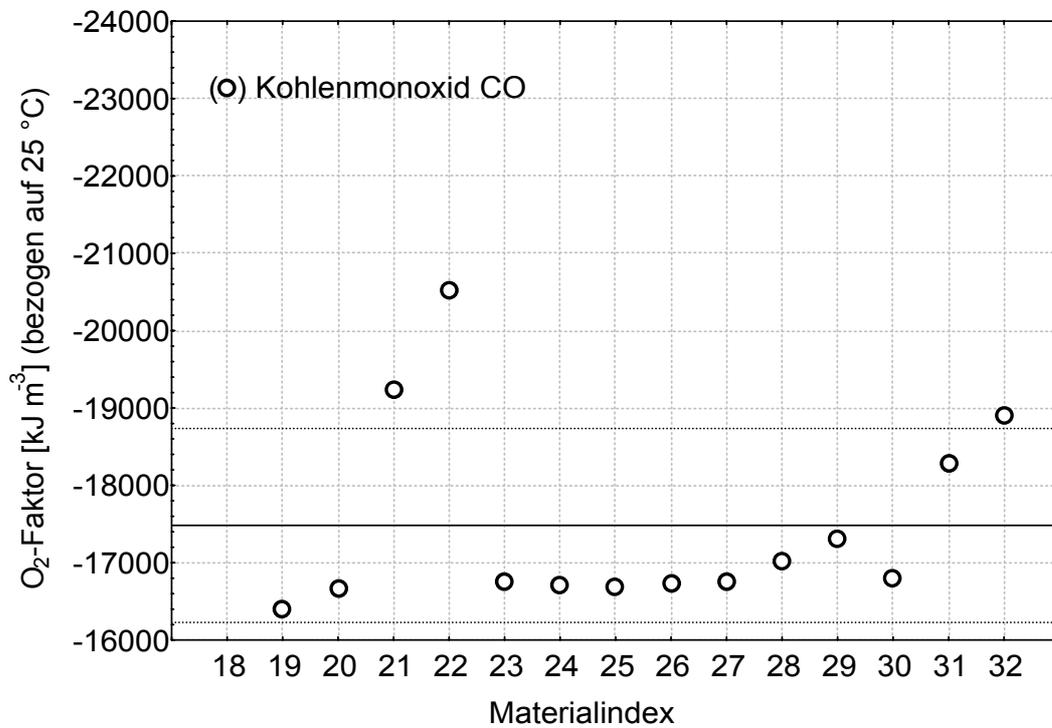


Diagramm A.2 O₂-Faktor verschiedener Stoffe gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

A.2.3 Summation der Anteile der Energiefreisetzung bei der Entstehung von Kohlendioxid und Wasserdampf

Aufgrund der chemischen Reaktion gemäß (2.1) kann auch angenommen werden, dass sich die Gesamtenergiefreisetzung aus der Summe von Energiefreisetzungen zusammensetzt, die jeweils proportional zur Menge der dabei entstehenden Reaktionsprodukte sind, also ein Anteil der Gesamtenergiefreisetzung der Menge eines bestimmten Reaktionsproduktes zugeordnet werden kann. Auch hier wird nur die Energiefreisetzung durch Oxidation von Kohlenstoff und Wasserstoff betrachtet.

$$\dot{q} = E_{\text{CO}_2, \text{M}}^{\text{V}} \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2} + E_{\text{H}_2\text{O}, \text{M}}^{\text{V}} \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{H}_2\text{O}} = E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}} \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2} \quad (2.9)$$

Unter dieser Voraussetzung sind der CO₂- und der H₂O-Faktor über die Zusammensetzung des Brennstoffs (Kohlenstoff, Wasserstoff) und den O₂-Faktor miteinander verknüpft.

$$\left(a + \frac{b}{4} \right) \cdot -E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}} = a \cdot E_{\text{CO}_2, \text{M}}^{\text{V}} + \frac{b}{2} \cdot E_{\text{H}_2\text{O}, \text{M}}^{\text{V}} \quad (2.10)$$

Mit (2.10) können der CO₂-Faktor und H₂O-Faktor nicht unmittelbar berechnet werden. Erst durch Vergleich zweier unterschiedlicher Stoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung und bekanntem Heizwert lassen sich die beiden Faktoren mit Hilfe der beiden Verhältnisgleichungen bestimmen.

$$E_{\text{CO}_2, \text{M1}}^{\text{V}} = E_{\text{CO}_2, \text{M2}}^{\text{V}} = \frac{\left(a_{\text{M2}} + \frac{b_{\text{M2}}}{4} \right) \cdot -E_{\text{O}_2, \text{M2}}^{\text{V}} - \frac{b_{\text{M2}}}{b_{\text{M1}}} \cdot \left(a_{\text{M1}} - \frac{b_{\text{M1}}}{4} \right) \cdot -E_{\text{O}_2, \text{M1}}^{\text{V}}}{a_{\text{M2}} - \frac{b_{\text{M2}}}{b_{\text{M1}}} \cdot a_{\text{M1}}} \quad (2.11)$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}, \text{M1}}^{\text{V}} = E_{\text{H}_2\text{O}, \text{M2}}^{\text{V}} = 2 \cdot \frac{\left(a_{\text{M2}} + \frac{b_{\text{M2}}}{4} \right) \cdot -E_{\text{O}_2, \text{M2}}^{\text{V}} - \frac{a_{\text{M2}}}{a_{\text{M1}}} \cdot \left(a_{\text{M1}} - \frac{b_{\text{M1}}}{4} \right) \cdot -E_{\text{O}_2, \text{M1}}^{\text{V}}}{b_{\text{M2}} - \frac{a_{\text{M2}}}{a_{\text{M1}}} \cdot b_{\text{M1}}}$$

Die CO₂-Faktoren und H₂O-Faktoren werden mit Hilfe der Gleichung (2.11) für die in ISO 9705 [A-8] (Table F.1) angegebenen Stoffe (Tabelle A.3, 1. Teil) bzw. die in [A-1] genannten Materialien (Tabelle A.3, 2. Teil) berechnet. Daraus ergeben sich die in

Diagramm A.3 und Diagramm A.5 bzw. Diagramm A.4 und Diagramm A.6 dargestellten Faktoren.

Daraus resultieren für die Materialien gemäß Tabelle A.3, 1. Teil

$$E_{\text{CO}_2}^{\text{V}} = (17388 \pm 4850) \text{ kJ m}_{\text{CO}_2}^{-3} \quad (\pm 28 \%) \quad [\pm 4861 \text{ kJ m}_{\text{CO}_2}^{-3}]$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}} = (8214 \pm 5802) \text{ kJ m}_{\text{H}_2\text{O}}^{-3} \quad (\pm 71 \%) \quad [\pm 5815 \text{ kJ m}_{\text{H}_2\text{O}}^{-3}]$$

und bei Betrachtung der Stoffe in Tabelle A.3, 2. Teil

$$E_{\text{CO}_2}^{\text{V}} = (21774 \pm 6824) \text{ kJ m}_{\text{CO}_2}^{-3} \quad (\pm 31 \%) \quad [\pm 6842 \text{ kJ m}_{\text{CO}_2}^{-3}]$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}} = (4692 \pm 5945) \text{ kJ m}_{\text{H}_2\text{O}}^{-3} \quad (\pm 127 \%) \quad [\pm 5961 \text{ kJ m}_{\text{H}_2\text{O}}^{-3}]$$

als Mittelwerte und Standardabweichungen.

Das Verhältnis von freigesetzter Energie zu entstandenem Kohlendioxid (CO₂-Faktor) weist eine eventuell akzeptable Toleranz (Standardabweichung) auf. Das entsprechende Verhältnis für die Wasserdampfentstehung (H₂O-Faktor) streut dagegen zu stark und ist nicht verwendbar.

Die Änderung des Wasserdampfvolumenstroms kann auf zwei Arten bestimmt werden, einerseits durch direkte Messung mit einem verhältnismäßig teuren und umständlich zu betreibenden Wasseranalysator, andererseits über den Ansatz der Sauerstoffbilanzierung (siehe Abschnitt A.6 „Gasstromänderungen durch Sauerstoffbilanzierung“).

Aufgrund der großen Unsicherheit bei der Festlegung der Proportionalitätsfaktoren bzw. deren systematischen Streuungen in Abhängigkeit von den betrachteten Materialien sollte der Ansatz zur Kalorimetrie mit der Bilanzierung über die beiden Verbrennungsprodukte Kohlendioxid und Wasserdampf für vergleichende Betrachtungen angewendet werden [A-17, A-18] und ist als eigenständiges Verfahren nur eingeschränkt geeignet.

A Sauerstoffkalorimetrische Verfahren zur Bestimmung von Brandparametern

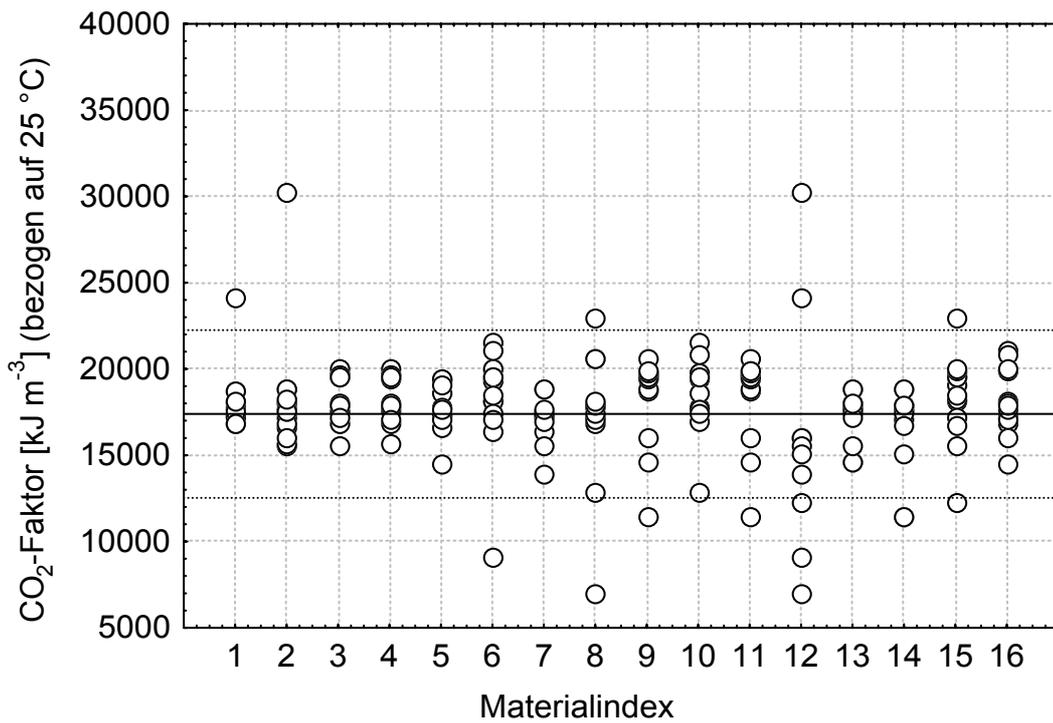


Diagramm A.3 CO₂-Faktor, berechnet für Kombinationen gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

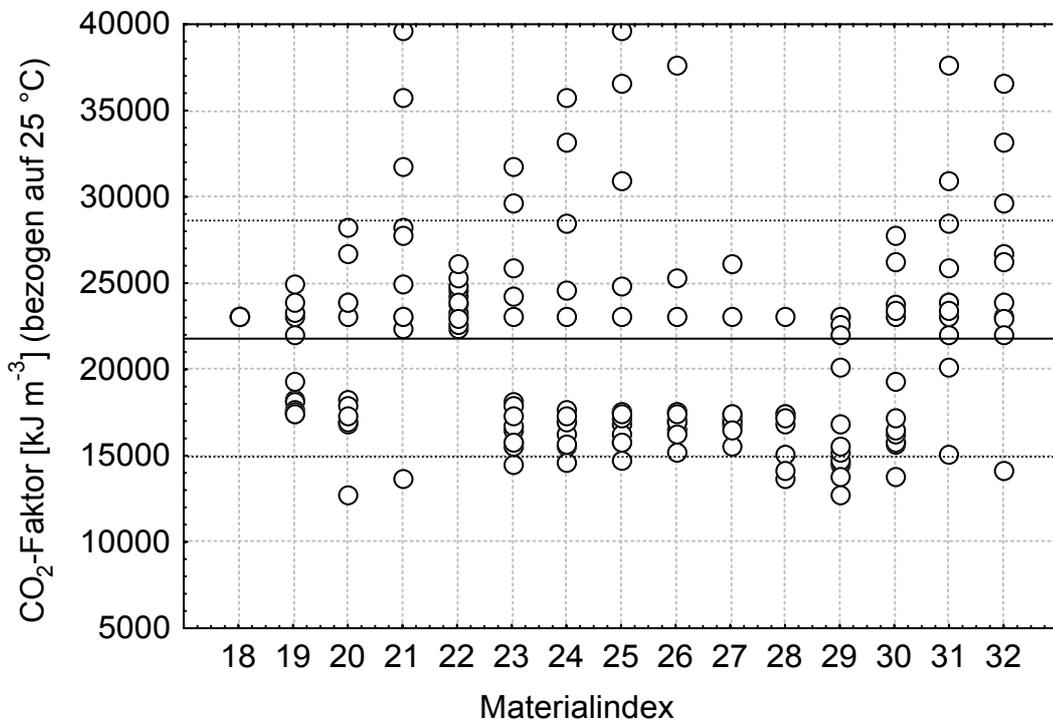


Diagramm A.4 CO₂-Faktor, berechnet für Kombinationen gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

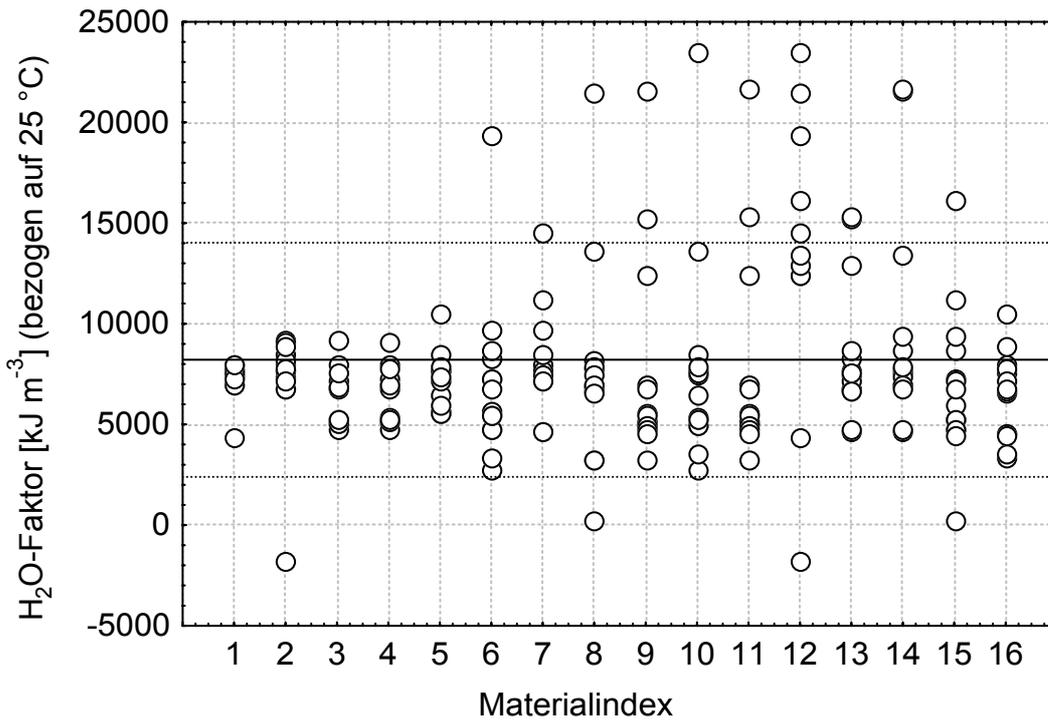


Diagramm A.5 H₂O- Faktor, berechnet für Kombinationen gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

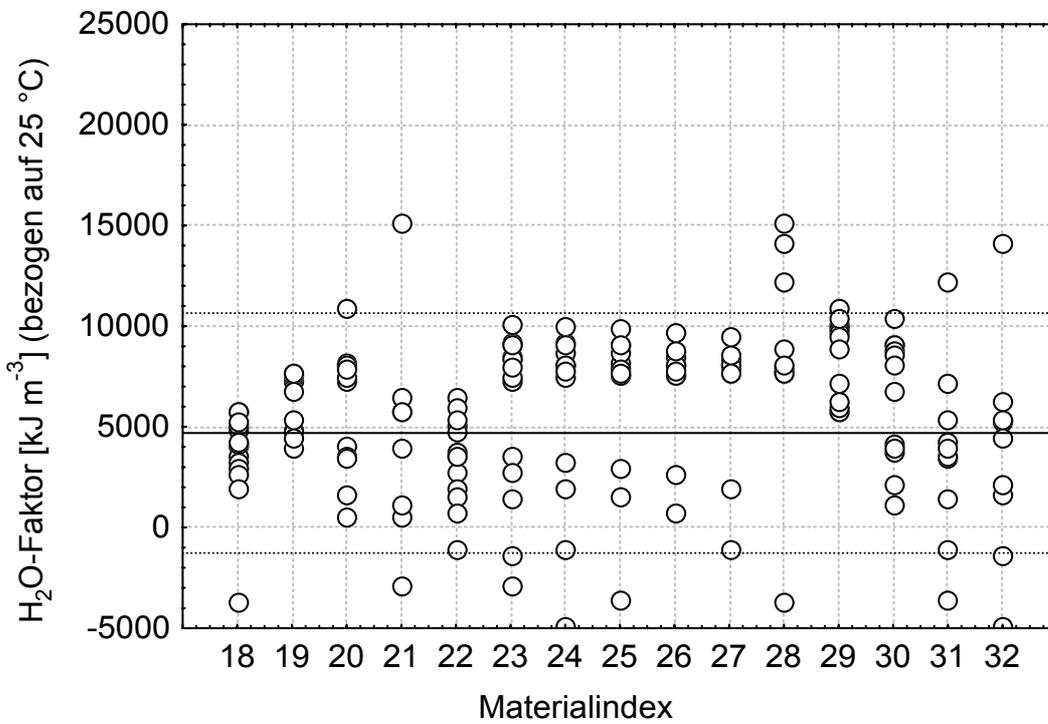
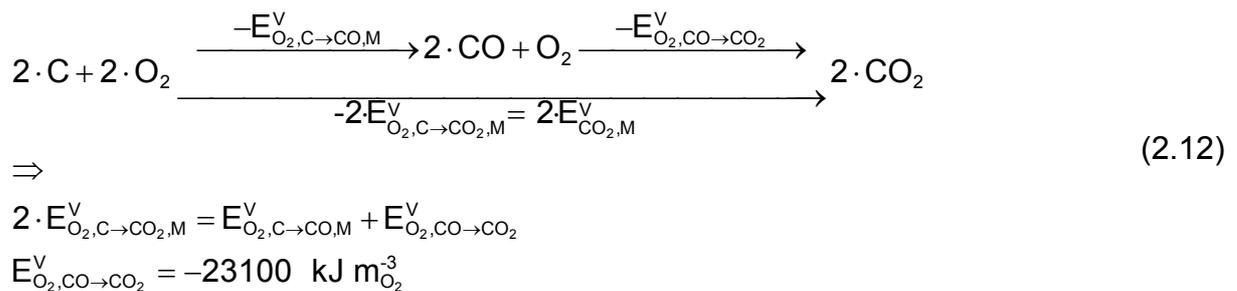


Diagramm A.6 H₂O- Faktor, berechnet für Kombinationen gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

A.2.4 Reduzierung der Energiefreisetzung durch eine unvollständige Verbrennung mit Kohlenmonoxidbildung

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde stets von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen. In der Praxis zeigt sich aber, dass bei vielen Materialien Kohlenmonoxid auch dann entsteht, wenn die Verbrennung unter guten Ventilationsbedingungen (brandlastgesteuert) stattfindet, d. h. ausreichende Zuluft und damit genügend Sauerstoff vorhanden ist. Unter ventilationsgesteuerten Randbedingungen, d. h. wenn die Verbrennung durch einen Mangel an Zuluft und damit ungenügend Sauerstoff stattfindet, wird erfahrungsgemäß Kohlenmonoxid in großen Mengen produziert. Durch diese nur teilweise Oxidation des Kohlenstoffs wird auch weniger Energie freigesetzt, da die „zweite Oxidationsstufe“ fehlt. Anhand der folgenden Gleichung wird der Zusammenhang deutlich:



Der Betrag der freigesetzten Energie bei der Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid ist in der Literatur [A-1, A-6] genannt (Tabelle A.3, 2. Teil). Er sollte verständlicherweise nicht von den chemischen Eigenschaften des ursprünglichen Brennstoffs abhängen. Bei bekannter Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und des Kohlenmonoxidvolumenstroms zusammen mit entsprechenden Faktoren kann die Verringerung der Energiefreisetzungsrates angegeben werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass der mit dem Kohlenstoff freigesetzte Wasserstoff vollständig reagiert und die damit verbundene Energie vollständig freigesetzt wird, also die Energiefreisetzung nur durch die unvollständige Oxidation von Teilen des Kohlenstoffs reduziert wird. Somit muss der Term, der die Verminderung der Energiefreisetzungsrates durch unvollständige Verbrennung berücksichtigt, nicht den O_2 -Faktor $E_{O_2,M}^V$ aus (2.6), sondern formal einen anderen O_2 -Faktor $E_{O_2,C \rightarrow CO_2,M}^V$ enthalten, der nur für die Kohlendioxidbildung gilt.

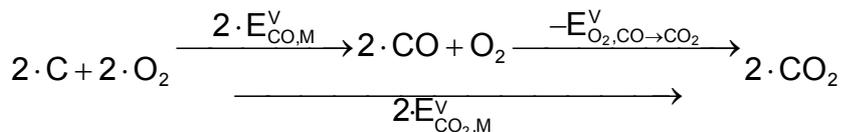
$$\dot{q} = E_{O_2,M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298,O_2} - \Delta \dot{V}_{298,CO} \cdot \frac{-E_{O_2,C \rightarrow CO_2,M}^V - E_{O_2,CO \rightarrow CO_2}^V}{2} \quad (2.13)$$

$$\dot{q} = E_{O_2,M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298,O_2} - \Delta \dot{V}_{298,CO} \cdot \frac{-E_{CO_2,M}^V - E_{O_2,CO \rightarrow CO_2}^V}{2}$$

Da der Faktor für die „reine“ Kohlendioxidbildung im Allgemeinen nicht bekannt ist (siehe Abschnitt A.2.3), wird in der obigen Gleichung der O₂-Faktor eingesetzt:

$$\dot{q} = E_{O_2,M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298,O_2} - \Delta \dot{V}_{298,CO} \cdot \frac{-E_{O_2,M}^V + 23100 \text{ kJ m}_{O_2}^{-3}}{2} \cdot 1 \text{ m}_{O_2}^3 \text{ m}_{CO}^{-3} \quad (2.14)$$

Um die Darstellung zu vervollständigen ist auch noch der Proportionalitätsfaktor $E_{CO,M}^V$ zu bestimmen, der die Energiefreisetzungsrates bei der unvollständigen Oxidation des Kohlenstoffs zu Kohlenmonoxid in Beziehung zur entstandenen Kohlenmonoxidmenge setzt. Zur Bestimmung dieses Faktors betrachte man auch (2.12), allerdings in Hinblick auf die Bilanzierung über die entstehenden Verbrennungsprodukte.



⇒

$$2 \cdot E_{CO_2,M}^V = 2 \cdot E_{CO,M}^V - E_{O_2,CO \rightarrow CO_2}^V$$

$$E_{CO,M}^V = \frac{2 \cdot E_{CO_2,M}^V + E_{O_2,CO \rightarrow CO_2}^V}{2} = \frac{2 \cdot E_{CO_2,M}^V - 23100 \text{ kJ m}_{CO_2}^{-3}}{2} \cdot 1 \text{ m}_{CO_2}^3 \text{ m}_{CO}^{-3} \quad (2.15)$$

Setzt man voraus, dass die Proportionalitätsfaktoren für die Entstehung von Kohlendioxid und Wasserdampf benutzt werden können, also der Ansatz über die Bilanzierung der Verbrennungsprodukte anwendbar ist, berechnet sich die Energiefreisetzung aus:

$$\dot{q} = E_{CO_2,M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298,CO_2} + E_{H_2O,M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298,H_2O} + E_{CO,M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298,CO}$$

$$E_{CO,M}^V = \frac{2 \cdot E_{CO_2,M}^V - 23100 \text{ kJ m}^{-3}}{2} \quad (2.16)$$

³⁾ Der Faktor $1 \text{ m}_{CO_2}^3 \text{ m}_{CO}^{-3}$ dient zur Korrektur der Einheiten.

Die bisherigen Gleichungen zur Bestimmung der freigesetzten Energie sind sehr allgemein gehalten, erfordern bei der praktischen Anwendung aber einen hohen Kenntnisstand über das Abbrandverhalten, genauer über die Kopplung von chemischen Reaktionen und damit verbundenen Energiefreisetzen. Auch ist noch nicht festgelegt, mit welchem Ansatz (Gasstromänderungen bei bekannter Brennstoffzusammensetzung oder Gasstromänderungen durch Sauerstoffbilanzierung) die Änderungen des Sauerstoff-, Kohlendioxid-, Kohlenmonoxid- und ggf. Wasserdampf-volumenstroms bestimmt werden.

Die intensive Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Energiefreisetzung und Sauerstoffverbrauch oder Kohlendioxid-, Kohlenmonoxid- und Wasserdampfentstehung zeigt, dass über den Sauerstoffverbrauch auch bei organischen Stoffen mit unbekannter Zusammensetzung die Bestimmung der Energiefreisetzung mit akzeptablem systematischen Fehler möglich ist. Soll aber über die Entstehung von Verbrennungsprodukten eine Berechnung der Energiefreisetzungsrates erfolgen, so müssen die chemische Zusammensetzung und der Heizwert des Brennstoffs bekannt sein, um den systematischen Fehler klein zu halten. Demzufolge sind Energiefreisetzungsrates, die experimentell über eine Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidbilanzierung berechnet werden, mit großer Unsicherheit behaftet, wenn die Eigenschaften des Brennstoffs nicht bekannt sind oder wenn unterschiedliche Brennstoffe gleichzeitig verbrannt werden (z. B. Mischbrandlasten).

A.2.5 Bemerkungen

Beispielhaft für eine Berechnung der Brandleistung über die entstandenen Verbrennungsprodukte gemäß Abschnitt A.2.2 ist die Bewertung von Tunnelbrandversuche [A-11]. Hierbei wird die Energiefreisetzungsrates über eine Kohlendioxidbilanzierung unter Berücksichtigung einer unvollständigen Verbrennung mit Kohlenmonoxidbildung berechnet. Zur Bestimmung der Energiefreisetzungsrates wird ein CO_2 -Faktor von 16600 kJ m^{-3} ($9,22 \text{ kJ g}^{-1}$) für Holz bzw. 22800 kJ m^{-3} ($14,33 \text{ kJ g}^{-1}$) für andere Brandlasten angesetzt (vgl. Mittelwerte 22332 kJ g^{-1} bzw. 26085 kJ g^{-1} in Tabelle A.3). Zu der zitierten Arbeit [A-11] ist kritisch anzumerken, dass die vorgestellten Brandversuche zum Teil auch mit Mischbrandlasten (Straßen- und Schienenfahrzeuge) durchgeführt wurden. Da weder chemische Zusammensetzung noch Heizwert

der Brandlasten im Rahmen des beschriebenen Vorhabens bestimmt worden waren, konnte die Richtigkeit des angenommenen CO₂-Faktor nicht überprüft werden. Folglich fehlen auch eine Abschätzung der Bandbreite des übernommenen CO₂-Faktors und eine Diskussion der Ergebnisse aus der Berechnung der Energiefreisetzungsrates bzw. der möglichen Fehlerbandbreite.

In diesem Zusammenhang muss auf eine sorgfältige Verwendung der Begriffe bezüglich „oxygen consumption“ und „oxygen depletion“ hingewiesen werden. Es ist davor zu warnen, den „oxygen depletion factor“ ϕ als „Ventilationsfaktor“ zu bezeichnen und den „chemical expansion factor“ α falsch zu interpretieren [A-11]. Aus dem Fehlen des Kohlendioxidanteils im Ausdruck für den „oxygen depletion factor“ ϕ darf nicht geschlossen werden, dass bei der Sauerstoffkalorimetrie „quasi eine Verbrennung an sich ignoriert wird“. Diese Fehlinterpretationen beruhen im Allgemeinen auf einem unzureichenden Verständnis der Sauerstoffkalorimetrie. Man muss aber bedenken, dass in Teilen der Literatur [A-5, A-6] und in mehreren Normen für sauerstoffkalorimetrische Prüfverfahren [A-7, A-8, A-9] kein großer Wert auf eine nachvollziehbare Darstellung zur Herleitung der maßgeblichen Berechnungsformeln gelegt wird, insbesondere wird der Zusammenhang zwischen Gasaufbereitungstechnik und anzuwendenden Auswertungsansatz nicht dargestellt. Unter diesem Gesichtspunkt ist verständlich, dass Lattimer und Beitel [A-19] bei der Durchsicht und Evaluierung von Normen und Standards, die sich mit der Prüfung bzw. Klassifizierung des Brandverhaltens auf Basis der Sauerstoffkalorimetrie befassen, in 17 von 22 dieser Normen oder Standards Fehler und/oder Ungenauigkeiten in der Darstellung der Berechnungsformeln bemängelt haben.

A.2.6 Luftbedarf und Zuluftverhältnis

Stöchiometrischer Luftbedarf und Zuluftverhältnis hängen zwar nicht unmittelbar mit der Sauerstoffkalorimetrie zusammen, basieren aber auf den in diesem Abschnitt A.2 „Oxidation und Energiefreisetzung“ beschriebenen Grundlagen. Die im Folgenden hergeleiteten Gleichungen werden in Teil B dieser Arbeit benötigt, um zusammen mit der Pyrolyserate und dem Zuluftvolumenstrom die Ventilationsrandbedingungen zu normieren.

Zur Bestimmung des stöchiometrischen Luftbedarfs setzt man einen Brennstoff und die chemische Reaktion gemäß (2.1) voraus. Damit bestimmt sich der stöchiometrische Luftbedarf r als Massenverhältnis von für eine vollständige Verbrennung benötigter Luft zu umgesetztem Brennstoff. Er kann also mit Hilfe der Molmasse des Brennstoffs nach (2.2) bei Vorgabe der Dichte von Luft unter Normalbedingungen und des Volumenanteils von Sauerstoff in der Zuluft berechnet werden:

$$r = \frac{a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2}}{M_{\text{Brennstoff}}} \cdot V_{m,0} \cdot \frac{1}{X_{\text{O}_2}^0} \cdot \rho_0^0 \quad (2.17)$$

Bedenkt man, dass der O_2 -Faktor in (2.6) mit Hilfe der chemischen Zusammensetzung und des Heizwerts berechnet wurde, so lässt sich der stöchiometrische Luftbedarf auch einfacher darstellen:

$$r = \frac{H_u}{-E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}}} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}} \cdot \frac{1}{X_{\text{O}_2}^0} \cdot \rho_0^0 \quad (2.18)$$

Die letztgenannte Gleichung kann zur Abschätzung des Luftbedarfs benutzt werden, wenn nur der Heizwert, nicht aber die chemische Zusammensetzung eines Brennstoffs bekannt ist. In diesem Fall setzt man anstelle des materialspezifischen Faktors $E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}}$ den allgemeinen O_2 -Faktor ⁴⁾ (-17200 kJ m^{-3}) ein.

Ein sehr einfacher Zusammenhang ergibt sich, wenn man einen volumen- und energiebezogene Luftbedarf r_{Q}^{V} definiert. Dieser ergibt sich auf einfachste Weise aus dem O_2 -Faktor:

$$r_{\text{Q}}^{\text{V}} = \frac{1}{-E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}}} \cdot \frac{1}{X_{\text{O}_2}^0} \quad (2.19)$$

Setzt man den allgemeinen O_2 -Faktor in Gleichung (2.19) ein, so erhält man für den stöchiometrischen Luftbedarf einen Wert von $0,2775 \text{ m}^3 \text{ MJ}^{-1}$ (ca. $1000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ MW}^{-1}$) (Volumen bezogen auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Der Wert $1000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ MW}^{-1}$ kann zur Abschätzung des für ausreichende Ventilation notwendigen Zuluftvolumenstroms bei Raumbränden herangezogen werden.

⁴⁾ O_2 -Faktor besitzt entgegen der üblichen Darstellung ein negatives Vorzeichen.

Mit Hilfe des stöchiometrischen Luftbedarfs aus (2.18) kann bei bekannter Abbrandrate und Zuluftmenge das Zuluftverhältnis ZLV bzw. das Globale Äquivalenzverhältnis GER (global equivalence ratio) als dimensionslose Größe zur Charakterisierung der Ventilationsrandbedingungen festgelegt werden:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{\text{stöchiometrisch}}^0 &= \dot{m}_{\text{Brennstoff}} \cdot r \\
 \dot{V}_{298, \text{stöchiometrisch}}^0 &= \dot{m}_{\text{Brennstoff}} \cdot r \cdot \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \\
 \text{ZLV} &= \frac{1}{\text{GER}} = \frac{\dot{m}^0}{\dot{m}_{\text{stöchiometrisch}}^0} = \frac{\dot{m}^0}{\dot{m}_{\text{Brennstoff}} \cdot r} \\
 &= \frac{\dot{V}_{298}^0}{\dot{m}_{\text{Brennstoff}} \cdot r} \cdot \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Das Zuluftverhältnis bzw. Globale Äquivalenzverhältnis hat zentrale Bedeutung bei der Übertragung von Ergebnissen aus labormaßstäblichen Untersuchungen in praxisrelevante Größenordnungen als annähernd vom Maßstab unabhängige Größe, insbesondere bei der Bewertung der Ventilationsbedingungen bei den unterschiedlichen Größenordnungen [A-13, A-14].

A.3 Aufbereitung des Messgases

Da die herzuleitenden Verfahrensweisen auf der Bilanzierung von Gasströmen beruhen, muss im Vorfeld die Aufbereitung von Gasen zur Bestimmung der Zusammensetzung betrachtet werden. Die Zuluft oder das Rauchgas / die Abluft, allgemein das Messgas, dessen Zusammensetzung teilweise oder vollständig bestimmt werden soll, setzt sich aus festen (Staub, Ruß), flüssigen bzw. verdampften (Wasserdampf) und gasförmigen Bestandteilen zusammen. Zum Schutz der Gasanalysatoren und der Zuleitungen vor Verschmutzung und Schädigung (Korrosion) werden bestimmte Bestandteile herausgefiltert.

Zur Messgasaufbereitung gehört vornehmlich das Entfernen von Partikeln (fest) und Tröpfchen (flüssig) mit Hilfe von Filtern (z. B. Papierfilter oder Wäscher). Mit dieser Reinigung des Messgases ist im Allgemeinen auch schon ein zumindest teilweises Herausfiltern von kondensierbaren (bei Betriebstemperatur der Analysestrecke flüssigen) Anteilen verbunden.

Das vollständige Entfernen von kondensierbaren Bestandteilen, hauptsächlich Wasserdampf, erfolgt im Allgemeinen mit Hilfe einer Kühlfalle, d. h. einem Gefäß oder Leitungsabschnitt mit kalter Oberfläche, an der sich die entsprechenden Stoffe niederschlagen und somit in diesem Abschnitt der Messgasaufbereitung dem Messgas entzogen werden. Beim Entfernen von Wasserdampf aus dem Messgas ist zu beachten, dass auch lösliche Stoffe in das kondensierte Wasser übergehen. Durch diesen Vorgang löst sich z. B. das Wasserstoffchlorid HCl vollständig im Kondenswasser, bildet Salzsäure und wird damit dem Messgas entzogen. Da die Löslichkeit von Kohlendioxid CO₂ - im Gegensatz zu Salzsäuregas HCl - sehr gering ist, wird nur ein zu vernachlässigender Anteil von CO₂ als Kohlensäure gebunden. Im Weiteren wird das Entfernen der kondensierbaren und der löslichen Bestandteile unter dem Begriff „H₂O-Trapping“ (engl. trap = Falle) zusammengefasst. Wird das durch eine Kühlfalle geführte Messgas zusätzlich über Silicagel geleitet, so kann auch der verbliebene Wasserdampf gebunden und die Effizienz des H₂O-Trapping so gesteigert werden, dass im Messgas danach kein Wasserdampf mehr nachweisbar ist. Inzwischen werden auch andere Filtermedien benutzt, da Silicagel in geringem Maße auch Kohlendioxid binden und später unkontrolliert wieder freisetzen kann.

Bei der für den Room-Corner-Test in ISO 9705 [A-8] bzw. DIN 4102 Teil 19 [A-9] vorgeschlagenen und für den SBI-Test in DIN EN 13823 [A-10] vorgeschriebenen Messgasaufbereitung wird nur H₂O-Trapping durchgeführt (Bild A.1). Im nächsten Abschnitt wird deutlich, dass daher neben dem Sauerstoffanalysator auch ein Kohlendioxid- und eventuell ein Kohlenmonoxidanalysator benötigt werden, um die Menge des umgesetzten Sauerstoffs und damit die Energiefreisetzungsrate mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen.

In einer weiteren Filterstufe kann Kohlendioxid in Natronkalk (engl. soda lime) gebunden werden. Das Messgas muss danach aber erneut getrocknet werden (z. B. mit dem bereits erwähnten Silicagel), um das dabei entstehende Wasser zu binden. Diese Art des Filterns wird im Weiteren „CO₂-Trapping“ genannt. Der Zweck des CO₂-Trappings wird bei Vorstellung der verschiedenen Auswertungsmethoden deutlich (Abschnitt A.7).

ISO 5660 [A-7] fordert für das Cone-Calorimeter nur einen Sauerstoffanalysator. Dieser reicht aus, da bei der Messgasaufbereitung zusätzlich CO₂-Trapping durchgeführt wird (Bild A.2). In den meisten Fällen sind beim Cone-Calorimeter aber auch ein Kohlendioxid- und ein Kohlenmonoxidanalysator angeschlossen. Die Messwerte dieser Analysatoren werden aber nicht für die Bestimmung der Energiefreisetzungsrate, sondern zusammen mit dem Ergebnis der Gewichtsmessung für die Berechnung der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute benötigt. Diese Form der Aufbereitung wird auch bei den Gasanalysestrecken des iBMB bei der Vermessung von Raumbränden in einer großen Brandkammer (z. B. Kabelbrände [A-20]) und beim Room-Corner-Test [A-17, A-18] verwendet. Die Gasanalysestrecke für die Cone-Kammer ist mit einer Erweiterung durch einen CO₂/CO-Analysator mit größeren Messbereichen, der in Reihe hinter den ersten CO₂/CO-Analysator geschaltet ist, ausgestattet [A-21] (vgl. Bild B.3 in Abschnitt B).

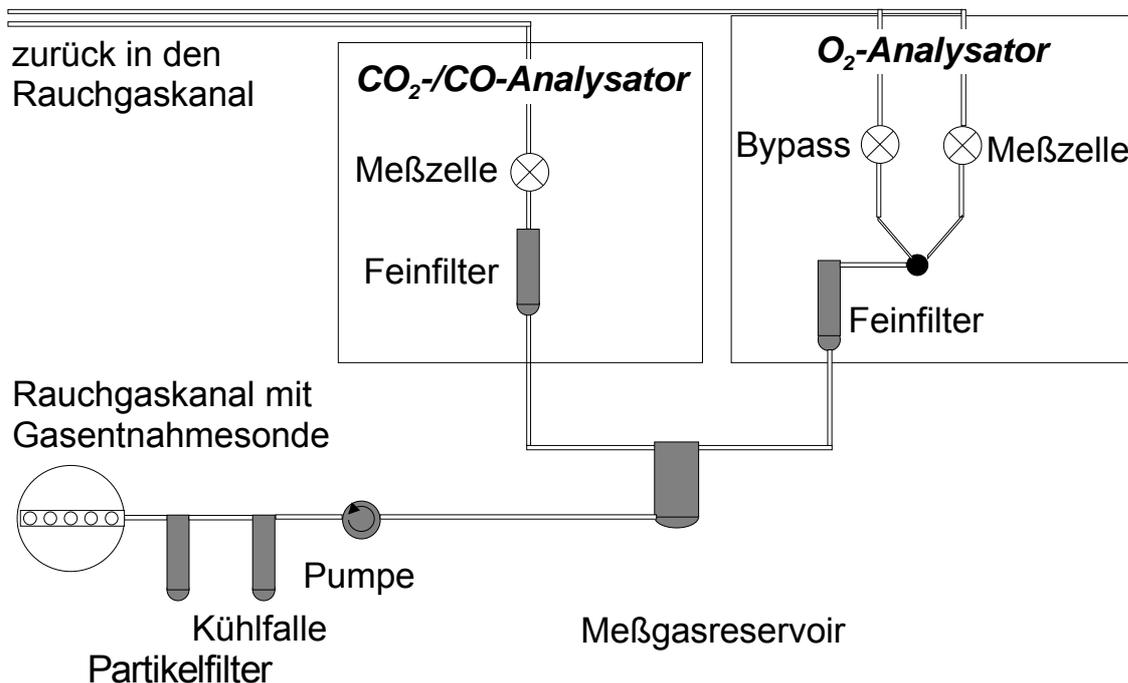


Bild A.1 Aufbau der Gasanalysestrecke mit H₂O-Trapping, z. B. für Room-Corner-Test gemäß ISO 9705 [A-8], SBI-Test gemäß [A-10]

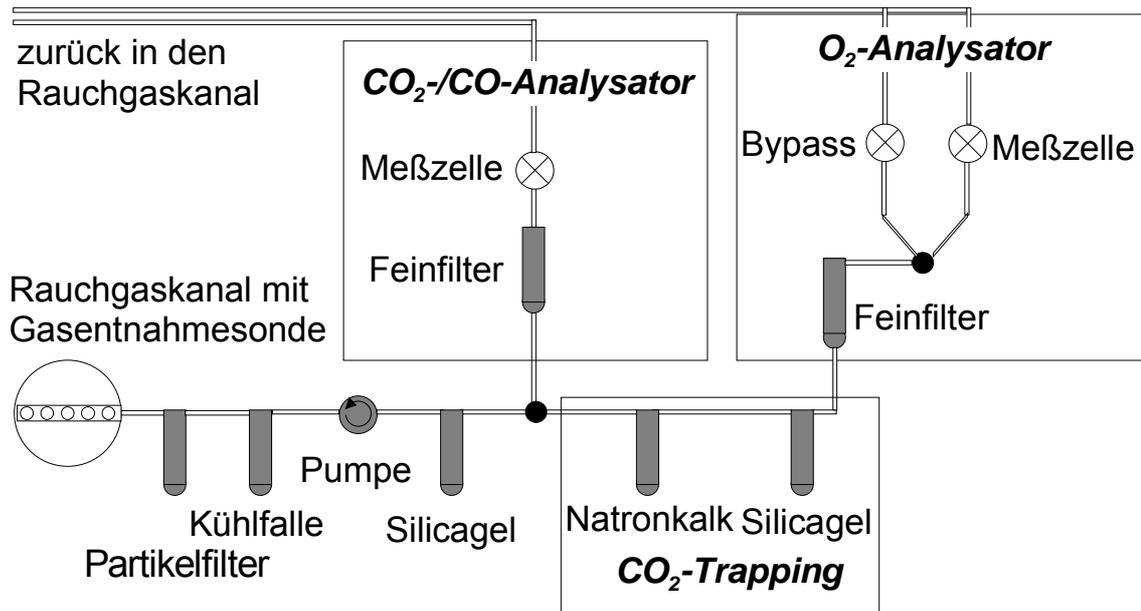


Bild A.2 Aufbau der Gasanalysestrecke mit H₂O-Trapping und CO₂-Trapping (CO₂/CO-Analysator optional) für das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [A-7] und für Raumbrandversuche [A-17, A-18]

A.4 Berechnung der Gaszusammensetzung

Durch die im vorherigen Abschnitt beschriebene Aufbereitung des Messgases werden die Zusammensetzung und damit die Massen- oder Volumenanteile verändert, da bestimmte Bestandteile / Komponenten im Rahmen der Messgenauigkeit vollständig entfernt werden. Durch die Gasanalytoren wird der Volumenanteil der entsprechenden Gaskomponente im aufbereiteten Messgas bestimmt, der sich vom Volumenanteil im nicht-gefilterten Gas unterscheidet. Die Umrechnung der gemessenen Volumenanteile in die Volumenanteile in der Zuluft oder im Rauchgas / in der Abluft zusammen mit den dafür notwendigen Annahmen und Vereinfachungen wird im Folgenden dargestellt.

Es wird angenommen, dass sich alle betrachteten Gase und Gasgemische nach den Gesetzmäßigkeiten für das „ideale“ Gas verhalten, d. h. in einer Volumeneinheit sind bei einer bestimmten Temperatur (und Druck) eine feste Anzahl von Gasmolekülen enthalten. Die Anzahl der Gasmoleküle ist unabhängig von der Molekülart und der Gaszusammensetzung. Die Zusammensetzung eines Gasgemisches, Zuluft oder Rauchgas / Abluft, lässt sich in molaren Anteilen bzw. Volumenanteilen darstellen.

Bei der Darstellung mit Hilfe von Volumina ist formal aber auch immer die Bezugstemperatur (und der Druck) zu nennen. Auch sind alle in diesem Abschnitt dargestellten Zusammenhänge für Volumen äquivalent zu Volumenströmen. Der Volumenanteil X_i einer Komponente ergibt sich aus dem Verhältnis von Teilvolumen der Komponente zu Gesamtvolumen:

$$X_i = \frac{V_{T,i}}{V_T} \Leftrightarrow V_{T,i} = X_i \cdot V_T \quad i = N_2, O_2, CO_2, CO, H_2O, K, NK \quad (4.1)$$

Die maßgeblichen Komponenten der Zuluft oder des Rauchgases / der Abluft sind Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO) und Wasserdampf (H_2O). Weitere Komponenten werden als kondensierbare (Index κ) oder nicht-kondensierbare (Index NK) Gasbestandteile zusammengefasst, wobei die vorher namentlich genannten Komponenten nicht zu diesen gehören. Somit gilt für die Zusammensetzung eines ungefilterten Gasvolumens (Zuluft oder Abluft):

$$\begin{aligned} V_T &= V_{T,N_2} + V_{T,O_2} + V_{T,CO_2} + V_{T,CO} + V_{T,H_2O} + V_{T,K} + V_{T,NK} \\ 1 &= X_{N_2} + X_{O_2} + X_{CO_2} + X_{CO} + X_{H_2O} + X_K + X_{NK} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Bei den gängigen Apparaturen ist vor der Messung des Volumenanteils einer oder mehrerer Komponenten erst eine Aufbereitung des Messgases notwendig. In der ersten Aufbereitungsstufe werden Wasserdampf und alle anderen kondensierbaren Bestandteile herausgefiltert. Durch dieses H_2O -Trapping werden auch alle stark löslichen Bestandteile entfernt. Bestandteile mit geringer Löslichkeit in Wasser (z. B. Kohlendioxid) sollen nicht entfernt werden, sondern vollständig im gefilterten Gas enthalten bleiben, d. h.:

$$X_{i_t}^t = \frac{V_{T,i_t}}{V_T^t} \Leftrightarrow V_{T,i_t} = X_{i_t}^t \cdot V_T^t \quad i_t = N_2, O_2, CO_2, CO, NK \quad (4.3)$$

Für die Zusammensetzung des so aufbereiteten Gases gilt die Beziehung:

$$\begin{aligned} V_T^t &= V_T - V_{T,H_2O} - V_{T,K} = V_{T,N_2} + V_{T,O_2} + V_{T,CO_2} + V_{T,CO} + V_{T,NK} \\ 1 &= X_{N_2}^t + X_{O_2}^t + X_{CO_2}^t + X_{CO}^t + X_{NK}^t \end{aligned} \quad (4.4)$$

Der Index ^t für diese Stufe wurde in Analogie zu „trocken“ bzw. dem in der englischen Literatur verwendeten „trapping“ gewählt. Das Trocknen wird durchgeführt, weil Wasser zum Teil an Partikelfiltern abgeschieden wird, zum anderen, um Pumpen, Zuleitungen und Gasanalysatoren vor Korrosion zu schützen. Diese Filterstufe kommt in allen relevanten Verfahren zum Einsatz (vgl. Bild A.1, Bild A.2).

In einer weiteren Stufe kann dem von den kondensierbaren Bestandteilen befreiten Messgas auch noch Kohlendioxid entzogen werden. Dies geschieht z. B. in der Gasanalysestrecke des Cone-Calorimeters nach ISO 5660 [A-7], der Cone-Kammer [A-21] und des Room-Corner-Test am iBMB [A-17] durch Natronkalk und Silicagel (vgl. Bild A.2). Auch die für Brandversuche in anderen Brandkammern des iBMB vorgehaltene mobile Gasanalysestrecke ist so aufgebaut, dass zum einen H₂O-Trapping vor allen Gasanalysatoren und zusätzlich auch CO₂-Trapping vor dem Sauerstoffanalysator durchgeführt wird.

$$X_{iPa}^{Pa} = \frac{V_{T,iPa}}{V_T^{Pa}} \Leftrightarrow V_{T,iPa} = X_{iPa}^{Pa} \cdot V_T^{Pa} \quad i_{Pa} = N_2, O_2, CO, NK \quad (4.5)$$

Nach CO₂-Trapping gilt für das bereits von Wasserdampf und anderen kondensierbaren Bestandteilen befreite Messgas:

$$V_T^{Pa} = V_T^t - V_{T,CO_2} = V_T - V_{T,H_2O} - V_{T,K} - V_{T,CO_2} = V_{T,N_2} + V_{T,O_2} + V_{T,CO} + V_{T,NK} \quad (4.6)$$

$$1 = X_{N_2}^{Pa} + X_{O_2}^{Pa} + X_{CO}^{Pa} + X_{NK}^{Pa}$$

Der Index ^{Pa} wurde gewählt, da diese zusätzliche Filterstufe dem paramagnetischen Sauerstoffanalysator beim Cone-Calorimeter [A-7] vorgeschaltet ist.

Das Verhältnis der Volumina einzelner Gasanteile ändert sich durch einen Filterprozess nicht, soweit einer der Bestandteile nicht herausgefiltert wurde. Durch das Herausfiltern einzelner Bestandteile ändert sich damit zwar der Volumenanteil einer Komponente im Messgas abhängig von der Art der Filterstufe, das Verhältnis der Volumenanteile zweier nicht herausgefilterter Komponenten zueinander wird aber nicht beeinflusst. Dieser einfach herzuleitende Sachverhalt stellt sich formal wie folgt dar:

$$\frac{V_{T,i}}{V_{T,j}} = \frac{V_T \cdot X_i}{V_T \cdot X_j} = \frac{V_T^t \cdot X_i^t}{V_T^t \cdot X_j^t} = \frac{V_T^{Pa} \cdot X_i^{Pa}}{V_T^{Pa} \cdot X_j^{Pa}} \quad (4.7)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_{T,i}}{V_{T,j}} = \frac{X_i}{X_j} = \frac{X_i^t}{X_j^t} = \frac{X_i^{Pa}}{X_j^{Pa}} = Z_{i/j}$$

Die Beziehung (4.7) lässt sich auch auf die Summe der Volumenanteile von einzelnen Bestandteilen anwenden. Geschieht dies z. B. für die Summe von Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenmonoxid und alle anderen nicht kondensierenden Bestandteile, so erhält man mit (4.7) unter Beachtung von (4.4) und (4.6) die einfache Beziehung zwischen Volumenanteil vor und nach CO₂-Trapping (H₂O-Trapping vorausgesetzt).

$$X_i^{Pa} = \frac{X_i^{Pa}}{X_{N_2}^{Pa} + X_{O_2}^{Pa} + X_{CO}^{Pa} + X_{NK}^{Pa}} = \frac{X_i^t}{X_{N_2}^t + X_{O_2}^t + X_{CO}^t + X_{NK}^t} = \frac{X_i^t}{1 - X_{CO_2}^t} \quad (4.8)$$

$$X_i^{Pa} = \frac{X_i^t}{1 - X_{CO_2}^t} \Leftrightarrow X_i^t = X_i^{Pa} \cdot (1 - X_{CO_2}^t)$$

Auf entsprechende Weise erhält man mit (4.7) unter Verwendung von (4.2) und (4.4) die Beziehung zwischen ungefiltertem Gas und aufbereitetem Messgas nach H₂O-Trapping. Der Zusammenhang lautet:

$$X_i^t = \frac{X_i^t}{X_{N_2}^t + X_{O_2}^t + X_{CO_2}^t + X_{CO}^t + X_{NK}^t} = \frac{X_i}{X_{N_2} + X_{O_2} + X_{CO_2} + X_{CO} + X_{NK}} = \frac{X_i}{1 - X_{H_2O} - X_K} \quad (4.9)$$

$$X_i^t = \frac{X_i}{1 - X_{H_2O} - X_K} \Leftrightarrow X_i = X_i^t \cdot (1 - X_{H_2O} - X_K)$$

Da bei den üblicherweise benutzten Gasanalysestrecken der Volumenanteil von Stickstoff N₂ nicht gemessen wird, soll hier noch ein besonderes Augenmerk auf diese Komponente gelegt werden. Zusammen mit (4.8) ergibt sich der Stickstoffvolumenanteil nach H₂O-Trapping aus (4.4) bzw. nach zusätzlichem CO₂-Trapping aus (4.6):

$$X_{N_2}^t = 1 - X_{O_2}^t - X_{CO_2}^t - X_{CO}^t - X_{NK}^t = 1 - X_{O_2}^{Pa} \cdot (1 - X_{CO_2}^t) - X_{CO}^t - X_{NK}^t \quad (4.10)$$

$$X_{N_2}^{Pa} = 1 - X_{O_2}^{Pa} - X_{CO}^{Pa} - X_{NK}^{Pa} = 1 - X_{O_2}^{Pa} - \frac{X_{CO}^t}{1 - X_{CO_2}^t} - X_{NK}^{Pa}$$

Wenn der Volumenanteil der nicht-kondensierenden Komponenten (NK) des Gases (außer Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid) vernachlässigt wer-

den darf, lässt sich der Stickstoffanteil nach H₂O-Trapping ohne zusätzliches CO₂-Trapping direkt angeben. Unter diesen Randbedingungen müssen die Volumenanteile von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid gemessen werden. Dies sollte bei der in ISO 9705 [A-8] oder DIN 4102 Teil 19 [A-9] beschriebenen Gasanalysestrecke (Bild A.1) geschehen, d. h. der Stickstoffanteil nach H₂O-Trapping berechnet sich wie folgt:

$$X_{N_2}^t = 1 - X_{O_2}^t - X_{CO_2}^t - X_{CO}^t \quad \text{für } X_{NK}^t = 0 \quad (4.11)$$

Tatsächlich wird dort, trotz der vorgeschlagenen Kohlenmonoxidmessung, der CO-Anteil vernachlässigt, so dass sich in den genannten Prüfvorschriften der Stickstoffanteil nach CO₂-Trapping noch einfacher darstellt:

$$X_{N_2}^t = 1 - X_{O_2}^t - X_{CO_2}^t \quad \text{für } X_{NK}^t = 0, X_{CO}^t = 0 \quad (4.12)$$

Eine weitere Vereinfachung ergibt sich bei zusätzlichem CO₂-Trapping ebenfalls unter der Annahme, dass der Kohlenmonoxidvolumenanteil des Gases vernachlässigt werden darf. Diese Randbedingungen und Annahmen finden bei der Bestimmung des Stickstoffvolumenanteils gemäß ISO 5660 [A-7] ihre Berücksichtigung. So ergibt sich:

$$X_{N_2}^{Pa} = 1 - X_{O_2}^{Pa} \quad \text{für } X_{CO}^{Pa} = 0, X_{NK}^{Pa} = 0 \quad (4.13)$$

Speziell am Beispiel der Berechnung des Stickstoffvolumenanteils erkennt man die Notwendigkeit, die benutzte Aufbereitungstechnik vor den Gasanalysatoren (Trapping) und die getroffenen Vereinfachungen bzw. Vernachlässigungen zusammen mit den Berechnungsformeln anzugeben. Diese Angaben werden in den gängigen Veröffentlichungen [A-5, A-6] gemacht. In den internationalen Normen [A-7, A-8], in denen der Aufbau der Gasanalysestrecke „nur“ informativ ist, wird nicht darauf hingewiesen, dass die angegebenen Auswertungsformeln nur für den Fall des gleichartigen Aufbaus der Gasanalysestrecke gelten, d. h. da der Aufbau der Gasanalysestrecke informativ ist, müssten auch die anzuwendenden Berechnungsverfahren informativ und nicht normativ sein. Diese Diskrepanz zwischen Status der Gasaufbereitungstechnik und der Auswertungsmethode weist bisher auch der Entwurf zur DIN 4102 Teil 19 [A-9] als Anpassung der ISO 9705 [A-8] an die nationalen Erforder-

nisse auf. Bei der Prüfnorm DIN EN 13823 [A-10] für den SBI-Test (single burning item), die ansonsten sehr detailliert den Versuchsaufbau und die Auswertungsverfahren beschreibt, ist die Gasanalysestrecke nicht einmal näher spezifiziert. Die Fehler, die auftreten, wenn Gasanalysestrecke und Auswertungsverfahren nicht aufeinander abgestimmt sind, werden in Abschnitt A.9.5 dargestellt.

Die Bestimmung des Wasserdampfvolumentanteils in der Zuluft - die Bedeutung dieser Maßnahme wird in den folgenden Abschnitten ersichtlich - kann auch indirekt über die Bestimmung der relativen Feuchte erfolgen. Dabei ist die relative Feuchte der Quotient aus Partialdruck des Wasserdampfs zu Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfs bei einer festen Temperatur. Andererseits folgt aus dem Boyle-Mariotteschen Gesetz, dass bei einem idealen Gas das Verhältnis von Teilvolumen zu Gesamtvolumen gleich dem Verhältnis von Partialdruck zu Gesamtdruck ist, was dem Volumenanteil entspricht. Damit bestimmt sich der Wasserdampfvolumenteil aus der relativen Feuchte bei Kenntnis des Sättigungsdampfdrucks und des Gesamtdrucks mit:

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\varphi \cdot p_s(T)}{p_{\text{ges}}} \quad (4.14)$$

Für diese Bestimmung muss zusätzlich auch die Temperatur des Gases bekannt sein, damit aus der Literatur, z. B. [A-22], der zugehörige Sättigungsdampfdruck entnommen werden kann.

Mit Hilfe von Diagramm A.7 kann der maximale Fehler abgeschätzt werden, der eingegangen wird, wenn bei der Bestimmung der Gaszusammensetzung nicht der Wasserdampfvolumenteil berücksichtigt wird. Bei Normaldruck (1,013 bar) und einer Temperatur von 10 - 25 °C beträgt der Sättigungsdampfdruck für Wasserdampf 0,0122 - 0,0317 bar. Damit beträgt unter diesen Bedingungen der Wasserdampfanteil maximal 1,2 - 3,1 % (100 % relative Feuchte angenommen). Dies ist auch der maximale Unterschied zwischen dem mit einer Gasanalysestrecke mit H₂O-Trapping gemessenen Sauerstoffanteil $X_{\text{O}_2}^{\text{Pa},0}$ und dem tatsächliche Sauerstoffanteil $X_{\text{O}_2}^0$ in der Zuluft. Um diesen Fehler zu vermeiden ist es notwendig, den Sauerstoffanteil in der ungefilterten Zuluft $X_{\text{O}_2}^0$ ohne H₂O-Trapping direkt zu messen. Alternativ dazu kann

der Wasserdampfanteil aus der Lufttemperatur und der relativen Feuchte berechnet werden. Zusammen mit dem mit H₂O-Trapping gemessenen Sauerstoffanteil $X_{O_2}^{Pa,0}$ bestimmt sich daraus der Sauerstoffanteil $X_{O_2}^0$ in der ungefilterten Zuluft.

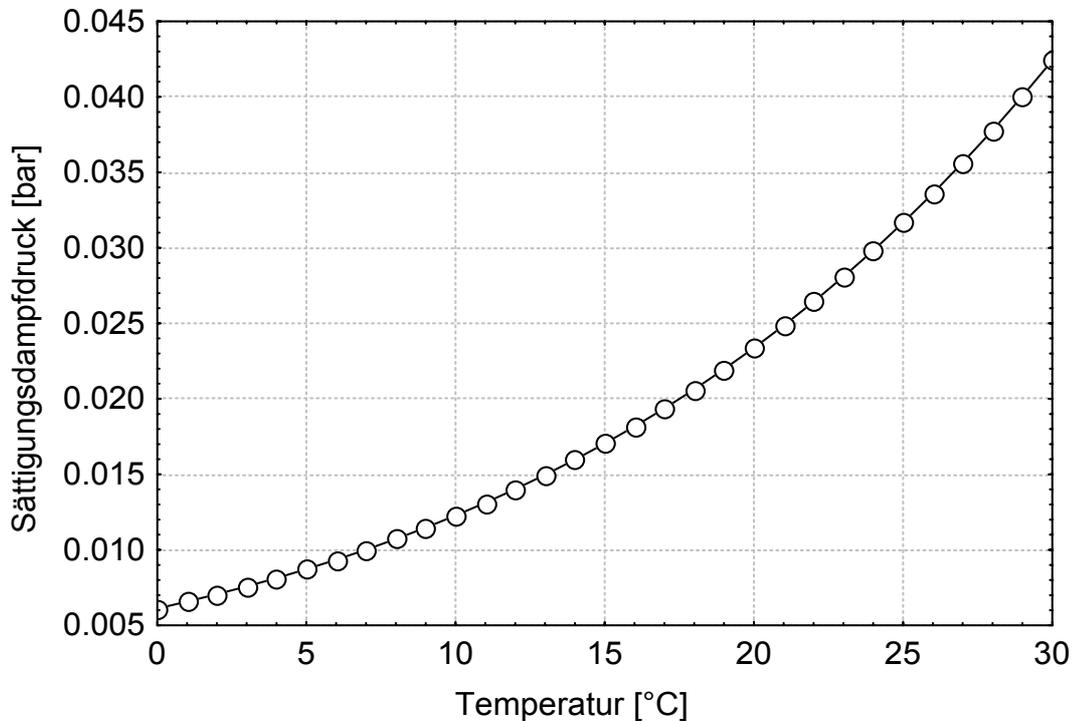


Diagramm A.7 Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf in Luft

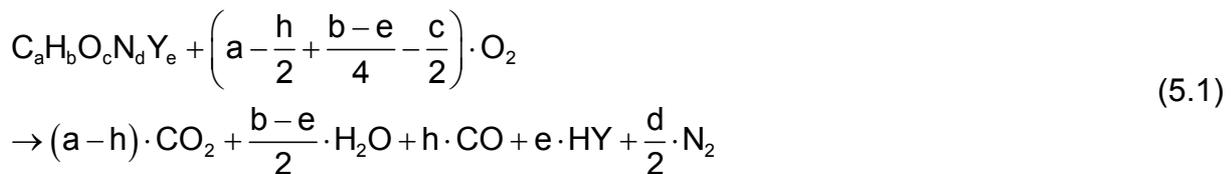
A.5 Änderungen der Gasströme bei der Verbrennung eines Stoffes bekannter Zusammensetzung

A.5.1 Grundlage

Im Abschnitt A.4 wurde allgemein auf die Bestimmung der Volumenanteile von verschiedenen Komponenten in einem Gas eingegangen. Dabei lag das Augenmerk auf der Herleitung der Umrechnungen, die notwendig sind, wenn ein Gas für die Zuführung zu unterschiedlichen Analysatoren durch verschiedene Filtervorgänge aufbereitet wird. In diesem Abschnitt sollen die Änderungen der Gaszusammensetzung und der Volumenströme unter den Randbedingungen einer Verbrennung betrachtet werden.

Bei der Verbrennung wird ein Stoff zersetzt (Pyrolyse) und die Zersetzungsprodukte reagieren untereinander und mit dem Bestandteilen der Zuluft. Im Weiteren ist die

Oxidation von Brennstoffbestandteilen maßgeblich. Eine sehr allgemeine, aber selbstverständlich nicht alle realen Möglichkeiten abdeckende Beschreibung der Verbrennungsreaktion erfolgt unter der Annahme eines Brennstoffs, der neben den Hauptbestandteilen Kohlenstoff und Wasserstoff auch Sauerstoff, Stickstoff und Elemente, die bei der Umsetzung Wasserstoff binden (z. B. Halogene), enthält. Die chemische Reaktionsgleichung lautet unter diesen Voraussetzungen, wie schon in (2.1) beschrieben:



Ist die chemische Summenformel des Brennstoffs nicht bekannt, sind aber z. B. durch massenspektroskopische Analyse die Massenanteile (Index m) der relevanten Elemente bestimmt worden, so lassen sich die molaren Anteile mit Hilfe der Molmassen (siehe Tabelle A.1) berechnen:

$$a = 1 \quad b = \frac{b_m}{M_H} \cdot \frac{M_C}{a_m} \quad c = \frac{c_m}{M_O} \cdot \frac{M_C}{a_m} \quad d = \frac{d_m}{M_N} \cdot \frac{M_C}{a_m} \quad e = \frac{e_m}{M_Y} \cdot \frac{M_C}{a_m} \quad 5) \quad (5.2)$$

Bei der in (5.1) formulierten chemischen Reaktion wird angenommen, dass sowohl der in der Atmosphäre als auch im Brennstoff enthaltene Sauerstoff an der Verbrennung teilnimmt, der im Brennstoff enthaltenen Stickstoff vollständig als molekularer Stickstoff freigesetzt wird und keine anderen gasförmigen Verbrennungsprodukte in nennenswerter Menge entstehen. Die Entstehung von gasförmigen Zwischenprodukten wird nicht berücksichtigt, wobei Kohlenmonoxid als theoretisches Zwischenprodukt bei der Kohlendioxidbildung davon ausgenommen wird.

Stellt man sich die Verbrennung in einem System vor, so muss zuerst die Zuluftmenge und deren Zusammensetzung betrachtet werden (Index 0). Im System muss die Verbrennung beschrieben werden, durch die einerseits molekularer Sauerstoff verbraucht wird und andererseits Verbrennungsprodukte erzeugt werden, insgesamt also die Menge und Zusammensetzung des Gasgemischs verändert wird (Δ). Das Gas-

⁵⁾ Da der molare Kohlenstoffanteil 1 gesetzt wird, ergeben sich für die anderen molaren Anteile nicht zwangsläufig ganze Zahlen.

gemisch, dessen Menge und Zusammensetzung durch die Verbrennung verändert worden ist, verlässt als Rauchgas / Abluft das System (Index ^s). Die Verknüpfung dieser drei Abschnitte lässt sich wie folgt formulieren:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{298}^0 &= \sum_i \dot{V}_{298,i}^0 \\
 \dot{V}_{298}^s &= \sum_i \dot{V}_{298,i}^s \\
 \Delta \dot{V}_{298} &= \sum_i \Delta \dot{V}_{298,i} \quad i = \text{N}_2, \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{HY} \\
 \dot{V}_{298}^0 + \Delta \dot{V}_{298} &= \dot{V}_{298}^s \\
 \dot{V}_{298,i}^0 + \Delta \dot{V}_{298,i} &= \dot{V}_{298,i}^s
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Hierbei werden die Gasvolumenströme bzw. die Änderungen auf das Volumen bei einer Gastemperatur von 25 °C (298,15 K) und einem Druck von 1 bar (Normaldruck) bezogen.

Ein Volumenstrom bzw. die Änderung eines Volumenstroms, der bzw. die auf eine Temperatur und einen Druck normiert wird, ist aufgrund der Voraussetzung eines idealen Gases proportional zum Teilchenstrom bzw. zur Teilchenstromänderung. Die Umrechnung erfolgt über das molare Normvolumen eines idealen Gases $V_{m,0} = (0,0224136 \pm 0,0000030) \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ und die Avogadro-Konstante (Loschmidt-Zahl) $N_A = (6,02252 \pm 0,00028) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ [A-12].

Eine Darstellung in der Form von Massenströmen und Massenstromänderungen - wie bei Janssens und Parker [A-5] - ist über die Atommasse bzw. Molekülmasse jederzeit möglich, aber unübersichtlich, da dann in allen Gleichungen auch die relativen Atom- bzw. Molekülmassen erscheinen. Zum anderen sei gegen die Darstellung über Massenströme angeführt, dass bei der Gasanalyse mit den gängigen Geräten der Volumenanteil eines Bestandteils, nicht aber dessen Massenanteil ermittelt wird. Aufgrund dieser beiden Punkte erscheint die Darstellung über Massenströme und Massenstromänderungen weniger anschaulich.

Die Gesamtänderung des Volumenstroms ergibt sich bei einer chemischen Reaktion (5.1) aus der Summe aller Volumenstromänderungen einzelner Bestandteile gemäß (5.3):

$$\Delta \dot{V}_{298} = \Delta \dot{V}_{298, O_2} + \Delta \dot{V}_{298, CO_2} + \Delta \dot{V}_{298, CO} + \Delta \dot{V}_{298, H_2O} + \Delta \dot{V}_{298, HY} + \Delta \dot{V}_{298, N_2} \quad (5.4)$$

Unter den gegebenen Randbedingungen lässt sich die Entstehung von Reaktionsprodukten durch die Umsetzung von Sauerstoff aus der Zuluft beschreiben, indem das Verhältnis der Volumenstromänderungen dem Verhältnis der Faktoren in (5.1) gleichgesetzt wird. Dabei ist zu beachten, dass der Faktor auf der linken Seite von (5.1) den Verbrauch von Sauerstoff bewertet, also mit umgekehrten Vorzeichen eingeht. Zur übersichtlicheren Darstellung werden außerdem alle Verhältnisse mit dem Wert 4 erweitert. Somit ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \dot{V}_{298, CO_2}}{\Delta \dot{V}_{298, O_2}} &= \frac{4 \cdot (a - h)}{\kappa} & \frac{\Delta \dot{V}_{298, CO}}{\Delta \dot{V}_{298, O_2}} &= \frac{4 \cdot h}{\kappa} & \frac{\Delta \dot{V}_{298, H_2O}}{\Delta \dot{V}_{298, O_2}} &= \frac{2 \cdot (b - e)}{\kappa} \\ \frac{\Delta \dot{V}_{298, HY}}{\Delta \dot{V}_{298, O_2}} &= \frac{4 \cdot e}{\kappa} & \frac{\Delta \dot{V}_{298, N_2}}{\Delta \dot{V}_{298, O_2}} &= \frac{2 \cdot d}{\kappa} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Der Nenner wurde zusammengefasst:

$$\kappa = -(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h) \quad (5.6)$$

Formt man die Ausdrücke aus (5.5) um und setzt sie in (5.4) ein, so erhält man einen Ausdruck, der die Gesamtänderung des Volumenstroms allein durch den Sauerstoffverbrauch (Änderung des Sauerstoffvolumenstroms) und die chemische Zusammensetzung des Brennstoffs beschreibt. Die Randbedingungen bei der Verbrennung werden nur über die molare Kohlenmonoxidausbeute h berücksichtigt.

$$\Delta \dot{V}_{298} = \Delta \dot{V}_{298, O_2} \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa} \quad (5.7)$$

A.5.2 Verbrennung in Umgebungsluft oder Atmosphäre bekannter Zusammensetzung

Im nächsten Schritt soll ein Ausdruck hergeleitet werden, der eine Darstellung der Sauerstoffvolumenstromänderung über messbare Größen (Volumenstrom, Volumenanteile von Gasbestandteilen) ermöglicht, wobei für die Bestimmung des Stickstoffvolumenanteils auf (4.10) oder (4.11) verwiesen werden kann.

Diesem Schritt legt man gemäß (4.7) das Verhältnis von Sauerstoff- zu Stickstoffvolumenstrom in der Abluft zugrunde, setzt für beide Bestandteile den Zusammenhang zwischen Volumenstrom der Abluft, der Zuluft und der Volumenstromänderung gemäß (5.4) an und berücksichtigt abschließend das durch (5.5) für Stickstoff- und Sauerstoffvolumenstromänderung festgelegte Verhältnis:

$$Z_{O_2/N_2}^S = \frac{\dot{V}_{298,O_2}^S}{\dot{V}_{298,N_2}^S} = \frac{\dot{V}_{298,O_2}^0 + \Delta\dot{V}_{298,O_2}}{\dot{V}_{298,N_2}^0 + \Delta\dot{V}_{298,N_2}} = \frac{\dot{V}_{298,O_2}^0 + \Delta\dot{V}_{298,O_2}}{\dot{V}_{298,N_2}^0 + \frac{2 \cdot d}{\kappa} \cdot \Delta\dot{V}_{298,O_2}} \quad (5.8)$$

In diesem Punkt unterscheidet sich die Herleitung wesentlich von den in der Literatur üblichen Formen [A-5, A-6], da auch die Freisetzung von Stickstoff berücksichtigt werden kann und nicht die Voraussetzung der Stickstoffkonstanz (die Annahme des unveränderten Stickstoffvolumenstroms) benötigt wird.

Letztgenannte Gleichung (5.8) kann man entsprechend umformen, so dass sich ein Ausdruck für die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms ergibt. Zusätzlich fasst man das Verhältnis von Sauerstoff- zu Stickstoffvolumenstrom in der Zuluft gemäß (4.7) zusammen und erhält die Gleichung zur Berechnung der Änderung des Sauerstoffvolumenstroms:

$$\Delta\dot{V}_{298,O_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \frac{\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1}{1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^S \cdot 2 \cdot d}{\kappa}} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2}} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \quad (5.9)$$

An dieser Stelle wurde zur besseren Übersicht für den Nenner in (5.9) die Vereinfachung eingeführt::

$$\Delta_{N_2} = 1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^S \cdot 2 \cdot d}{\kappa} = 1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^S \cdot 2 \cdot d}{-(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h)} \quad (5.10)$$

Da nur in seltenen Fällen im Material Stickstoff enthalten ist ($d = 0$), reduziert sich der Ausdruck Δ_{N_2} zu 1.

In einem geschlossenen System (z. B. Cone-Kammer) wird der Zuluftvolumenstrom gemessen und eventuell auch geregelt. Somit ist (5.9) direkt anwendbar. Wird Um-

gebungsluft unkontrolliert der Verbrennung zugeführt und können sich die Verbrennungsgase mit Umgebungsluft in einem offenen System mischen, bevor sie vom Abzugssystem aufgenommen werden, so muss statt des Zuluftvolumenstroms der Abluftvolumenstrom bestimmt werden (z. B. Cone-Calorimeter, Room-Corner-Test). Dann ist in (5.3) die Änderung des Gesamtvolumenstroms durch die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms gemäß (5.7) einzusetzen. Weiterhin ersetzt man die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms durch das Ergebnis aus (5.9), klammert den Zuluftvolumenstrom aus, löst die Gleichung zum Expansionsverhältnis als Verhältnis von Abluft- zu Zuluftvolumenstrom auf und erhält das Expansionsverhältnis:

$$\frac{\dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^0} = 1 + \frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2}} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa} \quad (5.11)$$

Wird das in (5.11) dargestellte Expansionsverhältnis in (5.9) eingesetzt, dann lässt sich die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms auch bei bekanntem Abluftvolumenstrom berechnen. Man kann auch (5.3) benutzen, dort für den Zuluftvolumenstrom aus der nach dem Zuluftvolumenstrom aufgelösten Gleichung (5.9) einsetzen, für die Volumenstromänderung (5.7) ansetzen, die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms ausklammern und nach dieser auflösen. In beiden Fällen erhält man die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms in Abhängigkeit vom Abluftvolumenstrom.

$$\Delta \dot{V}_{298, O_2} = \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{1}{\frac{1}{\frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2}} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right)} + \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa}} \quad (5.12)$$

Mit (5.9) oder (5.12) lässt sich die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms berechnen, wenn die molare Kohlenmonoxidausbeute (h) als chemische Eigenschaft des Brennstoffs bekannt ist. Es ist aber kaum zu erwarten, dass die molare Kohlenmonoxidausbeute ein konstanter, von den Randbedingungen der Verbrennung unabhängiger Stoffparameter ist. Es besteht aber die Möglichkeit, die molare Kohlenmonoxidausbeute über andere Größen auszudrücken.

Dazu legt man (4.7) für das Verhältnis von Kohlenmonoxid- zu Sauerstoffvolumenstrom in der Abluft zugrunde, setzt für beide Bestandteile den Zusammenhang zwischen Volumenstrom der Abluft, der Zuluft und der Volumenstromänderung gemäß (5.3) an, berücksichtigt das durch (5.5) für Kohlenmonoxid- und Sauerstoffvolumenstromänderung festgelegte Verhältnis und setzt für die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms (5.9) ein. So erhält man durch Umformen eine Bestimmungsgleichung für die molare Kohlenmonoxidausbeute.

$$h = \frac{(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e) \cdot \left(Z_{\text{CO/O}_2}^0 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO/O}_2}^s \right) + (Z_{\text{CO/O}_2}^s - Z_{\text{CO/O}_2}^0) \cdot Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s \cdot 2 \cdot d}{2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO/O}_2}^s - Z_{\text{CO/O}_2}^0 - 2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \right)} \quad (5.13)$$

Nach (5.13) wird die molare Kohlenmonoxidausbeute allein durch den Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlenmonoxidgehalt in der Zu- und Abluft bestimmt. Eine Bilanzierung über den Kohlenstoff, die bei der Betrachtung von Verbrennungsvorgängen zu erwarten wäre, scheint nicht notwendig zu sein. Tatsächlich erfolgt aber die Kohlenstoffbilanzierung indirekt durch die Vorgabe der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs und die Festlegung der chemischen Reaktion in (5.1).

Mit gleicher Vorgehensweise ((2.8), (5.3) und (5.5)), allerdings für Kohlendioxid anstelle von Kohlenmonoxid, lässt sich auch eine auf Kenntnis des Kohlendioxidgehalts basierende Bestimmungsgleichung für die molare Kohlenmonoxidausbeute herleiten.

$$h = \frac{4 \cdot a \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot (1 + Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^s) - (1 + Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^0) \right)}{2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^s - Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^0 + 2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \right)} + \frac{(b - 2 \cdot c - e) \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^s - Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^0 \right)}{2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^s - Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^0 + 2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \right)} + \frac{(Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^s - Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^0) \cdot Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s \cdot 2 \cdot d}{2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^s - Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^0 + 2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \right)} \quad (5.14)$$

Mit (5.13) und (5.14) kann unabhängig voneinander die molare Kohlenmonoxidausbeute ermittelt werden und so nachträglich die Konsistenz der Messungen (Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidvolumenanteil) überprüft werden. Gleichung (5.14) kann aber nur angewendet werden, wenn die chemische Brennstoffzusammensetzung, d. h. der molare Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Halogenanteil, bekannt ist.

Um die Entstehung von Verbrennungsprodukten zu bestimmen, legt man (4.7) für das Verhältnis von Verbrennungsprodukt- zu Sauerstoffvolumenstrom in der Abluft zugrunde, setzt für beide Bestandteile den Zusammenhang zwischen den Volumenströmen der Abluft, der Zuluft und der Volumenstromänderung gemäß (5.3) an und setzt für die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms (5.9) ein.

$$\Delta \dot{V}_{298,i} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(Z_{i/O_2}^s \cdot \left(1 + \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta_{N_2}} \right) - Z_{i/O_2}^0 \right) \quad 6) \quad (5.15)$$

Durch Einsetzen von (5.11) in (5.15) oder Durchführung der Herleitung mit (5.12) anstelle von (5.9) erhält man die Berechnungsformel für die Änderung des Volumenstroms eines Verbrennungsproduktes bei bekanntem Abluftvolumenstrom.

Mit den bisher zusammengestellten Gleichungen lässt sich auch die Zusammensetzung des Rauchgases / der Abluft bestimmen, genauer die Anteile der gasförmigen Komponenten. Der Anteil einer Komponente ist gemäß (4.1) als das Verhältnis von Volumen bzw. Volumenstrom der Komponente zu Gesamtvolumen bzw. Gesamtvolumenstrom definiert. Der Volumenstrom einer Komponente im Rauchgas / in der Abluft setzt sich aus deren Volumenstrom in der Zuluft und der Änderung des Volumenstroms durch die Verbrennung zusammen, wie in (5.3) gezeigt. Für die Änderung des Sauerstoffvolumenstrom setzt man (5.9) ein und benutzt das Expansionsverhältnis (5.11), um den Volumenstrom aus dem Ausdruck kürzen zu können.

$$X_{O_2}^s = X_{O_2}^0 \cdot \frac{1 + \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta_{N_2}}}{1 + X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa}} \quad (5.16)$$

6) Zur Überprüfung kann man in die obige Gleichung für das Verbrennungsprodukt i auch Sauerstoff O₂ einsetzen, dann geht (5.15) in (5.9) über, womit u. a. die Richtigkeit von (5.15) gezeigt wurde.

Soweit sie gemessen oder anderweitig abgeleitet werden können, ergeben sich damit die Volumenanteile der anderen Bestandteile im Rauchgas / in der Abluft einfach durch Einsetzen von (5.16) in das entsprechende Verhältnis gemäß (4.7):

$$X_{N_2}^s = \frac{X_{O_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^s} \quad (5.17)$$

$$X_i^s = Z_{i/O_2}^s \cdot X_{O_2}^s$$

Ausgeschrieben bedeutet dies für den Anteil von Kohlendioxid bzw. Kohlenmonoxid im Rauchgas / in der Abluft:

$$X_i^s = X_{O_2}^0 \cdot \frac{Z_{i/O_2}^s \cdot \left(1 + \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta_{N_2}} \right)}{1 + X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa}} \quad (5.18)$$

Alternativ kann der Anteil einer Komponente im Rauchgas / in der Abluft auch mit Hilfe der chemischen Reaktion (5.5) und der Änderung des Sauerstoffvolumenstroms (5.9) ausgedrückt werden.

$$X_i^s = X_{O_2}^0 \cdot \frac{Z_{i/O_2}^0 + \frac{f_i}{\kappa} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta_{N_2}}}{1 + X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa}} \quad (5.19)$$

$$f_{CO_2} = 4 \cdot (a - h) \quad f_{CO} = 4 \cdot h \quad f_{H_2O} = 2 \cdot (b - e) \quad f_{HY} = 4 \cdot e \quad f_{N_2} = 2 \cdot d$$

$i = N_2, CO_2, CO, H_2O, HY$

Dabei kann mit (5.19) auch der Anteil von Komponenten berechnet werden, die nicht direkt im Rauchgas / in der Abluft gemessen werden.

Mit den beiden letztgenannten Gleichungen besteht wiederum die Möglichkeit, die Richtigkeit der Messung (5.18) anhand der Theorie (5.19) für Kohlendioxid und Kohlenmonoxid zu prüfen bzw. zu verifizieren. Es ist nicht zulässig, mit Hilfe der Messung auf die Brennstoffzusammensetzung (Theorie) zu schließen. Dafür sind die systematischen Fehler bei der Messung und Auswertung zu groß.

A.5.3 Verbrennung in kontrollierter Atmosphäre und nachträglicher Zumischung von Umgebungsluft

Komplexer werden die Verhältnisse bei den Untersuchungen mit einem sogenannten „ventilation controlled“ Cone-Calorimeter, wie es bei finnischen Versuchen zur Schadstoffentstehung eingesetzt wurde [A-23, A-24]. Leider sind in den entsprechenden Forschungsberichten oder Veröffentlichungen die verwendeten Gleichungen zur Auswertung nicht dargestellt. Daher werden sie in diesem Abschnitt hergeleitet.

Beim modifizierten Cone-Calorimeter, das in den finnischen Versuchen eingesetzt wurde, wird in eine Verbrennungskammer ein Gemisch mit kontrollierter Menge und Zusammensetzung - z. B. Mischung aus reinem Stickstoff, reinem Sauerstoff, Luft - eingeblasen (Index ⁱⁿ). Das Gasgemisch tritt nach der Verbrennung aus der Kammer aus und wird beim Eintritt in das Abzugssystem des ursprünglichen Cone-Calorimeters mit Umgebungsluft (Index ^{am}) vermischt. Der Gesamtabluftstrom bzw. der Abluftstrom einer Komponente (Index ^s) setzt sich also aus dem in die Kammer eingeblasenen Gasstrom, der Änderung durch die Verbrennung und dem Volumenstrom der eingemischten Umgebungsluft zusammen. Umgekehrt ergibt sich der Volumenstrom der eingemischten Umgebungsluft als Differenz aus Abluft zu eingeblasenem Gas und Änderung durch die Verbrennung.

$$\begin{aligned}\dot{V}_{298}^{am} &= \dot{V}_{298}^s - \dot{V}_{298}^{in} - \Delta\dot{V}_{298} \\ \dot{V}_{298,i}^{am} &= \dot{V}_{298,i}^s - \dot{V}_{298,i}^{in} - \Delta\dot{V}_{298,i}\end{aligned}\tag{5.20}$$

Analog zum Ansatz in (5.8) bildet man auch hier das Verhältnis von Sauerstoffvolumenstrom zu Stickstoffvolumenstrom in der Abluft.

$$Z_{O_2/N_2}^s = \frac{\dot{V}_{298,O_2}^s}{\dot{V}_{298,N_2}^s} = \frac{\dot{V}_{298,O_2}^{in} + \dot{V}_{298,O_2}^{am} + \Delta\dot{V}_{298,O_2}}{\dot{V}_{298,N_2}^{in} + \dot{V}_{298,N_2}^{am} + \Delta\dot{V}_{298,N_2}}\tag{5.21}$$

Diese Gleichung kann man durch Einsetzen von (5.20) für den Volumenstrom der eingemischten Umgebungsluft, (5.5) für die Änderung des Stickstoffvolumenstroms und (5.7) für die Gesamtänderung des Volumenstrom durch die Verbrennung und mit

der Abkürzung (5.6) und (5.10) so umformen, dass man die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms durch die Verbrennung erhält.

$$\Delta \dot{V}_{298, O_2} = \frac{\dot{V}_{298}^{in} \cdot X_{O_2}^{in} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^{in}} - 1 \right) - \dot{V}_{298}^{in} \cdot X_{O_2}^{am} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^{am}} - 1 \right) + \dot{V}_{298}^s \cdot X_{O_2}^{am} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^{am}} - 1 \right)}{\Delta_{N_2} + X_{O_2}^{am} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^{am}} - 1 \right)} \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa} \quad (5.22)$$

Zur Probe kann man in (5.22) den Volumenstrom in die Kammer (Index ⁱⁿ) gleich 0 setzen und erhält dann (5.12) für den vorherigen Fall. Geht man, wie bei der Herleitung von (5.15), vom Verhältnis des Volumenstroms eines Verbrennungsproduktes *i* zum Sauerstoffvolumenstrom aus, so erhält man durch Umformen eine Gleichung zur Bestimmung der Volumenstromänderung des Verbrennungsproduktes im modifizierten Cone-Calorimeter. Zusätzlich werden die Abkürzung (5.6) bzw. (5.10) und für die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms (5.22) benötigt.

$$\Delta \dot{V}_{298, i} = \dot{V}_{298}^{in} \cdot X_{O_2}^{in} \cdot (Z_{i/O_2}^s - Z_{i/O_2}^{in}) + X_{O_2}^{am} \cdot (\dot{V}_{298}^s - \dot{V}_{298}^{in}) + \Delta \dot{V}_{298, O_2} \cdot \left(Z_{i/O_2}^s - (Z_{i/O_2}^s - Z_{i/O_2}^{am}) \cdot X_{O_2}^{am} \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{\kappa} \right) \quad (5.23)$$

Setzt man wiederum den Volumenstrom in die Kammer gleich 0 und ersetzt den Abluftvolumenstrom mit Hilfe von (5.11) so geht (5.23) in (5.15) über. Auf eine Berechnung der molaren Kohlenmonoxidausbeute mit Hilfe von (5.23) und (5.22) analog zum Ansatz für (5.13) wird hier verzichtet, da beim ventilationsgesteuerten Brand im modifizierten Cone-Calorimeter, d. h. bei geringem Sauerstoffgehalt in der eingeblasenen Zuluft oder bei geringem Zuluftvolumenstrom, eine Verbrennung außerhalb der Kammer beim Zusammentreffen der ausströmenden Gase mit der Umgebungsluft beobachtet wurde [A-24]. Diese zusätzliche Verbrennung unter „unkontrollierten“ Randbedingungen geht in die Bewertung mit ein, also können die Energiefreisetzungsrate und die Ausbeuten von Reaktionsprodukten für den ventilationsgesteuerten Brand mit dieser Apparatur nicht bestimmt werden.

A.5.4 Benutzung eines zusätzlichen Brenners

Bei Benutzung eines zusätzlichen Brenners wird vorausgesetzt, dass alle für den Brennerbetrieb relevanten Größen gemessen oder als bekannt vorausgesetzt werden können, d. h. dass bei vorgegebenem Brennstoff (z. B. Methan CH_4 , Propan C_3H_8) die chemische Zusammensetzung und die effektive Verbrennungswärme / der Heizwert bekannt sind und die Energiefreisetzungsrates (Leistung) beim Betrieb des Brenners als Produkt aus Abbrandrate / Durchflussmenge und effektiver Verbrennungswärme / Heizwert erfasst wird. Natürlich sollte der Brennstoff hier vollständig umgesetzt werden, d. h. es wird kein Kohlenmonoxid durch den Betrieb des Brenners erzeugt. Ansonsten müsste die molare Kohlenmonoxidausbeute des Brennstoffs h_B als von den Randbedingungen des Experiments unabhängige Stoffeigenschaft bekannt sein. Der Verbrauch von Sauerstoff und die Erzeugung von Verbrennungsprodukten ist dann mit der Brennerleistung bzw. mit der Abbrandrate des Brenners verknüpft (vgl. (5.3), (5.5)), wobei hier die Abbrandrate des Brenners analog zur Abbrandrate einer Brandlast (als Massenverlust) ein negatives Vorzeichen besitzt.

$$\Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2, \text{B}} = \frac{\dot{q}_B}{E_{\text{O}_2, \text{B}}^V} = \left(a_B - \frac{h_B}{2} + \frac{b_B - e_B}{4} - \frac{c_B}{2} \right) \cdot \frac{\dot{m}_B}{M_B} \quad (5.24)$$

Die durch den Brenner verursachten Änderungen der Volumenströme der anderen Gasbestandteile sind bei Verfolgen des Ansatzes „Änderungen der Gasströme bei der Verbrennung eines Stoffes bekannter Zusammensetzung“ mit der chemischen Reaktion nach (5.1) entsprechend (5.5) zu berechnen.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2, \text{B}} &= -(a_B - h_B) \cdot \frac{\dot{m}_B}{M_B} \\ \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}, \text{B}} &= -h_B \cdot \frac{\dot{m}_B}{M_B} \\ \Delta \dot{V}_{298, \text{H}_2\text{O}, \text{B}} &= -\frac{b_B - e_B}{2} \cdot \frac{\dot{m}_B}{M_B} \end{aligned} \quad \text{7) (5.25)}$$

7) Die Molmasse berechnet man bei bekannter Brennstoffzusammensetzung mit (2.2).

Die gesamte Änderung des Sauerstoffvolumenstroms oder einer anderen Gaskomponente setzt sich aus einer durch die Verbrennung des Materials und einer durch den Brenner verursachten Volumenstromänderung zusammen:

$$\Delta \dot{V}_{298,i} = \Delta \dot{V}_{298,i,M} + \Delta \dot{V}_{298,i,B} \quad i = \text{N}_2, \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2 \quad (5.26)$$

Für die weitere Herleitung wird wieder das Verhältnis von Sauerstoff- zu Stickstoffvolumenstrom der Abluft angesetzt, wobei aber zusätzlich zu der durch die Verbrennung des Materials verursachten Änderung des Sauerstoffvolumenstroms (5.8) noch ein Teil aus der Umsetzung durch den Betrieb des Brenners (5.26) hinzukommt.

$$Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^S = \frac{\dot{V}_{298,\text{O}_2}^S}{\dot{V}_{298,\text{N}_2}^S} = \frac{\dot{V}_{298,\text{O}_2}^0 + \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2}}{\dot{V}_{298,\text{N}_2}^0 + \Delta \dot{V}_{298,\text{N}_2}} = \frac{\dot{V}_{298,\text{O}_2}^0 + \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2,M} + \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2,B}}{\dot{V}_{298,\text{N}_2}^0 + \Delta \dot{V}_{298,\text{N}_2,M} + \Delta \dot{V}_{298,\text{N}_2,B}} \quad (5.27)$$

Aufgelöst nach der durch die Verbrennung des Materials hervorgerufenen Änderung des Sauerstoffvolumenstroms erhält man:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2,M} &= \\ &= \frac{\dot{V}_{298}^0 \cdot X_{\text{O}_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^S}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) - \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2,B} \cdot \left(1 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^S \cdot 2 \cdot d_B}{-(4 \cdot a_B + b_B - 2 \cdot c_B - e_B - 2 \cdot h_B)} \right)}{1 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^S \cdot 2 \cdot d_M}{-(4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M - 2 \cdot h_M)}} \quad (5.28) \\ \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2,M} &= \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{\text{O}_2}^0}{\Delta_{\text{N}_2,M}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^S}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) - \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2,B} \cdot \frac{\Delta_{\text{N}_2,B}}{\Delta_{\text{N}_2,M}} \end{aligned}$$

Mit der gleichen Begründung wie bei der Einführung der Abkürzung aus (5.10) wurden für (5.28) folgende Abkürzungen eingesetzt:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{N}_2,M} &= 1 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^S \cdot 2 \cdot d_M}{-(4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M - 2 \cdot h_M)} \\ \Delta_{\text{N}_2,B} &= 1 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^S \cdot 2 \cdot d_B}{-(4 \cdot a_B + b_B - 2 \cdot c_B - e_B - 2 \cdot h_B)} \end{aligned} \quad (5.29)$$

Die durch das Material verursachte Freisetzung von Verbrennungsprodukten (Änderung des Volumenstroms anderer Bestandteile) kann über den Ansatz des Verhält-

nisses von Volumenstrom des Verbrennungsproduktes zu Sauerstoffvolumenstrom in der Abluft ausgedrückt werden.

$$Z_{i/O_2}^S = \frac{\dot{V}_{298,i}^S}{\dot{V}_{298,O_2}^S} = \frac{\dot{V}_{298,i}^0 + \Delta\dot{V}_{298,i}}{\dot{V}_{298,O_2}^0 + \Delta\dot{V}_{298,O_2}} = \frac{\dot{V}_{298,i}^0 + \Delta\dot{V}_{298,i,M} + \Delta\dot{V}_{298,i,B}}{\dot{V}_{298,O_2}^0 + \Delta\dot{V}_{298,O_2,M} + \Delta\dot{V}_{298,O_2,B}} \quad (5.30)$$

Setzt man die Sauerstoffvolumenstromänderung gemäß (5.28) ein und fasst entsprechend zusammen, so erhält man einen Ausdruck für die Entstehung eines Verbrennungsproduktes der Materialumsetzung:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_{298,i,M} &= \\ &= \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2,M}} \cdot \left(Z_{i/O_2}^S \cdot \left(\Delta_{N_2,M} + \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) - \frac{\Delta\dot{V}_{298,O_2,B}}{\dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0} \cdot \Delta_{N_2,B} \right) - Z_{i/O_2}^0 \cdot \Delta_{N_2,B} \right) - \Delta\dot{V}_{298,i,B} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Die Entstehung des betrachteten Produktes durch den Brenner lässt sich mit (5.25) berechnen, die Abkürzungen sind in (5.29) definiert.

Für die Darstellung des Zusammenhangs zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom, die sog. Rauchgasexpansion, setzt man die Änderung durch die Verbrennung des Materials und durch den Brenner gemäß (5.7) an und benutzt die Ergebnisse aus (5.24) und (5.28).

$$\begin{aligned} \dot{V}_{298}^S &= \\ &= \dot{V}_{298}^0 \cdot \left(1 + \frac{b_M + 2 \cdot c_M + 2 \cdot d_M + 3 \cdot e_M + 2 \cdot h_M}{-(4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M - 2 \cdot h_M)} \cdot \frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2,M}} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \right) \\ &\quad - \Delta\dot{V}_{298,O_2,B} \cdot \frac{b_M + 2 \cdot c_M + 2 \cdot d_M + 3 \cdot e_M + 2 \cdot h_M}{-(4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M - 2 \cdot h_M)} \cdot \frac{\Delta_{N_2,B}}{\Delta_{N_2,M}} \\ &\quad + \Delta\dot{V}_{298,O_2,B} \cdot \frac{b_B + 2 \cdot c_B + 2 \cdot d_B + 3 \cdot e_B + 2 \cdot h_B}{-(4 \cdot a_B + b_B - 2 \cdot c_B - e_B - 2 \cdot h_B)} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Während sich bei der Bestimmung der durch die Verbrennung des Materials verursachten Änderung des Sauerstoffvolumenstroms - wenn weder vom Material noch vom Brenner Stickstoff freigesetzt wird - ein verhältnismäßig einfacher Ausdruck durch (5.28) ergab, so kann in der allgemeinen Form die Expansion bei Anwesenheit eines Brenners nicht mehr als einfaches Verhältnis von Ab- zu Zuluftvolumenstrom ausgedrückt werden (vergleiche (5.11)). In der Literatur [A-5, A-6] ist ein (5.32) ver-

gleichbarer Ausdruck nicht zu finden, was wahrscheinlich daran liegt, dass dort ohne explizite Erwähnung gleiche chemische Zusammensetzungen von Material und Brennergas postuliert werden. Wird für den Brennstoff des Brenners und das zu untersuchende Material eine identische chemische Zusammensetzung vorausgesetzt, dann geht (5.32) in (5.11) über.

Die molare Kohlenmonoxidstehung lässt sich aus dem Verhältnis von Kohlenmonoxidvolumenstrom zu Sauerstoffvolumenstrom in der Abluft gemäß (5.30) darstellen, indem man zuerst den Zusammenhang von Kohlenmonoxidvolumenstromänderung und Sauerstoffvolumenstromänderung gemäß (5.5) und dann die Sauerstoffvolumenstromänderung durch das Ergebnis aus (5.28) einsetzt. Die sich daraus ergebende Gleichung muss nach der molaren Kohlenmonoxidausbeute des Materials h_M aufgelöst werden.

$$\begin{aligned}\Sigma_a &= \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) - \Delta \dot{V}_{298, O_2, B} \cdot \Delta_{N_2, B} \\ \Sigma_b &= \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot (Z_{CO/O_2}^0 - Z_{CO/O_2}^S) \\ \Sigma_c &= \Delta \dot{V}_{298, O_2, B} \cdot \left(\frac{4 \cdot h_B}{-(4 \cdot a_B + b_B - 2 \cdot c_B - e_B - 2 \cdot h_B)} - Z_{CO/O_2}^S \right)\end{aligned}\quad (5.33)$$

$$h_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{(4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M) \cdot (Z_{CO/O_2}^S \cdot \Sigma_a - (\Sigma_b + \Sigma_c)) - Z_{O_2/N_2}^S \cdot 2 \cdot d_M \cdot (\Sigma_b + \Sigma_c)}{\Sigma_a \cdot (Z_{CO/O_2}^S - 2) - (\Sigma_b + \Sigma_c)}$$

Gleichung (5.33) zur Berechnung der molaren Kohlenmonoxidausbeute vereinfacht sich erheblich, wenn beim Brennergas die Freisetzung von Stickstoff ($d_B = 0$) und die Entstehung von Kohlenmonoxid ($h_B = 0$) vernachlässigt werden darf (siehe Abschnitt A.7).

Somit können die Änderungen des Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidvolumenstroms und damit die Energiefreisetzungsrate gemäß Abschnitt A.2 berechnet werden.

Die Zusammensetzung des Rauchgases / der Abluft lässt sich analog zu Abschnitt A.5.2 über die Änderung der Volumenströme der einzelnen Gasbestandteile und die Expansion berechnen.

A.6 Gasstromänderungen durch Sauerstoffbilanzierung

Bei der Bewertung von Brandverläufen von Wandbekleidungen im Room-Corner-Test wurde ein - nach bisheriger Kenntnis - neuer Ansatz zur Berechnung der Energiefreisetzungsrate über den Verbrauch von Sauerstoff und die Entstehung von Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasser, also über eine vollständige Sauerstoffbilanzierung, vorgestellt [A-17, A-18]. Die Herleitung wird im Folgenden dargestellt.

A.6.1 Voraussetzungen

Bei diesem Verfahren wird vorausgesetzt, dass die Zuluft und das Rauchgas / die Abluft aus Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasserdampf bestehen. Alle anderen Bestandteile sollen in so kleinen Mengen vorliegen, dass sie vernachlässigt werden dürfen. Dies beinhaltet auch, dass außer Wasserdampf keine kondensierbaren Bestandteile in der Zuluft existieren und auch nicht bei der Verbrennung freigesetzt werden. Somit reduzieren sich (4.2), (4.4) und (4.6) auf maximal fünf Gasbestandteile.

$$\begin{aligned}
 1 &= X_{N_2} + X_{O_2} + X_{CO_2} + X_{CO} + X_{H_2O} \\
 1 &= X_{N_2}^t + X_{O_2}^t + X_{CO_2}^t + X_{CO}^t \\
 1 &= X_{N_2}^{Pa} + X_{O_2}^{Pa} + X_{CO}^{Pa}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Die Beziehung zwischen Volumenanteil vor und nach CO₂-Trapping ergibt sich analog zu (4.9):

$$X_{i_t} = X_{i_t}^t \cdot (1 - X_{H_2O}^t) \quad i_t = N_2, O_2, CO_2, CO \tag{6.2}$$

Entsprechend ergibt sich die Beziehung zwischen getrocknetem und zusätzlich von Kohlendioxid befreitem Gas (vgl. (4.8)):

$$X_{i_{Pa}}^t = X_{i_{Pa}}^{Pa} \cdot (1 - X_{CO_2}^t) \quad i_{Pa} = N_2, O_2, CO \tag{6.3}$$

Der Stickstoffanteil nach H₂O-Trapping berechnet sich aus den Volumenanteilen der anderen drei Bestandteile unter Verwendung von (6.3):

$$X_{N_2}^t = 1 - X_{O_2}^{Pa} \cdot (1 - X_{CO_2}^t) - X_{CO_2}^t - X_{CO}^t \tag{6.4}$$

Zusätzlich kommt in diesem Abschnitt das Prinzip der Stickstoffkonstanz zur Anwendung, d. h. Stickstoff nimmt nicht an der Verbrennung teil, es wird also kein Stickstoff durch die Verbrennung erzeugt oder verbraucht. Der Stickstoffvolumenstrom in Zu- und Abluft ist demnach identisch:

$$\dot{V}_{298, N_2}^s = \dot{V}_{298, N_2}^0 \quad (6.5)$$

Zum dritten wird angenommen, dass bei der Verbrennung Sauerstoff verbraucht und nur Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasserdampf in nennenswerten Mengen freigesetzt werden, also nur folgende chemische Reaktionen betrachtet werden müssen:



A.6.2 Verbrennung ohne zusätzlichen Brenner

Für die weitere Berechnung zerlege man den Zuluftstrom und den Abluftstrom in den Wasserdampfstrom und den Strom der nicht-kondensierenden Bestandteile, d. h. Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid. Die Beziehung zwischen diesen Anteilen und dem gesamten Zuluftvolumenstrom bzw. Abluftvolumenstrom ist über (6.2) durch (4.3) gegeben, wenn man, wie durch (6.1) postuliert, andere kondensierende Komponenten vernachlässigt:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{298}^0 &= \dot{V}_{298}^{t,0} + \dot{V}_{298, H_2O}^0 \Rightarrow \dot{V}_{298}^{t,0} = (1 - X_{H_2O}^0) \cdot \dot{V}_{298}^0 \\ \dot{V}_{298}^s &= \dot{V}_{298}^{t,s} + \dot{V}_{298, H_2O}^s \Rightarrow \dot{V}_{298}^{t,s} = (1 - X_{H_2O}^s) \cdot \dot{V}_{298}^s \end{aligned} \quad (6.7)$$

Mit Hilfe der Stickstoffkonstanz lässt sich bei Kenntnis des Wasserdampfanteils der Zuluft der „getrocknete“ Abluftvolumenstrom beschreiben.

$$\dot{V}_{298}^s \cdot (1 - X_{H_2O}^s) = \dot{V}_{298}^{t,s} = \frac{\dot{V}_{298, N_2}^{t,s}}{X_{N_2}^{t,s}} = \frac{\dot{V}_{298, N_2}^{t,0}}{X_{N_2}^{t,s}} = \frac{\dot{V}_{298}^{t,0} \cdot X_{N_2}^{t,0}}{X_{N_2}^{t,s}} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{N_2}^{t,0}}{X_{N_2}^{t,s}} \cdot (1 - X_{H_2O}^0) \quad (6.8)$$

Die Änderungen der Volumenströme von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid sind vom H₂O-Trapping nicht betroffen, sie können also mit Hilfe von (6.8) dargestellt werden.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{298,i} &= \dot{V}_{298,i}^s - \dot{V}_{298,i}^0 = \dot{V}_{298,i}^{t,s} - \dot{V}_{298,i}^{t,0} = \dot{V}_{298}^{t,s} \cdot X_i^{t,s} - \dot{V}_{298}^{t,0} \cdot X_i^{t,0} \\ &= \dot{V}_{298}^0 \cdot (1 - X_{\text{H}_2\text{O}}^0) \cdot \left(\frac{X_{\text{N}_2}^{t,0}}{X_{\text{N}_2}^{t,s}} \cdot X_i^{t,s} - X_i^{t,0} \right) \quad i = \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Mit (6.8) lässt sich Änderung auch mit Hilfe des getrockneten Abluftvolumenstroms bestimmen, ungeachtet dessen, dass diese Größe messtechnisch nicht zugänglich ist:

$$\Delta \dot{V}_{298,i} = \dot{V}_{298}^{t,s} \cdot \left(X_i^{t,s} - X_i^{t,0} \cdot \frac{X_{\text{N}_2}^{t,s}}{X_{\text{N}_2}^{t,0}} \right) \quad i = \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO} \quad (6.10)$$

Da gemäß (6.6) nur drei chemische Umsetzungen berücksichtigt werden sollen, lässt sich die Änderung des Wasserdampfvolumenstroms auf die Änderungen der Volumenströme der drei anderen Bestandteile zurückführen, wobei zu beachten ist, dass bei der Bildung von Kohlenmonoxid bzw. Wasserdampf aus einem Molekül Sauerstoff zwei Moleküle des Reaktionsproduktes gebildet werden (daher der Faktor $1/2$):

$$\begin{aligned} 0 &= \Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2} + \Delta \dot{V}_{298,\text{CO}_2} + \frac{1}{2} \cdot \Delta \dot{V}_{298,\text{CO}} + \frac{1}{2} \cdot \Delta \dot{V}_{298,\text{H}_2\text{O}} \\ \Delta \dot{V}_{298,\text{H}_2\text{O}} &= -2 \cdot \left(\Delta \dot{V}_{298,\text{O}_2} + \Delta \dot{V}_{298,\text{CO}_2} + \frac{1}{2} \cdot \Delta \dot{V}_{298,\text{CO}} \right) \end{aligned} \quad (6.11)$$

Nun setzt man in (6.11) für die drei Bestandteile jeweils den Ausdruck gemäß (6.9) ein und fasst entsprechend zusammen.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{298,\text{H}_2\text{O}} &= \\ &= -2 \cdot \dot{V}_{298}^0 \cdot (1 - X_{\text{H}_2\text{O}}^0) \cdot \left(\frac{X_{\text{N}_2}^{t,0}}{X_{\text{N}_2}^{t,s}} \cdot \left(X_{\text{O}_2}^{t,s} + X_{\text{CO}_2}^{t,s} + \frac{1}{2} \cdot X_{\text{CO}}^{t,s} \right) - \left(X_{\text{O}_2}^{t,0} + X_{\text{CO}_2}^{t,0} + \frac{1}{2} \cdot X_{\text{CO}}^{t,0} \right) \right) \\ &= -2 \cdot \dot{V}_{298}^{t,s} \cdot \left(\left(X_{\text{O}_2}^{t,s} + X_{\text{CO}_2}^{t,s} + \frac{1}{2} \cdot X_{\text{CO}}^{t,s} \right) - \frac{X_{\text{N}_2}^{t,s}}{X_{\text{N}_2}^{t,0}} \cdot \left(X_{\text{O}_2}^{t,0} + X_{\text{CO}_2}^{t,0} + \frac{1}{2} \cdot X_{\text{CO}}^{t,0} \right) \right) \end{aligned} \quad (6.12)$$

Die Differenz zwischen Abluft- und Zuluftvolumenstrom lässt sich durch die Summe der Änderungen von Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidvolumenstrom gemäß (6.9) und des Wasserdampfvolumenstroms gemäß (6.12) ausdrücken. Damit kann auch das Expansionsverhältnis als Verhältnis von Abgas- zu Zuluftvolumenstrom bestimmt werden.

$$\frac{\dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^0} = 1 + (1 - X_{\text{H}_2\text{O}}^0) \cdot \left((X_{\text{O}_2}^{t,0} + X_{\text{CO}_2}^{t,0}) - \frac{X_{\text{N}_2}^{t,0}}{X_{\text{N}_2}^{t,s}} \cdot (X_{\text{O}_2}^{t,s} + X_{\text{CO}_2}^{t,s}) \right) \quad (6.13)$$

Der Abgasvolumenstrom setzt sich aus dem „getrockneten“ Abluftvolumenstrom gemäß (6.8), der Änderung des Wasserdampfvolumenstroms gemäß (6.12) und dem Zuluftvolumenstrom (inklusive Wasserdampf) zusammen. Damit ergibt sich auch ein Ausdruck für das Expansionsverhältnis:

$$\frac{\dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^0} = (1 - X_{\text{H}_2\text{O}}^0) \cdot \frac{X_{\text{N}_2}^{t,0}}{X_{\text{N}_2}^{t,s}} \cdot \left(1 - 2 \cdot \left((X_{\text{O}_2}^{t,s} + X_{\text{CO}_2}^{t,s} + \frac{1}{2} \cdot X_{\text{CO}}^{t,s}) - \frac{X_{\text{N}_2}^{t,s}}{X_{\text{N}_2}^{t,0}} \cdot (X_{\text{O}_2}^{t,0} + X_{\text{CO}_2}^{t,0} + \frac{1}{2} \cdot X_{\text{CO}}^{t,0}) \right) \right) \quad (6.14)$$

Betrachtet man nur den hinteren und vorderen Term von (6.8), löst diese nach dem Wasserdampfgehalt auf und setzt das Expansionsverhältnis gemäß (6.13) oder (6.14) ein, so lässt sich der Wasserdampfvolumenanteil im Rauchgas / in der Abluft bestimmen.

$$X_{\text{H}_2\text{O}}^s = 1 - \frac{\dot{V}_{298}^0}{\dot{V}_{298}^s} \cdot (1 - X_{\text{H}_2\text{O}}^0) \cdot \frac{X_{\text{N}_2}^{t,0}}{X_{\text{N}_2}^{t,s}} \quad (6.15)$$

Mit der Kenntnis über den Wasserdampfvolumenanteil der Abluft lassen sich auch die Volumenanteile der anderen Komponenten direkt im Rauchgas / in der Abluft (ohne H₂O-Trapping) berechnen (6.2). Somit ist die Zusammensetzung der Abluft unter den genannten Voraussetzungen bestimmt.

Diese Herleitung unterscheidet sich grundsätzlich vom Ansatz in Abschnitt A.5 „Änderungen der Gasströme bei der Verbrennung eines Stoffes bekannter Zusammensetzung“, weil gerade nicht die molaren Anteile (Brennstoffzusammensetzung) in die Gleichung für die Rauchgasexpansion (6.14) einfließen. Durch die vollständige Sauerstoffbilanzierung ist es nicht mehr notwendig, die Rauchgasexpansion aus der Brennstoffzusammensetzung herzuleiten. Allerdings ist die Umsetzung dieses Ansatzes in ein praktisches Messverfahren aufwendiger, da wegen der Voraussetzung der Oxidationsreaktionen (6.6) bzw. der Sauerstoffbilanzierung neben dem Sauerstoffgehalt auf jeden Fall auch der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt bestimmt

werden müssen. Die theoretische Bestimmung der Wasserdampfentstehung vervollständigt dann die Sauerstoffbilanzierung.

A.6.3 Benutzung eines zusätzlichen Brenners bei Sauerstoffbilanzierung

Verfolgt man den Ansatz der Sauerstoffbilanzierung gemäß dem vorherigen Abschnitt weiter, so lässt sich die Energiefreisetzung auf zwei verschiedene Weisen bestimmen. Zum einen kann man voraussetzen, dass für brennendes Material und für den Brennstoff des Brenners einheitliche Faktoren für die Entstehung von Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasserdampf angesetzt werden können. Dann ergibt sich die gesuchte Energiefreisetzungsrate des Materials auf einfache Weise aus der Differenz von Gesamtenergiefreisetzungsrate und Brennerleistung:

$$\dot{q}_M = E_{\text{CO}_2}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2} + E_{\text{H}_2\text{O}}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{H}_2\text{O}} + E_{\text{CO}}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}} - \dot{q}_B \quad (6.16)$$

Hierbei lässt sich die Volumenstromänderung von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid mit (6.10), die von Wasserdampf mit (6.12) berechnen. Diese einfache Lösung ergibt sich aus der Annahme, dass die Proportionalitätsfaktoren für die entstehenden Reaktionsprodukte unabhängig vom Brennstoff sind. Die Expansion des Rauchgases gegenüber der Zuluft muss mit Hilfe von (6.13) oder (6.14) berücksichtigt werden.

Die zweite Lösungsmöglichkeit bezieht sich auf den Sauerstoffverbrauch. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Proportionalitätsfaktoren für den Sauerstoffverbrauch zwischen brennendem Material und Brennstoff des Brenners unterscheiden. Mit den Zusammenhängen aus (2.12) bzw. (2.15) erhält man die Energiefreisetzungsrate des Materials bei bekanntem Sauerstoffverbrauch des Brenners oder zusammen mit (6.16) bei bekannter Brennerleistung.

$$\begin{aligned} \dot{q}_M &= E_{\text{O}_2, \text{M}}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2} + \frac{-E_{\text{O}_2, \text{M}}^V + E_{\text{O}_2, \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2}^V}{2} \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}} - E_{\text{O}_2, \text{M}}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2, \text{B}} \\ \dot{q}_M &= E_{\text{O}_2, \text{M}}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2} + \frac{-E_{\text{O}_2, \text{M}}^V + E_{\text{O}_2, \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2}^V}{2} \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}} - \frac{E_{\text{O}_2, \text{M}}^V}{E_{\text{O}_2, \text{B}}^V} \cdot \dot{q}_B \end{aligned} \quad (6.17)$$

Bei der Berechnung der Energiefreisetzungsrate mit der Methode der Sauerstoffbilanzierung über die Verbrennungsprodukte (6.16) muss die CO-Entstehung bei der Verbrennung des Brennergases nicht berücksichtigt werden, da angenommen wer-

den darf, dass dieser Effekt in der Brennerleistung selbst schon berücksichtigt wird. Bei der Berechnung allein über den Sauerstoffverbrauch (6.17) muss allerdings vorausgesetzt werden, dass bei der Umsetzung des Brennergases kein Kohlenmonoxid entsteht. Diese Einschränkung erscheint aber nicht wesentlich.

A.7 Anwendung und Vergleich mit den Herleitungen für genormte Prüfverfahren

Die Voraussetzungen und die Anwendung der in Abschnitt A.5 „Änderungen der Gasströme bei der Verbrennung eines Stoffes bekannter Zusammensetzung“ führt unter Berücksichtigung verschiedene Randbedingungen zur Herleitung der entsprechenden Berechnungsformeln. In diesem Abschnitt soll der Zusammenhang mit den aus der Literatur oder den Prüfnormen bekannten Auswertungsformeln dargestellt werden.

Die von Janssens und Parker [A-5] bzw. von Parker veröffentlichten Herleitungen [A-6] zur Sauerstoffkalorimetrie beruhen u. a. auf dem Prinzip der Stickstoffkonstanz, d. h. Stickstoff soll bei der Verbrennung nicht erzeugt oder verbraucht werden. Übertragen auf die hier durchgeführte Herleitung (Abschnitt A.5) lässt sich (5.11) durch Vernachlässigen des molaren Stickstoffanteils im Material ($d = 0$), allerdings nur für den Term im Nenner, in Gleichung (36) in [A-6] überführen. Dabei werden die allgemein üblichen Definitionen für das „molare Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff“ β und den „Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion“ α benutzt:

$$\beta = \frac{4 \cdot a + 2 \cdot b + 2 \cdot e + 2 \cdot d}{4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h} \quad (7.1)$$

$$\alpha = 1 + X_{O_2}^0 \cdot (\beta - 1)$$

Am Ende dieses Abschnitts (Tabelle A.4) sind die beiden Parameter für die bereits in Tabelle A.2 aufgeführten Materialien zusammengestellt.

Man erhält mit den entsprechenden Definitionen und Annahmen das Expansionsverhältnis. Dies entspricht der Herleitung von Gleichung (36) in [A-6] aus (5.11)):

$$\frac{\dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^0} = 1 + \frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2}} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{-(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h)}$$

Voraussetzung: $d = 0$

$$\Rightarrow \Delta_{N_2} = 1$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^0} = 1 + \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{-(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h)} \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right)$$

Definition für β :
$$\beta = \frac{4 \cdot a + 2 \cdot b + 2 \cdot e + 2 \cdot d}{4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h}$$

$$\Leftrightarrow 1 - \beta = \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{-(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h)}$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^0} = 1 + (1 - \beta) \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right)$$

Definition für α :
$$\alpha = 1 + X_{O_2}^0 \cdot (\beta - 1) \Leftrightarrow (1 - \beta) \cdot X_{O_2}^0 = 1 - \alpha$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^0} = 1 + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) = 1 + (\alpha - 1) \cdot \left(1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} \right) \quad (7.2)$$

Bei Parker [A-6] wird aber nicht darauf hingewiesen, dass bei der Verbrennung von stickstoffhaltigen Materialien das Prinzip der Stickstoffkonstanz verletzt wird bzw. dass die Stickstofffreisetzung bei der Verbrennung vernachlässigt werden soll. Auch muss bei der Verwendung des „chemical expansion factor“ α (Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion [A-9]) aus der Literatur [A-6] darauf geachtet werden, dass dieser nur für eine bestimmte Zusammensetzung der Zuluft (Sauerstoffanteil) gilt. Für die praktische Anwendung muss außerdem im molaren Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β die molare Kohlenmonoxidausbeute vernachlässigt werden ($h = 0$). Nur unter Beachtung dieser Vereinfachung ist auf die Herleitung von Parker [A-6] aufzubauen.

Geht man bei der Betrachtung von (5.9) auch von der Stickstoffkonstanz aus ($d = 0$) und nimmt zusätzlich an, dass Zu- und Abluft nicht nennenswert Kohlenmonoxid und andere nicht-kondensierende Bestandteile enthalten, so lässt sich der Stickstoffanteil nach CO_2 -Trapping und H_2O -Trapping mit (4.13) allein über der Sauerstoffanteil beschreiben. Zusätzlich muss angenommen werden, dass die Zuluft außer Sauerstoff und Stickstoff keine Bestandteile in nennenswerter Menge enthält (trockene saubere Zuluft), so dass der Sauerstoffanteil der Zuluft durch CO_2 -Trapping und H_2O -

Trapping nicht verändert wird. Unter diesen Vereinfachungen ergibt sich sinngemäß

8) Gleichung (42) in [A-6]:

$$\dot{q} = E_{O_2, M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{O_2}$$

$$\Delta \dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2}} \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right)$$

Voraussetzung: $d = 0$

$$\Rightarrow \Delta_{N_2} = 1$$

$$\Rightarrow \Delta \dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right)$$

$$\text{Annahme: } X_{CO}^{Pa,0} = 0 \cap X_{NK}^{Pa,0} = 0 \quad \Rightarrow X_{N_2}^{Pa,0} = 1 - X_{O_2}^{Pa,0}$$

$$X_{CO}^{Pa,s} = 0 \cap X_{NK}^{Pa,s} = 0 \quad \Rightarrow X_{N_2}^{Pa,s} = 1 - X_{O_2}^{Pa,s}$$

$$\Rightarrow \Delta \dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \frac{(1 - X_{O_2}^{Pa,0}) \cdot X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0} \cdot (1 - X_{O_2}^{Pa,s})}{(1 - X_{O_2}^{Pa,s}) \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}$$

$$\text{Annahme: } X_{O_2}^{Pa,0} = X_{O_2}^0$$

$$\Rightarrow \Delta \dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{1 - X_{O_2}^{Pa,s}}$$

$$\Rightarrow \dot{q} = E_{O_2, M}^V \cdot \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{1 - X_{O_2}^{Pa,s}} \quad 9) \quad (7.3)$$

Betrachtet man (7.2) unter diesen Voraussetzungen, so vereinfacht sich das Expansionsverhältnis noch weiter:

$$\dot{V}_{298}^0 = \frac{\dot{V}_{298}^s}{1 + (\alpha - 1) \cdot \left(1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} \right)}$$

$$\text{Annahme: } X_{CO}^{Pa,0} = 0 \cap X_{NK}^{Pa,0} = 0 \quad X_{CO}^{Pa,s} = 0 \cap X_{NK}^{Pa,s} = 0 \quad X_{O_2}^{Pa,0} = X_{O_2}^0$$

$$\Rightarrow X_{N_2}^{Pa,0} = 1 - X_{O_2}^{Pa,0} \quad \Rightarrow X_{N_2}^{Pa,s} = 1 - X_{O_2}^{Pa,s}$$

$$\text{Definition: } \beta = \frac{4 \cdot a + 2 \cdot b + 2 \cdot e + 2 \cdot d}{4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h} \quad \alpha = 1 + X_{O_2}^0 \cdot (\beta - 1) \Leftrightarrow \alpha - 1 = X_{O_2}^0 \cdot (\beta - 1)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{298}^0 = \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{1 - X_{O_2}^{Pa,s}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \quad (7.4)$$

8) Man erhält die Gleichung sinngemäß, da - im Gegensatz zur Norm - die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und der O_2 -Faktor negatives Vorzeichen besitzen.

9) Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und O_2 -Faktor besitzen ein negatives Vorzeichen.

Ersetzt man in (7.3) den Zuluftvolumenstrom gemäß (7.4) so erhält man auf einfachste Weise sinngemäß¹⁰⁾ Gleichung (43) in [A-6] bzw. Gleichung (6) in ISO 5660 [A-7]:

$$\dot{q} = E_{O_2, M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{O_2}$$

$$\Delta \dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa, s} - X_{O_2}^{Pa, 0}}{1 - X_{O_2}^{Pa, s}}$$

$$\dot{V}_{298}^0 = \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{1 - X_{O_2}^{Pa, s}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa, s}}$$

Definition : $\beta = \frac{4 \cdot a + 2 \cdot b + 2 \cdot e + 2 \cdot d}{4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h}$

Definition : $\alpha = 1 + X_{O_2}^0 \cdot (\beta - 1)$

$$\Rightarrow \Delta \dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa, s} - X_{O_2}^{Pa, 0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa, s}}$$

$$\Rightarrow \dot{q} = E_{O_2, M}^V \cdot \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa, s} - X_{O_2}^{Pa, 0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa, s}} \quad 11) \quad (7.5)$$

Der „oxygen depletion factor“ ϕ ist in Gleichung (F.5) von ISO 9705 [A-8]) (Sauerstoff-Erschöpfungs-Faktor) wie folgt definiert:

$$\phi^t = \frac{X_{O_2}^{t, 0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t, s}) - X_{O_2}^{t, s} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t, 0})}{X_{O_2}^{t, 0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t, s} - X_{O_2}^{t, s})} \quad (7.6)$$

Der „oxygen depletion factor“ ϕ lässt sich unter der Annahme, dass der Kohlenmonoxidanteil vernachlässigbar ist und das Messgas nur durch H₂O-Trapping aufbereitet wird (zur Verdeutlichung die Schreibweise ϕ^t), bei Anwendung von (4.4) auf die in [A-6] benutzte „depletion fraction“ (Anteil der Zuluft, der durch die Oxidation bzw. Verbrennung völlig von Sauerstoff befreit wird) zurückführen.

$$\phi^t = \frac{X_{O_2}^{t, 0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t, s}) - X_{O_2}^{t, s} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t, 0})}{X_{O_2}^{t, 0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t, s} - X_{O_2}^{t, s})}$$

¹⁰⁾ Man erhält die Gleichung sinngemäß, da - im Gegensatz zur Norm - die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und der O₂-Faktor negatives Vorzeichen besitzen.

¹¹⁾ Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und O₂-Faktor besitzen ein negatives Vorzeichen.

Annahme: $X_{\text{CO}}^{t,0} = 0 \cap X_{\text{NK}}^{t,0} = 0$ $X_{\text{CO}}^{t,s} = 0 \cap X_{\text{NK}}^{t,s} = 0$
 $\Rightarrow 1 - X_{\text{CO}_2}^{t,0} = X_{\text{O}_2}^{t,0} + X_{\text{N}_2}^{t,0}$ $\Rightarrow 1 - X_{\text{CO}_2}^{t,s} = X_{\text{O}_2}^{t,s} + X_{\text{N}_2}^{t,s}$

$$\Rightarrow \phi^t = \frac{X_{\text{O}_2}^{t,0} \cdot (X_{\text{O}_2}^{t,s} + X_{\text{N}_2}^{t,s}) - X_{\text{O}_2}^{t,s} \cdot (X_{\text{O}_2}^{t,0} + X_{\text{N}_2}^{t,0})}{X_{\text{O}_2}^{t,0} \cdot X_{\text{N}_2}^{t,s}} = \frac{X_{\text{O}_2}^{t,0} \cdot X_{\text{N}_2}^{t,s} - X_{\text{O}_2}^{t,s} \cdot X_{\text{N}_2}^{t,0}}{X_{\text{O}_2}^{t,0} \cdot X_{\text{N}_2}^{t,s}} = 1 - \frac{X_{\text{O}_2}^{t,s}}{X_{\text{N}_2}^{t,s}} \cdot \frac{X_{\text{N}_2}^{t,0}}{X_{\text{O}_2}^{t,0}}$$

$$\Rightarrow \phi = 1 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \quad (7.7)$$

Beim Einsatz eines zusätzlichen Brenners soll die Brennerleistung und der Sauerstoffverbrauch (Änderung des Sauerstoffvolumenstroms) über den bekannten O₂-Faktor des Brennergases verknüpft sein:

$$\Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2, \text{B}} = \frac{\dot{q}_{\text{B}}}{E_{\text{O}_2, \text{B}}^{\text{V}}} \quad (7.8)$$

Vernachlässigt man in (5.28) den molaren Stickstoffanteil des Materials und des Brennergases und ersetzt die Sauerstoffvolumenstromänderung des Brenners durch (7.8), so erhält man einen einfachen Ausdruck für die allein durch die Verbrennung des Materials hervorgerufenen Sauerstoffvolumenstromänderung:

$$\Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2, \text{M}} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{\text{O}_2}^0}{\Delta_{\text{N}_2}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) - \Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2, \text{B}} \cdot \frac{\Delta_{\text{N}_2, \text{B}}}{\Delta_{\text{N}_2, \text{M}}}$$

Voraussetzung: $d_{\text{b}} = 0 \quad \cap \quad d_{\text{M}} = 0$
 $\Rightarrow \Delta_{\text{N}_2, \text{B}} = 1 \quad \cap \quad \Delta_{\text{N}_2, \text{M}} = 1$

Voraussetzung: $\Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2, \text{B}} = \frac{\dot{q}_{\text{B}}}{E_{\text{O}_2, \text{B}}^{\text{V}}}$

$$\Rightarrow \Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2, \text{M}} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{\text{O}_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) - \frac{\dot{q}_{\text{B}}}{E_{\text{O}_2, \text{B}}^{\text{V}}} \quad (7.9)$$

Zusätzlich muss man die chemische Zusammensetzung von Material und Brennergas gleichsetzen und die Kohlenmonoxidentstehung bei der Umsetzung des Materials und des Brennergases vernachlässigen um (5.32) so zu vereinfachen, dass sie in (7.2) zu überführen ist:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{298}^s &= \\ &= \dot{V}_{298}^0 \cdot \left(1 + \frac{b_M + 2 \cdot c_M + 2 \cdot d_M + 3 \cdot e_M + 2 \cdot h_M}{-(4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M - 2 \cdot h_M)} \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \right) \\ &\quad - \Delta \dot{V}_{298, O_2, B} \cdot \frac{b_M + 2 \cdot c_M + 2 \cdot d_M + 3 \cdot e_M + 2 \cdot h_M}{-(4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M - 2 \cdot h_M)} \cdot \frac{\Delta_{N_2, B}}{\Delta_{N_2, M}} \\ &\quad + \Delta \dot{V}_{298, O_2, B} \cdot \frac{b_B + 2 \cdot c_B + 2 \cdot d_B + 3 \cdot e_B + 2 \cdot h_B}{-(4 \cdot a_B + b_B - 2 \cdot c_B - e_B - 2 \cdot h_B)} \end{aligned}$$

Voraussetzung: $d_M = d_B = 0 \wedge h = h_B = h_M = 0$

Voraussetzung: $a = a_B = a_M \wedge b = b_B = b_M \wedge c = c_B = c_M \wedge e = e_B = e_M$

$$\Rightarrow \dot{V}_{298}^s = \dot{V}_{298}^0 \cdot \left(1 + \frac{b + 2 \cdot c + 2 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot h}{-(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h)} \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) \right) \quad (7.10)$$

Benutzt man den „oxygen depletion factor“ ϕ gemäß (7.7) (entspricht Gleichung (F.5) in ISO 9705 [A-8]), so erhält man unter Beachtung aller vorher genannten Voraussetzungen für (7.8), (7.9), (7.10) die folgende Gleichung in der hier gewählten Form ¹²⁾ bzw. die Gleichung (F.4) aus ISO 9705 [A-8] und DIN 4102 Teil 19 [A-9]:

$$\dot{q} = E_{O_2, M}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, O_2, M}$$

$$\Delta \dot{V}_{298, O_2, M} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) - \Delta \dot{V}_{298, O_2, B}$$

$$\Delta \dot{V}_{298, O_2, B} = \frac{\dot{q}_B}{E_{O_2, B}^V}$$

$$\text{Annahme: } X_{CO}^{Pa,0} = 0 \wedge X_{NK}^{Pa,0} = 0 \quad X_{CO}^{Pa,s} = 0 \wedge X_{NK}^{Pa,s} = 0$$

$$\Rightarrow X_{N_2}^{Pa,0} = 1 - X_{O_2}^{Pa,0} \quad \Rightarrow X_{N_2}^{Pa,s} = 1 - X_{O_2}^{Pa,s}$$

$$\phi = 1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} \quad \Delta \dot{V}_{298, O_2, B} = \frac{\dot{q}_B}{E_{O_2, B}^V}$$

$$\text{Definition: } \beta = \frac{4 \cdot a + 2 \cdot b + 2 \cdot e + 2 \cdot d}{4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h} \quad \alpha = 1 + X_{O_2}^0 \cdot (\beta - 1)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{298}^0 = \frac{\dot{V}_{298}^s}{1 + (\alpha - 1) \cdot \left(1 - \frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^0} \right)}$$

$$\Rightarrow \Delta \dot{V}_{298, O_2, M} = \dot{V}_{298}^s \cdot X_{O_2}^0 \cdot \frac{-\phi}{\phi \cdot (\alpha - 1) + 1} - \frac{\dot{q}_B}{E_{O_2, B}^V}$$

$$\Rightarrow \dot{q} = E_{O_2, M}^V \cdot \dot{V}_{298}^s \cdot X_{O_2}^0 \cdot \frac{-\phi}{\phi \cdot (\alpha - 1) + 1} - \frac{E_{O_2, M}^V}{E_{O_2, B}^V} \cdot \dot{q}_B \quad 13) \quad (7.11)$$

Spätestens hier wird die Bedeutung des vom Brennstoff abhängigen O₂-Faktors für den zusätzlichen Brenner deutlich: Die Brennerleistung muss mit dem Quotienten aus den O₂-Faktoren des Materials und des Brenners gewichtet werden, bevor sie von der „Gesamtenergiefreisetzungsrate“ subtrahiert wird.

Es ist verwunderlich, dass in der Norm für den SBI-Test als neuestes Prüfverfahren für das Brandverhalten, das auf Basis der Sauerstoffkalorimetrie arbeitet, in diesem Punkt eine andere Darstellung gewählt wird (siehe DIN EN 13823 [A-10] Annex A.5.1.1 Gleichung A.15 und Annex A.5.1.2 Gleichung A.19): Hier wird für den Massenstrom des Propangases ein Wert von (0,647 ± 0,01) g s⁻¹ bzw. daraus resultierend eine Energiefreisetzungsrate des Brenners von (29,99 ± 0,46) kW in Abschnitt 8.2.6 gefordert, bei der Auswertung in Annex A.5.1.1 aber eine Energiefreisetzungsrate für den Brenner von (30,7 ± 2) kW genannt. Wenn man sich als interessierter Anwender dieser Norm die Mühe gibt, das Verhältnis von standardisierten O₂-Faktor (17200 kJ m⁻³) zu O₂-Faktor von Propan (16800 kJ m⁻³) zu bilden und den zuerst genannten Wert damit zu multiplizieren, dann kommt man auf eine „virtuelle“ Brennerleistung von (30,71 ± 0,47) kW und erkennt den Grund für die Annahme zweier scheinbar verschiedener Brennerleistungen in der Anwendung von (7.11) auch beim SBI-Test. Anwenden des SBI-Tests, die sich nicht so intensiv mit der Sauerstoffkalorimetrie beschäftigen und nur die Prüfnorm zur Verfügung haben, wird die Ursache für diese Diskrepanz wahrscheinlich verborgen bleiben.

Da es sinnvoll sein kann, mit einer fest aufgebauten Gasanalysestrecke an verschiedenen Verbrennungsapparaturen zu arbeiten (z. B. Cone-Calorimeter und Room-Corner-Test), wird als nächstes auch der „oxygen depletion factor“ ϕ aus ISO 9705 [A-8] für den Fall dargestellt, dass vor der Bestimmung des Sauerstoffanteils zusätzlich zum H₂O-Trapping auch noch CO₂-Trapping durchgeführt wird, z. B. bei der

¹²⁾ Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und O₂-Faktor besitzen ein negatives Vorzeichen.

¹³⁾ Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und O₂-Faktor besitzen ein negatives Vorzeichen.

Gasanalysestrecke des iBMB [A-18]. Alle anderen Annahmen (keine Stickstoff- und Kohlenmonoxidfreisetzung durch das Material und gegebenenfalls durch einen Brenner, gleiche chemische Zusammensetzung von Material und Brennstoff des zusätzlichen Brenners) sollen gültig sein, d. h. (4.12) und (4.13) werden angewendet:

$$\phi^t = \frac{X_{O_2}^{t,0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,s}) - X_{O_2}^{t,s} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,0})}{X_{O_2}^{t,0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,s} - X_{O_2}^{t,s})}$$

Annahme: $X_{CO}^{t,0} = X_{CO}^{t,s} = 0$

$$\Rightarrow X_{N_2}^t = 1 - X_{O_2}^t - X_{CO_2}^t$$

$$\Rightarrow X_{N_2}^{Pa} = 1 - X_{O_2}^{Pa}$$

$$\Rightarrow \phi^{Pa} = \frac{X_{O_2}^{Pa,0} - X_{O_2}^{Pa,s}}{X_{O_2}^{Pa,0} \cdot (1 - X_{O_2}^{Pa,s})} \quad 14) \quad (7.12)$$

Die in den beiden Vorschriften für die Baustoffprüfung ISO 5660 (Cone-Calorimeter) [A-7] und ISO 9705 (Room-Corner-Test) [A-8] bzw. DIN 4102 Teil 19 [A-9] und auch in DIN EN 13823 (SBI-Test) [A-10] eingebundenen Berechnungsformeln setzen eine vollständige Verbrennung ohne nennenswerte Kohlenmonoxidentstehung voraus. Damit wird die Reduktion der Energiefreisetzung durch unvollständige Verbrennung nicht berücksichtigt und die ermittelte Energiefreisetzungsrates liegt in den meisten Fällen auf der „sicheren Seite“.

Für den Fall der unvollständigen Verbrennung mit Kohlenmonoxidbildung soll aber auch die Verringerung der Energiefreisetzungsrates berücksichtigt werden. Daher wird die Energiefreisetzungsrates des Materials bei der Verbrennung mit Kohlenmonoxidbildung und Benutzung eines zusätzlichen Brenners betrachtet. Zur Vorbereitung werden zum einen die vereinfachten Gleichungen für die Sauerstoffvolumenstromänderung (7.9) und die Rauchgasexpansion (7.10) verwendet. Zum anderen wird auch die Änderung des Kohlenmonoxidvolumenstroms (5.31) in einfacher Form dargestellt, indem die Freisetzung von Stickstoff ausgeschlossen bzw. vernachlässigt wird.

¹⁴⁾ Die Herleitung von (7.12) erklärt auch das bei Steinert [A-11] angesprochene Fehlen des Kohlendioxidanteils im Ausdruck für den „Ventilationsfaktor“ ϕ und ihr Missverständnis, dass bei Fehlen eines CO_2 -Anteils in den Gleichungen „die Verbrennung an sich ignoriert wird“.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{298,i,M} &= \\ &= \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{O_2}^0}{\Delta_{N_2,M}} \cdot \left(Z_{i/O_2}^S \cdot \left(\Delta_{N_2,M} + \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 \right) - \frac{\Delta \dot{V}_{298,O_2,B}}{\dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0} \cdot \Delta_{N_2,B} \right) - Z_{i/O_2}^0 \cdot \Delta_{N_2,B} \right) - \Delta \dot{V}_{298,i,B} \end{aligned}$$

Voraussetzung: $d_M = 0 \cap d_B = 0$

$$\Rightarrow \Delta \dot{V}_{298,i,M} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(Z_{i/O_2}^S \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{i/O_2}^0 \right) - \Delta \dot{V}_{298,i,B} \quad (7.13)$$

Die durch das Material verursachte Änderung des Sauerstoffvolumenstroms (7.9) und die Änderung des Kohlenmonoxidvolumenstroms (7.13) setzt man in (6.17) ein und erhält zur Berechnung der reduzierten Energiefreisetzungsrate:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot E_{O_2,M}^V \cdot \\ &\cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 - \frac{E_{O_2,M}^V - E_{O_2,CO \rightarrow CO_2}^V}{2 \cdot E_{O_2,M}^V} \cdot \left(Z_{CO/O_2}^S \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{CO/O_2}^0 \right) \right) - \frac{E_{O_2,M}^V}{E_{O_2,B}^V} \cdot \dot{q}_B \end{aligned} \quad 15) \quad (7.14)$$

Da hierbei auch mit einer nennenswerten Kohlenmonoxidentstehung gerechnet werden muss, kann im Gegensatz zu den vorherigen Berechnungsformeln nicht mehr der Kohlenmonoxidgehalt im Rauchgas / in der Abluft vernachlässigt werden. Somit muss man den Stickstoffgehalt mit (4.11) unter Verwendung von (4.8) für die Beschreibung des Sauerstoffanteils vor CO₂-Trapping bzw. Kohlenmonoxidanteils nach CO₂-Trapping ansetzen:

$$\begin{aligned} X_{N_2}^t &= 1 - X_{O_2}^t - X_{CO_2}^t - X_{CO}^t = 1 - X_{O_2}^{Pa} \cdot (1 - X_{CO_2}^t) - X_{CO_2}^t - X_{CO}^t \\ X_{N_2}^{Pa} &= 1 - X_{O_2}^{Pa} - X_{CO}^{Pa} = 1 - X_{O_2}^{Pa} - \frac{X_{CO}^t}{1 - X_{CO_2}^t} \end{aligned} \quad (7.15)$$

Für diesen allgemeinen Fall ist zu prüfen, ob bei Erfassung des Abluftvolumenstroms die Expansion mit der zugegebenermaßen aufwändigen Gleichung (5.32) unter Verwendung der molaren Kohlenmonoxidausbeute nach (5.33) berechnet werden sollte. Bisher ist aber noch kein Prüfverfahren oder Versuchsaufbau bekannt, bei dem bei reduzierter Zuluft mit einer erhöhten Kohlenmonoxidentstehung zu rechnen ist und andererseits nur der Abluftvolumenstrom vermessen wird. Bei finnischen Experimenten

¹⁵⁾ Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und O₂-Faktor besitzen ein negatives Vorzeichen.

mit einem modifizierten Cone-Calorimeter [A-24] sowie bei eigenen Versuchen im Room-Corner-Test mit reduzierter Öffnungsfläche [A-13] konnte die Energiefreisetzungsrates beim ventilationsgesteuerten Abbrand nicht immer eindeutig bewertet werden, da unter diesen Bedingungen auch außerhalb der jeweiligen Kammer eine Verbrennung mit sichtbarer Flamme beobachtet wurde.

Dagegen ist die Cone-Kammer des iBMB ein geschlossenes System mit geregelter Zuluftvolumenstrom, in dem durchaus das Brandverhalten im ventilationsgesteuerten Fall untersucht werden kann. Da in dieser Apparatur kein zusätzlicher Brenner benutzt wird, entfällt in (7.14) der Subtrahend mit der Brennerleistung und die Energiefreisetzungsrates kann wie folgt berechnet werden:

$$\dot{q} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot E_{O_2,M}^V \cdot \left(\frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - 1 - \frac{E_{O_2,M}^V - E_{O_2,CO \rightarrow CO_2}^V}{2 \cdot E_{O_2,M}^V} \cdot \left(Z_{CO/O_2}^S \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{CO/O_2}^0 \right) \right)^{16)} \quad (7.16)$$

Die Ausbeute der Verbrennungsprodukte wird unter Vernachlässigung eines Brenners in (7.13) wie folgt berechnet:

$$\Delta \dot{V}_{298,i,M} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{O_2}^0 \cdot \left(Z_{i/O_2}^S \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^S}{Z_{O_2/N_2}^0} - Z_{i/O_2}^0 \right) \quad (7.17)$$

Der Stickstoffanteil muss auch in diesem Fall unter Beachtung des Kohlenmonoxidgehalts mit (7.15) berechnet werden.

Der in Abschnitt A.6 vorgestellte Ansatz der Sauerstoffbilanzierung und Summation der einzelnen Anteile der Energiefreisetzungsrates aus CO₂-, CO- und H₂O-Bildung wird nicht weiter verfolgt, da sich bei der Anwendung zeigte, dass über die zusätzlich notwendige Messung von Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt weitere Quellen für Messungenauigkeiten hinzutreten [A-17, A-18]. Außerdem konnte bei der Auswertung der entsprechenden Versuche [A-18] nachgewiesen werden, dass die in Abschnitt A.2 dargestellten Unzulänglichkeiten bei der Berechnung der Energiefreisetzungsrates über die entstehenden Reaktionsprodukte, verursacht durch die Ungewissheit bei der Festlegung der Proportionalitätsfaktoren, erheblich größere Fehler birgt als die Berechnung über den Sauerstoffverbrauch.

¹⁶⁾ Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und O₂-Faktor besitzen ein negatives Vorzeichen.

Tabelle A.4 Materialspezifische Parameter

Index	Material	Summenformel	Parameter		
			$E_{O_2,M}^V$ [kJ/m ³]	β	α
1. Teil gemäß Table F.1 aus [A-8]					
1	Methan	CH ₄	-16394	1,500	1,105
2	Propan	C ₃ H ₈	-16726	1,400	1,084
3	Polyethylen	-(C ₂ H ₄)-	-16543	1,333	1,070
4	Polypropylen	-(C ₃ H ₆)-	-16554	1,333	1,070
5	Polyisobutylene	-(C ₄ H ₈)-	-16707	1,333	1,070
6	Polybutadiene	-(C ₄ H ₆)-	-17185	1,273	1,057
7	Polystyrene	-(C ₈ H ₈)-	-16965	1,200	1,042
8	Poly(vinylchloride)	-(C ₂ H ₃ Cl)-	-16789	1,600	1,126
9	Poly(vinylidene chloride)	-(C ₂ H ₂ Cl ₂)-	-17811	2,000	1,210
10	Poly(methyl methacrylate)	-(C ₅ H ₈ O ₂)-	-16976	1,500	1,105
11	Polyacrylonitrile	-(C ₃ H ₃ N)-	-17814	1,333	1,070
12	Polyoxymethylene	-(CH ₂ O)-	-18974	2,000	1,210
13	Poly(ethylene terephthalate)	-(C ₁₀ H ₈ O ₄)-	-17280	1,400	1,084
14	Polycarbonate	-(C ₁₆ H ₁₄ O ₃)-	-17161	1,278	1,058
15	Cellulose triacetate	-(C ₁₂ H ₁₆ O ₈)-	-17300	1,667	1,140
16	Nylon 6.6	-(C ₆ H ₁₁ NO)-	-16584	1,455	1,095
Mittelwert			-17110	1,475	1,100
Standardabweichung			654	0,238	0,050
Variationskoeffizient			3,8 %	16,2 %	4,5 %
2. Teil gemäß Table 1.13 aus [A-1]					
18	Kohlenmonoxid ¹⁷⁾	CO	-23127	2,000	1,210
19	Methan	CH ₄	-16394	1,500	1,105
20	Ethan	C ₂ H ₆	-16663	1,429	1,090
21	Ethen	C ₂ H ₄	-19245	1,333	1,070
22	Ethyn	C ₂ H ₂	-20519	1,200	1,042
23	Propan	C ₃ H ₈	-16744	1,400	1,084
24	n-Butan	-(C ₄ H ₁₀)-	-16700	1,385	1,081
25	n-Pentan	-(C ₅ H ₁₂)-	-16688	1,375	1,079
26	n-Oktan	-(C ₈ H ₁₈)-	-16723	1,360	1,075
27	c-Hexan	-(C ₆ H ₁₂)-	-16745	1,333	1,070
28	Benzen	C ₆ H ₆	-17028	1,200	1,042
29	Methanol	CH ₃ OH	-17314	2,000	1,210
30	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	-16809	1,667	1,140
31	Aceton	(CH ₃) ₂ CO	-18274	1,500	1,105
32	d-Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	-18900	2,000	1,210
Mittelwert ¹⁷⁾			-17482	1,477	1,100
Standardabweichung ¹⁷⁾			1254	0,251	0,053
Variationskoeffizient ¹⁷⁾			7,2 %	17,0 %	4,8 %

¹⁷⁾ Kohlenmonoxid (Index 18) wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Berechnet man die Energiefreisetzungsrates über die sich aus diesem Ansatz (Abschnitt A.6 bzw. A.6.3) ergebende Sauerstoffvolumenstromänderung, so nähern sich die Ergebnisse den mit dem Ansatz „bei bekannter Brennstoffzusammensetzung“ (Abschnitt A.5) erzielten an, was allerdings für die gute Wiedergabe der Rauchgasexpansion mit dem Ansatz der Sauerstoffbilanzierung spricht.

Abschließend sind die materialspezifischen Parameter für die in Abschnitt A.2, Tabelle A.2 zusammengestellten Materialien dargestellt.

A.8 Rauchgasvolumenstrom und Rauchgaszusammensetzung

Die Bestimmung des Volumenstroms ist eine wichtige Aufgabe im Rahmen der Sauerstoffkalorimetrie. Im geschlossenen System lässt sich der Zuluftvolumenstrom sicherlich im Labormaßstab mit besonderen Geräten direkt messen. Bei größeren Zuluftmengen ist aber nur eine indirekte Erfassung (z. B. über die Strömungsgeschwindigkeit) mit aufwendigen Kalibrierprozeduren möglich. Bei den gängigen Prüfverfahren handelt es sich aber um offene Systeme. Die Volumenstromerfassung geschieht hierbei im Rauchgas- / Abluftstrom indirekt mit Hilfe einer Differenzdruckmessung über eine Lochblende (z. B. Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [A-7]) oder über eine bidirektionale Sonde, kurz „Bidi“, in der Mitte des Rauchgasrohrs (z. B. Room-Corner-Test gemäß ISO 9705 [A-8] bzw. DIN 4102 Teil 19 [A-9]).

Im Allgemeinen ist die Strömungsgeschwindigkeit und somit auch der Volumenstrom über die Dichte des Rauchgases mit dem zu messenden Differenzdruck verknüpft. Für den Staudruck gilt:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho^s(T^s) \cdot v^2 \quad (8.1)$$

Die temperaturabhängige Dichte lässt sich für ein ideales Gas aus der Dichte unter Normalbedingungen bestimmen:

$$\rho^s(T^s) = \frac{\rho_0^s \cdot T_0}{T^s} \quad (8.2)$$

Setzt man (8.2) in (8.1) ein und löst zur Geschwindigkeit auf, so ergibt sich:

$$v^s = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot T^s}{\rho_0^s \cdot T_0}} \quad (8.3)$$

Der Volumenstrom in einem Rohr ergibt sich bei Messung der Druckdifferenz mit einem „Bidi“ (Korrekturfaktor k_p) unter Berücksichtigung des Rohrquerschnitts und einer durch Kalibrierung zu bestimmenden Geschwindigkeitsprofilkorrektur (k_t):

$$\dot{V}^s(T^s) = A \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot v^s = A \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot T^s}{\rho_0^s \cdot T_0}} \quad (8.4)$$

Einleitend wurde erwähnt, dass die Energiemenge proportional zur Masse des umgesetzten Sauerstoffs ist bzw. bei Voraussetzung eines idealen Gases auch über das auf eine feste Temperatur bezogene Volumen bestimmt werden kann. Der auf 25 °C normierte Volumenstrom wird mit Hilfe der Rauchgastemperatur und des am „Bidi“ gemessenen Differenzdrucks bestimmt.

$$\dot{V}_{298}^s = A \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0^s}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T^s}} \quad (8.5)$$

Somit berechnet sich der normierte Rauchgasvolumenstrom aus den Parametern der Rauchgasrohres und der Messsonde (Querschnitt A , Korrekturfaktor k_p , Kalibrierfaktor k_t), den beiden Bezugstemperaturen (T_0 für die Dichte, 25 °C für den normierten Volumenstrom) und den beiden Messgrößen Differenzdruck Δp und Rauchgastemperatur T^s . Streng gesehen berechnet sich die Dichte ρ_0^s wiederum aus dem Molvolumen, den Molmassen der Rauchgaskomponenten und deren molaren Anteile, also der Zusammensetzung des Rauchgases.

Mit dem Ansatz aus Abschnitt A.5 lässt sich bei bekannter Brennstoffzusammensetzung mit Hilfe von (5.16) der Sauerstoffanteil und mit (5.18) oder zur Kontrolle mit (5.19) der Anteil der anderen Bestandteile im Rauchgas berechnen. Aus der daraus resultierenden Zusammensetzung des Rauchgases kann die Dichte mit Hilfe der Molmasse der einzelnen Bestandteile ermittelt werden.

Entsprechend ist es auch möglich, mit dem Ansatz über die Sauerstoffbilanzierung gemäß Abschnitt A.6 die Rauchgaszusammensetzung zu berechnen. Dabei ergibt

sich der Wasserdampfanteil im Rauchgas aus (6.15) zusammen mit (6.13) oder (6.14). Der jeweilige Anteil der anderen Bestandteile ergibt sich aus dem nach H₂O-Trapping gemessenen Anteil mit Hilfe von (4.9), bei Benutzung eines Sauerstoffanalyzers zusammen mit zusätzlichem CO₂-Trapping muss auch noch (4.6) herangezogen werden. Mit dem Ansatz der Sauerstoffbilanzierung lässt sich auch bei Benutzung eines zusätzlichen Brenners die Rauchgaszusammensetzung berechnen (Abschnitt A.6.3, [A-17, A-18]).

Für den Fall, dass mit einem zusätzlichen Brenner gearbeitet wird, sind die in Abschnitt A.5.4 für bekannte Material- und Brennstoffzusammensetzung hergeleiteten Gleichungen zu benutzen. Der Zuluft- und Abluftvolumenstrom sind über (5.32) miteinander verknüpft. Die Änderung des Volumenstroms einer Komponente durch die Umsetzung von Brennstoff bei Betrieb eines zusätzlichen Brenners ist durch (5.25) über den Brennstoffmassenstrom bzw. die Brennerleistung definiert. Die gesamte Änderung des Volumenstroms einer Komponente ist durch (5.26) gegeben, wobei die durch die Materialumsetzung verursachte Änderung des Volumenstroms mit (5.28) für Sauerstoff bzw. (5.31) für Kohlendioxid und Kohlenmonoxid bestimmt werden kann, nachdem die molare Kohlenmonoxidausbeute über (5.33) berechnet wurde. Da allerdings die Änderung des Volumenstroms selbst nur mit Kenntnis des Rauchgasvolumenstroms gemäß (5.32) bestimmt werden kann, ist die Berechnung der Rauchgaszusammensetzung wahrscheinlich nur noch iterativ zu bewältigen.

Bei Parker [A-6] wird gar nicht auf das Problem der Volumenstrommessung mit Kenntnis der Rauchgaszusammensetzung als Grundlage der Dichtebestimmung eingegangen. Bei Janssens und Parker [A-5] wird das Problem übergangen, indem die Dichte der Zuluft und des Rauchgases gleichgesetzt werden, und diese Vorgehensweise mit einer lapidaren Bemerkung („in absence of anything better“) begründet. In allen bekannten Fällen wird daher die Zusammensetzung und damit die Dichte von Luft und von Rauchgas unabhängig von der unterschiedlichen Zusammensetzung gleichgesetzt.

A.9 Überprüfung der Rechengrundlagen für offene Systeme

In den Veröffentlichungen zur Anwendung der Sauerstoffkalorimetrie und den beiden maßgeblichen Prüfverfahren Cone-Calorimeter nach ISO 5660 [A-7] und Room-

Corner-Test gemäß ISO 9705 [A-8] sowie der von ISO 9705 abgeleiteten DIN 4102 Teil 19 [A-9] und dem neuen SBI-Test gemäß DIN EN 13823 [A-10] werden die in Abschnitt A.7 hergeleiteten Berechnungsformeln benutzt. Dabei wird zumindest in den beiden ISO-Normen ein systematischer Fehler durch die vereinfachenden Annahmen erwähnt, der auf der Bandbreite des Sauerstoffverbrauchsfaktors beruht. Außerdem ist bei Verfahren, bei denen der Abluftvolumenstrom erfasst wird, sog. offenen Systemen, zu bedenken, dass bei unbekannter Brennstoffzusammensetzung das molare Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β und der daraus resultierende Expansionsfaktor α nicht exakt sind. Zusätzlich tritt auch noch ein systematischer Fehler bei diesen Verfahren auf, da die gegenüber der Zuluft veränderte Gaszusammensetzung und damit die veränderte Dichte der Abluft nicht berücksichtigt werden. Diese systematischen Fehler sollen in diesem Abschnitt quantifiziert werden.

Außerdem soll der Zusammenhang zwischen Gasaufbereitungstechnik und Auswertungsmethodik verdeutlicht werden. Dazu werden vergleichend Auswertungsformeln aus den Prüfvorschriften ISO 5660 [A-7] bzw. ISO 9705 [A-8] ($E_{O_2}^V = 17200 \text{ kJ m}^{-3}$, $\alpha = 1,105$ und $\beta = 1,5$) angewendet. Diese beiden Prüfvorschriften repräsentieren die Messgasaufbereitung mit H_2O -Trapping und mit bzw. ohne zusätzliches CO_2 -Trapping. DIN 4102 Teil 19 [A-9] und DIN EN 13823 [A-10] müssen nicht betrachtet werden, da sie im Auswertungsverfahren mit ISO 9705 übereinstimmen.

A.9.1 Systematische Fehler bei den Materialparametern

Im Folgenden sollen die Einflüsse der chemischen Materialzusammensetzung über den O_2 -Faktor, den chemischen Expansionsfaktor α und das Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β betrachtet werden. Dazu wird die Zusammensetzung des Materials über die molaren Anteile zusammen mit dem unteren Heizwert variiert. Der O_2 -Faktor wird gemäß (2.6), der Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion α und das Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β werden gemäß (7.1) berechnet, wobei der Sauerstoffgehalt der Zuluft auf 20,95 % festgelegt wird. Diese materialspezifischen Parameter sind in Tabelle A.4 für eine Auswahl von Stoffen zusammengestellt. Vergleichend wird mit

standardisierten Parametern aus den Prüfvorschriften ISO 5660 [A-7] bzw. ISO 9705 [A-8] ($E_{O_2}^V = 17200 \text{ kJ m}^{-3}$, $\alpha = 1,105$ und $\beta = 1,5$) gerechnet.

Die Brandlast wird durch die chemische Zusammensetzung $a_M, b_M, c_M, d_M, e_M, h_M$ und den Heizwert $H_{u,M}$ charakterisiert. Aus diesen Angaben können die materialspezifischen Parameter O_2 -Faktor $E_{O_2,M}^V$, Verhältnis β_M und Expansionsfaktor α_M bestimmt werden:

$$\beta_M = \frac{4 \cdot a_M + 2 \cdot b_M + 2 \cdot e_M + 2 \cdot d_M}{4 \cdot a_M + b_M - 2 \cdot c_M - e_M - 2 \cdot h_M}$$

$$\alpha_M = 1 + X_{O_2}^0 \cdot (\beta_M - 1) \tag{9.1}$$

$$E_{O_2,M}^V = \frac{(a_M \cdot M_C + b_M \cdot M_H + c_M \cdot M_O + d_M \cdot M_N + e_M \cdot M_{Cl}) \cdot H_{u,M}}{-\left(a_M + \frac{b_M - e_M}{2} - \frac{c_M}{2}\right)}$$

Die relativen Abweichungen der o. g. in den Prüfvorschriften vorgegebenen standardisierten Parameter von den für die verschiedenen bisher betrachteten Materialien (Tabelle A.2) bestimmbareren materialspezifischen Parametern sind wie folgt definiert:

$$\delta E_{O_2}^V = \frac{E_{O_2}^V - E_{O_2,M}^V}{E_{O_2,M}^V} = \frac{-17200 \text{ kJm}^{-3}}{E_{O_2,M}^V} - 1 \tag{9.2}$$

$$\delta \beta = \frac{\beta - \beta_M}{\beta_M} = \frac{1,5}{\beta_M} - 1 \quad \delta \alpha = \frac{\alpha - \alpha_M}{\alpha_M} = \frac{1,105}{\alpha_M} - 1$$

Beim O_2 -Faktor treten betragsmäßige Abweichungen von mehr als 5 % bei den Verbindungen Polyoxymethylene (Index 12), Aceton (Index 31) und d-Glucose (Index 32) auf, für Ethen (Index 21) und Ethyn (Index 22) ist die Abweichung sogar größer als 10 %. Bei diesen Materialien ist der tatsächliche O_2 -Faktor betragsmäßig größer als der festgelegte Wert von -17200 kJ m^{-3} , d. h. die Energiefreisetzungsrates müsste bei Berechnung mit standardisierten Parametern unterbewertet werden. Bei den Faktoren β und α treten außerordentlich große Abweichungen von den Vorgabewerten bei Poly(vinylchloride) (Index 9), Polyoxymethylene (Index 12), Methanol (Index 29) und d-Glucose (Index 32) auf. Mit Ausnahme des Poly(vinylchloride) ist diesen Materialien gemeinsam, dass in der Verbindung zusätzlich zu Kohlenstoff, Wasserstoff auch Sauerstoff enthalten ist (Diagramm A.8, Diagramm A.9).

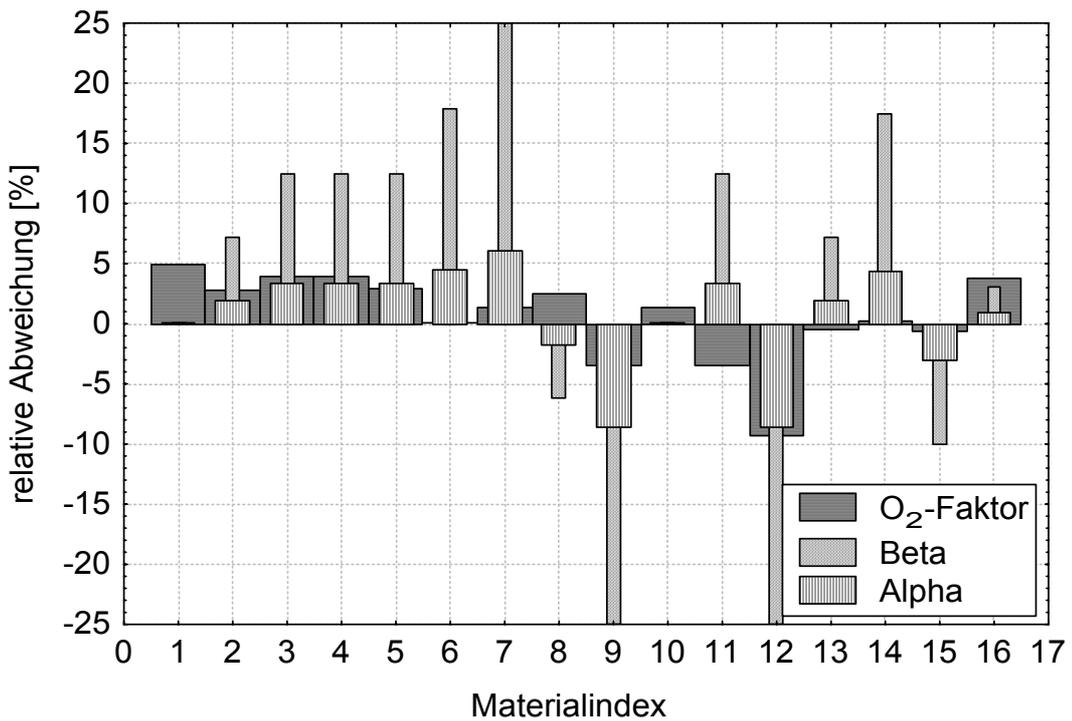


Diagramm A.8 Relative Abweichung der standardisierten von den material-spezifischen Parametern gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

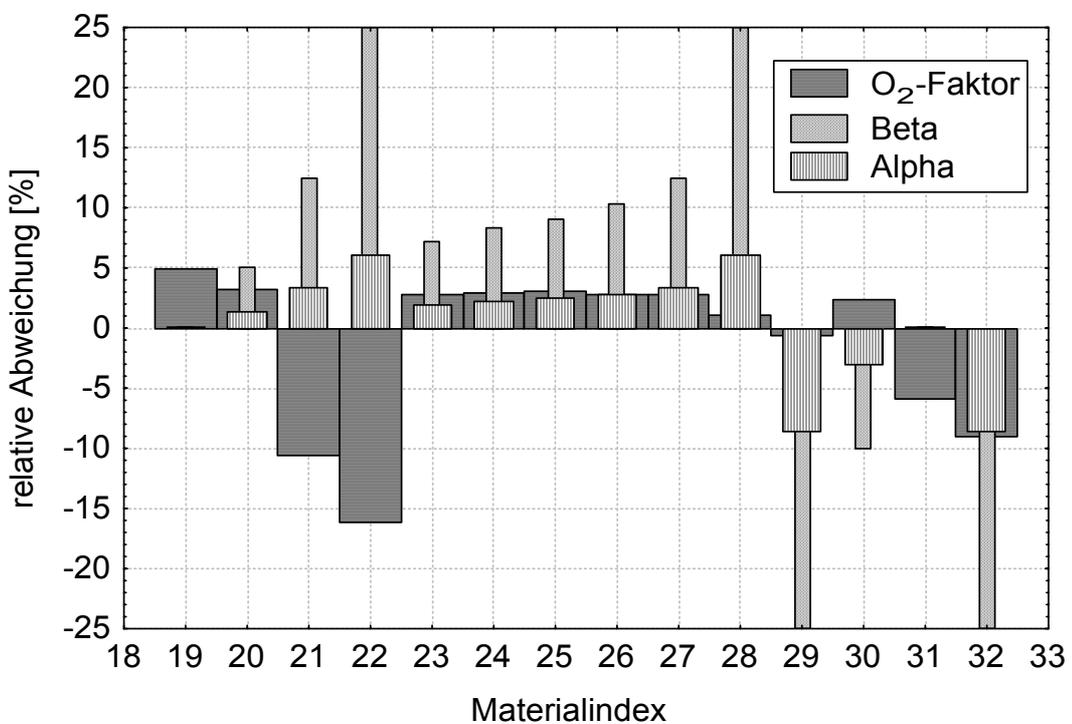


Diagramm A.9 Relative Abweichung der standardisierten von den material-spezifischen Parametern gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

Zum Vergleich sind in Tabelle A.5 die relativen Abweichungen der standardisierten Parameter von den Mittelwerten für die beiden Materialgruppen dargestellt. Die Variationskoeffizienten sind übernommen worden.

Tabelle A.5 Abweichung der standardisierten Parameter von den Mittelwerten

Parameter	Materialien (Index gemäß Tabelle A.4)	relative Abweichung des standardisierten Faktors vom Mittelwert der material- spezifischen Faktoren	Variationskoeffizient (siehe Tabelle A.4)
$E_{O_2,M}^V$	Index 1 - 16	0,526 %	3,8 %
	Index 19 - 32	-1,613 %	7,2 %
β	Index 1 - 16	1,695 %	16,2 %
	Index 19 - 32	1,557 %	17,0 %
α	Index 1 - 16	0,455 %	4,5 %
	Index 19 - 32	0,455 %	4,8 %

A.9.2 Systematischer Fehler durch die festgelegte Dichte der Abluft

Für die weiteren Berechnungen muss u. a. die Dichte der Zuluft bestimmt werden. Diese ergibt sich durch Vorgabe der Zusammensetzung über die Volumenanteile der einzelnen Komponenten:

$$\rho_0^0 = \frac{1}{V_{m,0}} \cdot \left(X_{O_2}^0 \cdot M_{O_2} + X_{CO_2}^0 \cdot M_{CO_2} + X_{H_2O}^0 \cdot M_{H_2O} + X_{N_2}^0 \cdot M_{N_2} + X_{CO}^0 \cdot M_{CO} + X_{HCl}^0 \cdot M_{HCl} \right) \quad (9.3)$$

Aus der chemischen Zusammensetzung der Brandlast und der Abbrandrate ergibt sich die Änderung der Volumenströme der Einzelkomponenten und die Gesamtänderung des Volumenstroms:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{298,O_2} &= \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \left(a_M - \frac{h_M}{2} + \frac{b_M - e_M}{4} - \frac{c_M}{2} \right) \\ \Delta \dot{V}_{298,CO_2} &= \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot (h_M - a_M) \\ \Delta \dot{V}_{298,H_2O} &= \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \left(-\frac{b_M - e_M}{2} \right) \\ \Delta \dot{V}_{298,N_2} &= \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \left(-\frac{d_M}{2} \right) \end{aligned} \quad (9.4)$$

$$\begin{aligned}\Delta\dot{V}_{298,\text{HCl}} &= \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot (-e_M) \\ \Delta\dot{V}_{298,\text{CO}} &= \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot (-h_M) \\ \Delta\dot{V}_{298} &= \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \left(-\frac{b_M + 3 \cdot e_M + 2 \cdot c_M + 2 \cdot d_M + 2 \cdot h_M}{4} \right)\end{aligned}\quad (9.4)$$

Damit ist der Abluftvolumenstrom vollständig theoretisch beschrieben:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{298,\text{exakt}}^s &= \dot{V}_{298}^0 + \Delta\dot{V}_{298} = \\ &= \dot{V}_{298}^0 + \frac{\dot{m} \cdot V_{m,0}}{M_M} \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \left(-\frac{b_M + 3 \cdot e_M + 2 \cdot c_M + 2 \cdot d_M + 2 \cdot h_M}{4} \right)\end{aligned}\quad (9.5)$$

Der Anteil der einzelnen Komponenten kann berechnet werden:

$$X_i^s = \frac{\dot{V}_{298}^0 \cdot X_i^0 + \Delta\dot{V}_{298,i}}{\dot{V}_{298,\text{exakt}}^s} = \frac{\dot{V}_{298}^0 \cdot X_i^0 + \Delta\dot{V}_{298,i}}{\dot{V}_{298}^0 + \Delta\dot{V}_{298}} \quad i = \text{N}_2, \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{HCl}, \text{CO} \quad (9.6)$$

Damit ist auch die theoretische Dichte der Abluft festgelegt:

$$\rho_0^s = \frac{1}{V_{m,0}} \cdot (X_{\text{O}_2}^s \cdot M_{\text{O}_2} + X_{\text{CO}_2}^s \cdot M_{\text{CO}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}}^s \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} + X_{\text{N}_2}^s \cdot M_{\text{N}_2} + X_{\text{CO}}^s \cdot M_{\text{CO}} + X_{\text{HCl}}^s \cdot M_{\text{HCl}}) \quad (9.7)$$

Die theoretischen Werte der Messgrößen für Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidanalysator lassen sich durch Umrechnen der theoretischen Werte für die ungefilterte Abluft durch Anwendung von (4.9) simulieren. Entsprechend lässt sich auch für Anwendung der ISO 5660 [A-7] der Sauerstoffgehalt in der Zuluft nach CO₂- und H₂O-Trapping mit (4.8) festlegen.

Für die Simulation der Differenzdruckmessung kann (8.5) nach Δp aufgelöst werden:

$$\Delta p = \frac{\rho_0^s \cdot T^s}{2 \cdot T_0} \cdot \left(\dot{V}_{298,\text{exakt}}^s \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{k_p}{k_t} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}} \right)^2 \quad (9.8)$$

Setzt man den durch (9.8) simulierten Differenzdruck wiederum in (8.5) ein, nimmt aber anstatt der Dichte der Abluft die Dichte der Zuluft an, so erhält man einen Ausdruck für den theoretisch zu berechnenden Abluftvolumenstrom:

$$\dot{V}_{298,\text{exakt}}^s = \dot{V}_{298,\text{Messung}}^s \cdot \sqrt{\frac{\rho_0^0}{\rho_0^s}} \Leftrightarrow \frac{\dot{V}_{298,\text{Messung}}^s}{\dot{V}_{298,\text{exakt}}^s} = \sqrt{\frac{\rho_0^s}{\rho_0^0}} \Leftrightarrow \dot{V}_{298,\text{Messung}}^s = \dot{V}_{298,\text{exakt}}^s \cdot \sqrt{\frac{\rho_0^s}{\rho_0^0}} \quad (9.9)$$

Damit erhält man bei der Berechnung des Abluftvolumenstroms einen systematischen Fehler in der Größenordnung der Wurzel des Verhältnisses von tatsächlicher Dichte der Abluft zu Dichte der Zuluft. Unter der Voraussetzung, dass der gesamte Sauerstoff der Zuluft ($X_{\text{O}_2}^0 = 20,95 \%$) in Kohlendioxid umgewandelt wird, erhält man unter Anwendung von (9.7) für das Verhältnis von tatsächlichem zu gemessenem Volumenstrom einen minimalen Wert von 95 %, d. h. der Volumenstrom wird bei Anwendung der Zuluftdichte überbewertet. Umgekehrt kann man auch annehmen, dass der Sauerstoff vollständig in Wasserdampf umgewandelt wird. Unter Beachtung der dabei auftretenden Expansion erhält man in diesem Fall mit einem maximalen Wert von 117,5 % eine Unterbewertung des Volumenstroms.

Zur Überprüfung des Einflusses der Differenz zwischen tatsächlicher Dichte der Abluft und in den Auswertungsverfahren vorgegebener Dichte wird der systematische Fehler der Dichte, des Abluftvolumenstroms und der Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom bei konstanter Abbrandrate untersucht. Für diese theoretischen Untersuchungen werden die Abbrandrate und die Zusammensetzung der Zuluft vorgegeben:

$$\begin{aligned} X_{\text{O}_2}^0 &= 20,95 \%, X_{\text{CO}_2}^0 = 0,3 \%, X_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,1 \%, X_{\text{CO}}^0 = 1 \text{ ppm}, X_{\text{HCl}}^0 = 0 \\ X_{\text{N}_2}^0 &= 1 - X_{\text{O}_2}^0 - X_{\text{CO}_2}^0 - X_{\text{H}_2\text{O}}^0 - X_{\text{CO}}^0 - X_{\text{HCl}}^0 \\ \dot{m} &= -250 \text{ g s}^{-1} \end{aligned} \quad (9.10)$$

Mit der genannten Abbrandrate ergeben sich Brandleistungen zwischen 2,25 MW für Poly(vinylidene chloride) (Index 9) und 12,5 MW für Methan (Index 1, 19). Für diese Abbrandrate wird mit Hilfe des stöchiometrischen Luftbedarfs r gemäß (2.17) der Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{298}^0 für einfaches bis zehnfaches Zuluftverhältnis ZLV vorgegeben.

$$\dot{V}_{298}^0 = -\dot{m} \cdot \text{ZLV} \cdot r \cdot \frac{T_0 + 25 \text{ K}}{T_0} \cdot \frac{1}{\rho_0^0} \quad \text{mit} \quad 1 \leq \text{ZLV} \leq 10 \quad (9.11)$$

Damit variiert der Zuluftvolumenstrom zwischen $0,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ für Poly(vinylidene chloride) (Index 9) bei einfachem Zuluftverhältnis und $36,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ für Methan (Index 1, 19) bei zehnfachem Zuluftverhältnis.

Der Abluftvolumenstrom wird mit (9.9) unter Verwendung des theoretischen Differenzdruck nach (9.8) bestimmt. Die Berechnungen werden für alle in Tabelle A.2 angegebenen Materialien durchgeführt. Die relative Abweichung der Dichte und des Abluftvolumenstroms ist wie folgt definiert:

$$\delta\rho_0 = \frac{\rho_0^0}{\rho_0^s} - 1 \quad \delta\dot{V}_{298}^s = \frac{\dot{V}_{298,\text{Messung}}^s}{\dot{V}_{298,\text{exakt}}^s} - 1 \quad (9.12)$$

In Diagramm A.10 und Diagramm A.11 ist die relative Abweichung der Dichte der Zuluft, die bei den Auswertungsverfahren auch für die Abluft vorgegeben wird, von der tatsächlichen Dichte der Abluft, die sich aus der theoretischen Zusammensetzung berechnet, für einfaches und für zehnfaches Zuluftverhältnis dargestellt. Eine entsprechende Darstellung der relativen Abweichung für den Abluftvolumenstrom findet sich in Diagramm A.12 und Diagramm A.13. In Anhang C, Diagramm C.1 bis Diagramm C.28, ist die relative Abweichung von Dichte und Abluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Zuluftmenge bzw. vom Zuluftverhältnis für die einzelnen Materialien gezeigt.

Erwartungsgemäß treten bei einfachem Zuluftverhältnis große relative Abweichungen für die Dichte auf. Dies wird dadurch erklärt, dass theoretisch der gesamte Sauerstoff durch Verbrennungsprodukte ersetzt wird. Bei zehnfacher Zuluftmenge ist die relative Abweichung der Dichte betragsmäßig im Allgemeinen kleiner als 0,5 %. Eine Ausnahme bildet hier nur das Poly(vinylidene chloride) (Index 9).

Aufgrund des in (9.9) hergeleiteten Zusammenhangs wechselt das Vorzeichen bei Betrachtung der relativen Abweichung des Abluftvolumenstroms gegenüber dem bei der Dichte. Die relative Abweichung des Abluftvolumenstroms ist betragsmäßig noch geringer als die Abweichung der Dichte (Diagramm A.12, Diagramm A.13). Für kein Material aus Tabelle A.3 überschreitet die relative Abweichung des Abluftvolumenstroms beim zehnfachen Zuluftverhältnis einen Betrag von 1 %. Mit Ausnahme von Poly(vinylidene chloride) (Index 9) ist der Betrag sogar immer kleiner als 0,5 %.

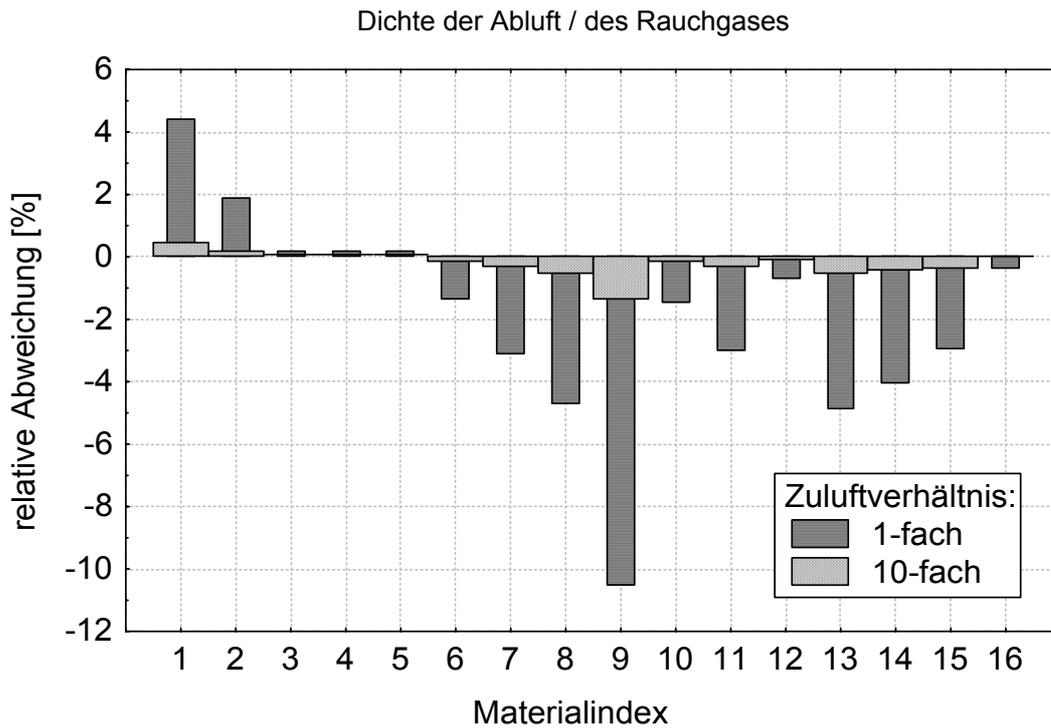


Diagramm A.10 Relative Abweichung der Dichte der Zuluft von der exakten Dichte für Materialien gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

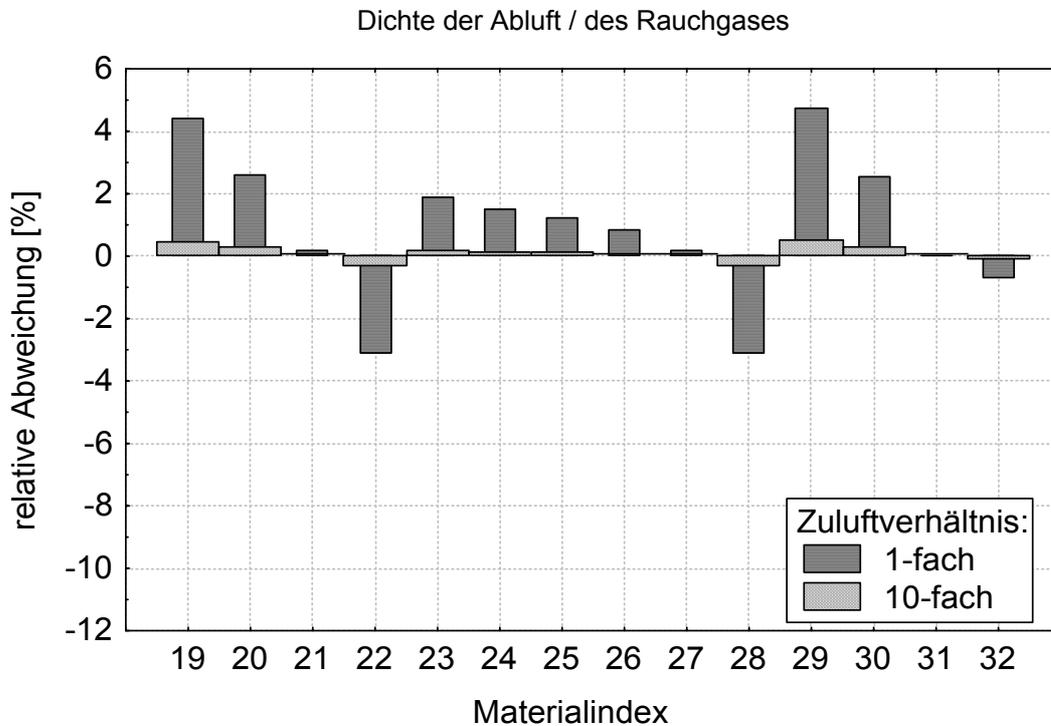


Diagramm A.11 Relative Abweichung der Dichte der Zuluft von der exakten Dichte für Materialien gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

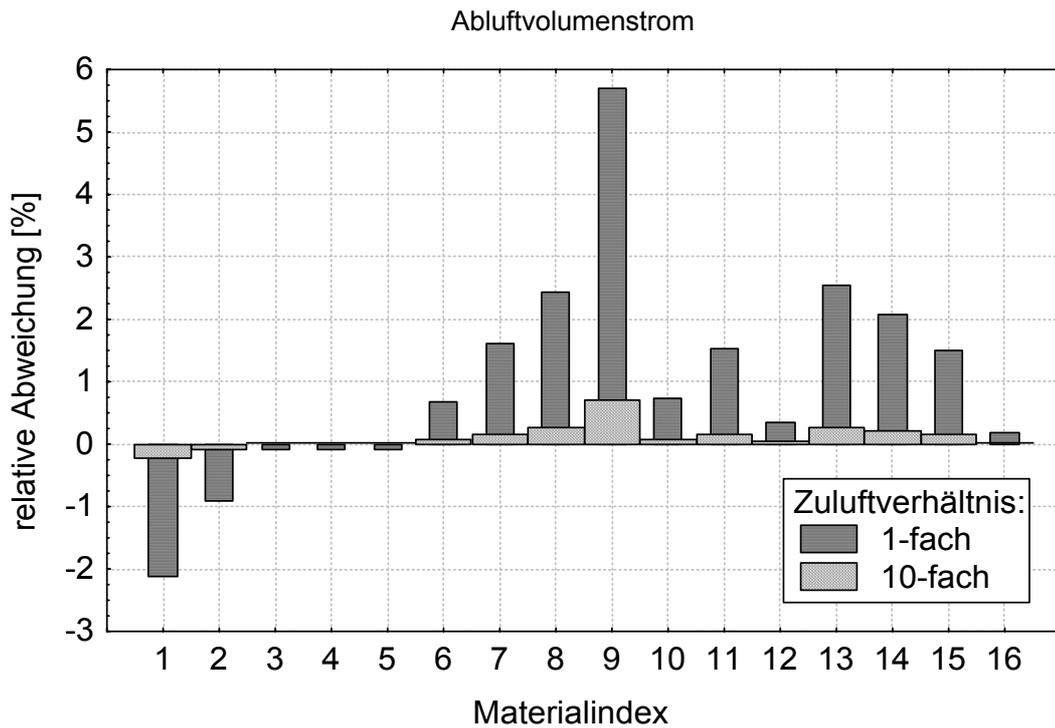


Diagramm A.12 Relative Abweichung des „gemessenen“ vom exakten Abluftvolumenstrom für Materialien gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

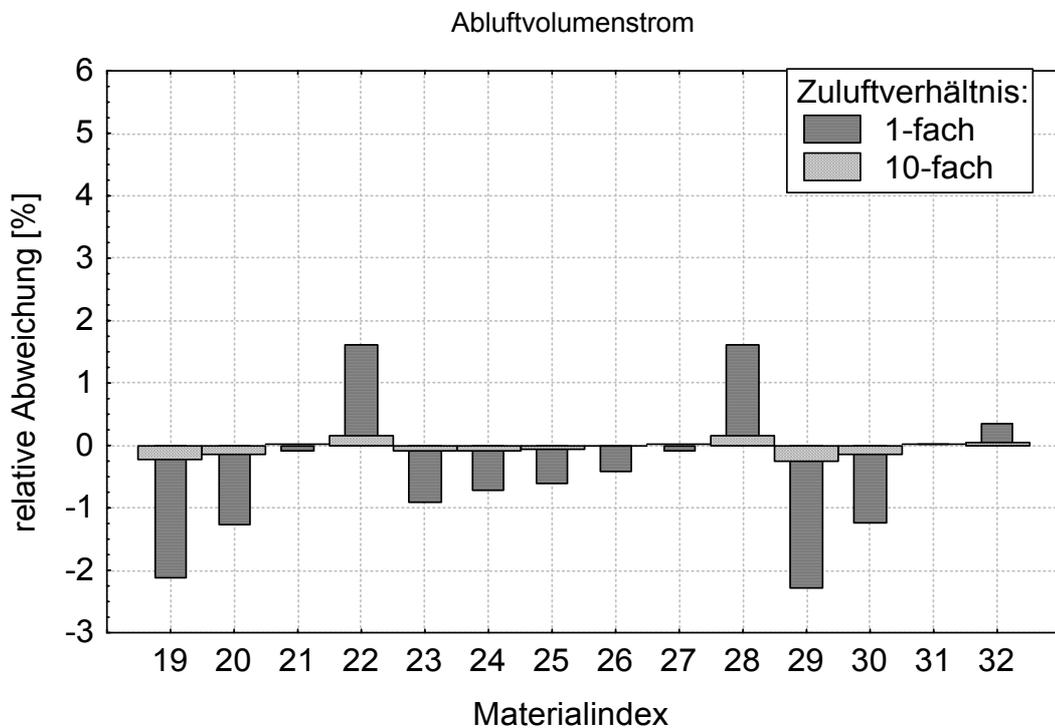


Diagramm A.13 Relative Abweichung des „gemessenen“ vom exakten Abluftvolumenstrom für Materialien gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

Das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [A-7] wird mit einem Volumenstrom im Bereich von 20 - 30 l s⁻¹ und einer Brandleistung, die im Allgemeinen kleiner als 10 kW ist, betrieben. Damit ist sichergestellt, dass ein Zuluftverhältnis von 7 nicht unterschritten wird. Bei der Baustoffprüfung im Room-Corner-Test gemäß ISO 9705 [A-8] beträgt der Abluftvolumenstrom etwa 12000 m³h⁻¹, erfahrungsgemäß lässt sich mit der Rauchgasstrecke eine Brandleistung von ca. 2 MW bewältigen. Damit liegt bei diesem Verfahren das Zuluftverhältnis über dem Wert 6. Betrachtet man in Diagramm C.1 bis Diagramm C.28 die relative Abweichung des Abluftvolumenstrom, so sieht man, dass bei den beiden o. g. Prüfverfahren der systematische Fehler bei der Bestimmung des Abluftvolumenstroms verhältnismäßig klein ist.

A.9.3 Systematischer Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate

Mit den im vorherigen Abschnitt genannten Grundlagen wird im Weiteren die Energiefreisetzungsrate berechnet, wobei zum einen die Berechnungsformeln gemäß ISO 5660 (7.5), zum anderen gemäß ISO 9705 (7.11) zur Anwendung kommen. Außerdem wird, wie oben erwähnt, einerseits mit den materialspezifischen Werten aus (9.1), andererseits mit den in den Vorschriften vorgegebenen Materialparametern gerechnet. Zur Beurteilung wird der relative Fehler der Energiefreisetzungsrate betrachtet. Dieser lautet:

$$\delta\dot{q} = \frac{\dot{q}}{-\dot{m} \cdot H_{u,M}} \quad (9.13)$$

Mit den zur Herleitung von (7.5) für ISO 5660 getroffenen Annahmen und Vereinfachungen berechnet sich die Energiefreisetzungsrate mit standardisierten Parametern gemäß

$$\dot{q} = 17200 \text{ [kJ m}^{-3}\text{]} \cdot \dot{V}_{298,\text{Messung}}^s \cdot \frac{X_{\text{O}_2}^{\text{Pa},s} - X_{\text{O}_2}^{\text{Pa},0}}{1,105 - 1,5 \cdot X_{\text{O}_2}^{\text{Pa},s}} \quad (9.14)$$

bzw. mit materialspezifischen Parametern gemäß

$$\dot{q} = E_{\text{O}_2,M}^V \cdot \dot{V}_{298,\text{Messung}}^s \cdot \frac{X_{\text{O}_2}^{\text{Pa},s} - X_{\text{O}_2}^{\text{Pa},0}}{\alpha_M - \beta_M \cdot X_{\text{O}_2}^{\text{Pa},s}} \quad (9.15)$$

Die Energiefreisetzungsrate nach ISO 9705 ergibt sich mit den für (7.11) getroffenen Annahmen und dem „oxygen depletion factor“ ϕ nach (7.12) mit standardisierten bzw. mit materialspezifischen Parametern gemäß:

$$\dot{q} = 17200 \text{ [kJ m}^{-3}\text{]} \cdot \dot{V}_{298, \text{Messung}}^s \cdot X_{\text{O}_2}^0 \cdot \frac{-\phi}{\phi \cdot (1,105 - 1) + 1} \quad (9.16)$$

$$\dot{q} = E_{\text{O}_2, \text{M}}^V \cdot \dot{V}_{298, \text{Messung}}^s \cdot X_{\text{O}_2}^0 \cdot \frac{-\phi}{\phi \cdot (\alpha_M - 1) + 1} \quad (9.17)$$

In Anhang C, Diagramm C.1 bis Diagramm C.28, ist die relative Abweichung der über die verschiedenen Ansätze berechneten Energiefreisetzungsrate zur vorgegebenen Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Zuluftmenge bzw. vom Zuluftverhältnis dargestellt. Bei Betrachtung dieser Diagramme ist zu bedenken, dass eine relative Abweichung größer als 0 eine Überbewertung, eine relative Abweichung kleiner als 0 eine Unterbewertung der Energiefreisetzungsrate bedeutet. Da beim Vergleich des Rechenansatzes nach ISO 5660 [A-7] mit dem Ansatz nach ISO 9705 [A-8] keine Unterschiede erkennbar sind, werden diese nicht mehr getrennt dargestellt. Um gewisse Gesetzmäßigkeiten zu erkennen, werden die Materialien nach folgenden Kriterien gruppiert:

- Die Berechnung der Energiefreisetzungsrate erfolgt mit materialspezifischen oder standardisierten Parametern.
- Die relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate ist bei großem Zuluftverhältnis größer oder kleiner 0.
- Die relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate steigt oder fällt mit zunehmenden Zuluftverhältnis (Tendenz steigend oder fallend).

Theoretisch ergeben sich daraus 16 Gruppen. Da die relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate bei Berechnung mit materialspezifischen Parametern bei großem Zuluftverhältnis immer größer als 0 ist, reduziert sich die Anzahl der Gruppen auf 8, von denen tatsächlich nur 6 besetzt sind (Tabelle A.6).

Tabelle A.6 Zuordnung der Brennstoffe bezüglich der relativen Abweichung der Energiefreisetzungsrate

Parameter				Summenformel (Materialindex)
materialspezifisch		standardisiert		
Abweichung bei großem Zuluftverhältnis	Tendenz bei zunehmenden Zuluftverhältnis	Abweichung bei großem Zuluftverhältnis	Tendenz bei zunehmenden Zuluftverhältnis	
> 0	steigend	> 0	steigend	CH ₄ (1, 19), C ₃ H ₈ (2, 23), -(C ₂ H ₄)- (3), -(C ₃ H ₆)- (4), -(C ₄ H ₈)- (5), -(C ₆ H ₁₁ ON)- (16), -(C ₄ H ₁₀)- (24), -(C ₅ H ₁₂)- (25), -(C ₈ H ₁₈)- (26), -(C ₆ H ₁₂)- (27)
			fallend	CH ₄ O (29), C ₂ H ₅ OH (30)
		< 0	steigend	-(C ₃ H ₃ N)- (11), C ₂ H ₄ (21)
			fallend	
	fallend	> 0	steigend	-(C ₄ H ₆)- (6), -(C ₈ H ₈)- (7), -(C ₁₆ H ₁₄ O ₃)- (14), C ₂ H ₂ (22), C ₆ H ₆ (28), (CH ₃) ₂ CO (31)
			fallend	-(C ₂ H ₃ Cl)- (8), -(C ₅ H ₈ O ₂)- (10), -(C ₁₀ H ₈ O ₄)- (13), -(C ₁₂ H ₁₆ O ₈)- (15)
		< 0	steigend	
			fallend	-(C ₂ H ₂ Cl ₂)- (9), -(CH ₂ O)- (12), C ₆ H ₁₂ O ₆ (32)

In Diagramm A.14 und Diagramm A.15 ist die relative Abweichung der mit material-spezifischen oder standardisierten Parametern bei einfachem Zuluftverhältnis berechneten Energiefreisetzungsrate dargestellt. Verwendet man die materialspezifischen Parameter, so schwankt die relative Abweichung zwischen -2 % bis +6 % (Index 1 - 16) bzw. -2 % bis +2 % (Index 19 - 32). Vergleicht man den Verlauf der relativen Abweichung des Volumenstroms mit dem Verlauf der Abweichung der mit materialspezifischen Parametern berechneten Energiefreisetzungsrate in Diagramm C.1 bis Diagramm C.28, so kommt man zu der Erkenntnis, dass diese Abweichung maßgeblich auf der Abweichung des Volumenstroms beruht, die durch die Festlegung der konstanten Dichte hervorgerufen wird.

Die Bandbreite der relativen Abweichung für die mit standardisierten Parametern berechnete Energiefreisetzungsrate ist erheblich größer: -5 % bis +13 % (Index 1 - 16) bzw. -20 % bis +7 % (Index 19 - 32). Da hierbei der Verlauf der relativen Abweichung der Energiefreisetzungsrate nicht mehr mit dem Verlauf der relativen Abweichung für den Abluftvolumenstrom korreliert ist, muss geschlossen werden, dass bei kleinem Zuluftverhältnis die Rauchgasexpansion nicht ausreichend durch den standardisierten Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion α und das standardisierte Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β beschrieben wird. Zusammenfassend führt die Betrachtung zu der Empfehlung, bei niedrigen Zuluftverhältnissen die Energiefreisetzungsrate nicht mit Hilfe der Messung des Abluftvolumenstroms sondern durch Bestimmung des Zuluftvolumenstroms zu berechnen, da die Parameter α und β hierbei nicht verwendet werden müssen.

Die Betrachtung bei zehnfachem Zuluftverhältnis (Diagramm A.16, Diagramm A.17) zeigt relative Abweichungen der mit materialspezifischen Parametern berechneten Energiefreisetzungsrate von 0 % bis 4 % (Index 1 - 16) bzw. 0 % - 1 % (Index 19 - 32). Werden die standardisierten Parameter benutzt, so beträgt die relative Abweichung -8 % bis +6 % (Index 1 - 16) bzw. -17 % bis +6 % (Index 19 - 32). Hierbei ist die Bewertung von Methan (Index 1, 19) und Nylon 6.6 (Index 16) weniger kritisch, da bei Anwendung der standardisierten Parameter die Energiefreisetzungsrate überbewertet wird. Bei Polyoxymethylene (Index 12), Aceton (Index 31) und d-Glucose (Index 32) erhält man eine Unterbewertung der Energiefreisetzungsrate im Rahmen der für die Sauerstoffkalorimetrie angegebenen Grenzen von 10 %. Für Ethen (Index 21) und Ethyn (Index 22) wird die Energiefreisetzungsrate mit 10,6 % bzw. 16,2 % zu stark unterbewertet.

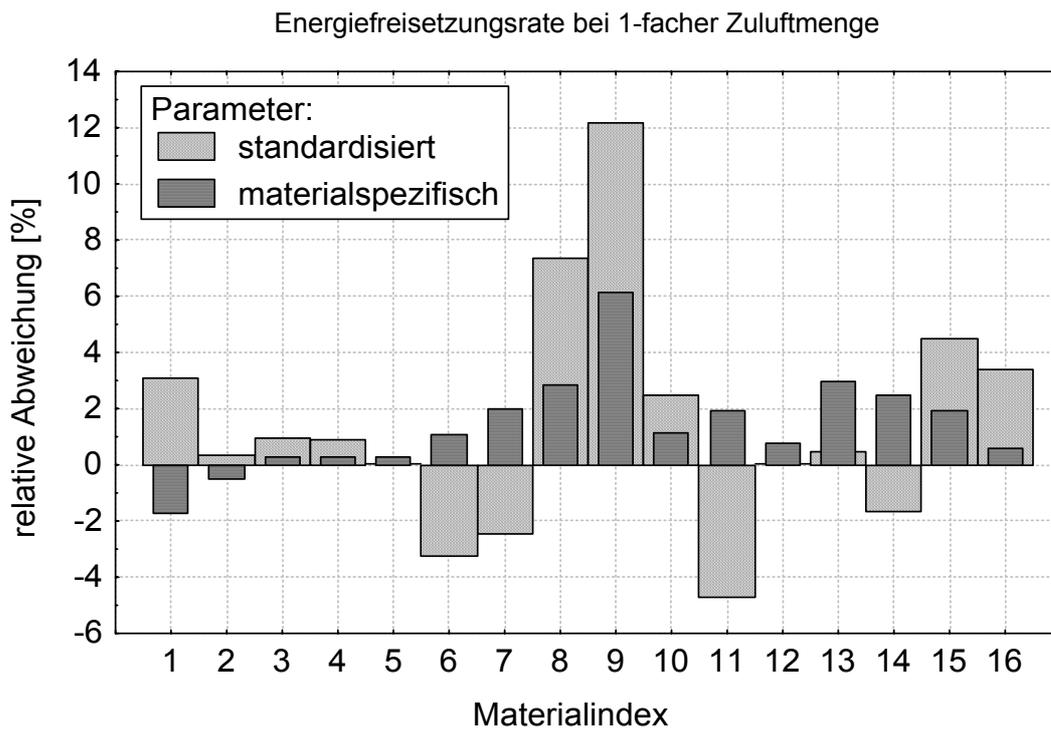


Diagramm A.14 Relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate bei einfacher Zuluftmenge für Materialien gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

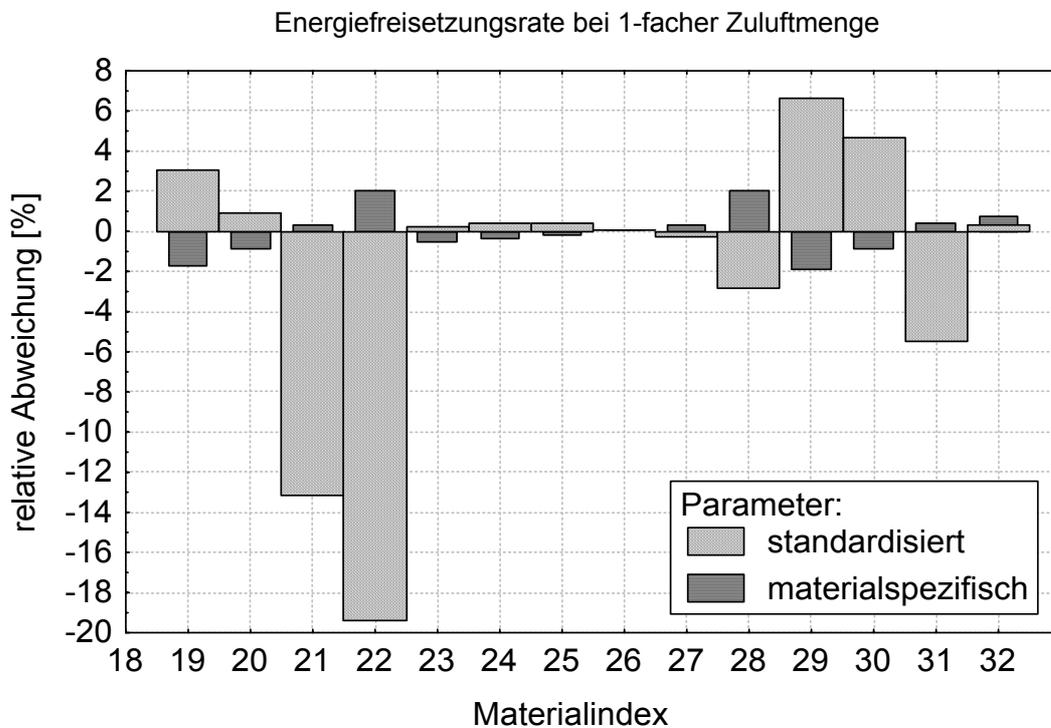


Diagramm A.15 Relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate bei einfacher Zuluftmenge für Materialien gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

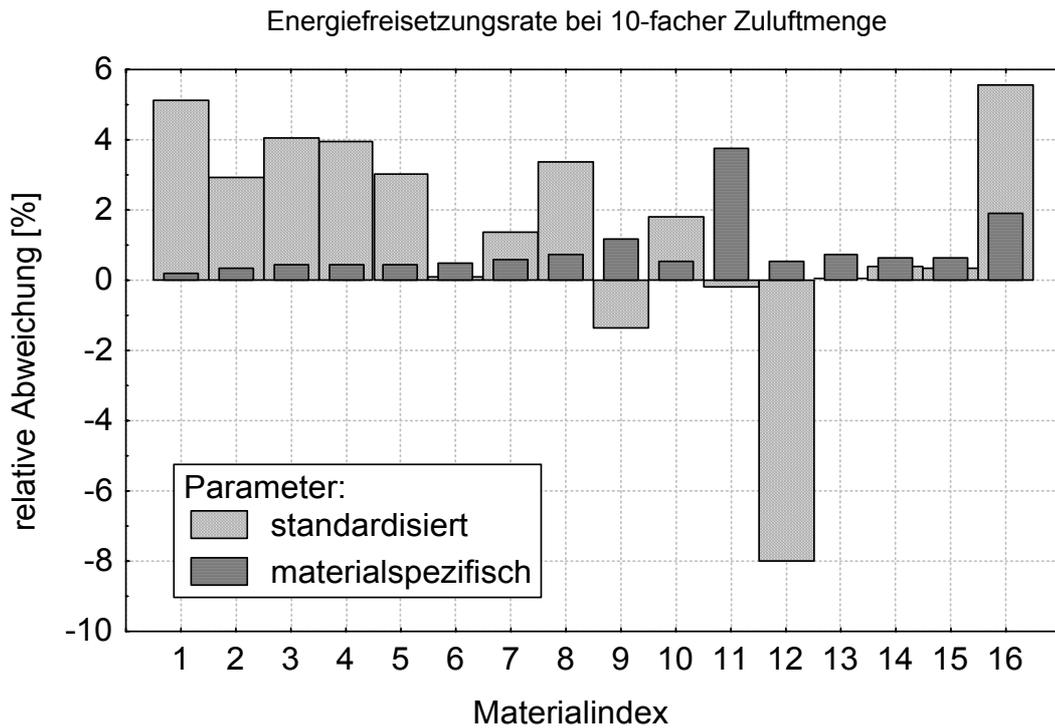


Diagramm A.16 Relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate bei 10-facher Zuluftmenge für Materialien gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

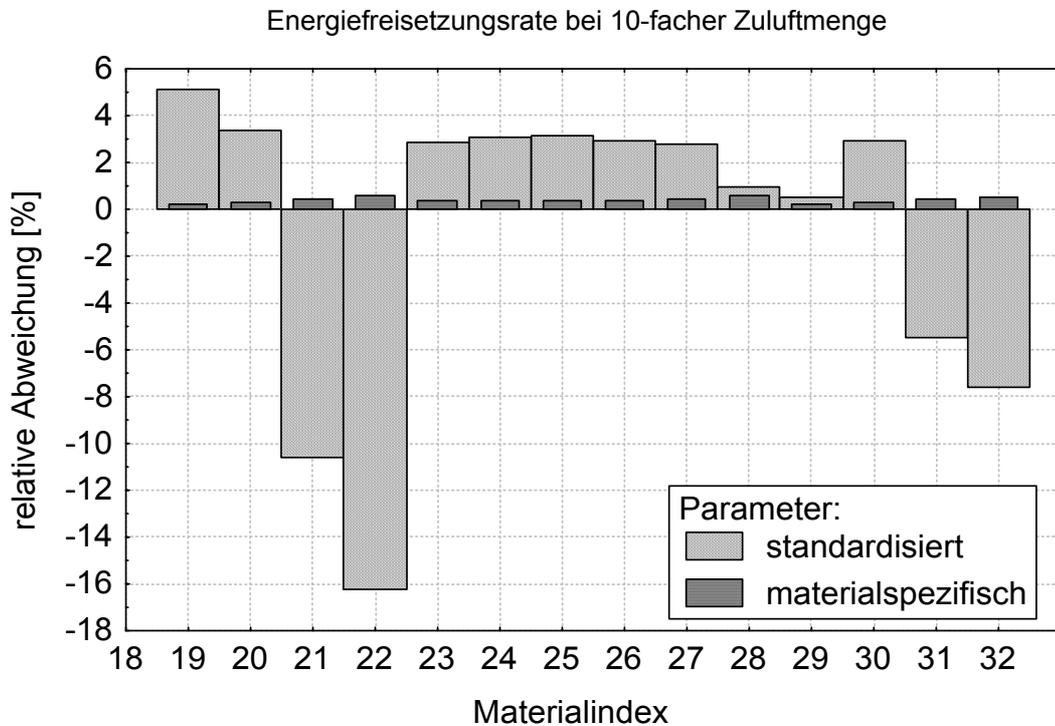


Diagramm A.17 Relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate bei 10-facher Zuluftmenge für Materialien gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

Ein Vergleich der in Diagramm A.8 und Diagramm A.9 dargestellten relativen Abweichung des standardisierten O_2 -Faktors mit der relativen Abweichung der Energiefreisetzungsrates (Diagramm A.16, Diagramm A.17) zeigt, dass die Abweichungen von O_2 -Faktor und der Energiefreisetzungsrates bei ausreichend hohem Zuluftverhältnis in der gleichen Größenordnung liegen. Somit wird der systematische Fehler bei offenen Systemen maßgeblich durch die Abweichung des standardisierten vom material-spezifischen O_2 -Faktor verursacht. Diese Tatsache fließt bei der Kalibrierung des Room-Corner-Test [A-8, A-9] und des SBI-Tests [A-10] ein, indem bei der Auswertung anstelle des standardisierten der materialspezifische O_2 -Faktor für Propan, das als Brennergas zum Einsatz kommt, verwendet wird. Bei der Kalibrierung des Cone-Calorimeters [A-7] wird neben dem O_2 -Faktor auch der Faktor α , der die Rauchgas-expansion berücksichtigt, von Methan in der Auswertungsformel verwendet.

In der aktuellen Fassung erfolgt die Bewertung des Brandverhaltens von Baustoffen mit den Prüfverfahren Cone-Calorimeter, Room-Corner-Test und SBI-Test auf Basis der standardisierten Materialparameter. Aufgrund der bisherigen Betrachtungen zum systematischen Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrates sollten die Prüfvorschriften insoweit angeändert werden, dass für Baustoffe mit einheitlicher Zusammensetzung die Energiefreisetzungsrates auf Basis der materialspezifischen Parameter berechnet werden darf, wenn diese aus der chemischen Zusammensetzung und dem unteren Heizwert abgeleitet werden können.

A.9.4 Bewertung des systematischen Fehlers mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz

Auf Basis der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Berechnungen werden mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes die Fehlergrenzen der einzelnen Parameter O_2 -Faktor, Abluftvolumenstrom, Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion α , Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β und der Gesamtfehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrates gemäß ISO 5660 [A-7] mit (7.5) untersucht. Dazu müssen die partiellen Ableitungen gebildet werden:

$$\begin{aligned}
\dot{q} &= E_{O_2}^V \cdot \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \\
\frac{\partial \dot{q}}{\partial E_{O_2}^V} &= \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} &= \frac{\dot{q}}{E_{O_2}^V} \\
\frac{\partial \dot{q}}{\partial \dot{V}_{298}^s} &= E_{O_2}^V \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} &= \frac{\dot{q}}{\dot{V}_{298}^s} \\
\frac{\partial \dot{q}}{\partial \alpha} &= \frac{-E_{O_2}^V \cdot \dot{V}_{298}^s \cdot (X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0})}{(\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s})^2} &= \frac{-\dot{q}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \\
\frac{\partial \dot{q}}{\partial \beta} &= \frac{E_{O_2}^V \cdot \dot{V}_{298}^s \cdot (X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}) \cdot X_{O_2}^{Pa,s}}{(\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s})^2} &= \frac{X_{O_2}^{Pa,s} \cdot \dot{q}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}}
\end{aligned} \tag{9.18}$$

Für die auf der Ungenauigkeit eines einzelnen Parameters beruhende Abweichung der Energiefreisetzungsrate gilt:

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{q}(E_{O_2}^V) &= \left| \frac{\partial \dot{q}}{\partial E_{O_2}^V} \cdot \Delta E_{O_2}^V \right| & \frac{\Delta \dot{q}(E_{O_2}^V)}{\dot{q}} &= \left| \frac{E_{O_2}^V - E_{O_2,M}^V}{E_{O_2}^V} \right| \\
\Delta \dot{q}(\dot{V}_{298}^s) &= \left| \frac{\partial \dot{q}}{\partial \dot{V}_{298}^s} \cdot \Delta \dot{V}_{298}^s \right| \\
\Delta \dot{q}(\alpha) &= \left| \frac{\partial \dot{q}}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha \right| & \frac{\Delta \dot{q}(\alpha)}{\dot{q}} &= \left| \frac{\alpha - \alpha_M}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \right| \\
\Delta \dot{q}(\beta) &= \left| \frac{\partial \dot{q}}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta \right| & \frac{\Delta \dot{q}(\beta)}{\dot{q}} &= \left| \frac{X_{O_2}^{Pa,s} \cdot (\beta - \beta_M)}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \right|
\end{aligned} \tag{9.19}$$

Der Gesamtfehler lässt sich damit abschätzen:

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{q} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial E_{O_2}^V} \cdot \Delta E_{O_2}^V \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial \dot{V}_{298}^s} \cdot \Delta \dot{V}_{298}^s \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta \right)^2} \\
\frac{\Delta \dot{q}}{\dot{q}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta E_{O_2}^V}{E_{O_2}^V} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \dot{V}_{298}^s}{\dot{V}_{298}^s} \right)^2 + \left(\frac{-\Delta \alpha}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \right)^2 + \left(\frac{X_{O_2}^{Pa,s} \cdot \Delta \beta}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \right)^2}
\end{aligned} \tag{9.20}$$

In Anhang D, Diagramm D.1 bis Diagramm D.28, ist die Standardabweichung als relative Größe für die Energiefreisetzungsrate dargestellt, wobei zum einen die Abhängigkeit von den einzelnen Parametern gemäß (9.19), zum anderen die Abhängigkeit insgesamt gemäß (9.20) als Funktion über dem Zuluftverhältnis gezeigt wird.

Von Parker [A-6] wird der Einfluss des systematischen Fehlers bei der Bestimmung der Expansion ebenfalls diskutiert. Die dabei betrachtete Gleichung (36) in [A-6] stimmt mit (7.2) überein. Diese Gleichung wird mit dem Abluftvolumenstrom erweitert, so dass der Zuluftvolumenstrom als Funktion der anderen Größen stehen bleibt und diese Funktion nach α abgeleitet werden kann.

$$\dot{V}_{298}^0 = \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{1}{1 + (\alpha - 1) \cdot \left(1 - Z_{O_2/N_2}^s / Z_{O_2/N_2}^0\right)}$$

$$\frac{d\dot{V}_{298}^0}{d\alpha} = \dot{V}_{298}^s \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^s / Z_{O_2/N_2}^0 - 1}{\left(1 + (\alpha - 1) \cdot \left(1 - Z_{O_2/N_2}^s / Z_{O_2/N_2}^0\right)\right)^2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{Z_{O_2/N_2}^s / Z_{O_2/N_2}^0 - 1}{1 + (\alpha - 1) \cdot \left(1 - Z_{O_2/N_2}^s / Z_{O_2/N_2}^0\right)} \quad (9.21)$$

Durch Umformung des Differentials erhält man abschließend einen Zusammenhang zwischen Fehler bzw. Abweichung des Zuluftvolumenstrom und Ungenauigkeit des Expansionsfaktors infolge chemischer Reaktion α :

$$\frac{d\dot{V}_{298}^0}{\dot{V}_{298}^0} = \frac{d\alpha}{\frac{Z_{O_2/N_2}^s}{Z_{O_2/N_2}^s - Z_{O_2/N_2}^0} - \alpha} \quad (9.22)$$

Der Term auf der rechten Seite von (9.21) wird maximal, wenn das Verhältnis von Sauerstoff zu Stickstoff in der Abluft verschwindet, d. h. wenn der Sauerstoffgehalt in der Abluft gegen 0 geht. Weiterhin wird vom Parker [A-6] angenommen, dass der Wert für α im Bereich 1,0 bis 1,2 variiert:

$$X_{O_2}^s = 0 \quad \Rightarrow \quad Z_{O_2/N_2}^s = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\dot{V}_{298}^0}{\dot{V}_{298}^0} = -\frac{d\alpha}{\alpha}$$

$$\alpha = 1,1 \pm 0,1 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\dot{V}_{298}^0}{\dot{V}_{298}^0} = \pm \frac{0,1}{1,1} \quad \Rightarrow \quad \left| \frac{d\dot{V}_{298}^0}{\dot{V}_{298}^0} \right| \leq 10\%$$

Auf diese Weise wird von Parker [A-6] geschlossen, dass der relative Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrates über den Abluftvolumenstrom (bei offenen Systemen) 10 % nicht überschreitet. Die in Abschnitt A.9.1 dargestellten Ergebnisse bei der Untersuchung der relativen Abweichungen der Materialparameter zeigen in den meisten Fällen, dass die Abweichung der standardisierten Expansionsfaktoren infolge chemischer Reaktion α und der O_2 -Faktoren die gleiche Richtung aufweisen (Diagramm A.8, Diagramm A.9). Da der Einfluss auf die Abweichung der Energiefrei-

setzungsrate für diese beiden Parameter aber entgegengesetzte Vorzeichen hat, heben sich die Abweichungen zum Teil wieder auf, so dass mit wenigen Ausnahmen, z. B. Ethen (Index 21) oder Ethyn (Index 22), die relative Abweichung der mit standardisierten Parametern berechneten Energiefreisetzungsrates auch bei einfachem Zuluftverhältnis kleiner als die relative Abweichung einzelner standardisierter Parameter ist.

Eine ähnliche Betrachtung wurde von Enrigh und Fleischmann [A-25] durchgeführt. Allerdings wurde bei dieser Untersuchung an einem Beispiel für den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrates der Einfluss der Variation von einzelnen Parametern auf die relative Abweichung dargestellt. Das Ergebnis ist mit den hier dargestellten Erkenntnissen vergleichbar.

A.9.5 Anwendung der „falschen“ Auswertungsformel

In Abschnitt A.3 wurden die beiden am häufigsten eingesetzten und zum Teil in den Prüfnormen beschriebenen Gasaufbereitungstechniken erläutert. Die Umrechnung des mit einem Gasanalysator bestimmten Volumenanteils nach Filterung auf den Volumenanteil im unbehandelten Gas wurde im Abschnitt A.4 dargestellt. Es wurde betont, dass in den Prüfnormen auf den Zusammenhang zwischen Gasanalysestrecke und Berechnungsmethode nicht hingewiesen wird. Daher soll hier exemplarisch die Fehlerbandbreite untersucht werden, die auftritt, wenn die „falschen“ Formeln angewendet werden. Dazu wird zum einen in der Auswertungsformel (7.5) für das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [A-7] der ohne CO₂-Trapping ermittelte Sauerstoffgehalt eingesetzt. Zum anderen wird für den Room-Corner-Test gemäß ISO 9705 [A-8] bzw. den SBI-Test gemäß DIN EN 18283 [A-10] in der Gleichung (7.11) ein „oxygen depletion factor“ ϕ (7.7) angewendet, bei dem ein mit zusätzlichem CO₂-Trapping gemessener Sauerstoffgehalt eingesetzt wird. Für diese Untersuchung wird ansonsten wie in den vorherigen Abschnitten vorgegangen, wobei die relative Abweichung nur für den Fall des zehnfachen Zuluftverhältnisses dargestellt wird.

In Diagramm A.18 und Diagramm A.19 ist die relative Abweichung der Energiefreisetzungsrates bei Anwendung der „falschen“ Berechnungsformeln gezeigt. Dabei bedeutet „ISO 5660“ die relative Abweichung der Energiefreisetzungsrates bei Berechnung mit der Sauerstoffkonzentration ohne CO₂-Trapping in Formel (7.5) gemäß

ISO 5660 [A-7] und „ISO 9705“ bei Berechnung der Sauerstoffkonzentration mit CO₂-Trapping gemäß ISO 9705 [A-8] mit Gleichung (7.11) und (7.7) jeweils gegenüber der mit dem „richtigen“ Auswertungsverfahren berechneten Energiefreisetzungsrate.

Wird bei der Gasaufbereitung kein CO₂-Trapping durchgeführt, bei der Berechnung aber vorausgesetzt, z. B. die Auswertungsmethode aus ISO 5660 [A-7] fälschlicherweise beim Room-Corner-Test mit einer Gasaufbereitung nach Norm (ISO 9705 [A-8] bzw. DIN 4102 Teil 19 [A-9]) angewendet, so wird die Energiefreisetzungsrate in allen Fällen überbewertet, ($17,8 \pm 3,5$) % (Materialindex 1 - 16) bzw. ($15,4 \pm 2,8$) % (Materialindex 19 - 32). Umgekehrt wird bei Anwendung der Auswertungsformeln aus ISO 9705 bzw. DIN 4102 Teil 19, in der davon ausgegangen wird, dass kein CO₂-Trapping erfolgt, bei der Messung in einer Gasaufbereitungsstrecke mit zusätzlichem CO₂-Trapping, wie beim Cone-Calorimeter (ISO 5660) die Energiefreisetzungsrate mit ($-18,8 \pm 3,7$) % (Materialindex 1 - 16) bzw. ($-16,3 \pm 2,9$) % (Materialindex 19 - 32) grundsätzlich unterbewertet.

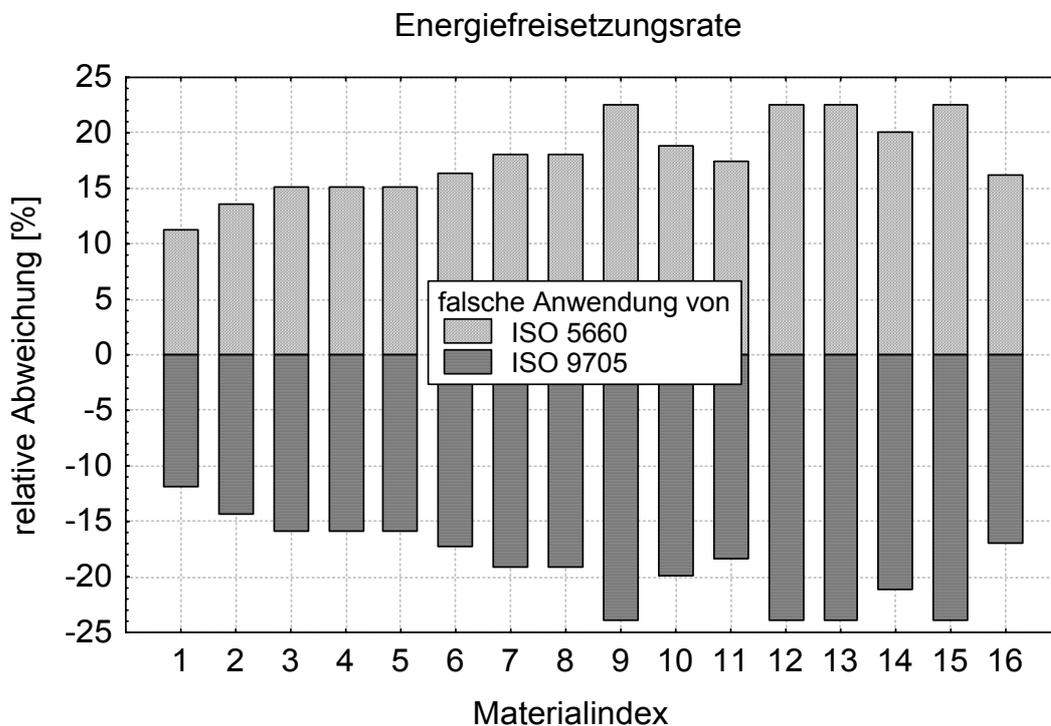


Diagramm A.18 Relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate bei 10-facher Zuluftmenge für Materialien gemäß Tabelle A.3 (1. Teil)

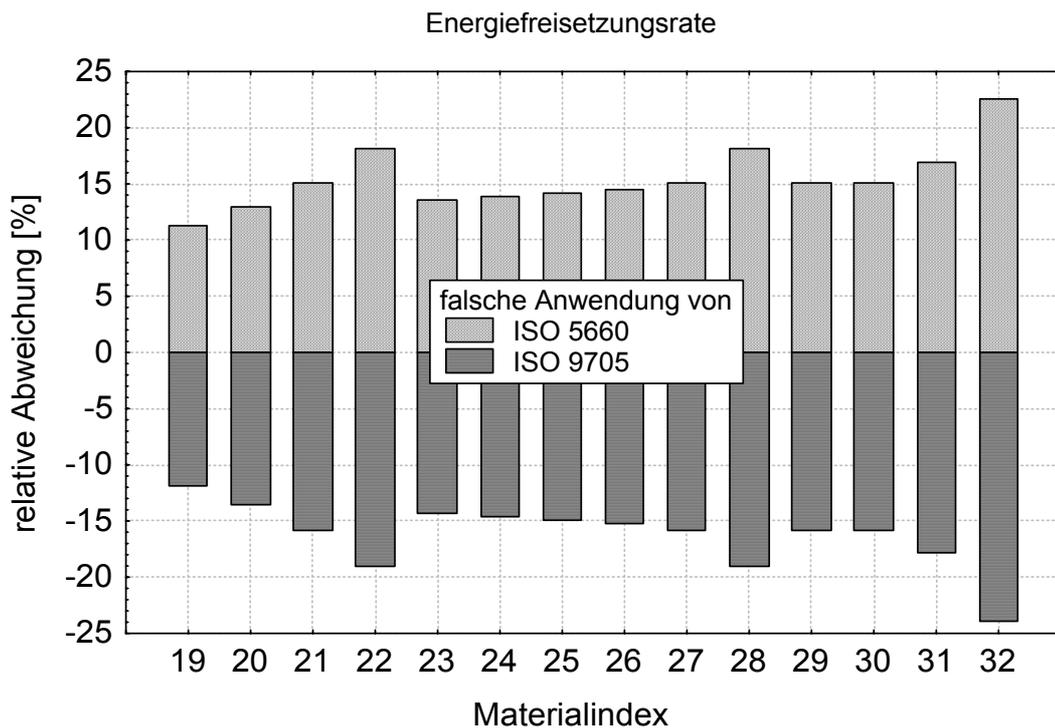


Diagramm A.19 Relative Abweichung der Energiefreisetzungsrate bei 10-facher Zuluftmenge für Materialien gemäß Tabelle A.3 (2. Teil)

A.9.6 Abweichungen durch das Auflösungsvermögen der Messgeräte

Der Einfluss der Messgenauigkeiten (Auflösungsvermögen bzw. Empfindlichkeit) auf das Ergebnis der Berechnung der Energiefreisetzungsrate wird ebenfalls mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes für offene Systeme (Cone-Calorimeter, Room-Corner-Test, SBI-Test) beurteilt. Hier wird nur die Berechnungsformel gemäß ISO 5660 mit Gleichung (7.5) betrachtet. Der Abluftvolumenstrom wird mit Hilfe von Gleichung (8.5) bestimmt, wobei mit Ausnahme der Temperatur und des Differenzdrucks alle Größen in einer Gerätekonstante C_G zusammengefasst werden. Die Energiefreisetzungsrate erhält man also zum einen durch Vorgabe der Parameter O_2 -Faktor $E_{O_2}^V$, Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion α , Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β und Gerätekonstante C_G (Cone-Calorimeter) bzw. des Korrekturfaktors k_i als Verhältnis von mittlerer Strömungsgeschwindigkeit zu Geschwindigkeit in Rohrmitte (Room-Corner-Test) sowie zum anderen durch Messung des Differenzdrucks Δp , der Rauchgastemperatur T^s , des Sauerstoffgehaltes nach H_2O - und CO_2 -Trapping der Zuluft $X_{O_2}^{Pa,0}$ und des Rauchgases $X_{O_2}^{Pa,s}$:

$$\dot{q}(\Delta p, T^s, X_{O_2}^{Pa,0}, X_{O_2}^{Pa,s}) = E_{O_2}^V \cdot C_G \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T^s}} \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} \quad (9.23)$$

Indirekt ist die Gerätekonstante C_G bzw. der Korrekturfaktor k_t selbst eine Messgröße, da sie bzw. er im Allgemeinen durch Kalibrierung mit einem Gasbrenner bestimmt wird. Hier wird aber die Gerätekonstante bzw. der Korrekturfaktor weiterhin als fester Parameter behandelt. Der Einfluss der Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Brennerleistung beim Room-Corner-Test wird nicht untersucht.

Beim weiteren Vorgehen müssen von der Funktion (9.23) die partiellen Ableitungen nach den vier Variablen (Messwerten) gebildet werden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{q}}{\partial \Delta p} &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta p}} \cdot E_{O_2}^V \cdot C_G \cdot \sqrt{\frac{1}{T^s}} \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} = \dot{q} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta p} \\ \frac{\partial \dot{q}}{\partial T^s} &= -\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{T^s{}^3}} \cdot E_{O_2}^V \cdot C_G \cdot \sqrt{\Delta p} \cdot \frac{X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} = \dot{q} \cdot \frac{-1}{2 \cdot T^s} \\ \frac{\partial \dot{q}}{\partial X_{O_2}^{Pa,0}} &= E_{O_2}^V \cdot C_G \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T^s}} \cdot \frac{-1}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}} = \dot{q} \cdot \frac{1}{X_{O_2}^{Pa,0} - X_{O_2}^{Pa,s}} \\ \frac{\partial \dot{q}}{\partial X_{O_2}^{Pa,s}} &= E_{O_2}^V \cdot C_G \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T^s}} \cdot \frac{\alpha + \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}{(\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s})^2} = \dot{q} \cdot \frac{\alpha + \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}{(\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}) \cdot (X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0})} \end{aligned} \quad (9.24)$$

Die Funktion für die Fehlerfortpflanzung lautet:

$$\Delta \dot{q} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial \Delta p} \cdot \Delta \Delta p \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial T^s} \cdot \Delta T^s \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial X_{O_2}^{Pa,0}} \cdot \Delta X_{O_2}^{Pa,0} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial X_{O_2}^{Pa,s}} \cdot \Delta X_{O_2}^{Pa,s} \right)^2} \quad (9.25)$$

Setzt man die partiellen Ableitungen aus (9.24) in (9.25) ein und dividiert durch die Energiefreisetzungsrate, so erhält man den relativen Fehler der Energiefreisetzungsrate (hier in 2. Potenz) in Abhängigkeit vom Auflösungsvermögen der einzelnen Messgeräte.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta \dot{q}}{\dot{q}} \right)^2 &= \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta T^s}{T^s} \right)^2 + \left(\frac{1}{X_{O_2}^{Pa,0} - X_{O_2}^{Pa,s}} \cdot \Delta X_{O_2}^{Pa,0} \right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{\alpha + \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,0}}{(\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}) \cdot (X_{O_2}^{Pa,s} - X_{O_2}^{Pa,0})} \cdot \Delta X_{O_2}^{Pa,s} \right)^2 \end{aligned} \quad (9.26)$$

Für die Bewertung der Genauigkeit werden für den Differenzdruckaufnehmer ± 2 Pa bei einem Messbereich von 100 Pa (Auflösungsvermögen 2 %), für das Thermoelement ± 5 K (Auflösungsvermögen 1,5 - 2 %), für den Sauerstoffanalysator $\pm 0,01$ Vol.-% bei einem Messbereich von 25 Vol.-% (Auflösungsvermögen 0,04 %) als Auflösung bei der Messung angenommen. Die Berechnung wird mit standardisierten Parametern für alle Materialien aus Tabelle A.3 durchgeführt.

Es zeigt sich, dass der Variationskoeffizient für die Energiefreisetzungsrate theoretisch unabhängig vom Material ist. Damit ergibt sich der in Diagramm A.20 dargestellte Verlauf des auf der Messgenauigkeit bzw. auf dem Auflösungsvermögen der verwendeten Messgeräte basierenden relativen Fehlers der Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Zuluftverhältnis der relative Fehler ansteigt. Dies erklärt sich daraus, dass bei großer Zuluftmenge nur ein geringer Teil des Sauerstoffs durch die Verbrennung umgesetzt wird, damit die Reduzierung des Sauerstoffgehalts klein ist und sich dem Auflösungsvermögen des Sauerstoffanalysators annähert.

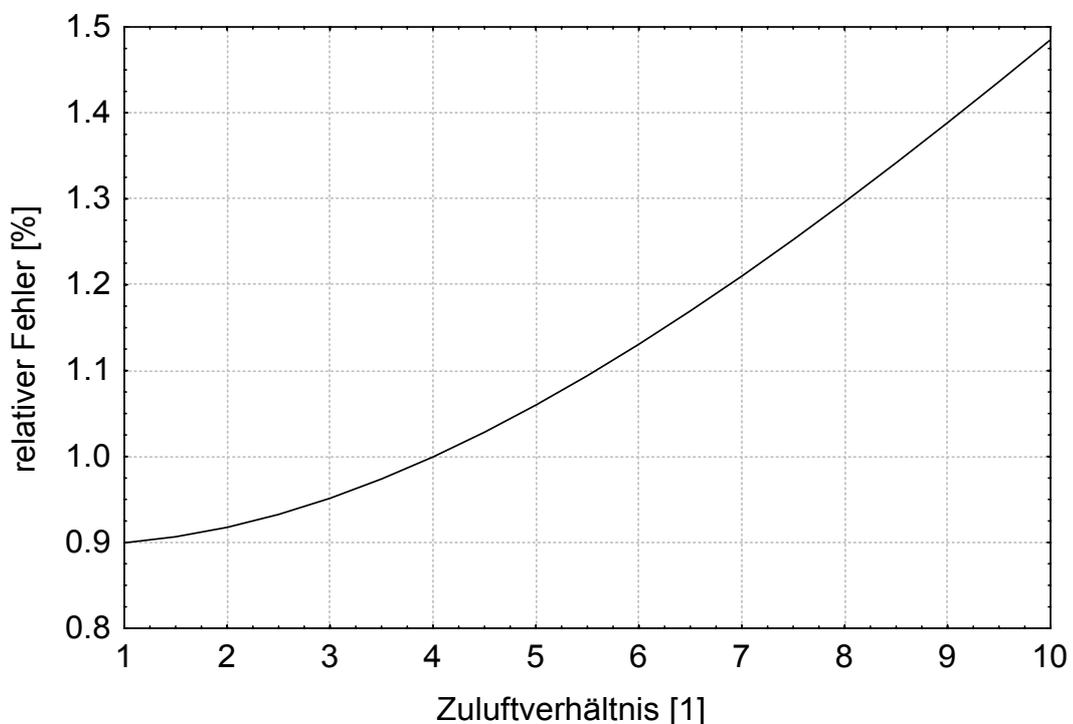


Diagramm A.20 Relativer Fehler der Energiefreisetzungsrate durch Messungenauigkeiten in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

Vergleichend wurde für den Sauerstoffanalysator eine fünfmal größere Ungenauigkeit ($\pm 0,05$ Vol.-%) angenommen. Dann ergibt sich ein relativer Fehler der Energiefreisetzungsrates von 1 % bei einfacher bis 6 % bei zehnfacher Zuluftmenge. Der höhere relative Fehler bei großem Zuluftverhältnis wird maßgeblich durch den geringeren Sauerstoffverbrauch verursacht.

Die letztgenannte Größe der Abweichung bei der Sauerstoffkonzentration ($\pm 0,05$ Vol.-%) wurde auch deshalb untersucht, weil oftmals die Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre von 20,95 Vol.-% auf 21 Vol.-% (Differenz: 0,05 Vol.-%) aufgerundet wird. Allein diese „Bequemlichkeit“ kann zu einem Fehler in der genannten Größenordnung führen.

Diese Zusammenhänge sind der Grund für die hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit des bei der Sauerstoffkalorimetrie eingesetzten Sauerstoffanalysators. Das Auflösungsvermögen dieses Messgerätes muss 50-mal besser sein als das der Differenzdruckmesser oder der Thermoelemente, mit deren Hilfe der Abluftvolumenstrom bestimmt wird.

A.9.7 Auflösungsvermögen der Prüfverfahren

Im vorherigen Abschnitt wurde mit Hilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung für offene Systeme, d. h. Systeme ohne Messung / Steuerung des Zuluftstroms und mit Bestimmung des Abluftvolumenstroms, gezeigt, dass die Nachweisgrenzen der Sauerstoffkalorimetrie maßgeblich durch die Messgenauigkeit des Sauerstoffanalysators¹⁸⁾ gegeben sind. Für die folgende Betrachtung der drei die Sauerstoffkalorimetrie einbeziehenden Prüfverfahren wird der Ansatz für das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5606 [A-7] zugrunde gelegt. Für die Berechnung der Energiefreisetzungsrates beim Room-Corner-Test oder beim SBI-Test wird zusätzliches CO₂-Trapping vorausgesetzt, so dass kein zusätzlicher CO₂-Analytator angenommen werden muss. Somit entfällt bei Verwendung von zusätzlichem CO₂-Trapping eine Quelle für Ungenauigkeiten, die zu einer weiteren Vergrößerung der minimal nachweisbaren Energiefreisetzungsrates bzw. einer Verkleinerung des Auflösungsvermögens führen kann.

¹⁸⁾ Eigne Erfahrung haben gezeigt, dass es durchaus sinnvoll sein kann, einen Sauerstoffanalysator mit einem analogen Signalausgang einzusetzen: Diese „älteren“ Geräte (z. B. SERVOMEX bei Cone-Calorimeter von Stanton Redcroft) weisen bei gleicher zeitlicher Drift gegenüber „neueren“ Geräten mit digitalem Ausgang bzw. Signalwandler (z. B. SIEMENS beim SBI-Test von Universität Gent) ein vergleichsweise geringes Signalrauschen auf.

Die Berechnung mit den Parametern für die drei verschiedenen Prüfverfahren aus Tabelle A.7 erfolgt mit folgender Gleichung:

$$\dot{q}_{\min} = V_{298}^s \cdot E_{298}^V \cdot \frac{\Delta X_{O_2}^{Pa,s-0}}{\alpha - \beta \cdot X_{O_2}^{Pa,s}}$$

$$E_{298}^V = 17200 \text{ kJ m}^3_{O_2} \quad \alpha = 1,105 \quad \beta = 1,5 \quad (9.27)$$

$$X_{O_2}^{Pa,0} = 0,2095 \quad X_{O_2}^{Pa,s} = X_{O_2}^{Pa,0} - \Delta X_{O_2}^{Pa,s-0}$$

Tabelle A.7 Nachweisgrenzen

Verfahren	Cone-Calorimeter	Room-Corner-Test	SBI-Test
Dokument	ISO 5660 [A-7]	ISO 9705 [A-8], DIN 4102 Teil 9 [A-9]	DIN EN 13823 [A-10]
Volumenstrom V_{298}^s	20 - 30 l s ⁻¹	2 - 5 ¹⁹⁾ m ³ s ⁻¹	0,5 - 0,65 m ³ s ⁻¹
Auflösung des O ₂ -Analysators $\Delta X_{O_2}^{Pa,s-0}$	0,01 Vol-%	0,05 Vol-% (0,01 Vol-%) ²⁰⁾	0,01 Vol-%
nachweisbare Energiefrei- setzungsrate \dot{q}_{\min}	0,027 - 0,041 kW (2,7 - 4,1 kW m ⁻² bei 100 cm ² Probenoberfläche)	14 - 34 kW (2,7 - 6,8 kW)	0,68 - 0,88 kW

Mit Hilfe dieser Betrachtung lässt sich auch die Kalibrierprozedur und die Klassifizierung an der Grenze von nichtbrennbaren zu brennbaren Bauprodukten für die einzelnen Verfahren bewerten:

- Bei der Kalibrierung des Cone-Calorimeters wird die Leistung des Methan-Brenners auf 5 kW oder 10 kW eingestellt. Diese ist mindestens 100-mal größer als die untere Nachweisgrenze. Ein Grenzwert der relativen Energiefreisetzungsrates für nichtbrennbare Baustoffe beträgt 10 kW m⁻², ist also mindestens zweimal größer als die Nachweisgrenze (bei 100 cm² Probenfläche).
- Die Leistungsniveaus bei der Kalibrierung der Messstrecke des Room-Corner-Tests mit 100 kW und 300 kW gemäß ISO 9705 [A-8] sind 3- bis 20-mal größer als die untere Nachweisgrenze. Bei Verwendung eines höherwertigen O₂-Analy-

¹⁹⁾ Oberer Grenzwert der Rauchgasreinigungsanlage des iBMB

²⁰⁾ Sauerstoffanalysator der Messstrecke des iBMB

sators (0,01 %) würde sich dieses Verhältnis auf das 30- bis 100-fache verbessern. Eine Klassifizierungsgrenze für Wandbekleidungen ist auf 1 MW festgelegt, liegt also deutlich über der Nachweisgrenze.

- Die Brennerleistung (30 kW, 93 kW) bei der Kalibrierung des SBI-Tests ist mindestens 35-mal größer als die untere Nachweisgrenze. Für die Klassifizierung des Brandverhaltens wird bei diesem Verfahren allerdings nicht die Energiefreisetzung direkt verwendet. Es ist außerdem nicht bekannt, inwieweit die Klassifizierung von nichtbrennbaren Bauprodukten mit Hilfe des FIGRA-Index durch die Nachweisgrenze erschwert wird, jüngste Erfahrungen lassen dies aber erwarten.

In diesem Zusammenhang wird auch deutlich, dass die Empfindlichkeit für die Bestimmung der Energiefreisetzungsrates mit zunehmendem Volumenstrom abnimmt, bzw. die untere Nachweisgrenze in Abhängigkeit vom Auflösungsvermögen des eingesetzten Sauerstoffanalysators linear mit dem Abluftvolumenstrom ansteigt. Diese Tatsache wird beim Cone-Calorimeter in ISO 5660 [A-7] berücksichtigt, indem abhängig von der maximal zu erwartenden Energiefreisetzungsrates bei der Materialuntersuchung das Gerät für einen mehr oder weniger hohen Abluftvolumenstrom kalibriert werden soll. Während einer Untersuchung im Cone-Calorimeter wird der Volumenstrom aber nicht geändert. Die Messstrecke des Room-Corner-Test wird gemäß ISO 9705 [A-8] bzw. DIN 4102 Teil 19 [A-9] für den gesamten Bereich der einzustellenden Abluftvolumenströme „kalibriert“, indem ein volumenstromabhängiger Korrekturfaktor k_t bestimmt wird. Bei Untersuchungen im Room-Corner-Test ist vorgesehen, die Einstellung des Abluftvolumenstroms dem Brandverlauf, also der entstehenden Rauchmenge anzupassen. Beim SBI-Test gemäß DIN EN 13823 [A-10] ist eine Anpassung des Abluftvolumenstroms und damit eine Anpassung der Empfindlichkeit während eines laufenden Versuchs oder zwischen einzelnen Versuchen nicht vorgesehen. Gemäß Prüfvorschrift wird beim SBI-Test unabhängig vom zu erwartenden Brandverlauf immer mit gleichem Abluftvolumenstrom gearbeitet. Diese Einschränkung erschwert die Beurteilung an der Grenze zwischen brennbarer und nichtbrennbarer Einstufung, insbesondere weil zusätzlich über den FIGRA-Index noch eine Integration durchgeführt wird, bei der sich Messfehler aufaddieren können. Da aber zur Zeit noch keine ausreichenden Betriebserfahrungen vorliegen bzw. die zahlreich durchgeführten Materialprüfungen mit dem SBI-Test nicht unter dem Aspekt der Empfind-

lichkeit der Bewertungsgrößen auf Änderungen des Volumenstroms und der Messgenauigkeit der eingesetzten Gasanalytoren und sonstigen Messaufnehmer betrachtet wurden, ist hier keine Bewertung möglich.

A.10 Zusammenfassung

In diesem Teil der Arbeit wurden die Grundlagen der Sauerstoffkalorimetrie erklärt und die Herleitung der maßgeblichen Auswertungsverfahren ausführlich beschrieben. Alternativ zur üblichen Herleitung der Gasstromänderung bei bekannter Brennstoffzusammensetzung (Abschnitt A.5) wurde auch ein neuer Ansatz zur Herleitung über die Sauerstoffbilanzierung (Abschnitt A.6) vorgestellt. Bei allen Herleitungen wurde darauf geachtet, dass erst möglichst spät vereinfachende Annahmen bzw. Voraussetzungen eingeführt wurden, die dann zu praxisgerechten numerischen Auswertungsformeln führen.

Die aus den vereinfachenden Annahmen resultierenden systematischen Fehler in den Auswertungsverfahren wurden bisher in der Literatur nicht ausreichend diskutiert. Daher wurde in einem eigenständigen Abschnitt der Einfluss der standardisierten Parameter auf die Größenordnung der systematischen Fehler untersucht. Abschließend wurde der Einfluss der Messgenauigkeit bzw. der Empfindlichkeit der verwendeten Messgeräte auf den Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrates behandelt.

Durch die detaillierte Betrachtung konnte gezeigt werden, dass der im Allgemeinen mit maximal 10 % angegebene systematische Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrates mit Hilfe sauerstoffkalorimetrischer Verfahren zu hoch angesetzt ist. Vielmehr wird der systematische Fehler bei geschlossenen Systemen nur durch die Abweichung des standardisierten vom materialspezifischen O_2 -Faktors bestimmt. Diese Abweichung ist in den meisten Fällen kleiner als 5 %. Obwohl bei offenen Systemen zusätzlich die Rauchgasexpansion, beschrieben durch die materialspezifischen Parameter „Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion“ α und „Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff“ β , berücksichtigt werden muss, beträgt auch hier der systematische Fehler im Allgemeinen weniger als 5 %. Er kann auf deutlich weniger als 1 % reduziert werden, wenn bei bekanntem Heizwert und bekannter chemischer Zusammensetzung die materialspezifischen Parame-

ter festgelegt werden können und bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate verwendet werden.

Aus der umfassenden Betrachtung der systematischen und messtechnischen Fehler resultiert eine Bewertung der Betriebsrandbedingungen für das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [A-7], für den Room-Corner-Test gemäß ISO 9705 [A-8] bzw. DIN 4102 Teil 19 [A-9] und für den SBI-Test gemäß DIN EN 13823 [A-10]. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sollten in die Arbeiten zur Modifikation und Verbesserung der betrachteten Prüfvorschriften, insbesondere für den SBI-Test, einfließen.

Die dargestellte Herleitung und die detaillierte Betrachtung der Quellen für systematische und zufällige Fehler sind Grundlage für die Entwicklung der Cone-Kammer sowie die Zusammenstellung der Auswertungsverfahren und Bewertung der Ergebnisse im Teil B dieser Arbeit.

Literatur für Teil A

- [A-1] Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics. 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., 1999.
- [A-2] DIN 51900 Teil 2: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe; Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter und Berechnung des Heizwertes, Verfahren mit isothermen Wassermantel.
- [A-3] Thornton, W. M.: The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds. Philosophical Magazine, Vol. 33 , pp. 196-203, 1917.
- [A-4] Huggett, C.: Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption. Journal of Fire and Flammability, Vol. 12, 1980.
- [A-5] Janssens, M.; Parker, J.: Oxygen Consumption Calorimetry. pp. 31-59 in Heat Release in Fires / edited by V. Babrauskas and S. J. Grayson, Elsevier Science Publishing CO., New York, 1992.
- [A-6] Parker, W. J.: Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. Journal of Fire Sciences, Vol. 2, September/October 1984, p. 381 - 395.
- [A-7] ISO 5660 - 1: Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release from building products (Cone Calorimeter Method). 1999.
- ISO 5660 - 2: Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement). 1999.
- ISO DTR 5660 - 3: Reaction to fire tests - Guidance on heat release, smoke production and mass loss rate measurements. 1999.
- [A-8] ISO 9705 Fire tests - Full-scale room test for surface products, 1996.

- [A-9] DIN 4102 Teil 19: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Wand- und Deckenbekleidungen in Räumen, Versuchsraum für zusätzliche Beurteilung. Entwurf Dezember 1998.
- [A-10] DIN EN 13823: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Deutsche Fassung EN 13823, Juni 2002.
- [A-11] Steinert, C.: Messung und Simulation von Fahrzeugbränden in Tunneln. TU Braunschweig, Dissertation, 1996.
- [A-12] Gobrecht, H.: Bergmann-Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 1, Mechanik, Akustik, Wärme.
- [A-13] Hosser, D.; Blume, G.; Siegfried, W.; Will, J.: Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2 - Ermittlung effektiver Heizwerte. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU-1999-526, ISSN 0724-3316 (1998).
- [A-14] Blume, G.: Vereinfachte Verfahren zur brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung der Verbrennungseffektivität. TU Braunschweig, Dissertation. 2003.
- [A-15] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz in Industriebauten; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Mai 1998.
- [A-16] DIN 18230-2: Baulicher Brandschutz in Industriebauten; Teil 2: Ermittlung des Abbrandfaktors m , Mai 1998.

- [A-17] Hosser, D.; Dobbernack, R.; Will, J.: Großmaßstäbliche Raumbrandversuche zur Überprüfung und Absicherung eines sauerstoffkalorimetrischen Prüfverfahrens für Bauprodukte und eines vertikalen Brandausbreitungsmodells. Vorhaben RS II 2 - 67 41 02 - 93.42 im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, 1995.
- [A-18] Anlagen zum Abschlußbericht „Großmaßstäbliche Raumbrandversuche zur Überprüfung und Absicherung eines sauerstoffkalorimetrischen Prüfverfahrens für Bauprodukte und eines vertikalen Brandausbreitungsmodells“. Forschungsvorhaben RS II 2 - 67 41 02 - 93.42, Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, 20. Februar 1996.
- [A-19] Lattimer, B. Y.; Beitel, J. J.: Evaluation of Heat Release Rate Equations Used in Standard Test Methods. Fire and Materials, Vol. 22, p 167 - 173, 1998.
- [A-20] Hosser, D.; Siegfried, W.; Will, J.: Untersuchungen zum Brandverhalten von Kabelanlagen und zur Schutzfunktion von dämmschichtbildenden Anstrichen auf Kabeln. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU-1998-525, ISSN 0724-3316, 1998.
- [A-21] Hosser, D.; Blume, G.; Will, J.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlager (I),. Abschlussbericht 01RG9503/1, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, 2000.
- Hosser, D., Blume, G. und Will, J.: Brandschutz in Chemikalienlagern: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 151, Braunschweig 2000.
- [A-22] Cerbe, G.; Hoffmann, H.-J.: Einführung in die Wärmelehre.

- [A-23] Mikkola, E.: Effects of oxygen concentration on cone calorimeter results. In: Carole A. Franks (ed.) Interflam '93. 6th International Fire Conference, Oxford (UK), 30 March . 1 April 1993, Interscience Communications Ltd., p 49 - 56, ISBN 0-9516320-3-5.
- [A-24] Hietaniemi, J.; Kallonen, R.; Mikkola, E.: Fires at chemical warehouses. A cone calorimeter study on the burning characteristics and fire effluent composition of chemical compounds. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1810.
- [A-25] Enrigh, P. A.; Fleischmann, C. M.: Uncertainty of Heat Release Rate Calculation of the ISO 5660-1 Cone Calorimeter Standard Test method. Fire Technology, Vol. 35, No. 2, p 153 - 169, 1999.

B Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden

B.1 Aufgabenstellung

Für die Charakterisierung des von Baustoffen und Lagergütern ausgehenden Risikos der Entzündung, Brandausbreitung und Brandwirkung sind Kenntnisse zur Energiefreisetzungsrates, Abbrandrate, effektiven Verbrennungswärme und Freisetzung von Brandprodukten (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und andere toxische Verbrennungsprodukte) von Bedeutung. Die Bestimmung dieser Größen ist unter praxisgerechten Bedingungen einerseits mit erheblichem technischem - und damit finanziellem - Aufwand verbunden. Andererseits können die Randbedingungen einer großmaßstäblichen Untersuchung nur im begrenzten Rahmen kontrolliert und gesteuert werden. Bei der Kontrolle und Steuerung der Ventilationsrandbedingungen - besonders bei natürlicher Zu- und / oder Abluft - kommt man bei Brandversuchen im praxisgerechten Maßstab schnell an die technischen Grenzen, wobei ein wesentliches Problem die Verbrennung außerhalb des kontrollierten Bereichs darstellt, z. B. vor dem Brandraum beim Übergang in das Abzugssystem mit der Messstrecke für die Sauerstoffkalorimetrie [B-1, B-2]. Auch reagiert der Brandverlauf im ventilationsgesteuerten Fall sehr empfindlich auf kleinste Variationen der physikalisch/chemischen Eigenschaften der Brandlast (Aufbau und Anordnung) und der Eigenschaften der Umfassungsbau- teile sowie der Umgebungsrandbedingungen. Aus diesen Gründen können bei der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von großmaßstäblichen Brandversuchen zur Bestimmung der Brandparameter starke Schwankungen auftreten.

Die Untersuchung des Brandverhaltens ist im Labormaßstab erheblich einfacher, da sich die Materialeigenschaften und die Versuchsrandbedingungen in dieser Größenordnung erheblich besser überwachen und einstellen lassen. Hierbei ist aber darauf zu achten, dass tatsächlich auch Randbedingungen wie bei einem realen Brand herrschen, d. h.

- die Materialmenge so groß gewählt werden kann, dass auch Volumeneffekte in der Brandlast berücksichtigt werden können,
- die Größe des Verbrennungsraums eine Umsetzung mit Diffusionsflamme einschließlich Wechselwirkung Flamme - Brennstoffoberfläche zulässt und

- der Querschnitt des Verbrennungsraums ausreichend groß ist, um auch bei einer Verbrennung mit einem Zuluftverhältnis deutlich größer als 1 die Flamme nicht zu stark zu stören (nicht zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten).

Die Entwicklung und Anwendung des im Weiteren vorzustellenden Verfahrens erfolgte im Rahmen eines Forschungsvorhaben über Schutzkonzepte für Brandstörfälle in Chemikalienlagern [B-3, B-4]. Die Notwendigkeit, ein eigenständiges Untersuchungsverfahren zu entwickeln, war darin begründet, dass bei der Untersuchung in Mikroverbrennungsapparaturen auf Basis des sogenannten DIN-Rohres bzw. DIN-Ofens keine Randbedingungen eingestellt werden können, die eine Verbrennung unter Randbedingungen erlauben, die einem Realbrand vergleichbar oder auf diesen übertragbar sind. Das zu entwickelnde labormaßstäbliche Verfahren sollte die o. g. Anforderungen erfüllen und schwerpunktmäßig eine Untersuchung unter definierten Ventilationsrandbedingungen ermöglichen.

Durch Vergleich der im Labormaßstab gewonnenen Ergebnisse mit Ergebnissen aus Raumbrandversuchen soll nachgewiesen werden, dass die Verbrennungsrandbedingungen im Labormaßstab denen eines Realbrandes entsprechen.

Die mit dem Laborverfahren ermittelten Brandparameter sollen bei der numerischen Simulation von ventilationsgesteuerten Bränden verwendet werden. Damit soll der indirekte Nachweis erbracht werden, dass die im Labormaßstab ermittelten Brandparameter auch auf reale Brände übertragen werden können. Dieser indirekte Nachweis ist notwendig, da zur Zeit keine abgesicherten Daten aus Raumbrandversuchen vorliegen.

B.2 Grundlagen für die Entwicklung der Cone-Kammer

Die Entwicklung des labormaßstäblichen Verfahrens zur Bestimmung der Brandparameter bei unterschiedlich ventilierten Bränden, der Cone-Kammer, ist unmittelbar mit den Erfahrungen bei der Anwendung des Cone-Calorimeters verbunden. Wesentliche Komponenten des neuen Untersuchungsverfahrens sind vom Cone-Calorimeter entliehen. Daher soll einleitend das Cone-Calorimeter vorgestellt werden. In den darauffolgenden Abschnitten werden Verfahren beschrieben, mit denen

die Energiefreisetzung und die Ausbeute von Verbrennungsprodukten bei eingeschränktem Sauerstoffangebot untersucht werden kann.

B.2.1 Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660

Das Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [B-5] stellt einen Versuchsaufbau im Labormaßstab dar, der die Anforderungen an ein Untersuchungsverfahren für die Bestimmung und Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen und anderen Brandlasten erfüllt. Dieses Gerät wurde in den USA von Babrauskas [B-6, B-7] für die detaillierte Vermessung des Brandverhaltens - vornehmlich von Baustoffen - entwickelt. Dieses Verfahren wird neben den USA vor allem im skandinavischen Raum für die Untersuchung des Brandverhaltens und die Baustoffklassifizierung, z. B. ASTM E 1354-90 [B-8], eingesetzt ¹⁾. Im Bereich der Forschung und Entwicklung stellt das Cone-Calorimeter inzwischen ein unverzichtbares Instrument zur Bestimmung der für das Brandverhalten maßgeblichen Größen dar.

Mit dem Cone-Calorimeter wird vornehmlich das Brandverhalten von flächigen Baustoffen untersucht. Es kann auch für andere Materialien eingesetzt werden, z. B. Flüssigkeiten, Granulate oder elektrische Leitungen und Kabel [B-9]. Bei der Untersuchung wird die Brennstoffoberseite bzw. Vorderseite mit Hilfe eines elektrischen Heizers allein durch Wärmestrahlung erhitzt. Austretende Pyrolysegase entzünden sich entweder selbständig (self ignition) oder werden mit einem über zwei Elektroden erzeugten elektrischen Funken oberhalb bzw. vor der Materialoberfläche entzündet (piloted ignition).

Die beim Cone-Calorimeter verwendete Form der radiativen Erwärmung durch einen elektrischen Strahler und der Entzündung durch einen Lichtbogen hat wesentliche Vorteile gegenüber anderen Untersuchungs- und Klassifizierungsverfahren. Da die Beheizung des Strahlers und die Erzeugung des Zündfunkens elektrisch erfolgt, ist kein zusätzlicher Sauerstoffverbraucher (Brenner), wie z. B. beim SBI-Verfahren gemäß DIN EN 13823 [B-10] oder Room-Corner-Test nach ISO 9705 [B-11] bzw. DIN 4102 Teil 19 [B-12], zu berücksichtigen. Durch Verzicht auf eine thermische Beaufschlagung mit einer Flamme wird außerdem verhindert, dass durch turbulente

¹⁾ Inzwischen werden Materialien für die Verwendung in Schienenverkehrsfahrzeugen auch im Cone-Calorimeter geprüft.

Schwankungen keine örtlich und zeitlich konstante Wärmestromdichte auf die Oberfläche des zu untersuchenden Materials wirkt, wie Hosser et. al. durch die Vermessung verschiedener Zündquellen gezeigt haben [B-9, B-13, B-14].

B.2.1.1 Plattform mit dem Cone-Heizer

Der hier als Plattform bezeichnete Teil des Cone-Calorimeters ist auf einer Bodenplatte mit Gestänge und Wiegezeile aufgebaut (Bild B.1). Die Wiegezeile (Waage) besitzt eine Aufnahme für die sogenannte Probenpfanne (Untersuchung an horizontalen Oberflächen) bzw. für die spezielle Probenhalterung bei der Untersuchung in vertikaler Ausrichtung. Am Gestänge wird das Gehäuse des Cone-Heizers geführt. An das Gehäuse des Cone-Heizers ist zusätzlich die Schwenkvorrichtung für die zwei Zündelektroden angebracht. Außerdem besitzt das Gehäuse eine Aufnahme für einen Methanbrenner bzw. für die Schmidt-Boelter-Sonde zur Messung der Strahlungsflussdichte.

Die Oberfläche des zu untersuchenden Stoffes wird mit einem kegelförmigen, elektrisch beheizten Strahler - dem Cone-Heizer (engl. Cone-Heater) - radiativ erwärmt. Die besondere Form dieses Heizers hat dem Gerät bzw. Verfahren den Namen gegeben. Der Cone-Heizer ist so geformt, dass er in der Ebene der maximal 100 cm² großen Materialoberfläche eine homogene Strahlungsflussdichte (Leistung pro Flächeneinheit) erzeugt. Der Cone-Heizer ist durch ein Gelenk mit der Führung am Gestänge verbunden. Der Cone-Heizer kann daher um 90° geschwenkt werden, so dass auch Proben in senkrechter Anordnung untersucht werden können.

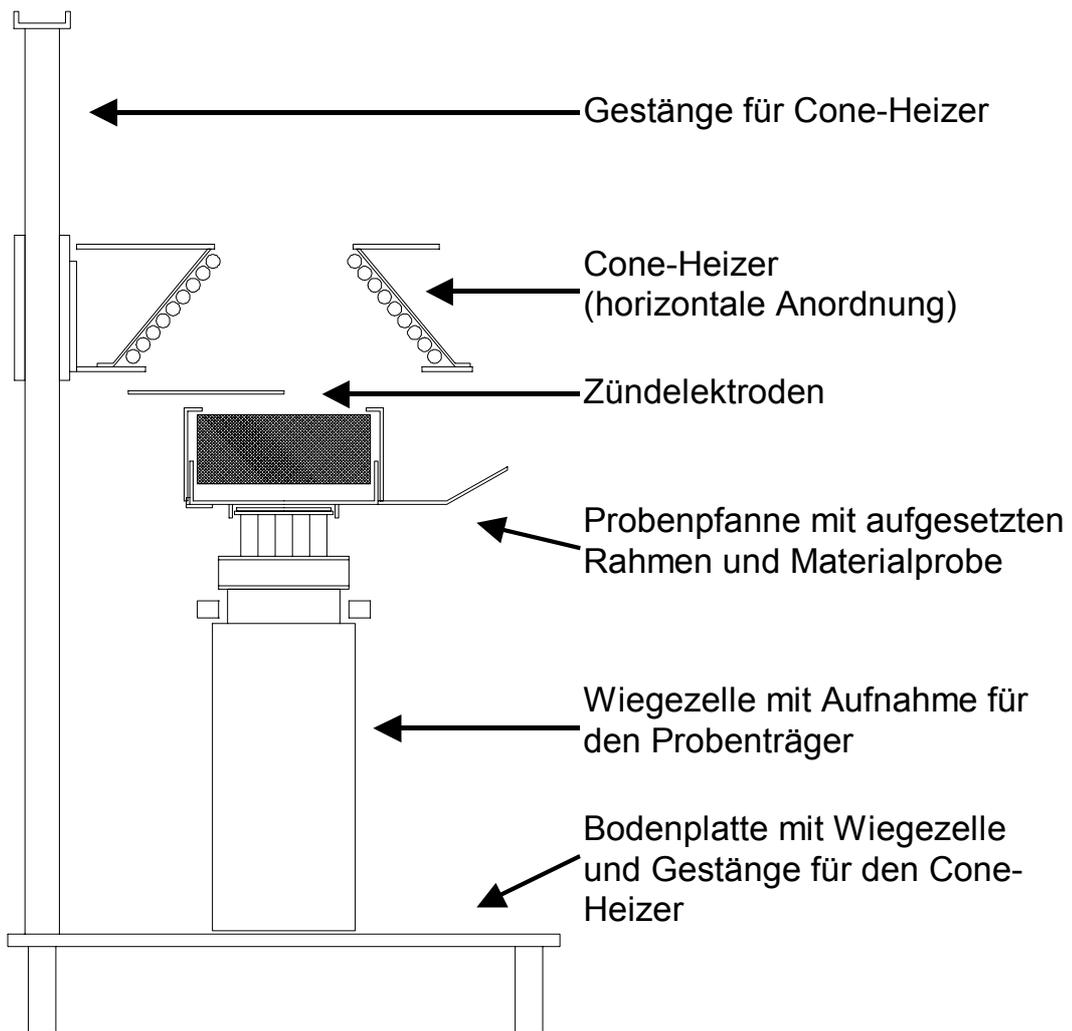


Bild B.1 Plattform bestehend aus Bodenplatte, Wiegezone, Gestänge, kegelförmigem Cone-Heizer mit Zündelectroden (Probenpfanne mit Rahmen und Materialprobe ebenfalls dargestellt)

Es kann eine maximale Strahlungsflussdichte von über 100 kW/m² bei einer Heizertemperatur von mehr als 1000 °C in der Ebene der Probenoberfläche erzeugt werden. Zur Einstellung wird die Strahlungsflussdichte in der Ebene der Materialoberfläche mit einer Schmidt-Boelter-Sonde gemessen. Zur Voreinstellung der Strahlungsflussdichte kann die in Diagramm B.1 dargestellte Kurve benutzt werden.

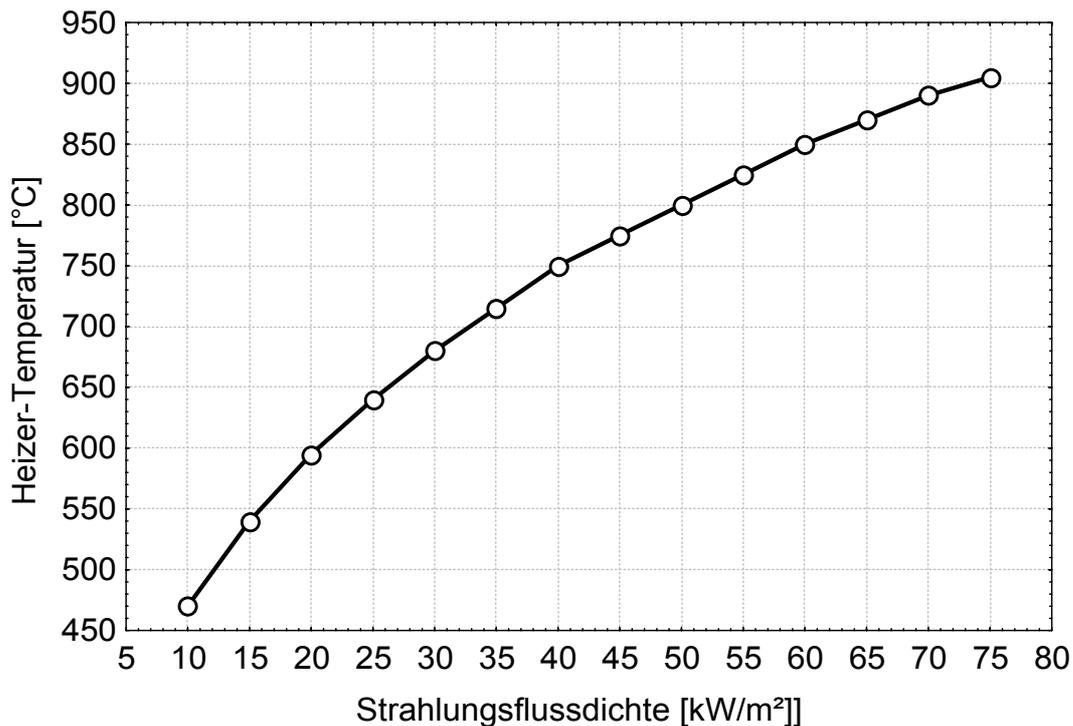


Diagramm B.1 Einstellung der Heizer-Temperatur beim Cone-Calorimeter

Ein periodischer Zündfunke dient zur gesteuerten Entzündung (piloted ignition) der infolge der Erwärmung und Zersetzung austretenden Pyrolyseprodukte. Nach der Entzündung verbrennen die Zersetzungsprodukte in einer Diffusionsflamme, die Höhen von mehr als 40 cm erreichen kann und damit durch die kreisförmige Aussparung im Cone-Heizer bis in die Abzughaube schlägt.

Als Probenträger stehen für die horizontale Anordnung eine quadratische Pfanne, die bei Bedarf mit einem Rahmen und ggf. einem zusätzlichen Gitter erweitert werden kann, und bei vertikaler Anordnung ein spezieller Rahmen zur Verfügung.

Aus Gründen der Arbeitssicherheit - offenen Flamme und hohe Temperatur - ist beim Cone-Calorimeter nach ISO 5660 [7] der gesamte Aufbau in einem von unten und oben belüfteten, mit Glastüren geschützten Experimentierraum aufgestellt. Über dem

Experimentierraum befindet sich oberhalb der beschriebenen Plattform eine Abzughaube, über die entstehende Rauchgase zusammen mit eingemischter Umgebungsluft vom Abzugssystem aufgenommen werden.

B.2.1.2 Abzugssystem und Gasanalyse des Cone-Calorimeters

Die entstehenden Rauchgase werden beim Cone-Calorimeter über die Abzughaube dem Abzugssystem zugeführt. Das Abzugssystem besteht aus der genannten Haube, einem anschließenden horizontalen Rohr, dem Gebläse mit Motor und einem vertikalen Rohr.

Im horizontalen Abschnitt des Abzugsystems befinden sich die Entnahmesonden für die Zuführung zur sauerstoffkalorimetrischen Messstrecke und der Rußsammler. Die zweite Entnahmesonde, ein Rohr mit einer der Rauchgasströmung zugewandten Öffnung, dient zur Entnahme von Rauchgas für die Bestimmung der entstandenen Rußmenge. Hinter den beiden Entnahmesonden kann optional eine Lasermessstrecke für die Ermittlung der optischen Extinktion und somit der Rauchentstehung angebaut werden [B-5]. Im horizontalen Abschnitt des Abzugsystems wird die Rauchgastemperatur im Bereich der Rußentnahmesonde bzw. der Lasermessstrecke durch ein Thermoelement gemessen. Im vertikalen Rohr befindet sich eine Blende. Vor und hinter der Blende ist über zwei Bohrungen ein Differenzdruckmessgerät angeschlossen. Außerdem befindet sich unmittelbar hinter der Blende ein Thermoelement.

Mit Hilfe der Differenzdruck- und der Rauchgastemperaturmessung an der Blende im vertikalen Abschnitt des Abzugsystems kann zusammen mit der durch Kalibrierung bestimmten Gerätekonstante der Massen- bzw. Volumenstrom des Rauchgases berechnet werden. Das Thermoelement im horizontalen Abschnitt in der Nähe der Rußentnahmesonde bzw. Lasermessstrecke dient ebenfalls der Volumenstromberechnung.

Das Cone-Calorimeter stellt ein offenes System dar, bei dem nicht der Zuluftstrom, sondern der Abluftstrom (als Massen- oder Volumenstrom) gemessen wird. Dementsprechend müssen die zur Herleitung von Gleichung (7.5) in Abschnitt A.7 (Seite A-51ff.) angenommenen Vereinfachungen bezüglich der Rauchgasexpansion berücksichtigt werden.

B.2.1.3 Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen mit dem Cone-Calorimeter

Es gab Bestrebungen, das Cone-Calorimeter auch in Deutschland für die Prüfung und Klassifizierung von Baustoffen anzuwenden. Zu diesem Zweck wurde von Kleingelhof et al. ein Forschungsvorhaben durchgeführt [B-15]. In diesem Vorhaben wurde die bei der Untersuchung im Cone-Calorimeter ermittelte effektive Verbrennungswärme und der Gesamtmassenverlust der Baustoffe betrachtet und versucht, eine Korrelation mit den für die Baustoffklassifizierung relevanten Eigenschaften herzustellen, z. B. Restlänge bei der Prüfung der Entflammbarkeit und Brandausbreitung im Brandschacht gemäß DIN 4102 Teil 1 [B-16] bzw. Teil 16 [B-17].

Die Einführung des Cone-Calorimeters für die Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen ist daran gescheitert, dass die Größe der Materialproben im Cone-Calorimeter nicht ausreicht, um alle praxisrelevanten Risiken zu erfassen. Allerdings können auch bei der Prüfung im Brandschacht gemäß DIN 4102 Teil 1 [B-16] und Teil 16 [B-17] oder im SBI-Test gemäß DIN EN 13823 [B-10] aufgrund der gegenüber der realen Einbausituation verringerten Materialoberfläche nicht alle praxisrelevanten Aspekte betrachtet bzw. vollständig bewertet werden.

B.2.2 „Controlled-atmosphere“ Cone-Calorimeter

Will man das Abbrandverhalten bei Variation der Ventilationsbedingungen - gegeben durch Menge und Zusammensetzung (Sauerstoffanteil) der Zuluft - untersuchen, so muss der Aufbau der Experimentierkammer des Cone-Calorimeters geändert werden.

Beim National Institute of Standard and Technology NIST haben Babrauskas et al. [B-18] das Cone-Calorimeter so umgebaut, dass eine Untersuchung des Brandverhaltens unter ventilationsgesteuerten Randbedingungen möglich ist. Dieser Prototyp erscheint identisch mit einem NASA-Prüfverfahren [B-19] für Materialien, die in der Raumfahrt eingesetzt werden. Von Leonard et al. [B-20] wurde bei CSIRO in Australien ein sehr ähnliches Gerät entwickelt.

Beide Geräte basieren auf dem ursprünglichen Cone-Calorimeter, wobei der offene Experimentierraum mit der Plattform für den Cone-Heizer in eine näherungsweise luftdicht abgeschlossene Kammer umgewandelt wurde. Diese Kammer hat schätzungsweise ein Volumen von 250 - 300 l. In beiden Fällen wird Umgebungsluft mit erhöhtem Druck (Pressluft) bzw. mit Hilfe eines Gebläses in die Kammer eingeleitet. Zwischen Pressluftzuführung bzw. Ansaugrohr und Kammer kann reiner Stickstoff zugemischt werden. Rauchgas wird über die Abzughaube des ursprünglichen Cone-Calorimeters abgesaugt. Auf der Abluftseite entspricht das Rauchgasrohr mit den Gasentnahmesonden und den anderen Messaufnehmer im Wesentlichen dem in Abschnitt B.2.1.2 beschriebenen Aufbau. Das amerikanische Gerät besitzt zusätzlich zur Analysetechnik des Cone-Calorimeters Analytoren für Wasser, Salzsäuregas und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (Total Unburned Hydrogen Carbon).

Für die Steuerung der Zuluftmenge ist bei beiden Geräten eine aufwändige elektronische Steuerung des Regelventils (bei Pressluft) bzw. des Gebläses auf der Zuluftseite im Zusammenspiel mit dem Abluftgebläse des ursprünglichen Cone-Calorimeters notwendig.

Obwohl bei diesen beiden Geräten alle Komponenten des ursprünglichen Cone-Calorimeters zum Einsatz kommen, wurde bei der hier eingesetzten Eigenentwicklung von einer weitgehenden Kopie des amerikanischen Gerätes Abstand genommen. Zum einen erschien das Volumen der Kammer sehr groß, so dass Probleme mit dem zeitlichen Auflösungsvermögen / der Empfindlichkeit bei der Gasanalyse erwartet wurden. Zum anderen wurde befürchtet, dass aufgrund der zusätzlichen Absaugung über das Gebläse auf der Abluftseite „Fremdluft“ durch Undichtigkeiten in der Kammer angesaugt werden könnte und damit die Ventilationsbedingungen nicht mehr uneingeschränkt kontrollierbar wären.

B.2.3 „Ventilation controlled“ Cone-Calorimeter

Das „ventilation controlled“ Cone-Calorimeter von Mikkola [B-21] unterscheidet sich grundsätzlich vom oben beschriebenen „Controlled-atmosphere“ Cone-Calorimeter. Bei diesem modifizierten Cone-Calorimeter erfolgt die Erwärmung des Materials und die Entzündung entstehender Zersetzungsprodukte auf gleiche Weise wie im ursprünglichen Cone-Calorimeter. Allerdings geschieht dies in einem gegen die

Umgebung abgeschlossenen System, bestehend aus Vormischkammer und Hauptkammer (Volumen ca. 43 l). In der Vormischkammer kann durch kontrollierte Zuführung von Luft und Stickstoff sowohl die Menge als auch die Zusammensetzung der Zuluft gesteuert werden. Die Rauchgase strömen durch die Öffnung im Cone-Heizer aus und werden durch das in Abschnitt B.2.1.2 beschriebene Abzugssystem des ursprünglichen Cone-Calorimeters aufgenommen. Aufgrund des geringen Kammerolumens erscheint diese Lösung auf den ersten Blick sehr interessant, da hiermit eine schnelle Spülung der Kammer möglich ist und mit einer sehr guten zeitlichen Auflösung bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate und der Ausbeuten von Reaktionsprodukten zu rechnen ist.

Die Erwärmung der horizontalen Probenoberfläche erfolgt mit dem auf der Kammer montierten Cone-Heizer, der identisch zum Heizers des ursprünglichen Cone-Calorimeters aufgebaut ist. Die Schwenkvorrichtung mit den Zündelektroden und die Halterung für den Methanbrenner bzw. die Schmidt-Boelter-Sonde sind aber unabhängig vom Heizer in der Kammer montiert. Eine Wiegezelle ist unterhalb der Hauptkammer montiert.

Tatsächlich wird hier die Plattform des Cone-Calorimeters durch den geschlossenen Aufbau mit der Kammer ersetzt. Die Vielfalt der Untersuchungsmöglichkeiten wird mit diesem Aufbau eingeschränkt, da der Cone-Heizer nicht schwenkbar ist und somit Proben nicht vertikal angeordnet werden können. Außerdem wird durch die nachträgliche Einmischung von Umgebungsluft auch auf der Abluftseite eine abluftseitige Volumen- bzw. Massenstrombestimmung notwendig. Die sauerstoffkalorimetrische Auswertung ist - wie in Abschnitt A.5.3 (Seite A-40 ff.) gezeigt - sehr umfangreich und von vielen Vereinfachungen abhängig. Insbesondere wird die molare Kohlenmonoxidstehung nicht berücksichtigt, die gerade bei der ventilationsgesteuerten Verbrennung eine signifikante Größenordnung erreichen kann.

Bei großer Energiefreisetzungsrate, die erfahrungsgemäß mit einer hohen Flamme verbunden ist, tritt die Flamme durch die Öffnung im Cone-Heizer aus der Kammer aus und kommt mit Umgebungsluft, also zusätzlichem Sauerstoff in Kontakt. Eine weitere Verbrennung, die nicht mit der kontrollierten Ventilation der Kammer zusammenhängt, kann erfolgen und wird über das Messsystem mit erfasst. Somit ist das

System tatsächlich nicht abgeschlossen und die Beurteilung der Brandeigenschaften muss nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit den für die Kammer eingestellten Ventilationsbedingungen stehen.

Bei dem finnischen Forschungsvorhaben, das sich mit Bränden in Chemikalienlagern beschäftigte, wurde dieser Aufbau eingesetzt [5-22]. Durch die nachträgliche Verbrennung außerhalb der Kammer wurden bei diesen Versuchen die Verbrennungseigenschaften so verändert, dass die Korrelationen zwischen Energiefreisetzungsrates, Abbrandrate oder Gesamtenergiefreisetzung und den eingestellten Ventilationsbedingungen nur schwach ausgeprägt waren. Die qualitative und quantitative Veränderung des Schadstoffspektrums bei Variation der Zuluftmenge und Zuluftzusammensetzung konnte nur unzureichend erforscht werden.

B.3 Cone-Kammer

Das im vorherigen Abschnitt vorgestellte modifizierte „ventilation controlled“ Cone-Calorimeter hat zwei schwerwiegende Nachteile. Zum einen kann die bei der ventilationsgesteuerten Verbrennung verstärkt auftretende Kohlenmonoxidbildung in der sauerstoffkalorimetrischen Auswertung nicht mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt A.5.3). Zum anderen werden die bei der ventilationsgesteuerten Verbrennung auftretenden Effekte durch eine nachträgliche Oxidation außerhalb der Kammer „verschmiert“, d. h. sie sind nicht unmittelbar mit der eingestellten Zuluftmenge und Gaszusammensetzung korreliert. Daher fiel bei der Entwicklung der Cone-Kammer die Entscheidung, ein „echtes“ geschlossenes System aufzubauen und dabei soweit wie möglich die Komponenten des Cone-Calorimeters zu verwenden. Dabei sollte aber - im Gegensatz zur in Abschnitt B.2.2 beschriebenen amerikanischen bzw. australischen Entwicklung [B-18, B-20] - zum einen das Volumen der Kammer minimiert werden und zum anderen eine möglichst einfache Steuerung des Zuluftstroms ohne Eingriffe auf der Abluftseite verwendet werden.

Im Folgenden werden der Aufbau und die Handhabung der Versuchsanlage sowie das Auswertungsverfahren dargestellt.

B.3.1 Beschreibung der Cone-Kammer

Bei der Eigenentwicklung für ein Cone-Calorimeter zur Untersuchung des Einflusses der Ventilationsbedingungen auf das Abbrandverhalten, der Cone-Kammer (Bild B.2), wurde die gesamte in Abschnitt B.2.1.1 beschriebene und in Bild B.1 dargestellte Plattform des Cone-Calorimeters aus dem offenen Raum des ursprünglichen Cone-Calorimeters in eine geschlossene Kammer umgesetzt. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass keine mechanischen Umbauten an der Plattform notwendig waren und nur die elektrischen Anschlüsse für Heizer, Zündelektroden, Schwenkvorrichtung, Wiegezelle und Thermoelemente neu hergestellt werden mussten. Außerdem können auch die Schmidt-Boelter-Sonde zur Messung und Einstellung der Strahlungsflussstromdichte und der Brenner zur Kalibrierung und Überprüfung weiterhin eingesetzt werden, da in der Cone-Kammer die Anschlüsse für die Sonde und für Methan gas vorhanden sind.

Das Abzugssystem und die Entnahmesonden werden im Gegensatz zum ursprünglichen oder zum angebotenen modifizierten Cone-Calorimeter nicht mehr benutzt. Anstelle dessen ist auf der Oberseite der ansonsten geschlossenen Kammer ein vertikales Rauchgasrohr mit zwei Blenden und eigener Entnahmesonde montiert. Die Blenden dienen vornehmlich der Homogenisierung des Rauchgasstroms, können aber auch zur Volumenstrombestimmung (Abluft) genutzt werden. Zur Probennahme für die Rußsammelstrecke dient, wie beim Cone-Calorimeter, ein Rohr mit einer der Rauchgasströmung zugewandten Öffnung. Die Entnahmesonde für die sauerstoffkalorimetrische Messstrecke ist ein horizontales Rohr mit einer vorgegebenen Anzahl von Bohrungen auf der der Rauchgasströmung abgewandten Seite. Diese Form der Entnahmesonde wurde beim Room-Corner-Test [B-11, B-12] entliehen und hat die gleichen Vorzüge wie der ringförmige Sammler im Rauchgasrohr des Cone-Calorimeters.

Die Stirnwand der Kammer kann vollständig abgenommen werden, damit die komplette Plattform mit Wiegeeinrichtung, Probenaufnahme, Zündelektroden und Cone-Heizer eingesetzt oder herausgenommen werden kann. In der Stirnwand ist eine zusätzliche Klappe (15 cm × 15 cm) angebracht, durch die der Probenträger mit der entsprechenden Materialprobe hineingebracht bzw. herausgenommen werden kann.

Durch die beiden Fenster in der linken und rechten Seitenwand kann der Versuchsvorlauf beobachtet werden. Zur Verwendung des Methanbrenners oder der Schmidt-Boelter-Sonde (Einstellung der Strahlungsflussdichte) muss lediglich die rechte Scheibe herausgenommen werden. Dann kann der Brenner bzw. die Schmidt-Boelter-Sonde in die Halterung am Cone-Heizer eingesetzt werden. Die elektrischen Zuleitungen für den Cone-Heizer (Thermoelemente und Stromversorgung), für die Wiegeeinrichtung und die Zündelektroden (Motorsteuerung und Hochspannungsversorgung) werden durch die Rückwand geführt. Außerdem kann der Messaufnehmer für die Einstellung der Strahlungsflussdichte (Schmidt-Boelter-Sonde) angeschlossen und mit Kühlwasser versorgt werden. Zusätzlich wurde eine Anschluss für die Methanversorgung des Kalibrierbrenners montiert.

In der Rückwand befindet sich eine Aussparung, in die das Gegengewicht der Schwenkvorrichtung für die Zündelektroden hineinragt. Das Gesamtvolumen der Kammer (ohne Einbauten) ist mit ca. 130 l erheblich kleiner als beim amerikanischen bzw. australischen „controlled atmosphere“ Cone-Calorimeter [B-18, B-20]. Das gegenüber dem skandinavischen „ventilation controlled“ Cone-Calorimeter größere Kammervolumen ist ein Kompromiss, der daraus resultiert, dass möglichst viele Komponenten des ursprünglichen Cone-Calorimeters zu verwenden waren und das die Untersuchungsmöglichkeiten (vertikale Probenanordnung) nicht eingeschränkt werden sollten. Die Erfahrung hat gezeigt, dass ein gewisses Volumen oberhalb der Probe notwendig ist, damit sich eine Diffusionsflamme bilden kann.

Über einen elektronischen Massenstromregler wird gefilterte und weitgehend getrocknete Pressluft von unten in die Kammer eingeblasen. Damit die einströmende Luft nicht die Wiegeeinrichtung bzw. Gewichtsmessung stört, ist unterhalb der Plattform ein Prallblech (in Bild B.2 nicht dargestellt) angebracht, das den Gasstrom horizontal ablenkt. Die Zuluft strömt dann vierseitig zwischen Kammerwand und Wiegezelle nach oben. Wegen des großen Querschnitts ist die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Materialprobe gering und stört nicht die Flamme. Die Rauchgase strömen durch das vertikale Rohr an den Entnahmesonden vorbei und treten dann erst aus, um vom Absaugsystem übernommen zu werden.

Der elektronische Massenstromregler ist vom Hersteller für einen Regelbereich bis maximal 1000 l min^{-1} (Volumen bezogen auf 20 °C) kalibriert worden ²⁾. Damit schließt das Intervall der in der Cone-Kammer einstellbaren Zuluftmenge unmittelbar an den Einstellbereich von $20 - 30 \text{ l s}^{-1}$ ($1200 - 1800 \text{ l min}^{-1}$) des Cone-Calorimeters an. Die vorhandene Pressluftversorgung lässt allerdings im Dauerbetrieb vorerst nur einen maximalen Volumenstrom von ca. 400 l min^{-1} zu.

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

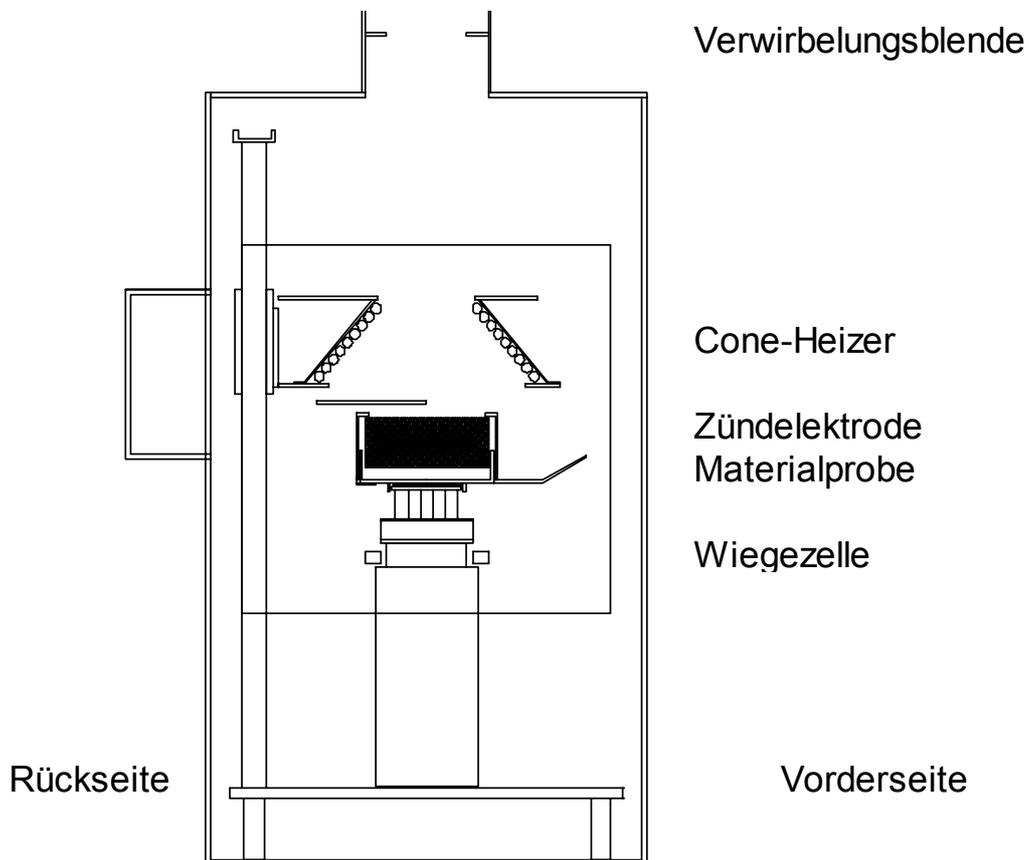


Bild B.2 Aufbau der Cone-Kammer, Seitenansicht

²⁾ Bezugstemperatur 20 °C gegenüber 25 °C für die Faktoren der Sauerstoffkalorimetrie

Für die Bestimmung der Rauchgaszusammensetzung wird die Gasanalysestrecke des Cone-Calorimeters verwendet. Von Anfang an war zu erwarten, dass der Messbereich für Kohlenmonoxid und Kohlendioxid beim Gasanalysator des Cone-Calorimeters zu klein sein würde. Daher wurde ein zweiter, baugleicher CO_2 -/CO-Analysator mit größerem Messbereich hinter den vorhandenen geschaltet (Bild B.3). Die Reihenschaltung der beiden CO_2 -/CO-Analysatoren hat nebenher den Vorteil, dass bis zum Erreichen der Messbereichsgrenze die höhere Empfindlichkeit des ursprünglichen CO_2 -/CO-Analysators genutzt werden kann.

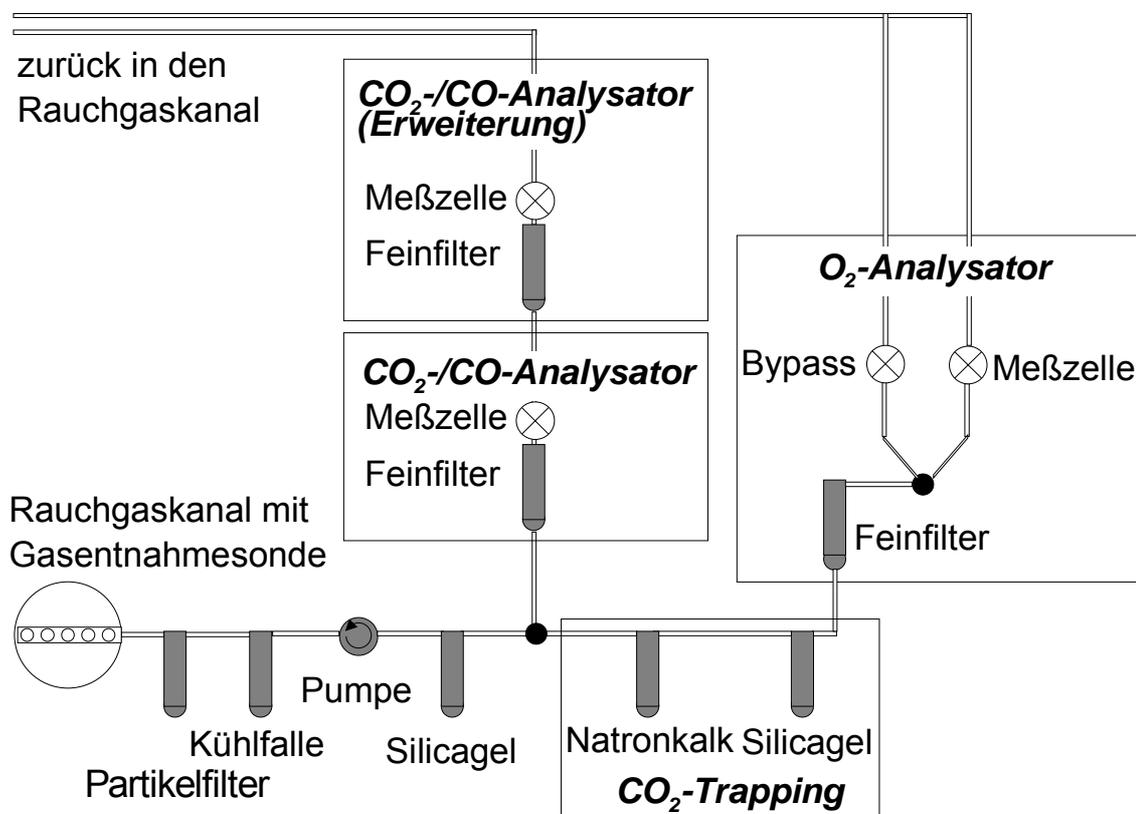


Bild B.3 Aufbau der Gasanalysestrecke mit H_2O -Trapping und CO_2 -Trapping für die Cone-Kammer mit Erweiterung durch CO_2 /CO-Analysator

Da bei der selbstentwickelten Cone-Kammer, im Gegensatz zu den in Abschnitt B.2.3 beschriebenen „ventilation controlled“ Cone-Calorimeter, die Gasentnahme vor dem Mischen mit Umgebungsluft erfolgt, wird die Rauchgaszusammensetzung in einem geschlossenen System real erfasst. Eine eventuelle weitere Verbrennung nach Zusammentreffen mit Umgebungsluft kann auch hier auftreten, wird aber nicht in die

Bewertung einbezogen, da die Probenentnahme vor dem Zusammentreffen mit Umgebungsluft und damit vor einer derartigen „Nachverbrennung“ erfolgt.

Diese Form der Rauchgasführung und Gasanalyse stellt ein geschlossenes System dar. Da die Zuluftmenge geregelt und gemessen wird, können einerseits die „einfachen“ Gleichungen zur Berechnung der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid-Volumenstromänderung angewendet werden. Annahmen, die die Rauchgasexpansion berücksichtigen und zusätzliche systematische Fehler in das Auswertungsverfahren bringen, müssen nicht getroffen werden. Andererseits kann die Zuluftmenge mit Hilfe des verwendeten Volumenstromreglers sehr genau eingestellt und gesteuert werden. Eine Kalibrierung des sauerstoffkalorimetrischen Systems (Bestimmung der Gerätekonstante), wie sie beim Cone-Calorimeter mit einem Methanbrenner mindestens täglich durchgeführt werden muss, ist nicht notwendig.

Da die Plattform vom Cone-Calorimeter ohne Veränderungen übernommen wird, sind die meisten „Handgriffe“ bei der Versuchsdurchführung identisch mit denen beim Experimentieren im Cone-Calorimeter. Die Erfahrungen bei der Versuchsvorbereitung, bei der Einstellung der Strahlungsflussdichte, bei der Probenpräparation und bei der Versuchsdurchführung können im Wesentlichen übernommen werden.

In der beschriebenen Form kann mit der Cone-Kammer das Brandverhalten in Abhängigkeit von der Zuluftmenge untersucht werden. Es ist aber auf technisch einfache Weise auch die Untersuchung in Abhängigkeit von der Zuluftzusammensetzung möglich. Für diesen Zweck müsste eine ausreichend dimensionierte Stickstoffversorgung aufgebaut werden und die Zuluftzuleitung mit einem zusätzlichen elektronischen Massenstromregler und einem Gasmischer nachgerüstet werden. Eine Bestimmung des Sauerstoffgehalts auf der Zuluftseite wäre für die Überwachung hilfreich, aber nicht notwendig, wenn ein ähnlich präziser Massenstromregler für den Stickstoffzustrom verwendet würde.

Auch in finanzieller Hinsicht war der Aufbau einer eigenständigen Kammer unter Nutzung der für das Cone-Calorimeter vorhandenen Komponenten günstiger als der Umbau des Cone-Calorimeters nach amerikanischem oder australischem Muster (siehe Abschnitt B.2.2).

B.3.2 Sauerstoffkalorimetrisches Messsystem und Auswertung

B.3.2.1 Messgrößen

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert und in Bild B.3 dargestellt, wird eine Gasanalysestrecke mit H₂O-Trapping vor den CO₂-/CO-Analysatoren und dem zusätzlichen CO₂-Trapping vor dem O₂-Analysator eingesetzt. Die Zuluftmenge wird mit einem elektronischen Massenstromregler eingestellt und erfasst. Außerdem steht eine Wiegevorrichtung für die Messung der Probenmasse zur Verfügung. Im Rauchgasrohr ist eine Blende angebracht, über die der Druckabfall bestimmt werden kann. Außerdem wird die Rauchgastemperatur gemessen. Zusätzlich können für die Einstellung, Kalibrierung und Überwachung der Methangasmassenstrom, die Heizer-Temperatur, die Strahlungsflussdichte, die Temperatur der Kühlfalle und der Zellendruck des paramagnetischen O₂-Analysators als Messgrößen erfasst werden. Der Zeitpunkt für den Versuchsbeginn oder die Entzündung kann als Statussignal (elektrische Spannung) eines Schalters in die Datenaufzeichnung übernommen werden.

Tabelle B.1 Messgrößen für die Sauerstoffkalorimetrie

Sauerstoffgehalt nach H ₂ O-Trapping und CO ₂ -Trapping in der Zuluft und im Rauchgas	$X_{O_2}^{Pa,0}$, $X_{O_2}^{Pa,s}$
Kohlendioxidgehalt nach H ₂ O-Trapping in der Zuluft und im Rauchgas	$X_{CO_2}^{Pa,0}$, $X_{CO_2}^{Pa,s}$
Kohlenmonoxidgehalt nach H ₂ O-Trapping in der Zuluft und im Rauchgas	$X_{CO}^{Pa,0}$, $X_{CO}^{Pa,s}$
Zuluftvolumenstrom	\dot{V}_{298}^0
Probenmasse	m
Rauchgastemperatur (nicht für Sauerstoffkalorimetrie notwendig)	T ^s
Differenzdruck, Druckabfall über der Blende im Rauchgasrohr (nicht für Sauerstoffkalorimetrie notwendig)	Δp

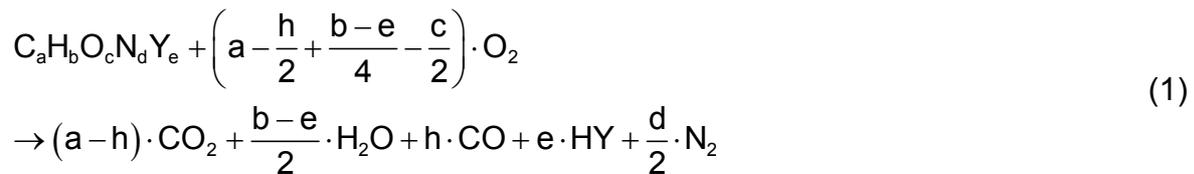
B.3.2.2 Festlegung der materialspezifischen Eigenschaften

Neben den in Tabelle B.1 zusammengefassten Messgrößen ist für die Anwendung der im Abschnitt A.5.2 hergeleiteten Gleichungen zur Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs bzw. der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidentstehung die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs notwendig. Die Kenntnis der Summenformel zusammen mit dem Heizwert erlaubt die Festlegung des materialspezifischen

schen O_2 -Faktors (Abschnitt A.2.2) und des stöchiometrischen Luftbedarfs (Abschnitt A.2.6).

Die wesentlichen Gleichungen zur Festlegung der materialspezifischen Eigenschaften lauten:

1. Summenformel und Reaktionsgleichung, siehe Abschnitt A.2 Gleichung (2.1):



2. Materialspezifischer O_2 -Faktor, siehe Abschnitt A.2.2 Gleichung (2.6), Molmassen gemäß Tabelle A.1:

$$E_{O_2, M}^V = \frac{H_u \cdot (a \cdot M_C + b \cdot M_H + c \cdot M_O + d \cdot M_N + e \cdot M_Y)}{-\left(a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2} \right)} \cdot \frac{1}{V_{m,0}} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}} \quad 3) \quad (2)$$

3. Stöchiometrischer Luftbedarf, siehe Abschnitt A.2.6 Gleichung (2.17) bzw. (2.18):

$$r = \frac{a + \frac{b-e}{4} - \frac{c}{2}}{a \cdot M_C + b \cdot M_H + c \cdot M_O + d \cdot M_N + e \cdot M_Y} \cdot V_{m,0} \cdot \frac{1}{X_{O_2}^0} \cdot \rho_0^0 \quad (3)$$

$$= \frac{H_u}{-E_{O_2, M}^V} \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}} \cdot \frac{1}{X_{O_2}^0} \cdot \rho_0^0$$

4. Dichte von Luft, Molvolumen und 0-Punkt der „Celsius-Skala“

$$\rho_0^0 = 1,293 \text{ kg m}^{-3} \quad V_{m,0} = 0,00224136 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \quad T_0 = 273,15 \text{ K}$$

Mit den Gleichungen (1), (2) und (3) werden die materialabhängigen Parameter festgelegt. Für die untersuchten Materialien war die chemische Zusammensetzung durch massenspektroskopische Analyse bestimmt worden. Der Heizwert war gemäß DIN 51900 [B-23, B-24, B-25] gemessen worden.

³⁾ Der O_2 -Faktor besitzt ein negatives Vorzeichen.

B.3.2.3 Berechnungen

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt A.2.4 kann mit Hilfe des Sauerstoffverbrauchs und der Kohlenmonoxidstehung die Energiefreisetzung unter Berücksichtigung einer eventuell vorliegenden unvollständigen Verbrennung bestimmt werden. Außerdem lassen sich mit dem aus der Gewichtsmessung berechneten Massenverlust bzw. der Abbrandrate die effektive Verbrennungswärme, die Kohlendioxid- und die Kohlenmonoxidausbeute berechnen.

Zur Berechnung der wesentlichen Ergebnisgrößen wurden verwendet:

1. Stickstoffanteil nach H₂O-Trapping in der Zuluft und im Rauchgas, siehe Abschnitt A.4 Gleichung (4.10):

$$\begin{aligned} X_{N_2}^{t,0} &= 1 - X_{O_2}^{Pa,0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,0}) - X_{CO_2}^{t,0} - X_{CO}^{t,0} \\ X_{N_2}^{t,s} &= 1 - X_{O_2}^{Pa,s} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,s}) - X_{CO_2}^{t,s} - X_{CO}^{t,s} \end{aligned} \quad (4)$$

2. Stickstoffanteil nach H₂O-Trapping und CO₂-Trapping in der Zuluft und im Rauchgas, siehe Abschnitt A.4 Gleichung (4.10):

$$X_{N_2}^{Pa,0} = 1 - X_{O_2}^{Pa,0} - \frac{X_{CO}^{t,0}}{1 - X_{CO_2}^{t,0}} \quad X_{N_2}^{Pa,s} = 1 - X_{O_2}^{Pa,s} - \frac{X_{CO}^{t,s}}{1 - X_{CO_2}^{t,s}} \quad (5)$$

3. Volumenverhältnis Sauerstoff zu Stickstoff in der Zuluft und im Rauchgas, siehe Abschnitt A.4 Gleichung (4.7):

$$Z_{O_2/N_2}^0 = \frac{X_{O_2}^{Pa,0}}{X_{N_2}^{Pa,0}} \quad Z_{O_2/N_2}^s = \frac{X_{O_2}^{Pa,s}}{X_{N_2}^{Pa,s}} \quad (6)$$

4. Volumenverhältnis Kohlendioxid bzw. Kohlenmonoxid in der Zuluft und im Rauchgas, siehe Abschnitt A.4 Gleichung (4.7):

$$\begin{aligned} Z_{CO_2/O_2}^0 &= \frac{X_{CO_2}^{t,0}}{X_{O_2}^{Pa,0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,0})} & Z_{CO_2/O_2}^s &= \frac{X_{CO_2}^{t,s}}{X_{O_2}^{Pa,s} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,s})} \\ Z_{CO/O_2}^0 &= \frac{X_{CO}^{t,0}}{X_{O_2}^{Pa,0} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,0})} & Z_{CO/O_2}^s &= \frac{X_{CO}^{t,s}}{X_{O_2}^{Pa,s} \cdot (1 - X_{CO_2}^{t,s})} \end{aligned} \quad (7)$$

5. Molare Kohlenmonoxidausbeute, siehe Abschnitt A.5.2 Gleichung (5.13):

$$h = \frac{(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e) \cdot \left(Z_{\text{CO/O}_2}^0 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO/O}_2}^s \right) + (Z_{\text{CO/O}_2}^s - Z_{\text{CO/O}_2}^0) \cdot Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s \cdot 2 \cdot d}{2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} \cdot Z_{\text{CO/O}_2}^s - Z_{\text{CO/O}_2}^0 - 2 \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \right)} \quad (8)$$

6. Korrekturwert für stickstoffhaltige Brennstoffe, siehe Abschnitt A.5.2 Gleichung (5.10):

$$\Delta_{\text{N}_2} = 1 - \frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s \cdot 2 \cdot d}{-(4 \cdot a + b - 2 \cdot c - e - 2 \cdot h)} \quad (9)$$

7. Änderung des Sauerstoffvolumenstroms, siehe Abschnitt A.5.2 Gleichung (5.9):

$$\Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot \frac{X_{\text{O}_2}^0}{\Delta_{\text{N}_2}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \quad 4) \quad (10)$$

8. Änderung des Kohlendioxidvolumenstroms, siehe Abschnitt A.5.2 Gleichung (5.15):

$$\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}_2} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{\text{O}_2}^0 \cdot \left(Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^s \cdot \left(1 + \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta_{\text{N}_2}} \right) - Z_{\text{CO}_2/\text{O}_2}^0 \right) \quad (11)$$

9. Änderung des Kohlenmonoxidvolumenstroms, siehe Abschnitt A.5.2 Gleichung (5.15):

$$\Delta \dot{V}_{298, \text{CO}} = \dot{V}_{298}^0 \cdot X_{\text{O}_2}^0 \cdot \left(Z_{\text{CO/O}_2}^s \cdot \left(1 + \left(\frac{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^s}{Z_{\text{O}_2/\text{N}_2}^0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta_{\text{N}_2}} \right) - Z_{\text{CO/O}_2}^0 \right) \quad (12)$$

10. Energiefreisetzungsrate bzw. relative Energiefreisetzungsrate, siehe Abschnitt A.2.4 Gleichung (2.14):

$$\dot{q} = E_{\text{O}_2, \text{M}}^V \cdot \Delta \dot{V}_{298, \text{O}_2} - \Delta \dot{V}_{298, \text{CO}} \cdot \frac{-E_{\text{O}_2, \text{M}}^V - 23100 \text{ kJ m}^{-3}}{2} \quad 5) \quad (13)$$

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{A}$$

4) Die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms besitzt ein negatives Vorzeichen.

5) Änderung des Sauerstoffvolumenstroms und O₂-Faktor besitzen ein negatives Vorzeichen.

11. Abbrandrate bzw. relative Abbrandrate (numerische Ableitung) gemäß ISO 5660

[B-5]:

$$\begin{aligned}
 -\dot{m}(t_1) &= \frac{25 \cdot m(t_1) - 48 \cdot m(t_2) + 36 \cdot m(t_3) - 16 \cdot m(t_4) + 3 \cdot m(t_5)}{3 \cdot (t_5 - t_1)} \\
 -\dot{m}(t_2) &= \frac{10 \cdot m(t_1) + 3 \cdot m(t_2) - 18 \cdot m(t_3) + 6 \cdot m(t_4) - m(t_5)}{3 \cdot (t_5 - t_1)} \\
 -\dot{m}(t_{3 \leq i \leq n-2}) &= \frac{-m(t_{i-2}) + 8 \cdot m(t_{i-1}) - 8 \cdot m_{i+1} + m(t_{i+2})}{3 \cdot (t_{i-2} - t_{i+2})} \\
 -\dot{m}(t_{i=n-1}) &= \frac{-10 \cdot m(t_n) - 3 \cdot m(t_{n-1}) + 18 \cdot m(t_{n-2}) - 6 \cdot m(t_{n-3}) + m(t_{n-4})}{3 \cdot (t_{n-4} - t_n)} \\
 -\dot{m}(t_{i=n}) &= \frac{-25 \cdot m(t_n) + 48 \cdot m(t_{n-1}) - 36 \cdot m(t_{n-2}) + 16 \cdot m(t_{n-3}) - 3 \cdot m(t_{n-4})}{3 \cdot (t_{n-4} - t_n)}
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{m}}{A}$$

mit i Index des Zeitpunktes
 n Anzahl der Messzyklen, Index des letzten Messzyklus
 t_i Zeit für i -ten Datensatz
 $m(t_i)$ Masse
 $-\dot{m}(t_i)$ Abbrandrate als Betrag von $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ bzw. $\frac{dm(t)}{dt}$

12. Effektive Verbrennungswärme:

$$\Delta H_{c,eff} = \frac{\dot{q}}{-\dot{m}} \tag{15}$$

13. Verbrennungseffektivität, siehe Abschnitt A.2.1 Gleichung (2.4):

$$\chi = \frac{\Delta H_{c,eff}}{H_u} \tag{16}$$

14. Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute:

$$Y_{CO_2} = \frac{\Delta \dot{V}_{298,CO_2}}{\dot{m}} \cdot 1,7989 \frac{kg}{m^3} \tag{17}$$

$$Y_{CO} = \frac{\Delta \dot{V}_{298,CO}}{\dot{m}} \cdot 1,1449 \frac{kg}{m^3} \tag{18}$$

15. Zuluftverhältnis, siehe Abschnitt A.2.6 Gleichung (2.20):

$$ZLV = \frac{\dot{V}_{298}^0}{\dot{m} \cdot r} \cdot \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}} \quad (19)$$

Schrittweise lassen sich, beginnend mit Gleichung (4) und endend mit Gleichung (19), alle wesentlichen Größen zeitabhängig berechnen.

Für die Bewertung des Abbrandverhaltens wesentlich sind der zeitliche Verlauf und die Mittelwerte über bestimmte Zeitintervalle der Ergebnisgrößen

- Energiefreisetzungsrate bzw. relative Energiefreisetzungsrate,
- Abbrandrate bzw. relative Abbrandrate,
- effektive Verbrennungswärme bzw. Verbrennungseffektivität,
- Kohlendioxidausbeute,
- Kohlenmonoxidausbeute und
- Zuluftverhältnis.

Die mittlere Abbrandrate über ein vorgegebenes Zeitintervall ergibt sich aus der Differenz der Probenmasse zu Beginn und am Ende des Intervalls. Zusätzlich kann durch numerische Integration der Energiefreisetzungsrate, der Änderung des Kohlendioxid- bzw. Kohlenmonoxidvolumenstroms über ein bestimmtes Zeitintervall und anschließende Division durch die Differenz der Probenmasse der Mittelwert für die effektive Verbrennungswärme, die Kohlendioxid- bzw. Kohlenmonoxidausbeute bestimmt werden.

B.3.2.4 Datenerfassung und Umrechnung

Die Thermoelemente sind direkt an den Datenlogger angeschlossen. Dieser besitzt eine Referenz, so dass die Thermospannung unmittelbar in eine Temperatur umgerechnet werden kann. Bei den anderen Messaufnehmern werden die analogen elektrischen Signale (elektrische Gleichspannung) auf diese Mehrkanal-Datenerfassungsanlage aufgeschaltet. In vorgegebenen Zeitintervallen (0,5 s) werden die Mess-

werte digitalisiert und zur Sicherung auf einen Personalcomputer im ASCII-Format übertragen. Die weitere Bearbeitung dieser Daten und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt nach Abschluss des Versuchs mit einem handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramm und einem selbstentwickelten BASIC-Programm.

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

Für den Druckaufnehmer und Volumenstromregler für die Zuluft wird vor jedem Versuch die Offsetspannung (0-Punktabweichung) ermittelt. Diese wird vor der Umrechnung der gemessenen Spannung in die eigentliche Messgröße berücksichtigt.

Für die eingesetzten Gasanalysatoren wird täglich eine Kalibrierung durchgeführt. Hierfür wird zum einem der Nullpunkt / die Offsetspannung mit Hilfe von reinem Stickstoffgas N_2 ermittelt, zum anderen wird zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors ein Kalibriergas, das einen definierten Anteil des zu messenden Gases enthält, dem jeweiligen Gasanalysator zugeleitet und die elektrische Spannung bestimmt. Mit der Offsetspannung und dem Umrechnungsfaktor kann dann der Gasanteil während der Versuche aus der Ausgangsspannung berechnet werden. Die genannten Umrechnungen der gemessenen Werte erfolgen nicht direkt während eines Experiments, sondern erst im Rahmen der Datenaufbereitung. Auf diese Weise kann mit einer maximalen Datenerfassungsfrequenz (2 Hz) gemessen werden.

Da die verwendeten Gasanalysatoren linear arbeiten, können über zwei Punkte die Parameter für die Geradengleichung festgelegt werden. Dazu müssen für die beiden Kalibriergase K1 und K2 die Volumenanteile X_{K1} und X_{K2} bekannt sein und die Ausgangsspannungen U_{K1} und U_{K2} gemessen werden. Der Volumenanteil $X(t)$ während eines Experiments berechnet sich mit Hilfe der Ausgangsspannung $U(t)$ und den Ergebnissen aus der Kalibrierung wie folgt:

$$X(t) = \frac{X_{K2} - X_{K1}}{U_{K2} - U_{K1}} \cdot (U(t) - U_{K2}) + X_{K2} = \frac{X_{K2} - X_{K1}}{U_{K2} - U_{K1}} \cdot (U(t) - U_{K1}) + X_{K1} \quad (20)$$

Meist wird zum einen ein „Nullgas“ (99,999 % reiner Stickstoff) und zum anderen ein Kalibriergas (getrocknete Luft für den O₂-Analysator, Gemisch aus Stickstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid für die CO₂-/CO-Analysatoren mit 75 % - 95 % des Messbereichs) verwendet. Die obige Gleichung (20) vereinfacht sich dann zu der in [B-3, B-4] genannten Form:

$$X(t) = (U(t) - U_0) \cdot \frac{X_k}{U_k - U_0} \quad (21)$$

- X_k: Anteil der Komponente im Kalibriergas [1]
- U_k: Spannung für Anteil X_k [V]
- mit U₀: Offsetspannung, Messung mit 0-Gas [V]
- U(t): Spannung [V]
- X(t): Anteil der Komponente [1]

Bei den Versuchen werden die Messwerte im Takt von 0,5 s aufgezeichnet. Die endgültige Auswertung erfolgt aber für größere Zeitintervalle (z. B. 5 s). Daher werden die ursprünglich aufgezeichneten Messwerte (z. B. Spannung) vor Umrechnung in die physikalische Größe geglättet, d. h. es wird der endgültige Wert der Größe als Resultat einer fortlaufenden linearen Regression über die ursprünglichen Messwerte im festgelegten Zeitintervall um den Berechnungszeitpunkt bestimmt. Somit kann auch für einen Zeitpunkt, an dem die Messwertgeber nicht abgefragt wird, ein Wert bestimmt werden. Bei dieser Umrechnung wird auch die zeitliche Verzögerung in der Messung bei Gasanalysatoren (Ansprechzeit), die durch die Zuführung des Gasgemischs von der Kammer über die Gasentnahmesonde und die Gasaufbereitung (Filter) auftritt, berücksichtigt.

Für die fortlaufende lineare Regression wird die „Regressionsgerade für bestmögliche Voraussage von Y bei gegebenem Wert von X“ gewählt, da die Variable Zeit mit einem erheblich geringeren Fehler als die Variable Messwert bestimmt werden kann.

$$\begin{aligned}
 n &= i_{\text{Ende}} - i_{\text{Start}} + 1 \\
 \bar{t} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} t_i & \bar{y} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} y_i \\
 r &= \frac{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (t_i - \bar{t}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (y_i - \bar{y})^2}} & y(t) &= r \cdot \frac{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=i_{\text{Start}}}^{i_{\text{Ende}}} (t_i - \bar{t})^2} \cdot (t - \bar{t}) + \bar{y}
 \end{aligned} \tag{22}$$

- $i_{\text{Start}}, i_{\text{Ende}}$: Index des ersten bzw. letzten Datensatzes
 n : Anzahl der Datensätze
 t_i : Zeit, i-te Messung [s]
 \bar{t} : Mittelwert der Zeit [s]
 mit y_i : Messwert, i-te Messung [Einheit]
 \bar{y} : Mittelwert des Messwerts [Einheit]
 r : empirischer Korrelationskoeffizient [s]
 $y(t)$: gemittelter Wert zum Zeitpunkt t [Einheit]

Es hat sich als günstig erwiesen, die Messwertgeber mit hoher Frequenz abzufragen und die Daten nachträglich zu reduzieren. Bei einer Abfrage mit niedriger Frequenz (großen Pausen) können keine Aussagen über Streuung bzw. Rauschen der Signale gemacht werden. Im Vorfeld wurde außerdem geprüft, ob es ausreicht, den abschließenden Wert allein durch eine einfache Mittelwertbildung zu bestimmen. Die gewählte Vorgehensweise mit der fortlaufenden linearen Regression ist aber der einfachen Mittelwertbildung überlegen, da auch zeitliche Änderungen des Signals berücksichtigt werden. Das Ergebnis einer derartigen Glättung ist am Beispiel der Ausgangsspannung der Wiegezeile in Diagramm B.2 dargestellt.

Mit der „fortlaufenden linearen Regression“ werden auch die „geglätteten“ zeitlichen Verläufe ermittelt. Die im Zusammenhang mit der „Glättung“ genannte „Anzahl der Nachbarn“ N besagt, dass N zeitlich vorherliegende Werte, der Wert selbst und N folgende Werte, also $2 \times N + 1$ Werte benutzt werden, z. B. wenn bei einem Messintervall von 5 s auch $N = 5$ Nachbarn einbezogen werden, dann werden 11 Werte betrachtet und die Intervallbreite beträgt $25 \text{ s} + 25 \text{ s} = 50 \text{ s}$.

Zur Bestimmung von Mittelwerten über bestimmte Zeitintervalle werden vorbereitend die Energiefreisetzungsrate ($W = \text{J s}^{-1}$), die Kohlendioxid- oder die Kohlenmonoxid-

entstehungsrate (kg s^{-1}) aufsummiert und daraus die Gesamtenergiefreisetzung (J), die Kohlendioxid- oder die Kohlenmonoxidbildung (kg) gebildet.

Für die Auswertung und graphische Darstellung der Versuche in der Cone-Kammer wird ein eigenes Basic-Programm benutzt, das auf der Umgebung des Tabellenkalkulationsprogramms STATISTICA abläuft.

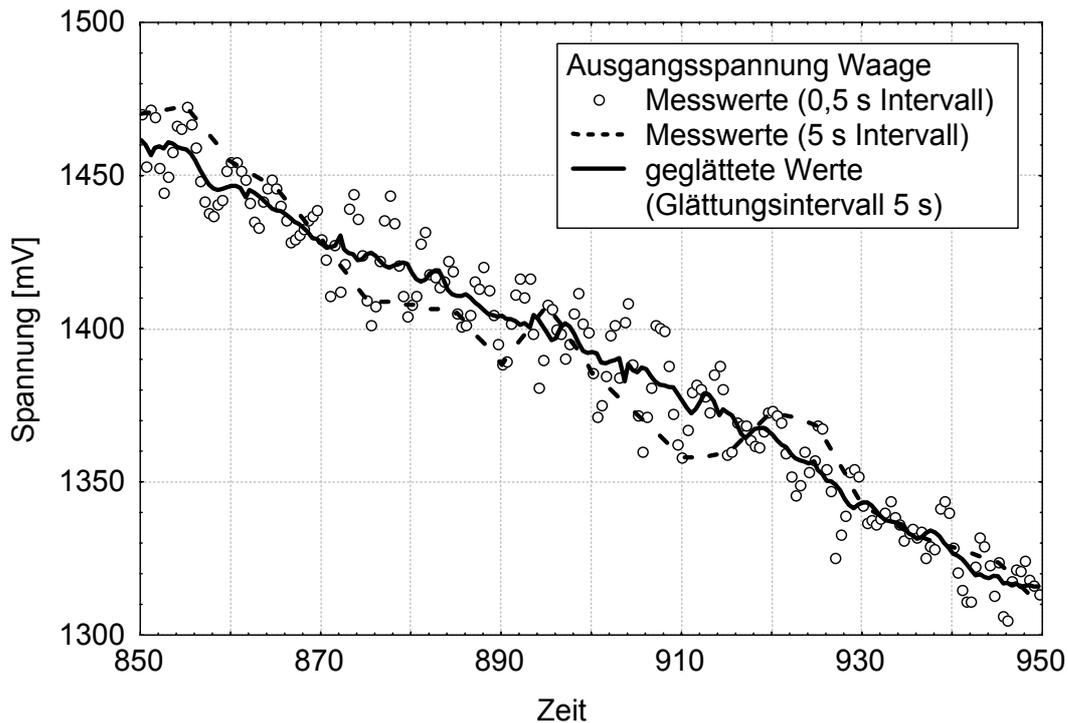


Diagramm B.2 Vergleich von Messung und geglätteten Werten für die weitere Auswertung (am Beispiel des Ausgangssignals der Wiegezelle)

B.3.2.5 Festlegung der zeitlichen Intervalle für die Mittelwertbildung

Die Grenzen eines Zeitintervalls für die Mittelwertbildung sollten nicht willkürlich festgesetzt werden. Vielmehr ist es notwendig, ein Verfahren für diese Festsetzung zu definieren, das unabhängig von den Versuchsrandbedingungen angewendet werden kann. Dieses Verfahren sollte außerdem für die parallel durchgeführten Raumbrandversuche angewendet werden können, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zum Abbrandverhalten in unterschiedlichen Maßstäben zu gewährleisten.

Im Vorfeld zu den Versuchen in der Cone-Kammer wurde bezüglich der Auswertung und der Berechnung von Mittelwerten für die relative Energiefreisetzungsrate, die

relative Abbrandrate, die effektive Verbrennungswärme und die Ausbeuten von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid eine Verfahrensweise festgelegt. Analog zur Beurteilung des Brandverhaltens von Baustoffen gemäß ISO 5660 [B-5] werden vier Intervalle mit Begrenzung durch Zeitkriterien übernommen:

- „insgesamt“: untere Grenze = Versuchbeginn,
obere Grenze = Versuchende.
Es wird über die gesamte Versuchsdauer gemittelt. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Versuch beendet wird, wenn der Sauerstoffgehalt der Abluft / des Rauchgases annähernd auf den ursprünglichen Wert (ohne Verbrennung) zurückgegangen ist, eine Verbrennung also nicht mehr nachweisbar ist.
- „ab Entzündung“: untere Grenze = Zündzeitpunkt,
obere Grenze = Versuchende.
Es wird über die Dauer der Verbrennung mit offener Flamme gemittelt. Daher beginnt das Intervall mit der Entzündung. Für das Versuchende gelten die o. g. Voraussetzungen.
- „180 s“: untere Grenze = Zündzeitpunkt,
obere Grenze = Zündzeitpunkt + 180 s.
Die ersten drei Minuten der Verbrennung, beginnend mit der Entzündung, sind ausschlaggebend für die Mittelwertbestimmung.
- „300 s“: untere Grenze = Zündzeitpunkt,
obere Grenze = Zündzeitpunkt + 300 s.
Die ersten fünf Minuten der Verbrennung, beginnend mit der Entzündung, sind ausschlaggebend für die Mittelwertbestimmung.

Zusätzlich wird eine Verfahrensweise zur Festsetzung der Intervallgrenzen neu definiert, die auf dem Verlauf der Energiefreisetzungsrate beruht:

- „x %-Kriterium“ untere Grenze = frühester Zeitpunkt, an dem die Energiefreisetzungsrate gleich x % der maximalen Energiefreisetzungsrate überschritten wird,

obere Grenze = spätestester Zeitpunkt, an dem die Energiefreisetzungsrates gleich $x\%$ der maximalen Energiefreisetzungsrates unterschritten wird.

Es wurden die Grenzwerte von 0% , 5% , 10% , 25% und 50% vorgegeben.

Abschließend wird eine Verfahrensweise auf Basis des Massenverlustes aus der ISO 5660 [B-5] übernommen:

„MLR 10-90 %“: untere Grenze = Zeitpunkt, zu dem 10% der insgesamt verbrannten Brennstoffmasse umgesetzt sind,
obere Grenze = Zeitpunkt, zu dem 90% der insgesamt verbrannten Brennstoffmasse umgesetzt sind.

In dieser Form wurde für die Cone-Kammer ein Zeitintervall über den Massenverlust festgelegt.

Das letztgenannte Kriterium wurde in abgewandelter Form (untere Grenze 80%) auch für die Auswertung von Raumbrandversuchen angewendet, die im Rahmen der Optimierung von Nachweismethoden für Chemikalienlager parallel zu den Experimenten in der Cone-Kammer [B-3, B-4] und zur Untersuchung der Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen für kerntechnische Anlagen [B-1, B-2] durchgeführt wurden. Hierbei ist es wichtig, sich auf die insgesamt umgesetzte Masse und nicht auf die Gesamtmasse der Probe zu beziehen, ansonsten können Fehlinterpretationen auftreten wie bei der Bestimmung der effektiven Verbrennungswärme im Rahmen der Erprobung des Cone-Calorimeters [B-15].

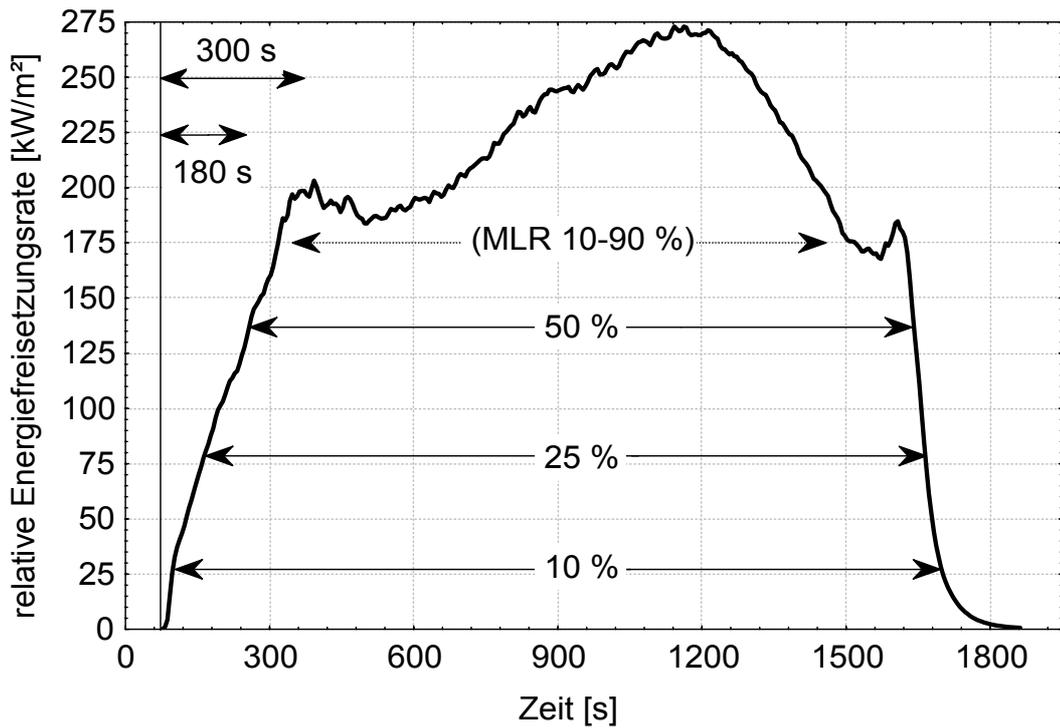


Diagramm B.3 Festlegung der Zeitintervalle für die Mittelwertbildung über den Verlauf der Energiefreisetzungsrate

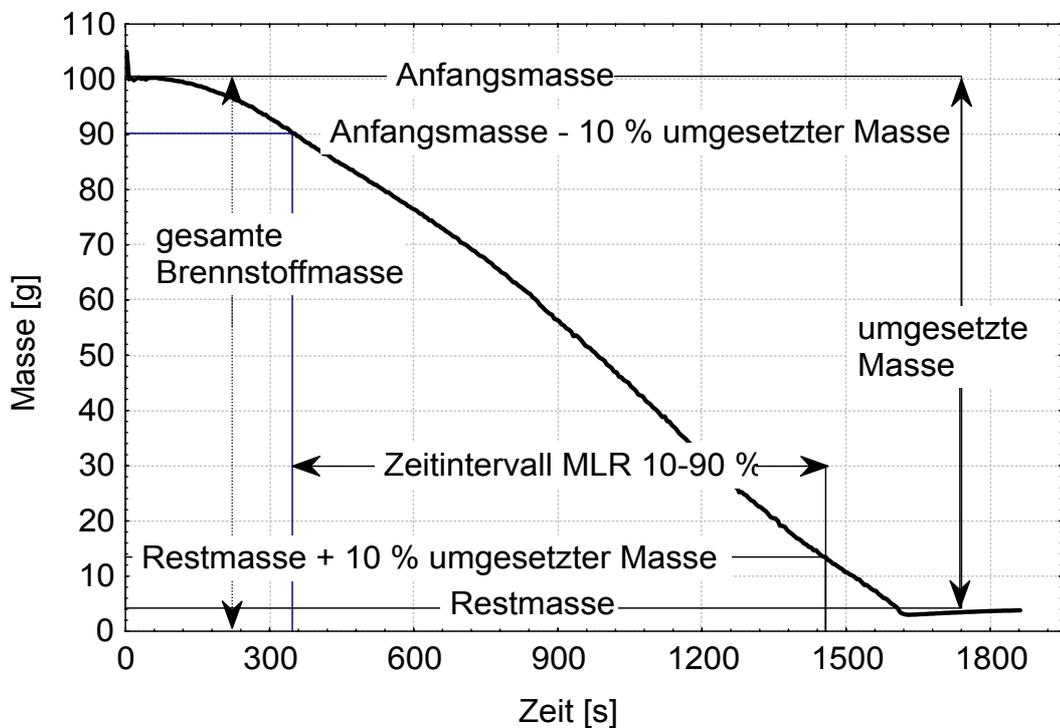


Diagramm B.4 Festlegung der Zeitintervalle für die Mittelwertbildung über den Massenverlust

In Diagramm B.3 sind der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrates und die daraus resultierenden Zeitintervalle für das „10 %-“, „25 %-“ und „50 %-Kriterium“ dargestellt. Zusätzlich sind in diesem Diagramm die Zeitintervalle „180 s“ und „300 s“ und „MLR 10-90 %“ eingetragen, wobei das letztgenannte Zeitintervall aus dem zugehörigen zeitlichen Verlauf der Probenmasse bestimmt wurde, exemplarisch dargestellt in Diagramm B.4.

Die in den Übersichten angegebenen bzw. in den Diagrammen des Anhang E eingetragenen Mittelwerte beziehen sich auf die wie oben beschrieben ermittelten Zeitintervalle.

B.3.3 Kalibrierung und Funktionsprüfung der Cone-Kammer

Analog zur ISO 5660 [B-5] wurde eine Arbeitsanweisung zusammengestellt, in der die mehr oder weniger häufig durchzuführenden Tätigkeiten beschrieben werden. Zu den beschriebenen Tätigkeiten gehören der Umbau des Experimentiertisches vom Cone-Calorimeter in die Cone-Kammer, die Herstellung aller notwendigen elektrischen Verbindungen und der Anschluss der erweiterten Gasanalysestrecke an die Entnahmesonde im Rauchgasrohr. Nach jeder Wiederinbetriebnahme der Kammer ist eine Funktionsprüfung notwendig, die über die Arbeiten der regelmäßigen Kalibrierung hinausgeht. Diese Tätigkeiten, die mit den weniger häufigen Kalibrierungen gemäß ISO 5660 [B-5] beim Cone-Calorimeter vergleichbar sind, basieren auf den Vorversuchen, die zum Test des experimentellen Aufbaus und zur Überprüfung und Absicherung des Auswertungsverfahrens durchgeführt wurden.

B.3.3.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Massenstromreglers für die Zuluft, des Massenstrommessers für Methan und der Schmidt-Boelter-Sonde (Messung der Strahlungsflussdichte) erfolgt in den vorgegebenen Zeitintervallen beim jeweiligen Gerätehersteller oder einem anerkannten Prüflabor. Die Thermoelemente waren kalibriert worden, bevor sie in die Cone-Kammer bzw. in den Cone-Heizer eingebaut wurden.

Die Kalibrierung der Gasanalysatoren ist die am häufigsten durchzuführende Tätigkeit. Sie ist zu Beginn eines jeden Versuchstages und nach jedem Wechsel der Fil-

termedien (Filterpapier, Silicagel, Natronkalk) und der dabei notwendigen Reinigung der Gasanalysestrecke erforderlich. Die Ergebnisse der Kalibrierung werden wie in Abschnitt B.3.2.4 beschrieben für die Datenerfassung und Auswertung übernommen.

Weniger häufig durchzuführen ist die Kalibrierung der Wiegezone mit geeichten Gewichten, da sie nur nach Änderung der Tara-Einstellung, Wiederinbetriebnahme nach längerem Stillstand oder Umbau des Experimentiertisches vom Cone-Calorimeter in die Cone-Kammer notwendig ist.

Zu den seltenen Kalibrierungen gehört die Überprüfung der Strahlungsflusscharakteristik (Diagramm B.1). In einer Vielzahl von Versuchen im Cone-Calorimeter und bei der wiederholten Vermessung in der Cone-Kammer hat sich gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Heizer-Temperatur und Strahlungsflussdichte keinen kurzfristigen Schwankungen unterworfen ist. Auch konnte bei fester Heizer-Temperatur keine Abhängigkeit der Strahlungsflussdichte vom Volumenstrom im Abzugssystem beim Cone-Calorimeter bzw. Zuluftvolumenstrom bei der Cone-Kammer nachgewiesen werden. Aufgrund der Versuchserfahrungen ist die Bestimmung der Strahlungsflusscharakteristik nur bei Wiederinbetriebnahme nach Umbau oder längerem Stillstand der Cone-Kammer notwendig.

Ebenfalls selten durchzuführen ist aus eigener Erfahrung die Bestimmung der Verzögerungszeiten für die Gasanalysatoren. Es ist ausreichend, diese Kalibrierung im Rahmen der Funktionsprüfung durchzuführen, sofern sichergestellt ist, dass die Leitungen der Gasanalysestrecke regelmäßig gereinigt werden und die Gasanalysestrecke bzw. die einzelnen Gasanalysatoren mit gleichbleibendem Volumenstrom betrieben werden. Da bei der Cone-Kammer zur Bestimmung der Energiefreisetzungsrates neben der Sauerstoffkonzentration auch die Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration in der Abluft in die Berechnungen eingeht, kann hier - im Gegensatz zum Cone-Calorimeter gemäß ISO 5660 [B-5] - keine übergreifende Systemansprechzeit definiert werden.

B.3.3.2 Funktionsprüfung

In diesem Arbeitsschritt, der nach dem Umbau des Experimentiertisches vom Cone-Calorimeter in die Cone-Kammer oder nach Wiederinbetriebnahme durchgeführt

wird, wird die Funktionsfähigkeit aller Messaufnehmer und der Datenerfassung geprüft. Dazu muss ein Feuer mit bekannter Energiefreisetzungsrate eingesetzt werden. Diese Quelle kann durch einen Gasbrenner mit bekanntem Brennstoffdurchsatz oder durch einen Feststoff mit bekannter, wenig variierender effektiver Verbrennungswärme simuliert werden. Geeignet als Feststoff wäre z. B. Polymethylmethacrylat PMMA, das beim Cone-Calorimeter für die Untersuchung der Streuung von Versuchsergebnissen eingesetzt wird [B-5].

Beim Cone-Calorimeter wird ein Methanbrenner für die tägliche Kalibrierung eingesetzt, bei der die sogenannte Gerätekonstante und die Systemansprechzeit bestimmt werden [B-5]. Zum Zweck der Funktionsprüfung und zur Validierung des Auswertungsverfahrens bei Erstinbetriebnahme der Cone-Kammer und bei allen weiteren Funktionsprüfungen wird dieser Methanbrenner mit zugehörigem Massenstrommesser ebenfalls verwendet. Dazu wird er in die Aufnahme am Gehäuse des Cone-Heizers eingesetzt und an die Gasversorgung angeschlossen. Um auch gleichzeitig das selbstentwickelte Auswertungsprogramm zu überprüfen, wird der zeitabhängige Methan-Massenstrom aufsummiert und so umgerechnet, dass das Signal der Abbrandwaage in der Messwertdatei simuliert werden kann.

Zur Vorbereitung werden die materialspezifischen Eigenschaften für Methan mit Hilfe der Gleichungen (1), (2) und (3) bestimmt (Tabelle B.2). Der Zusammenhang zwischen Zuluftvolumenstrom ⁶⁾ und Brennerleistung kann mit Gleichung (2.19) aus Abschnitt A.2.6 bestimmt werden.

⁶⁾ Die Volumenangaben sind zum Teil unübersichtlich, da die Bezugstemperaturen schwanken: 25 °C für Sauerstoffkalorimetrie, 0 °C für Normliter, 20 °C bei dem hier verwendeten Volumenstromregler.

Tabelle B.2 Eigenschaften von Methan

Summenformel	CH ₄
Heizwert	50 kJ g ⁻¹
Molmasse	16,04303 g mol ⁻¹
Dichte	0,715 kg m ⁻³
O ₂ -Faktor ⁷⁾	-16394 kJ m ⁻³
Luftbedarf ⁸⁾	17,2451 kg kg ⁻¹ 0,2912 m ³ MJ ⁻¹ 17,47 l min ⁻¹ kW ⁻¹ 16,01 ln min ⁻¹ kW ⁻¹

Mit Hilfe des letztgenannten Wertes in Tabelle B.2 kann auf einfache Weise der Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit vom gewünschten Zuluftverhältnis und der Brennerleistung eingestellt werden, wobei hier die üblicherweise bei Volumenstrommessern und -reglern benutzte Einheit Normliter „ln“, d. h. Volumen eines Liters bezogen auf die Temperatur von 0 °C, verwendet wird:

$$\dot{V}_0 = 16,01 [\text{ln min}^{-1} \text{ kW}^{-1}] \cdot \text{ZLV} \cdot \dot{q}_{\text{Brenner}} \quad (23)$$

Z. B. kann bei der Cone-Kammer mit dem maximalen, über einen längeren Zeitraum stabilen Zuluftvolumenstrom von ca. 400 ln min⁻¹ bei einer Brennerleistung von 5 KW ein maximales Zuluftverhältnis ZLV von 10 eingestellt werden. Mit dem vorhandenen Volumenstromregler (Regelbereich bis 1000 l min⁻¹) ließen sich bei größer dimensionierter Pressluftanlage entsprechend höhere Zuluftverhältnisse bzw. Brennerleistungen untersuchen.

Die Energiefreisetzungsrate wird bei den Versuchen zur Funktionsprüfung einerseits über den Zuluftvolumenstrom berechnet. Andererseits wird in Anlehnung an die Kalibrierung des Cone-Calorimeters gemäß ISO 5660 [B-5] mit Hilfe der Differenzdruck- und Temperaturmessung die Gerätekonstante C_G ermittelt. Mit Hilfe dieser Gerätekonstante kann der Abluftvolumenstrom über die Temperatur- und Differenzdruckmessung bestimmt und mit den Auswertungsverfahren für das Cone-Calorimeter ebenfalls die Energiefreisetzungsrate berechnet werden.

⁷⁾ Die Änderung des Sauerstoffvolumenstroms besitzt ein negatives Vorzeichen.

⁸⁾ [l]: Liter, Volumen bezogen auf 25 °C, [ln]: Normliter, Volumen bezogen auf 0 °C

⁹⁾ [ln]: Normliter, Volumen bezogen auf 0 °C

Für die Funktionsprüfung wird bei konstantem Zuluftvolumenstrom die Leistung des Methanbrenners in Stufen variiert. In Diagramm B.5 ist das Ergebnis eines dieser Versuche dargestellt. Hierbei wird bei einem konstanten Zuluftvolumenstrom von ca. 400 l min^{-1} der Methanbrenner für ca. 2 Minuten mit 0,5 kW und danach für ca. 4 Minuten mit 5 kW betrieben. Diese Leistungsniveaus werden gewählt, damit die Verbrennung mit einem erheblichen Luftüberschuss (100-fach bzw. 10-fach) abläuft und sichergestellt ist, dass die Verbrennung nicht durch Sauerstoffmangel reduziert wird.

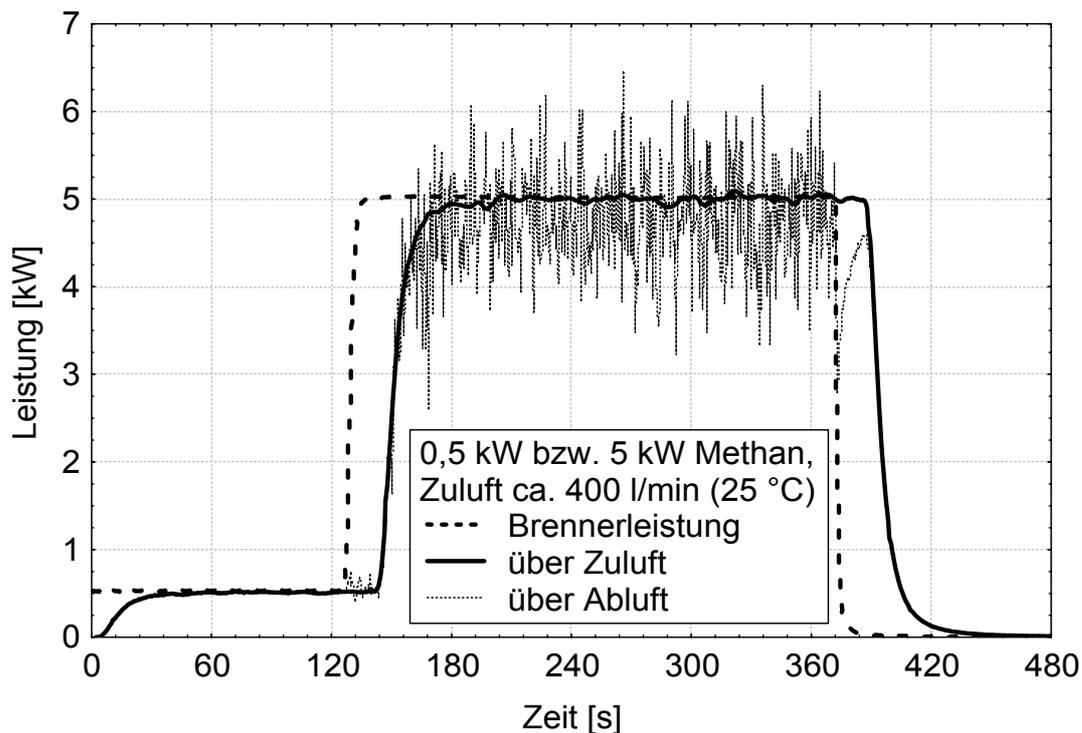


Diagramm B.5 Energiefreisetzungsraten bei der Funktionsprüfung

In Diagramm B.5 ist einerseits der zeitliche Verlauf des Methanvolumenstroms, umgerechnet in die Brennerleistung, zum anderen die Energiefreisetzungsraten dargestellt, die mit Hilfe der in Abschnitt B.3.2.3 zusammengestellten Gleichungen für ein geschlossenes System (über Zuluftstrom) oder mit Hilfe der in Abschnitt A.7 genannten Gleichungen für ein offenes System (über Abluft) berechnet wurde.

Die zeitliche Verzögerung zwischen der über den Massenstrom bestimmten Brennerleistung und den sauerstoffkalorimetrisch berechneten Energiefreisetzungsraten (über Zuluft bzw. über Abluft) wird ausschließlich durch die Verzögerungszeiten für die Gasanalysatoren bestimmt.

Die Verläufe in Diagramm B.5 werden in verschiedene Phasen unterteilt:

0. s - 35. s: Die Brennerleistung beträgt unverzüglich nach Entzündung der Flamme 0,5 kW. Aufgrund der Verzögerungszeit der Gasanalysatoren steigt die berechnete Energiefreisetzungsrate (beide Ansätze) langsam auf den stationären Wert.
35. s - 125. s: Im Rahmen der Messgenauigkeit (2 % maximale Abweichung) stimmen Brennerleistung und Energiefreisetzungsrate für beide Ansätze überein.
125. s - 175 s: Innerhalb von 5 s wird der neue Wert der Brennerleistung manuell am Regler eingestellt. Die Brennerleistung folgt dem geänderten Sollwert unverzüglich. Die größere Flamme flackert stark und erzeugt Turbulenzen in der Strömung, die sich durch starke Schwankungen des Differenzdrucks im Rauchgasrohr bemerkbar machen. Daher schwankt die mit dem Ansatz „über die Abluft“ berechnete Energiefreisetzungsrate im Abschnitt zwischen dem Anstieg der Brennerleistung und den Anstiegen der berechneten Energiefreisetzungsrate.
175. s - 370. s: Brennerleistung und mit dem Ansatz „über Zuluft“ berechnete Energiefreisetzungsrate weichen in der stationären Phase um maximal 1 % voneinander ab. Die mit dem Ansatz „über Abluft“ bestimmte Energiefreisetzungsrate ist im Mittel 5 % niedriger als die Brennerleistung. Die durch die flackernde Methanflamme verursachten Turbulenzen im Rauchgasrohr bewirken starke Druckschwankungen, die sich auch in der „über Abluft“ berechneten Energiefreisetzungsrate als Störung zeigen.
370. s - 420. s: Der Methanbrenner wird durch Schließen des Hahns schlagartig abgeschaltet, die Brennerleistung geht unverzüglich auf 0 kW. Die mit dem Ansatz „über Zuluft“ berechnete Energiefreisetzungsrate folgt mit zeitlicher Verzögerung. Mit Abschalten der Flamme verschwinden die Turbulenzen der Strömung im Rauchgasrohr und die

Schwankungen bei der „über Abluft“ bestimmten Energiefreisetzungsrates. Aufgrund der Trägheit des Thermoelements im Rauchgasrohr wird über einen Zeitraum von ca. 15 s der Volumenstrom im Rauchgasrohr unterbewertet ($\dot{V}_{298}^s \propto T^{-0.5}$) und damit eine zu kleine Energiefreisetzungsrates berechnet. Danach stimmen die mit den unterschiedlichen Ansätzen berechneten Energiefreisetzungsrates überein.

420. s - 480. s: Allmählich nähern sich die sauerstoffkalorimetrisch berechneten Energiefreisetzungsrates dem Wert 0 kW. Die Verläufe werden durch die Dämpfung des Sauerstoffanalysators vorgegeben.

Die Funktionsprüfung bei Erstinbetriebnahme hat gezeigt, dass alle Komponenten der Messung, Datenerfassung und Datenübertragung fehlerfrei funktionieren. Außerdem konnte das Auswertungsprogramm validiert werden. Es hat sich gezeigt, dass in einem geschlossenen System mit dem Ansatz „über Zuluft“ die Energiefreisetzungsrates mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.

Als Nebeneffekt hat sich experimentell bestätigt, dass mit dem sauerstoffkalorimetrischen Ansatz für ein offenes System, bei dem der Abluftvolumenstrom bestimmt wird, bei bekannter Materialzusammensetzung die Energiefreisetzungsrates auch mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann. Die hier auftretende Abweichung von maximal 5 % wird im Wesentlichen dadurch verursacht, dass die an der Blende im Rauchgasrohr auftretenden Druckdifferenzen weniger als 5 % des Messbereichs des verwendeten Differenzdruckmessers betragen. Somit wird die beobachtete Abweichung hauptsächlich durch die „ungenaue“ Differenzdruckmessung verursacht.

B.4 Versuche mit PE-Granulat und Glykol

B.4.1 Stoffauswahl

Wie einleitend erwähnt, wurde die Cone-Kammer im Rahmen eines Forschungsvorhabens über Schutzkonzepte für Brandstörfälle in Chemikalienlagern [B-3, B-4] entwickelt. Bei Versuchen in einer Mikroverbrennungsapparatur, basierend auf dem Verfahren DIN 53436 [B-26], hat Leck [B-27] die Cyanwasserstofffreisetzung bei stickstoffhaltigen Lagergütern und Baustoffen bestimmt. Bahadir und Richter [B-28, B-29] haben mit einer dem Aufbau von Leck vergleichbaren Mikroverbrennungsapparatur typische Stoffe aus Chemikalienlagern untersucht, das Spektrum der Verbrennungsprodukte qualitativ bestimmt und quantitativ vermessen. Von Pleß [B-30] wurden zum einen Lösversuche an typischen Chemikalien im Labormaßstab und an typischen Lageraufbauten mit „Repräsentanten“ im Realmaßstab durchgeführt, zum anderen die Entstehung schädlicher/toxischer Verbrennungsprodukte im Labormaßstab mit einer selbstentwickelten Verbrennungsapparatur untersucht. Die Arbeiten von Leck, Richter und Pleß wurden ebenfalls im Rahmen des o. g. Forschungsvorhabens zum Brandschutz in Chemikalienlagern (FKZ: 01RG9503) vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie gefördert.

Pleß [B-30] und Donner [B-31] haben bei ihren Arbeiten an realen Lageranordnungen aufgrund der unkalkulierbaren Risiken keine typischen Chemikalien mit dem entsprechenden Spektrum an toxischen Reaktionsprodukten, sondern „Repräsentanten“ eingesetzt. Die Auswahl dieser Ersatzstoffe erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlager“ in Zusammenarbeit mit den „forschenden“ Institutionen und Firmen (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz iBMB und Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik der TU Braunschweig, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Minimax GmbH), beratend tätigen Organisationen (TÜV Nord, Feuerwehr Hannover, Feuerwehr der Stadt Essen) und Vertretern der chemischen Industrie (BASF AG, Bayer AG).

Als Ersatzstoff für feste Chemikalien wird ein Polyethylen PE-Granulat der BASF AG mit der Bezeichnung Lupolen 5021 D eingesetzt. Die Flüssigkeiten werden durch Glykol Glysantin G 48 der BASF AG repräsentiert.

Die Grundlagen und die Durchführung der Versuchsserie mit den beiden Stoffen werden in diesem Kapitel beschrieben.

B.4.2 Materialeigenschaften

In Tabelle B.3 sind die Parameter für die in der Cone-Kammer untersuchten Stoffe zusammengestellt. Dabei wurden die Bestimmung des Heizwertes und die chemische Analyse vom Hersteller der beiden Materialien, der BASF AG, durchgeführt. Die jeweilige Spalte „theoretisch“ enthält aus der Summenformel abgeleitete Größen (Massenanteile in Klammern). Dagegen beruhen die Werte in der Spalte „analytisch“ auf einer massenspektroskopischen Analyse, die die Massenanteile von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff im Material ergibt. Aus den Massenanteilen werden rechnerisch die molaren Anteile (in Klammern) bestimmt.

Der materialspezifische O_2 -Faktor $E_{O_2,M}^V$ wird mit Gleichung (2), der stöchiometrische Luftbedarf r mit Gleichung (3) berechnet. Zusätzlich sind in Tabelle B.3 das molare Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β und der Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion α angegeben, die gemäß der Definition (Gleichung (7.1), Abschnitt A.7) berechnet werden. Diese beiden Materialparameter werden nicht für die Auswertung beim geschlossenen System der Cone-Kammer, aber bei der Auswertung für offene Systeme, Cone-Calorimeter (ISO 5660 [B-5]) oder Room-Corner-Test (ISO 9705 [B-11]), benötigt. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass bei der Auswertung der Raumbrandversuche für das Forschungsprojekt über Schutzkonzepte für Brandstörfälle in Chemikalienlagern [B-3, B-4] und für die Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen [B-1, B-2] der in Tabelle B.3 genannte O_2 -Faktor, nicht aber der Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion α , angewendet wurde.

Beim PE-Granulat Lupolen 5021 D sind Abweichungen zwischen den aus der chemischen Summenformel („theoretischen“) und den durch massenspektroskopische Analyse („analytisch“) abgeleiteten Materialparametern so gering, dass zwischen

„theoretischem“ und „analytischem“ O₂-Faktor lediglich eine Abweichung von 0,38 % besteht. Bei dem Glykol Glysantin G 48 dagegen überträgt sich die Abweichung von 3 % beim molaren Sauerstoffanteil c auf den O₂-Faktor E_{O₂,M}^V mit einer Abweichung von 2,96 %.

Die Abweichungen von „theoretischem“ und „analytischem“ O₂-Faktor beim PE-Granulat Lupolen 5021 D liegen unterhalb der Nachweisgrenze selbst von empfindlicheren sauerstoffkalorimetrischen Messverfahren. Bei Glykol Glysantin G 48 könnte der Unterschied, der aus der Verwendung des „theoretischen“ oder des „analytischen“ O₂-Faktors bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate herrührt, bei der Gegenüberstellung unterschiedlicher Materialien einen Effekt haben. Auch die experimentell bestimmte Verbrennungseffektivität wird bei Verwendung des aus der chemischen Summenformel hergeleiteten O₂-Faktors genau um die Abweichung (2,96 %) kleiner sein als bei Verwendung des „analytischen“ O₂-Faktors.

Tabelle B.3 Materialspezifische Parameter ¹⁰⁾

Material	PE-Granulat Lupolen 5021 D		Glykol Glysantin G 48	
Kurzbezeichnung	PE-Granulat		Glykol	
unterer Heizwert H _u [kJ g ⁻¹]	43,19		16,6	
	theoretisch	analytisch	theoretisch	analytisch
Summenformel	CH ₂		CH ₃ O	
Massenanteile				
C-Anteil [g _C g _{Brennstoff} ⁻¹]	(0,856277)	0,857	(0,387027)	0,378
H-Anteil [g _H g _{Brennstoff} ⁻¹]	(0,143723)	0,141	(0,097442)	0,095
O-Anteil [g _O g _{Brennstoff} ⁻¹]	(0,000000)	0,000	(0,515531)	0,520
Rest-Anteil [g _{Rest} g _{Brennstoff} ⁻¹]	-	0,002	-	0,007
Molare Anteile				
a (Kohlenstoff C)	1	(1)	1	(1)
b (Wasserstoff H)	2	(1,96)	3	(2,99)
c (Sauerstoff O)	0	(0)	1	(1,03)
Molmasse M _{Brennstoff} [g mol ⁻¹]	14,027	13,987	31,034	31,504
O ₂ -Faktor E _{O₂,M} ^V [kJ m ⁻³] ¹¹⁾	-16509	-16572	-16846	-17344
stöchiometrischer Luftbedarf r [g _{Luft} g _{Brennstoff} ⁻¹]	14,8355	14,7366	5,5718	5,4119
β	1,3333	1,3289	2,0000	2,0243
α	1,0698	1,0689	1,2095	1,2146

¹⁰⁾ Die für die Auswertung verwendeten Werte sind grau hinterlegt.

¹¹⁾ Der O₂-Faktor besitzt entgegen der üblichen Darstellung ein negatives Vorzeichen.

Aus der Literatur [B-32] entnommene Werte für die materialspezifischen Parameter von Polyethylen und Ethylen Glykol werden in Tabelle B.4 den für PE-Granulat Lupolen 5021 D und Glysantin G 48 berechneten „theoretischen“ Werten gegenübergestellt. Es zeigen sich für das Polyethylen Unterschiede von weniger als 0,3 %. Beim Glykol weicht der für das in den Untersuchungen verwendete Material bestimmte Heizwert um ca. 3 % vom Literaturwert ab. In der gleichen Größenordnung liegen die Abweichungen des O₂-Faktors bei Glykol.

Tabelle B.4 Vergleich der materialspezifischen Parametern mit Werten aus der Literatur [B-32]

	theoretisch	Literatur	theoretisch	Literatur
Material	Lupolen 5021 D	Poly ethylene	Glysantin G 48	Ethylene glycol
unterer Heizwert H_u [kJ g ⁻¹]	43,19	43,28	16,6	17,05
O ₂ -Faktor $E_{O_2,M}^V$ [kJ m ⁻³] ¹²⁾	-16509	-16545	-16846	-17291
O ₂ -Faktor $E_{O_2,M}^M$ [kJ kg ⁻³] ¹²⁾	-12622	-12650	-12880	-13220

Um eine einheitliche Vorgehensweise innerhalb des Forschungsprojektes „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlager“ zu gewährleisten, wurde sich darauf geeinigt, die aus der chemischen Summenformel abgeleiteten (theoretischen) Materialparameter zu verwenden, wobei unabhängig von der Produktionscharge jeweils der in Tabelle B.3 angegebene Heizwert verwendet werden sollte ¹³⁾. Damit waren die zu verwendenden Materialparameter endgültig festgelegt.

¹²⁾ Der O₂-Faktor besitzt entgegen der üblichen Darstellung ein negatives Vorzeichen.

¹³⁾ Abweichungen der Werte bei Blume [B-4] von den hier genannten beruhen auf Rundungsfehlern und haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse bei Bestimmung der Verbrennungseffektivität für PE Granulat Lupolen 5021 D oder Glykol Glysantin G 48 in [B-4].

B.4.3 Prinzipielle Versuchsdurchführung in der Cone-Kammer

B.4.3.1 Probenvorbereitung

Bei einer „normalen“ Untersuchung im Cone-Calorimeter [B-5] werden feste Proben mit einer Kantenlänge von üblicherweise 100 mm verwendet. Daher sind gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen, um sogenannte Kanten- und/oder Oberflächeneffekte zu verhindern. Eine Maßnahme zur Verhinderung von Kanteneffekten kann das Abkleben der Probenkanten mit Aluminiumfolie sein. Durch die zusätzliche Verwendung des Probenrahmens bzw. des Probenrahmens zusammen mit dem Gitter zur Probenpfanne können auch Kanten- bzw. Kanten- und Oberflächeneffekte unterbunden werden. Da bei der Cone-Kammer auch die Pfanne als Probenträger verwendet wird, sind prinzipiell die gleichen Maßnahmen wie beim Cone-Calorimeter zu ergreifen. Im vorliegenden Fall kann aber darauf verzichtet werden, da weder PE-Granulat Lupolen 5021 D noch Glykol Glysantin G 48 als fester Stoff im o. g. Sinn untersucht werden.

In allen Versuchen wird die $10,5 \text{ cm} \times 10,5 \text{ cm} = 110,25 \text{ cm}^2$ große Fläche der Probenpfanne mit dem Granulat bzw. der Flüssigkeit bedeckt. Vom PE-Granulat Lupolen 5021 D werden in allen Versuchen $100 \pm 0,1 \text{ g}$ abgewogen, so dass die Füllung der Pfanne ca. 17 mm hoch ist. Im anderen Fall wird mit einer Pipette $100 \pm 1 \text{ ml}$ Glykol Glysantin G 48 abgemessen und in die Probenpfanne gefüllt, so dass die Füllhöhe ca. 9 mm beträgt. Diese Menge entspricht einer Masse von ca. 113 g.

Die Befüllung der Pfanne mit PE-Granulat oder Glykol erfolgt außerhalb der Cone-Kammer. Die befüllte Pfanne wird mit einer $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ großen, ca. 6 mm dicken Kalziumsilikatplatte abgedeckt und in die vorbereitete Cone-Kammer eingebracht.

B.4.3.2 Vorbereitung der Cone-Kammer

Der Cone-Heizer wird vor dem Einschalten so positioniert, dass der Abstand von $25 \pm 1 \text{ mm}$ zwischen Unterkante des Heizer-Gehäuses und Oberfläche der Probe entsprechend ISO 5660 [B-5] eingehalten wird.

Die Heizer-Temperatur wird gemäß Diagramm B.1 für die gewünschte Strahlungsflussdichte vorgewählt. Bis zum Erreichen der stationären Temperatur vergehen dann in Abhängigkeit von der Höhe der einzuregelnden Temperatur 20 - 40 Minuten.

Um ein übermäßiges Aufheizen der Wände der Cone-Kammer zu verhindern, wird zusammen mit dem Cone-Heizer auch die Zuluft eingeschaltet. Der Zuluftvolumenstrom wird unabhängig von den späteren Versuchsrandbedingungen in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte / Heizer-Temperatur gewählt. Erst unmittelbar vor Einbringen der mit der Kalziumsilikat-Platte abgedeckten Probenpfanne wird der Zuluftvolumenstrom entsprechend den geplanten Randbedingungen eingestellt.

Die Pumpe der Gasanalysestrecke wird ca. 5 Minuten vor Versuchsbeginn eingeschaltet, um die Schläuche, Filter und Messzellen mit „sauberer“ Luft zu spülen. Die Datenerfassung beginnt ca. 2 Minuten vor Einbringen der Probenpfanne, damit die „Nullwerte“ der Gasanalytoren über einen ausreichend langen Zeitraum aufgezeichnet werden können.

B.4.3.3 Versuchsdurchführung

Zum Einbringen der Probenpfanne muss die Klappe in der Stirnwand der Cone-Kammer geöffnet werden. Die Probenpfanne mit der Kalziumsilikatplatte wird auf die Wiegezone gesetzt, die Kalziumsilikatplatte entfernt und der Schalter betätigt, so dass das Signal für den Versuchsbeginn an die Datenerfassung weitergegeben wird und gleichzeitig die Zündelektroden über die Probenpfanne schwenken. Nach dem Herausnehmen der Kalziumsilikatplatte wird die Klappe in der Stirnwand geschlossen. Zwischen Versuchsbeginn und Schließen der Klappe vergehen wenige Sekunden (< 5 s).

Während des Versuchs wird die Probenoberfläche durch eines der Seitenfenster beobachtet. Der Zeitpunkt der Entzündung wird dadurch erfasst und aufgezeichnet, dass der entsprechende Schalter betätigt und ein elektrisches Spannungssignal ausgelöst wird.

Aus Erfahrungen bei der Untersuchung des Brandverhaltens von elektrischen Leitungen und Kabeln [B-9] und der Qualifizierung von Kabelschutzsystemen [B-33] so-

wie vielfältiger Materialprüfungen mit Hilfe des Cone-Calorimeters in Anlehnung an ISO 5660 [B-5] ist bekannt, dass sich das Ende des Abbrandes bzw. der annähernd vollständige Umsatz der brennbaren Bestandteile durch einen starken Anstieg des Kohlenmonoxidgehalts bei gleichzeitigem Anstieg des Sauerstoffgehalts in der Abluft ankündigt. Basierend auf dieser Erfahrung wird zu Beginn der Versuchsserie festgelegt, dass ein Experiment in der Cone-Kammer dann beendet werden soll, wenn zum einen der Kohlenmonoxidgehalt sein Maximum eindeutig überschritten hat und gleichzeitig der Sauerstoffgehalt größer als 20,875 % wird.

B.4.3.4 Abschluss eines Versuchs und Nachbereitung

Mit Erfüllen des Kriteriums zum Beenden wird die Datenerfassung abgeschlossen. Gleichzeitig wird der Cone-Heizer abgeschaltet. Die Zuluft wird auf einen Wert von ca. 300 l min^{-1} eingestellt, um zum einen restliche Verbrennungsprodukte auszuspülen und zum anderen die Cone-Kammer zu kühlen.

Nach jedem Versuch muss das Kondenswasser aus der Kühlfalle abgelassen und das Silicagel des H_2O - und CO_2 -Trappings ausgetauscht werden. Der Austausch des Filterpapiers im Hauptfilter ist in den meisten Fällen nach jedem Experiment notwendig, bei der Untersuchung von PE-Granulat wegen der starken Rußbildung, bei Glykol wegen der starken Feuchtigkeitsbildung. Der Natronkalk muss nach Versuchen mit geringem Zuluftvolumenstrom ebenfalls ausgetauscht werden. Bei der Verbrennung von PE-Granulat muss mit wenigen Ausnahmen nach jedem Versuch auch das Schlauchsystem bis zu den Filtern des CO_2 -Trappings einschließlich der Entnahmesonde im Rauchgasrohr gereinigt werden, da die Rußentstehung - auch bei ausreichender Zuluft - erheblich ist.

B.4.4 Versuchsmatrix

Nach zahlreichen Versuchen mit dem Methanbrenner zur Funktionsprüfung und Kalibrierung werden insgesamt 20 Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D und 17 Versuche mit Glykol Glysantin G 48 bei Variation der Parameter Zuluftvolumenstrom und Strahlungsflussdichte durchgeführt (Tabelle B.5). Einige Versuche werden mit gleicher Parametereinstellung wiederholt, um die Reproduzierbarkeit zu

überprüfen oder um eventuelle „Ungereimtheiten“ bei den Ergebnissen auszuräumen.

Tabelle B.5 Zusammenstellung der durchgeführten Versuche

Strahlungsflussdichte	Zuluftvolumenstrom (bezogen auf 20 °C)	Index	
PE-Granulat Lupolen 5021 D			
10 – 15 kW m ⁻²	100 - 200 l min ⁻¹	7	
15 kW m ⁻²	25 l min ⁻¹	12	
	50 l min ⁻¹	10	
	100 l min ⁻¹	8	
	200 l min ⁻¹	9	
25 kW m ⁻²	25 l min ⁻¹	11	
	50 l min ⁻¹	3	
	80 l min ⁻¹	5, 13, 14	
	100 l min ⁻¹	1	
	150 l min ⁻¹	4	
	200 l min ⁻¹	2	
40 kW m ⁻²	400 l min ⁻¹	6	
	25 l min ⁻¹	20	
	50 l min ⁻¹	18	
	100 l min ⁻¹	16	
	150 l min ⁻¹	17	
40 kW m ⁻²	200 l min ⁻¹	15	
	400 l min ⁻¹	19	
	Glykol Glysantin G 48		
	15 kW m ⁻²	25 l min ⁻¹	33
		50 l min ⁻¹	32
100 l min ⁻¹		27	
200 l min ⁻¹		28	
25 kW m ⁻²	25 l min ⁻¹	25	
	50 l min ⁻¹	22, 29	
	100 l min ⁻¹	21, 31	
	200 l min ⁻¹	23, 30	
	300 l min ⁻¹	26	
	400 l min ⁻¹	24	
40 kW m ⁻²	50 l min ⁻¹	36	
	100 l min ⁻¹	35	
	200 l min ⁻¹	34	
	400 l min ⁻¹	37	

In Anhang E sind die Ergebnisse der Untersuchungen für PE-Granulat Lupolen 5021 D (Übersicht E.1 - Übersicht E.20, Diagramm E.1 - Diagramm E.100) und in

Anhang F für Glykol Glysantin G 48 (Übersicht F.1 - Übersicht F.17, Diagramm F.1 - Diagramm F.85) zusammengestellt.

B.5 Ergebnisse der Untersuchungen in der Cone-Kammer

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen mit PE-Granulat Lupolen 5021 D Granulat und Glykol Glysantin G 48 zusammengefasst.

B.5.1 Entzündungsverhalten

Durch Variation der Strahlungsflussdichte (thermische Beaufschlagung) kann das Entzündungsverhalten von Materialien im Cone-Calorimeter untersucht werden. Bei den Untersuchungen eines Materials in der Cone-Kammer wird bei gleicher Strahlungsflussdichte zwar zwischen den einzelnen Versuchen der Zuluftvolumenstrom variiert, zur Zeit ist es aber noch nicht möglich, die Zusammensetzung des zuströmenden Gases zu variieren. Somit dürfte kein Einfluss des Zuluftvolumenstroms auf das Entzündungsverhalten eines Materials bemerkbar sein. Eine Analyse der für PE-Granulat Lupolen 5021 D Granulat bzw. Glykol Glysantin G 48 ermittelten Zündzeitpunkte bestätigt diese Annahme. Andernfalls - der Zuluftvolumenstrom würde den Zündzeitpunkt beeinflussen - hätte die Zuluftführung in der Kammer überprüft werden müssen.

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

Es gibt zwei verschiedene Formen des Erwärmungs- und Entzündungsverhaltens [B-34]:

Thermisch dickes Verhalten kann angenommen werden, wenn die Probendicke groß bzw. die thermische Leitfähigkeit klein ist [B-32]. Dies führt zu dem Schluss, dass der Zündzeitpunkt proportional zum Kehrwert des Quadrats der Strahlungsflussdichte ist. Um dieses Verhalten zu bestätigen, müsste sich bei einer graphischen Auftragung

des Kehrwerts der Wurzel des Zündzeitpunktes über der Strahlungsflussdichte gemäß Gleichung (24) eine Gerade ergeben.

$$t_{ig} \propto \frac{1}{\dot{q}''^2} \Leftrightarrow \dot{q}'' \propto \frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} \quad (24)$$

Wenn umgekehrt die thermische Leitfähigkeit groß bzw. die Probendicke klein ist, spricht man von thermisch dünnem Verhalten. Unter diesen Bedingungen ist der Zündzeitpunkt proportional zum Kehrwert der Strahlungsflussdichte. Die graphische Auftragung des Kehrwerts des Zündzeitpunktes über der Strahlungsflussdichte müsste dann nach Gleichung (25) die Gerade ergeben.

$$t_{ig} \propto \frac{1}{\dot{q}''} \Leftrightarrow \dot{q}'' \propto \frac{1}{t_{ig}} \quad (25)$$

Für das PE-Granulat und für Glykol werden beide Annahmen überprüft, indem zum einen von allen Zündzeitpunkten die Wurzel des Kehrwertes bzw. der Kehrwert gebildet wird (Bezeichnung „Einzelmessung“) und zum anderen der Mittelwert der Zündzeitpunkte jeweils für die Strahlungsflussdichte von 15 kW m⁻², 25 kW m⁻² und 40 kW m⁻² berechnet und von diesem Mittelwert dann die Wurzel des Kehrwertes bzw. der Kehrwert gebildet wird (Bezeichnung „Mittelwert“).

Für beide Materialien ergibt die Annahme des thermisch dicken Verhaltens (Diagramm B.6) eine weniger gute Übereinstimmung als die des thermisch dünnen Verhaltens (Diagramm B.7). Auf Basis der letztgenannten Annahme erhält man für PE-Granulat eine kritische Wärmestromdichte von ca. 5 kW m⁻², für Glykol von ca. 11 kW m⁻². Dies sind theoretische Werte, in der Realität wird die kritische Wärmestromdichte höher liegen. Sie ließe sich iterativ durch schrittweises Verkleinern der Strahlungsflussdichte ermitteln. Die Versuche in der Cone-Kammer haben z. B. gezeigt, dass PE-Granulat bei einer Strahlungsflussdichte von 10 kW m⁻² nicht mehr entzündet werden kann. Bei 15 kW m⁻² ist dagegen die Entzündung innerhalb von durchschnittlich 2 ½ Minuten möglich.

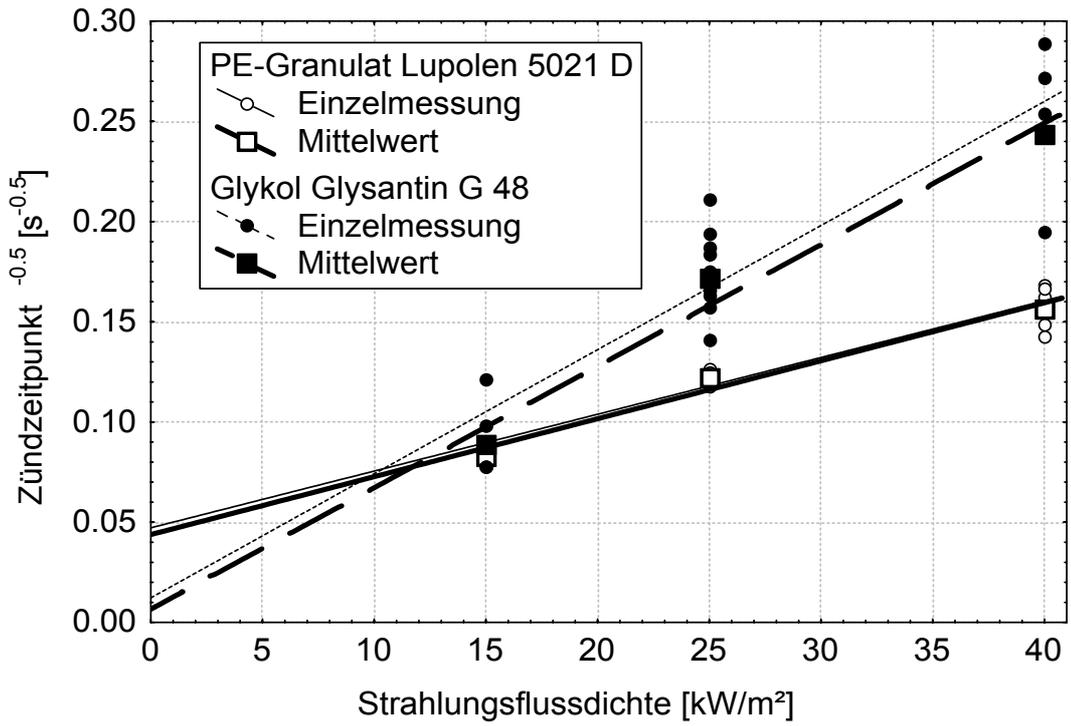


Diagramm B.6 Thermisch dickes Verhalten

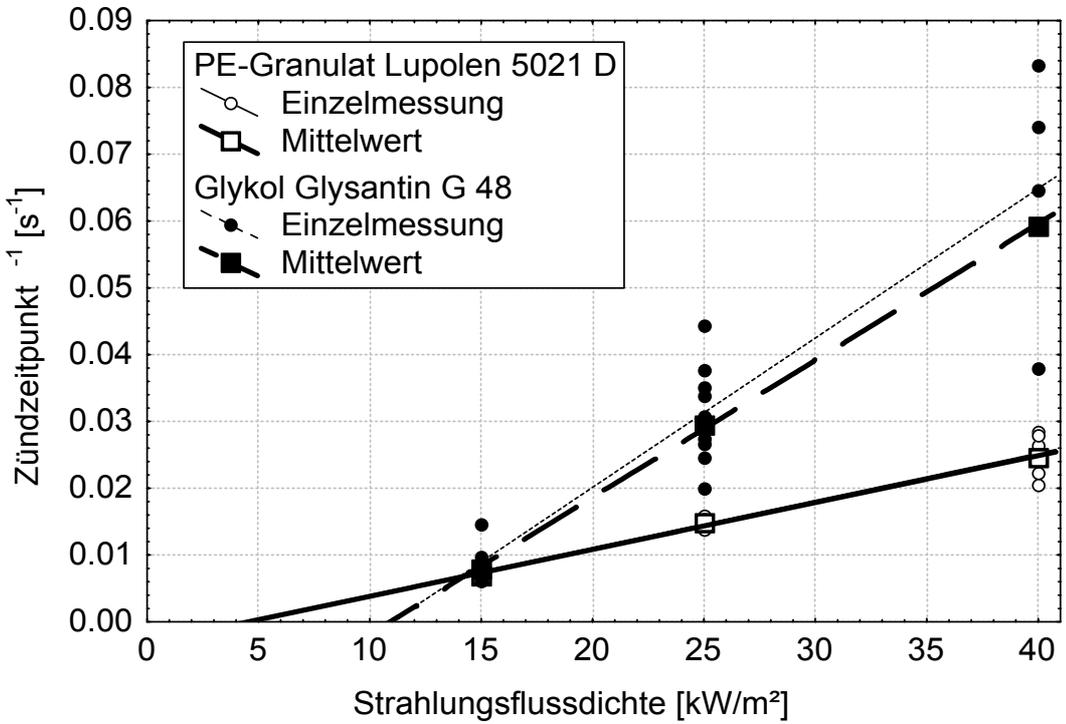


Diagramm B.7 Thermisch dünnes Verhalten

Angaben zur kritischen Wärmestromdichte sind weder für PE-Granulat, noch für Glykol zu finden. Allerdings wird in [B-32] für Polyethylen (fest) eine kritische Wärmestromdichte von 15 kW m^{-2} genannt, was in guter Übereinstimmung mit dem hier ermittelten experimentellen Wert von mindestens 10 kW m^{-2} steht, wenn man bedenkt, dass sich die Literaturangabe auf Material im Block bzw. als Platte bezieht, während in der Cone-Kammer Polyethylen als locker geschüttetes Granulat untersucht wird.

B.5.2 Relative Energiefreisetzungsrate

Der zeitliche Verlauf der relativen Energiefreisetzungsrate wird von den beiden Parametern thermische Beaufschlagung (Strahlungsflussdichte) und Ventilation (Zuluftvolumenstrom) beeinflusst. Durch die thermische Beaufschlagung wird die Pyrolyse- bzw. Abbrandrate und so die für die Verbrennung bereitstehende Masse gesteuert. Durch die zusätzliche Erwärmung infolge der Flammenstrahlung auf die Brennstoffoberfläche kann die Pyrolyserate und damit - bei ausreichendem Sauerstoffangebot - die Energiefreisetzungsrate noch erhöht werden. Dieser Effekt ist bei PE-Granulat besonders ausgeprägt. Bei niedrigem Zulufvolumenstrom kann zwar durch die thermische Beaufschlagung eine bestimmte Pyrolyserate erzwungen werden, der Brennstoff wird aber wegen des unzureichenden Sauerstoffangebots nicht vollständig oxidiert. Die maximale Energiefreisetzungsrate wird durch den Zuluftvolumenstrom begrenzt. Die maximale Energiefreisetzungsrate bzw. relative Energiefreisetzungsrate (bei vorgegebener Fläche) lässt sich auf einfache Weise mit Hilfe des allgemeinen oder des materialspezifischen O_2 -Faktors bestimmen:

$$\dot{q}_{\max} = E_{\text{O}_2, \text{M}}^{\text{V}} \cdot X_{\text{O}_2}^0 \cdot \dot{V}_{293}^0 \cdot \frac{T_0 + 25\text{K}}{T_0 + 20\text{K}} \quad \dot{q}_{\max}'' = \frac{\dot{q}_{\max}}{A} \quad (26)$$

Mit Hilfe der Gleichung (26) sind die in Tabelle B.6 zusammengestellten Werte, die als Anhalt bei der Betrachtung der folgenden Diagramme dienen sollen, berechnet worden.

Tabelle B.6 Maximale relative Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom bei vollständigen Sauerstoffverbrauch

Zuluftvolumenstrom [l/min] (bezogen auf 20 °C)	maximale relative Energiefreisetzungsrates [kW m ⁻²] (bezogen auf eine Probenfläche von 110,25 cm ²)		
	PE-Granulat Lupolen 5021 D Granulat	Glykol Glysantin G 48	Allgemein
25	130	133	136
50	261	266	271
100	521	532	543
200	1042	1064	1086
300	1563	1595	1629
400	2085	2127	2172
1440	7504	7657	7818

In Diagramm B.8 bzw. Diagramm B.9 ist der Verlauf der relativen Energiefreisetzungsrates bei unterschiedlichen Strahlungsflussdichten und bei ausreichender Zuluft (200 l min⁻¹) für PE-Granulat bzw. für Glykol dargestellt.

- Glykol entzündet sich früher als PE-Granulat, daher setzt die Energiefreisetzung früher ein.
- Bei PE-Granulat steigt die Energiefreisetzungsrates langsamer an.
- PE-Granulat brennt bei vergleichbarer Masse länger als Glykol, da der Heizwert von PE-Granulat mehr als 2,5-mal größer als der von Glykol ist.
- Bei geringer thermischen Beaufschlagung (15 kW m⁻²) erreicht die Energiefreisetzungsrates von Glykol das Niveau von PE-Granulat. Ansonsten ist die Energiefreisetzungsrates von PE-Granulat größer als die von Glykol.

Basierend auf (Tabelle B.6) wird das Erreichen der maximalen Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit von der Zuluftmenge betrachtet:

- Bei einer Strahlungsflussdichte von 40 kW m⁻² und 100 l min⁻¹ Zuluftvolumenstrom wird für PE-Granulat die maximal mögliche Energiefreisetzungsrates nahezu erreicht (Diagramm B.10), bei Glykol dagegen nicht (Diagramm B.11).

- Bei geringerer Strahlungsflussdichte (15 kW m^{-2} bzw. 25 kW m^{-2}) und 100 l min^{-1} Zuluftvolumenstrom ist die relative Energiefreisetzungsrate bei PE-Granulat niedriger als bei Glykol (vgl. Diagramm B.10 und Diagramm B.11).
- Bei 50 l min^{-1} Zuluftvolumenstrom und 40 kW m^{-2} Strahlungsflussdichte wird der Maximalwert für die relativen Energiefreisetzungsrate von ca. 270 kW m^{-2} bei Glykol und bei PE-Granulat erreicht (Diagramm B.12, Diagramm B.13).
- Bei 25 l min^{-1} Zuluftvolumenstrom und 15 kW m^{-2} Strahlungsflussdichte wird die Obergrenze der relativen Energiefreisetzungsrate von ca. 130 kW m^{-2} bei beiden Materialien nicht erreicht (Diagramm B.14, Diagramm B.15).

Bei Betrachtung von Diagramm B.16 - Diagramm B.20 erkennt man, dass mit abnehmendem Zuluftvolumenstrom auch die relative Energiefreisetzungsrate kleiner wird. Auch bei niedrigen Zuluftstraten wird die theoretisch mögliche, maximale relative Energiefreisetzungsrate (Tabelle B.6) zu keinem Zeitpunkt überschritten. Damit ist sichergestellt, dass die Ventilationsbedingungen ausschließlich durch den Zuluftvolumenstrom und nicht durch das Kammervolumen bestimmt werden.

Hohe thermischen Beaufschlagung, 40 kW m^{-2} :

- Bei ausreichender Zuluftmenge ($\geq 150 \text{ l min}^{-1}$) entwickelt sich bei PE-Granulat die Energiefreisetzungsrate unabhängig vom Wert des Luftüberschusses (Diagramm B.16).
- Die maximale Energiefreisetzungsrate von PE-Granulat scheint mit zunehmendem Zuluftvolumenstrom geringfügig zu steigen.
- Der Einfluss der Zuluft auf die maximale Energiefreisetzungsrate ist bei Glykol stärker ausgeprägt als bei PE-Granulat.
- Bei höherem Zuluftvolumenstrom steigt die relative Energiefreisetzungsrate bei Glykol schneller an und erreicht im Maximum einen höheren Wert (Diagramm B.17).

Mittlere thermischen Beaufschlagung, 25 kW m^{-2} :

- In der Anfangsphase steigt die relative Energiefreisetzungsrate bei PE-Granulat unabhängig von der Zuluftmenge an (Diagramm B.18).

- Bei kleineren Zulufraten bricht bei PE-Granulat der Anstieg der Energiefreisetzungsrates früher ab und die maximale relative Energiefreisetzungsrates ist kleiner als bei höheren Zuluftvolumenströmen (Diagramm B.18).
- Der letztgenannte Effekt ist bei Glykol (Diagramm B.19) weniger stark ausgeprägt als bei PE-Granulat.

Niedrige thermische Beaufschlagung, 15 kW m^{-2} :

- Auch bei ausreichender Ventilation zeigt sich eine auffällige Verringerung der relativen Energiefreisetzungsrates mit abnehmendem Zuluftvolumenstrom (Diagramm B.19, Diagramm B.20).
- Sicherlich befinden sich beide Materialien bei einem Zuluftvolumenstrom von 25 l min^{-1} und 50 l min^{-1} (PE-Granulat eventuell auch 100 l min^{-1}) in der ventilationsgesteuerten Phase, bei höherem Zuluftvolumenstrom dagegen in der brandlastgesteuerten Phase.

In Diagramm B.22 und Diagramm B.23 ist jeweils die maximal mögliche relative Energiefreisetzung bei vollständigem Sauerstoffverbrauch als Gerade zusätzlich eingetragen. Weder der Graph für die mittlere, noch der Graph für die maximale relative Energiefreisetzungsrates schneiden diese Geraden. Da auch für die maximale Energiefreisetzungsrates keine Punkte auf der anderen Seite der Gerade liegen, kann ausgeschlossen werden, dass das Kammervolumen eine Speicherwirkung hat und somit (ggf. auch kurzzeitig) mehr Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht als über die Zuluft nachgeführt wird. Bei einer thermischen Beaufschlagung von 40 kW m^{-2} kommen mittlere und maximale relative Energiefreisetzungsrates bei einem Zuluftvolumenstrom von weniger als 100 l min^{-1} diesen Geraden sehr nahe, d. h. es wird annähernd der gesamte Sauerstoff der Zuluft verbraucht. Dies ist aber nicht gleichbedeutend mit einer vollständigen Verbrennung, bei der der gesamte freigesetzte Brennstoff vollständig oxidiert wird, d. h. nur sehr wenig Kohlenmonoxid und Ruß entstehen.

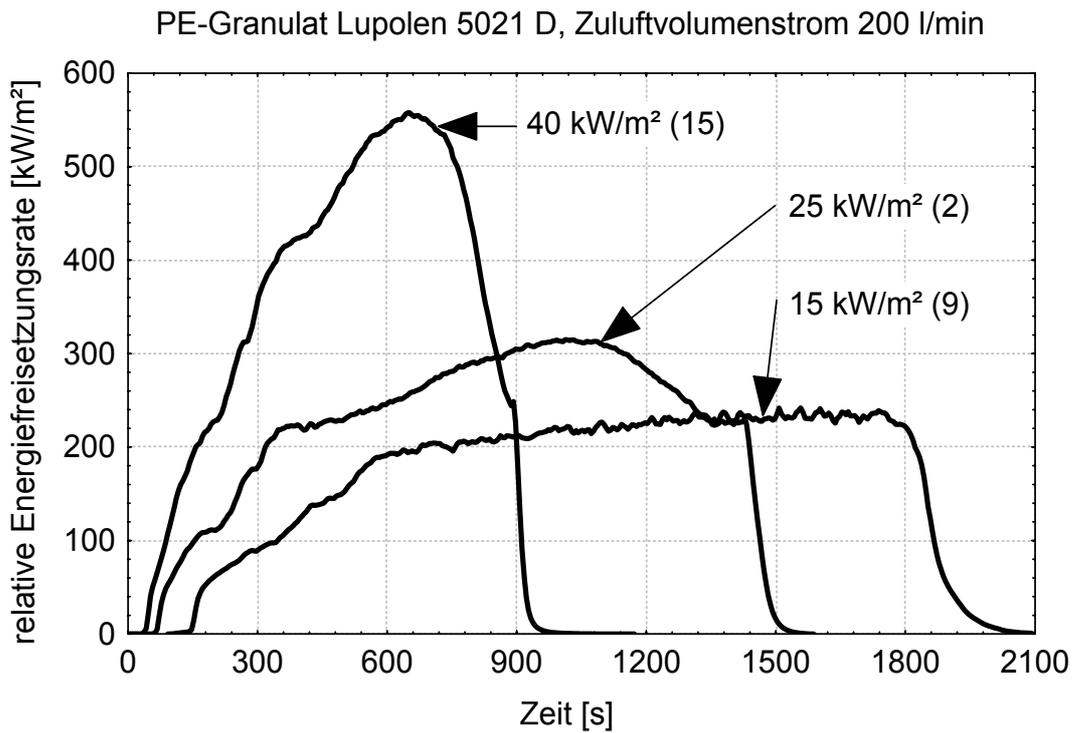


Diagramm B.8 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D, 200 l min⁻¹

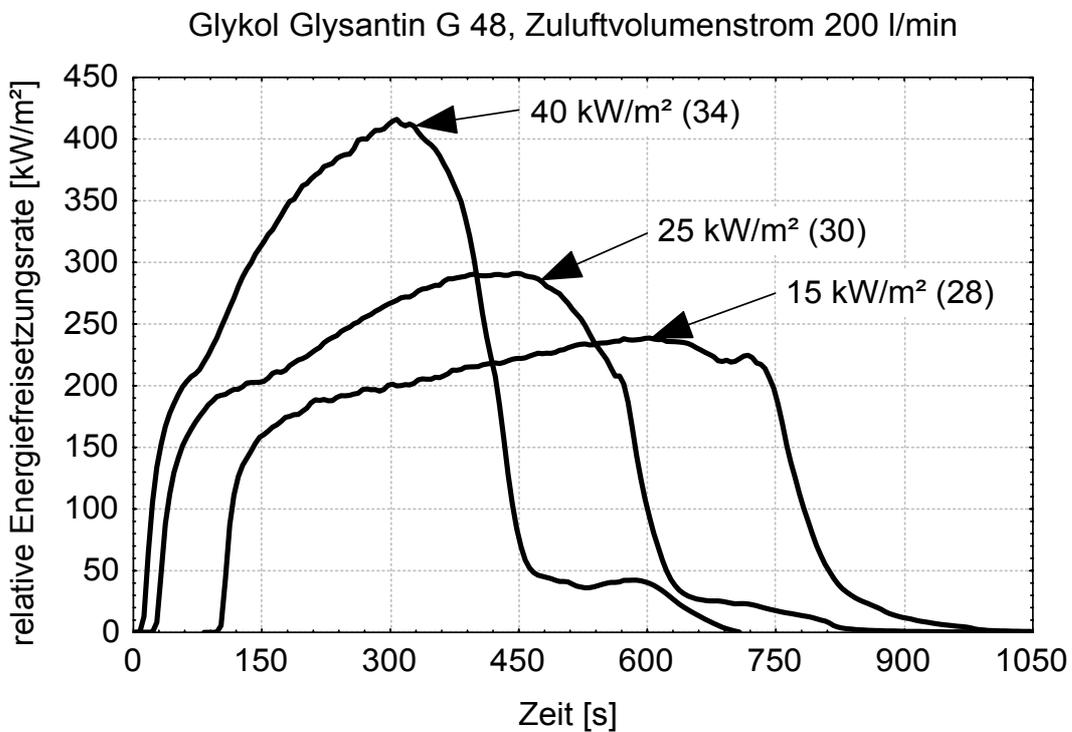


Diagramm B.9 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48, 200 l min⁻¹

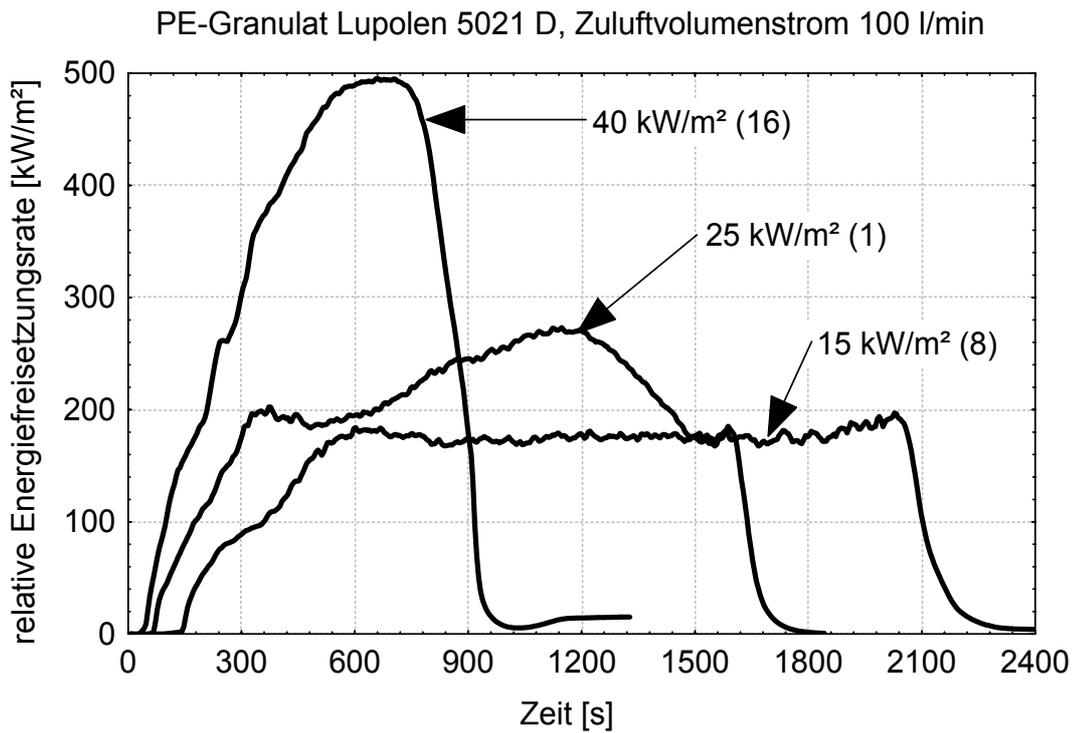


Diagramm B.10 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D, 100 l min⁻¹

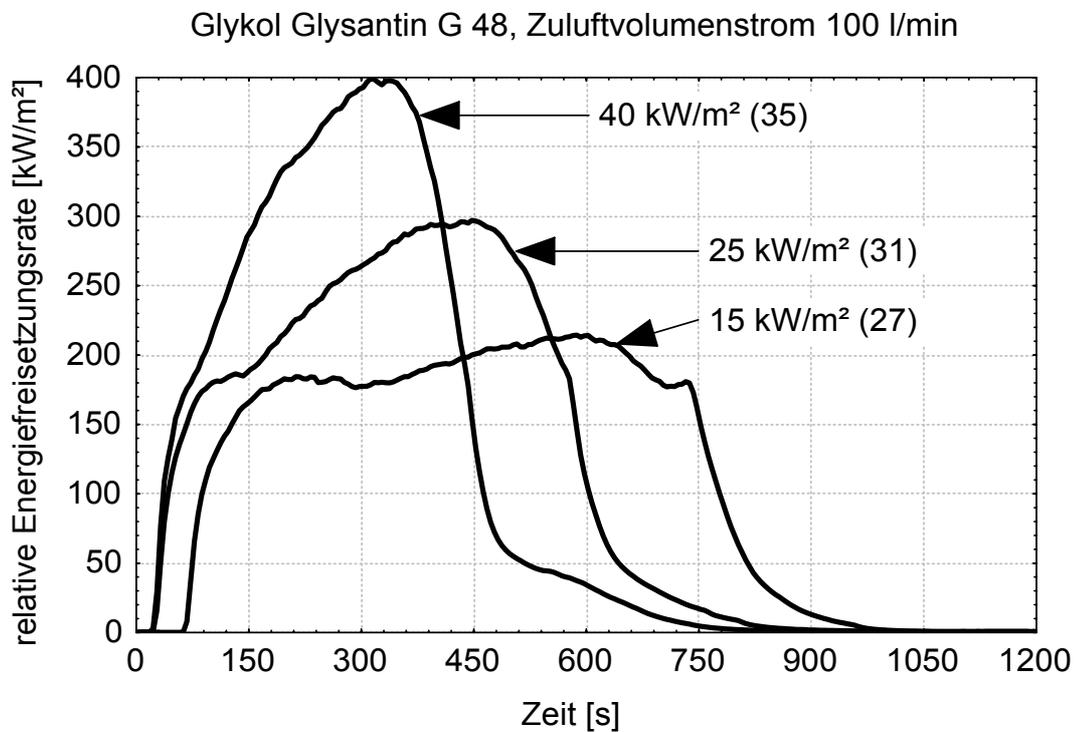


Diagramm B.11 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48, 100 l min⁻¹

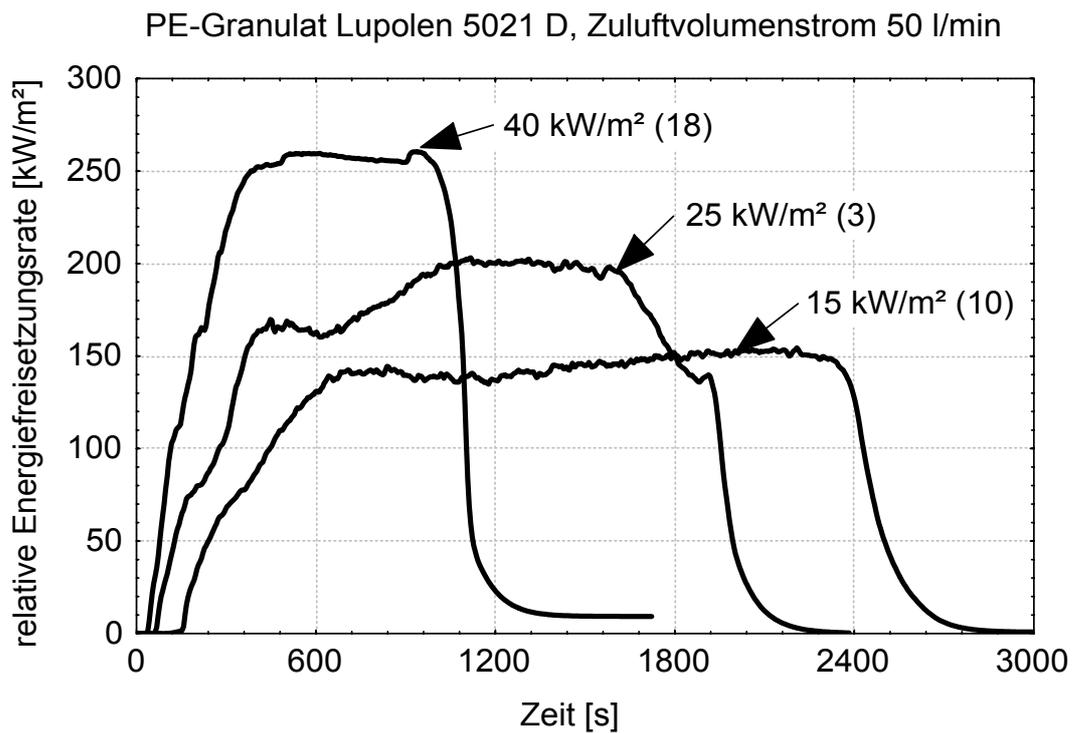


Diagramm B.12 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D, 50 l min⁻¹

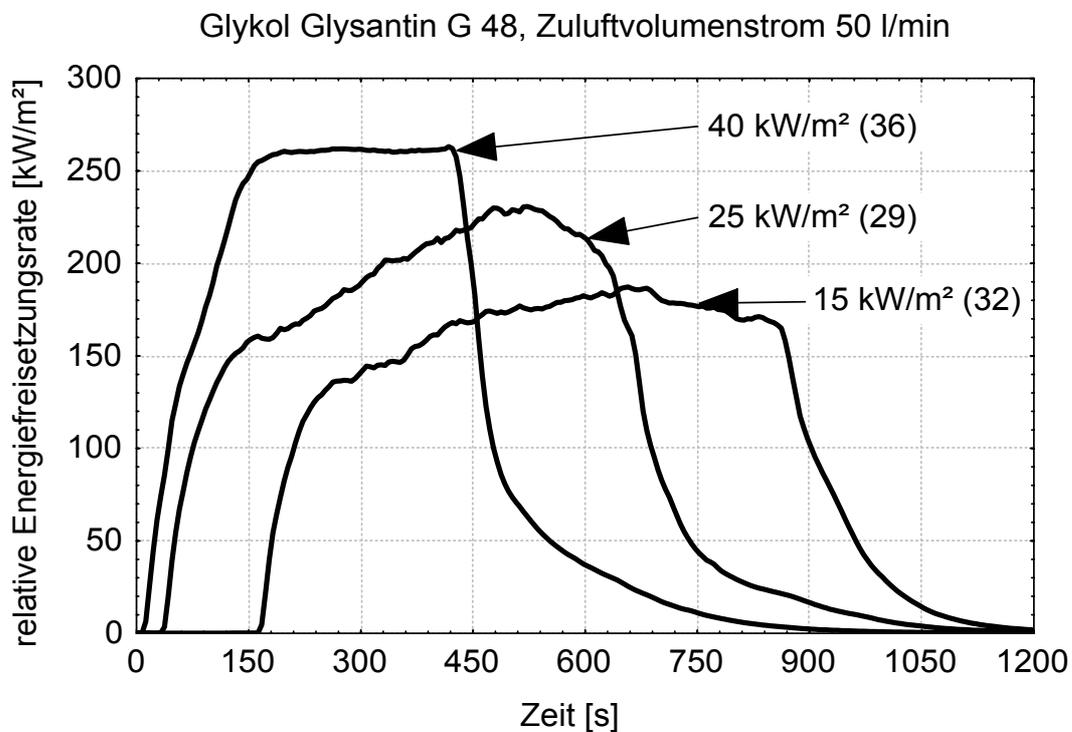


Diagramm B.13 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48, 50 l min⁻¹

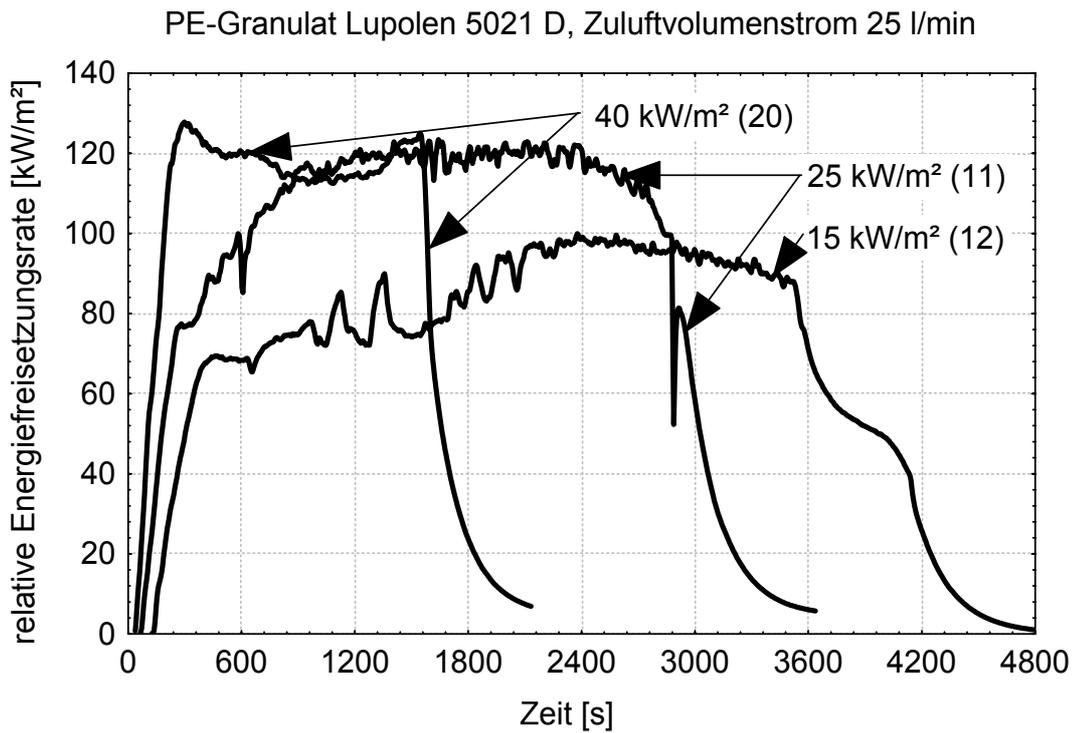


Diagramm B.14 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D, 25 l min⁻¹

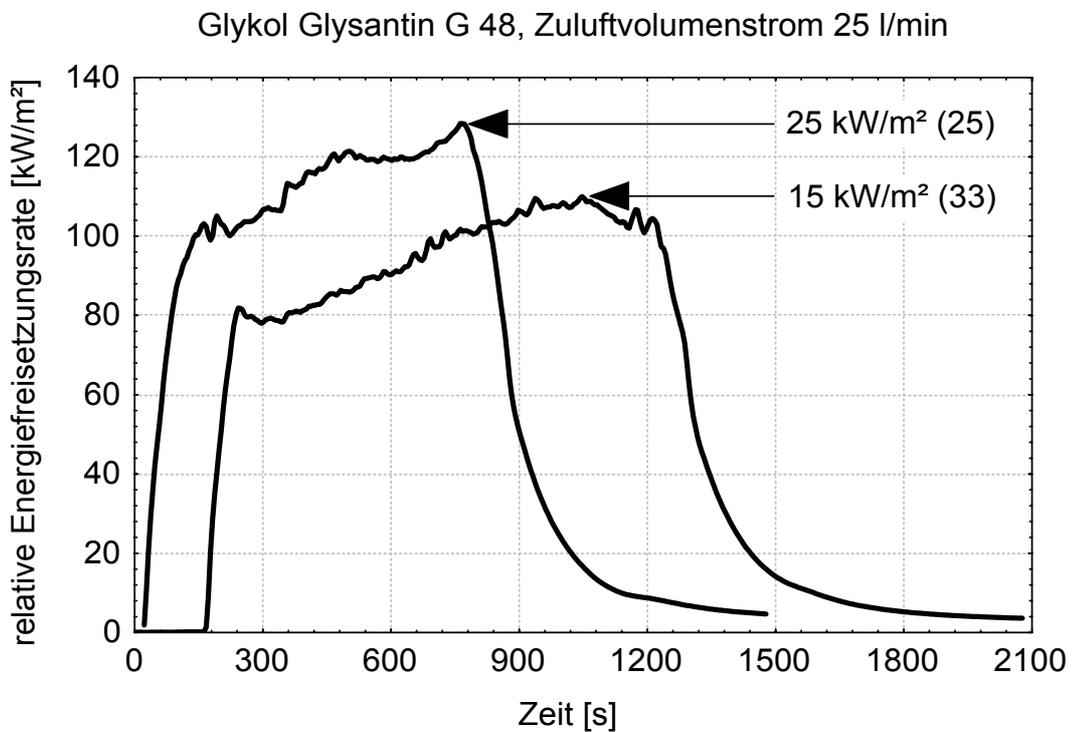


Diagramm B.15 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48, 25 l min⁻¹

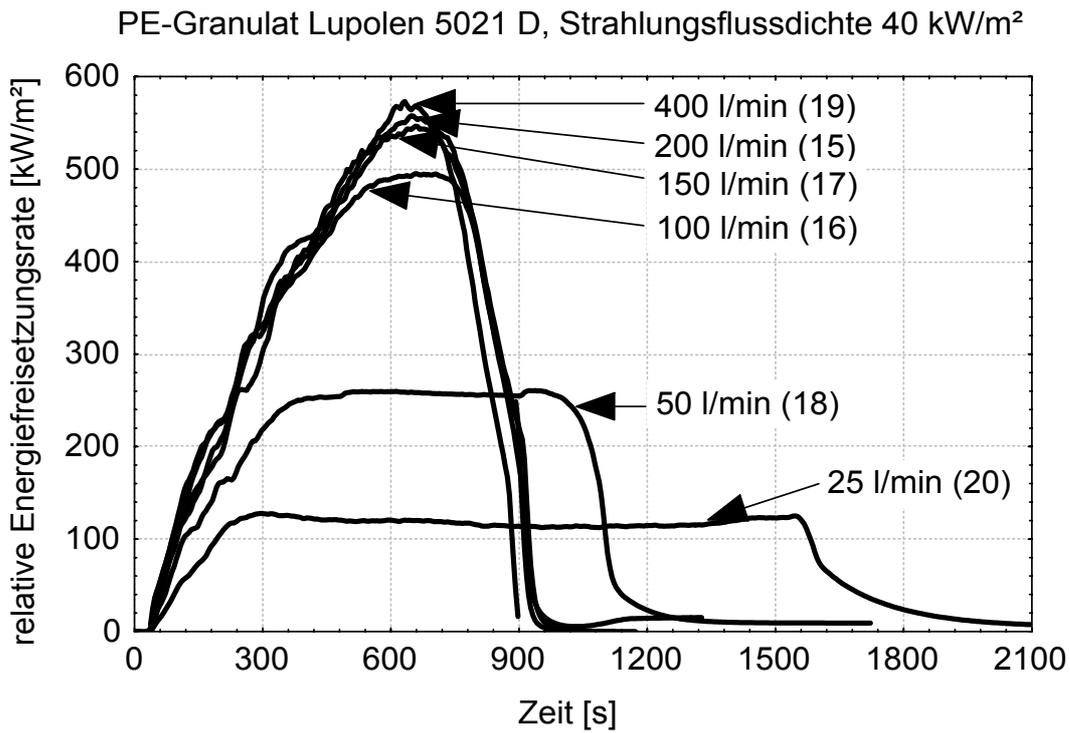


Diagramm B.16 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom, PE-Granulat Lupolen 5021 D, 40 kW m⁻²

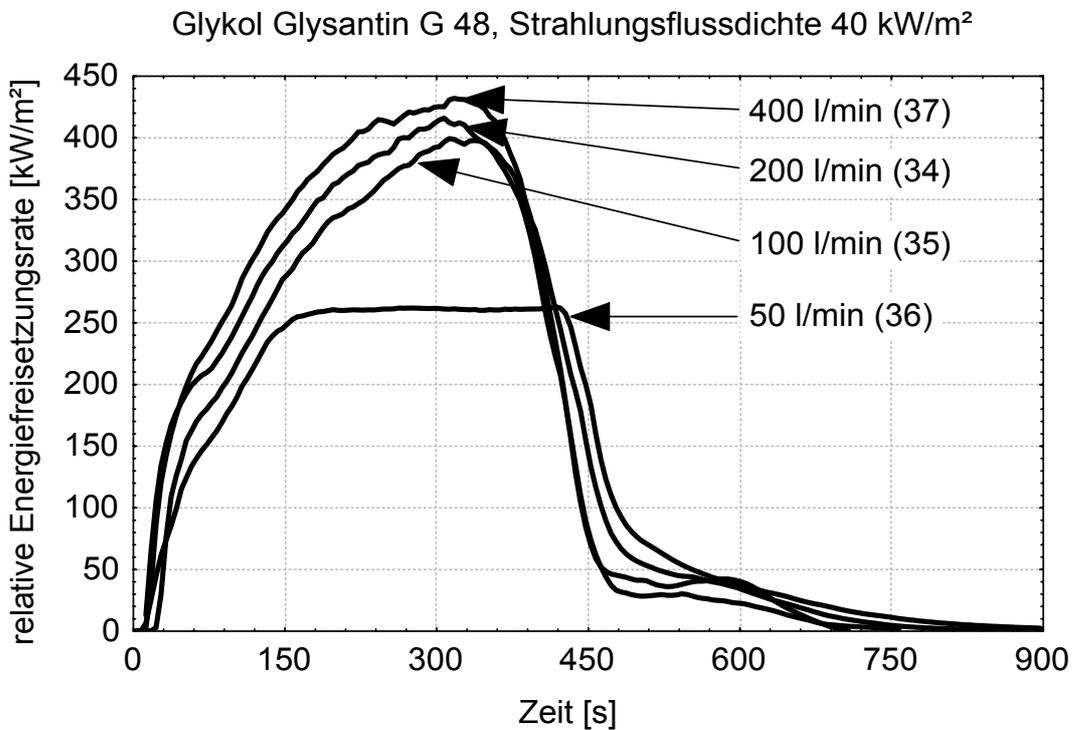


Diagramm B.17 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom, Glykol Glysantin G 48, 40 kW m⁻²

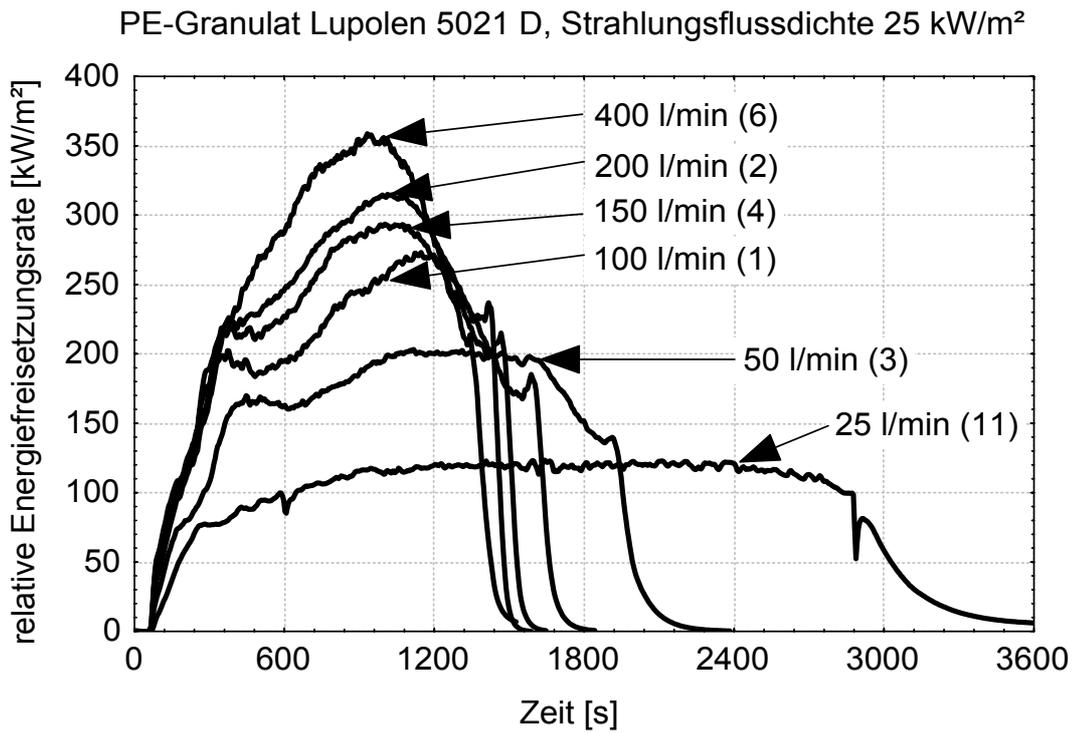


Diagramm B.18 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom, PE-Granulat Lupolen 5021 D, 25 kW m⁻²

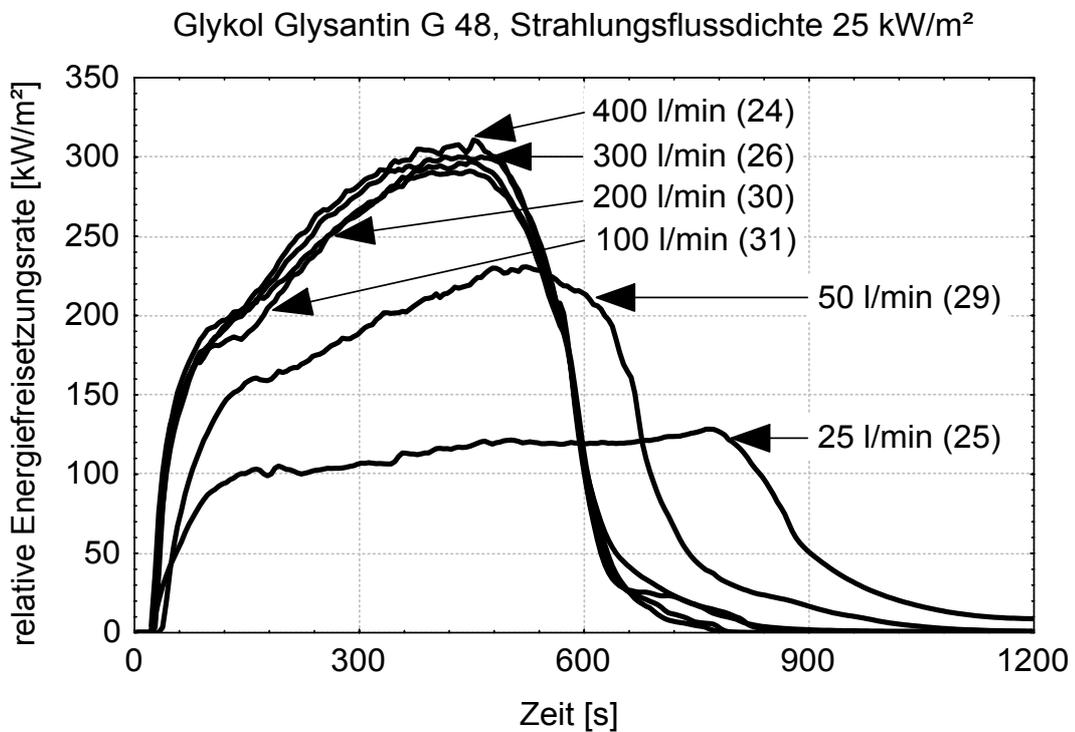


Diagramm B.19 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom, Glykol Glysantin G 48, 25 kW m⁻²

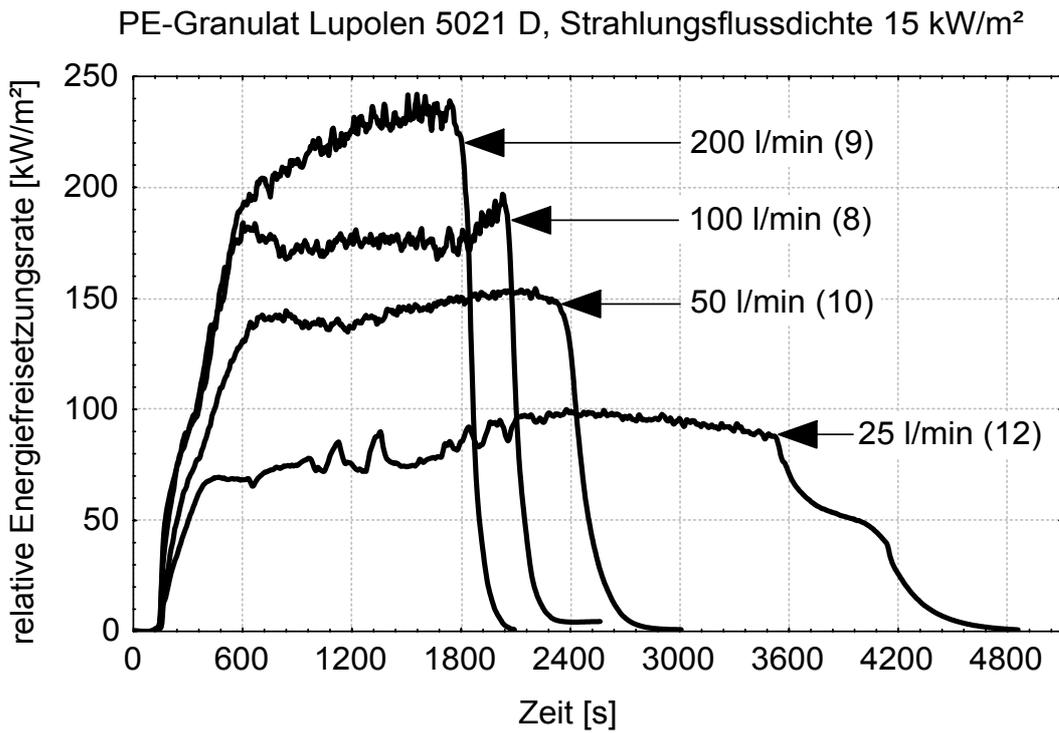


Diagramm B.20 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom, PE-Granulat Lupolen 5021 D, 15 kW m⁻²

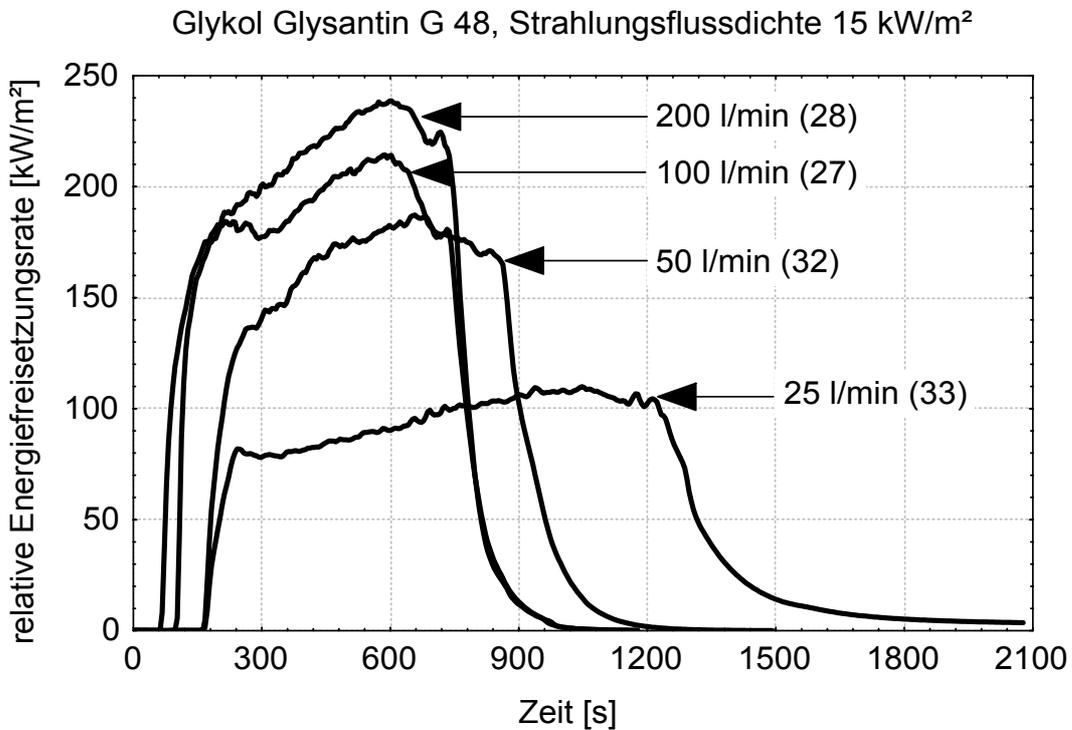


Diagramm B.21 Relative Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom, Glykol Glysantin G 48, 15 kW m⁻²

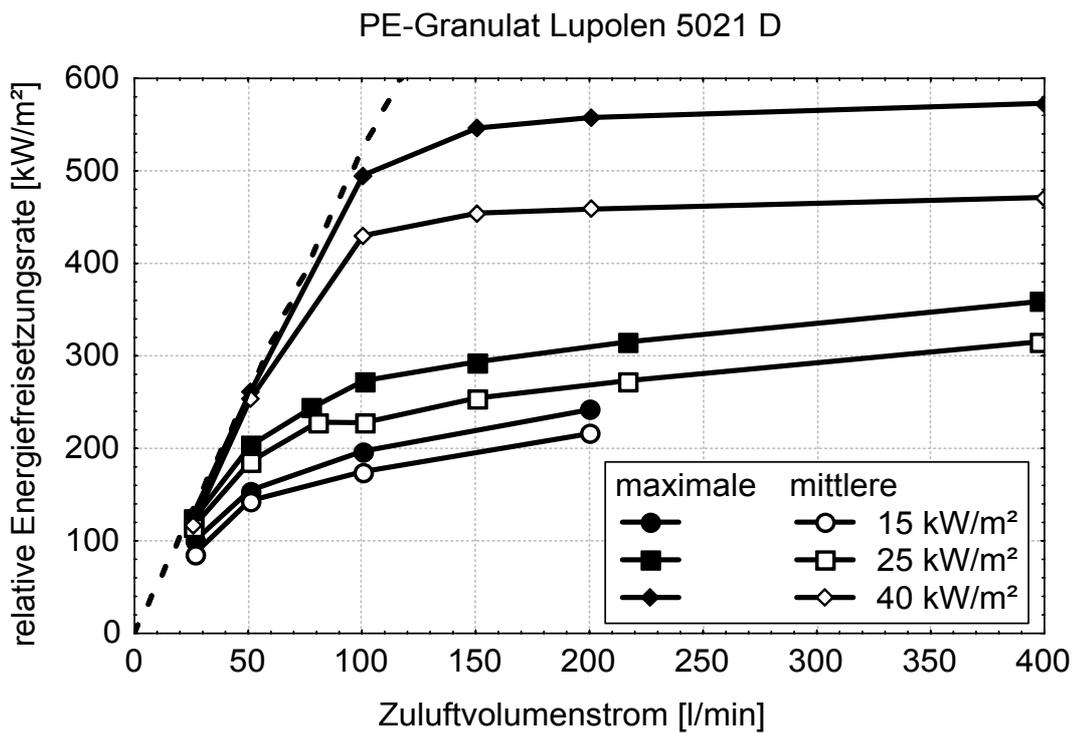


Diagramm B.22 Relative Energiefreisetzungsrate abhängig von Ventilation und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

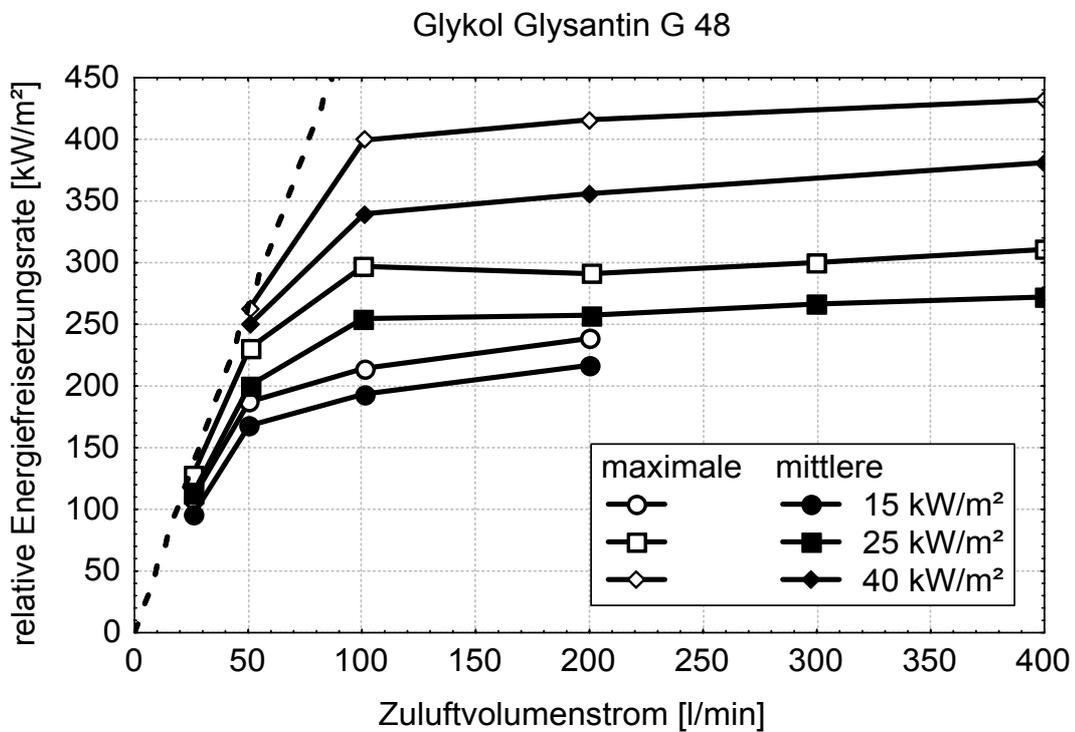


Diagramm B.23 Relative Energiefreisetzungsrate abhängig von Ventilation und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

Bei den beiden niedrigeren thermischen Beaufschlagungen (Strahlungsflussdichte 15 kW m^{-2} bzw. 25 kW m^{-2}) liegt der Annährungspunkt bei weniger als 50 l min^{-1} . In diesem Bereich ist auch ein Unterschied zwischen PE-Granulat und Glykol erkennbar. Der Abstand zwischen der Gerade für vollständigen Sauerstoffverbrauch und den Ergebnissen der Messungen in der Cone-Kammer im ventilationsgesteuerten Fall ist bei PE-Granulat signifikant größer als bei Glykol. Diese Beobachtung lässt sich damit erklären, dass bei der Verbrennung von Glykol, auch bei sehr kleinen Zuluftvolumenströmen, eine erheblich geringere Rauch- / Rußentstehung beobachtet wurde als bei PE-Granulat. Ruß besteht hauptsächlich aus unverbrannten Pyrolyseprodukten, d. h. aus Material, das fast nicht oxidiert wurde und damit nicht zum Sauerstoffverbrauch und zur Energiefreisetzung beigetragen hat. Je größer der Anteil der nicht-oxidierten Pyrolyseprodukte ist, umso kleiner ist die Verbrennungseffektivität und umso größer wird der Abstand zur theoretischen Gerade beim ventilationsgesteuerten Abbrand.

Auffällig ist ebenfalls, dass bei kleiner (15 kW m^{-2}) und mittlerer (25 kW m^{-2}) Strahlungsflussdichte die maximale und mittlere relative Energiefreisetzungsrate von PE-Granulat (Diagramm B.22) mit zunehmendem Zuluftvolumenstrom deutlich stärker ansteigt als bei Glykol (Diagramm B.23). Dieser Unterschied ist in gleicher Form auch bei der mittleren relativen Abbrandrate zu beobachten (Diagramm B.24, Diagramm B.25).

B.5.3 Brandverhalten in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis

Für die vergleichende Beschreibung ist der Zuluftvolumenstrom als Parameter weniger gut geeignet. Die Ventilationsbedingungen werden besser durch das Zuluftverhältnis ZLV als Verhältnis von angebotener Zuluftmenge zu der für eine stöchiometrische Verbrennung notwendigen Luftmenge charakterisiert. Alternativ wird auch der Kehrwert des Zuluftverhältnisses, das globale Äquivalenzverhältnis GER, verwendet (siehe Abschnitt A.2.6, Gleichung (2.20)). Der Nenner des Zuluftverhältnisses ZLV bzw. Zähler des globalen Äquivalenzverhältnisses GER berechnet sich aus dem Produkt von Abbrandrate \dot{m} und Zuluftbedarf r . In der weiteren Darstellung wird das Zuluftverhältnis ZLV verwendet, da es sehr anschaulich die Ventilationsverhältnisse widerspiegelt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei Bahadir et al. [B-28] und bei

Richter [B-29] die Normierung über das globale Äquivalenzverhältnis GER. Die Darstellung mit Hilfe des globalen Äquivalenzverhältnisses GER erscheint sinnvoll, wenn im Wesentlichen das Verhalten in der ventilationsgesteuerten Phase ($ZLV \leq 1$ bzw. $GER \geq 1$) von Interesse ist.

Selbstverständlich wäre es möglich, für jeden Zeitpunkt im Verlauf eines Versuchs ein „zeitlich aufgelöstes“ Zuluftverhältnis anzugeben, indem der Zuluftvolumenstrom ins Verhältnis zur Abbrandrate zusammen mit dem stoffspezifischen Zuluftbedarf zum entsprechenden Zeitpunkt gebracht wird. Diese Vorgehensweise würde aber zu einer unübersichtlichen Darstellung führen, aus der Gesetzmäßigkeiten schwer abzulesen wären. Daher wird die Bewertung des Abbrandverhalten auf Basis von Mittelwerten angewendet. Für die Bestimmung des Zeitintervalls, über das die Mittelwertbildung stattzufinden hat, wird das „MLR“-Kriterium benutzt (siehe Abschnitt B.3.2.5).

Die Bestimmung des Zuluftverhältnisses basiert auf der in Diagramm B.24 und Diagramm B.25 dargestellten mittleren relativen Abbrandrate. Aus diesen Diagrammen ließen sich schon die Zusammenhänge zwischen Abbrandrate und Ventilationsrandbedingungen ablesen. Allerdings kann das Abbrandverhalten besser diskutiert werden, wenn die Ergebnisse der Untersuchungen in Abhängigkeit vom Zuluftverhältnis dargestellt werden.

Da die Abbrandrate nicht nur durch die thermische Beaufschlagung, sondern auch durch die Ventilationsrandbedingungen beeinflusst wird, ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Zuluftverhältnis und Zuluftvolumenstrom nur in Bereichen hohen Zuluftvolumenstroms bzw. Zuluftverhältnisses (Diagramm B.26, Diagramm B.27). Die Steigung dieser Gerade ergibt sich im Idealfall aus dem Zuluftbedarf und der mittleren Abbrandrate gemäß Gleichung (19). Bei ausreichender Ventilation, d. h. wenn die Abbrandrate nicht mehr durch Vergrößern des Zuluftvolumenstrom gesteigert werden kann, muss diese Anpassungsgerade durch den Koordinatenursprung verlaufen. Unter diesem Aspekt ergibt ein deutlicher Unterschied zwischen PE-Granulat und Glykol.

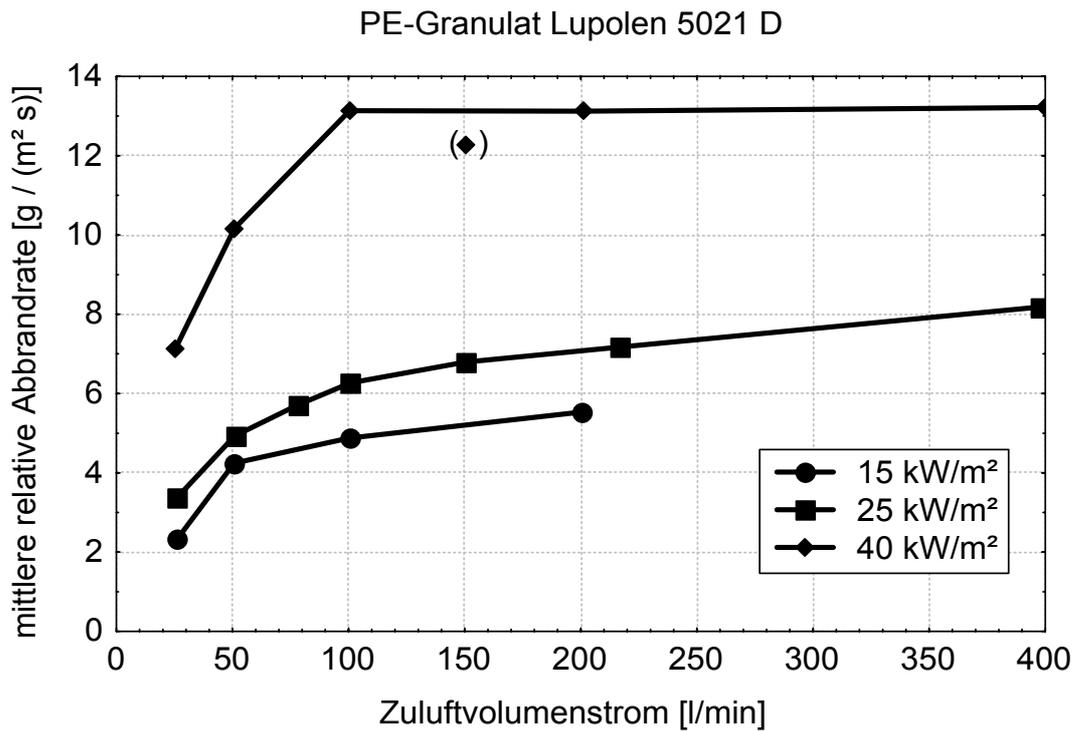


Diagramm B.24 Mittlere relative Abbrandrate abhängig von Ventilation und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

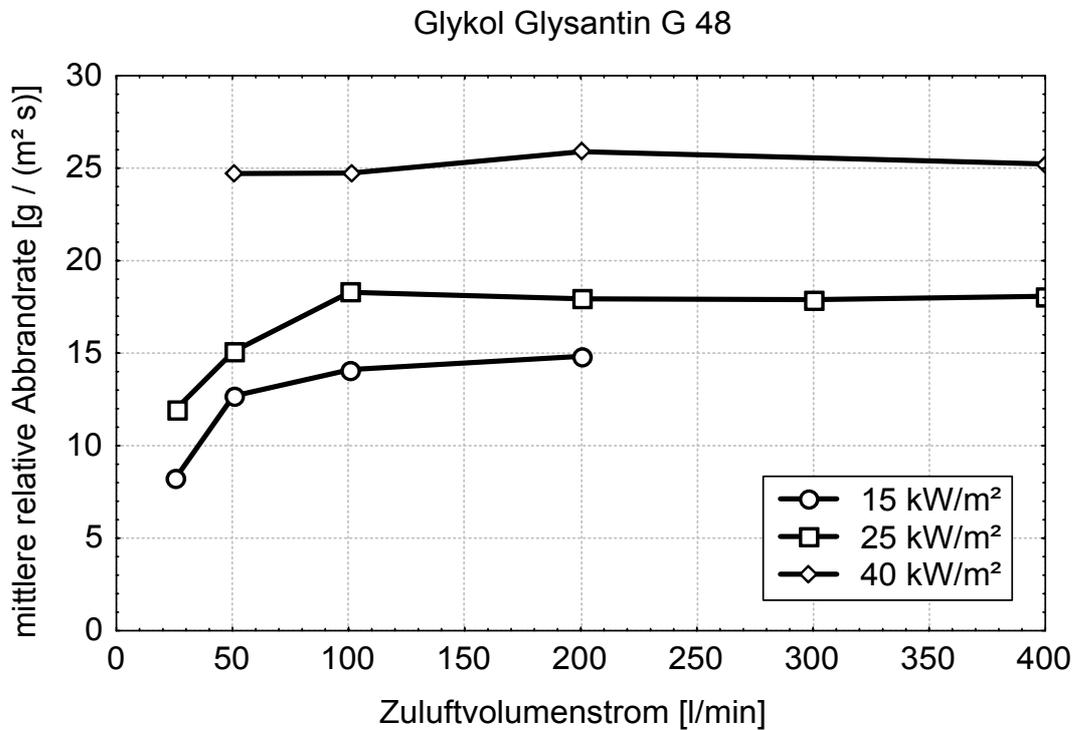


Diagramm B.25 Mittlere relative Abbrandrate abhängig von Ventilation und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

In Diagramm B.24 bzw. Diagramm B.28 zeigt sich, dass bei PE-Granulat die mittlere relative Abbrandrate auch bei großem Zuluftvolumenstrom mit zunehmender Sauerstoffversorgung ansteigt. Erst bei größerer Strahlungsflussdichte (40 kW m^{-2}) ergibt sich der idealisierte Zustand, d. h. die Abbrandrate ist unabhängig von der externen Energiezufuhr. Dieses Verhalten wird durch die Auftragung des Zuluftverhältnisses über dem Zuluftvolumenstrom in Diagramm B.26 noch einmal verdeutlicht.

Bei Glykol liegen die Punkte bei ausreichender Zuluft (Zuluftverhältnis $> 1,5$) unabhängig auch bei geringerer Strahlungsflussdichte (15 kW m^{-2} , 25 kW m^{-2}) auf der idealisierten Gerade (Diagramm B.27), d. h. die Abbrandrate von Glykol wird bei einem Zuluftverhältnis über 1,5 nicht mehr nennenswert durch die Zuluftmenge beeinflusst. Bei einer Strahlungsflussdichte von 40 kW m^{-2} wird die Abbrandrate überhaupt nicht mehr von der Zuluftmenge beeinflusst. Dieser Zusammenhang stimmt mit den Darstellungen in Diagramm B.25 bzw. Diagramm B.29 überein.

Die mittlere relative Abbrandrate von PE-Granulat steigt bei einem Zuluftverhältnis oberhalb 1,5 und einer Strahlungsflussdichte von 15 kW m^{-2} und 25 kW m^{-2} weiterhin geringfügig an (Diagramm B.28). Bei Glykol tritt dieser kontinuierliche Anstieg bei einer Strahlungsflussdichte von 25 kW m^{-2} nicht auf (Diagramm B.29). Bei einer Strahlungsflussdichte von 40 kW m^{-2} beeinflusst das Zuluftverhältnis die mittlere relative Abbrandrate von PE-Granulat Glykol nicht nennenswert. Mit abnehmendem Zuluftverhältnis unterhalb des Wertes von 1,5 sinkt die mittlere relative Abbrandrate stark ab. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei Glykol zu beobachten. Bei einer Strahlungsflussdichte von 15 kW m^{-2} und 25 kW m^{-2} sinkt die mittlere relative Abbrandrate bei einem Zuluftverhältnis unterhalb von 2 stark ab. Dieser Unterschied im Verhalten von Glykol im Gegensatz zu PE-Granulat kann erklärt werden, wenn man annimmt, dass das feste Granulat erheblich mehr Energie aufnehmen muss als das flüssige Glykol, um in die Phase überführt zu werden, in der es mit dem Luftsauerstoff reagiert und verbrennt. Ein erheblicher Teil dieser Energie muss durch die Verbrennung selbst und nicht durch die Strahlung des Cone-Heizers bereitgestellt werden.

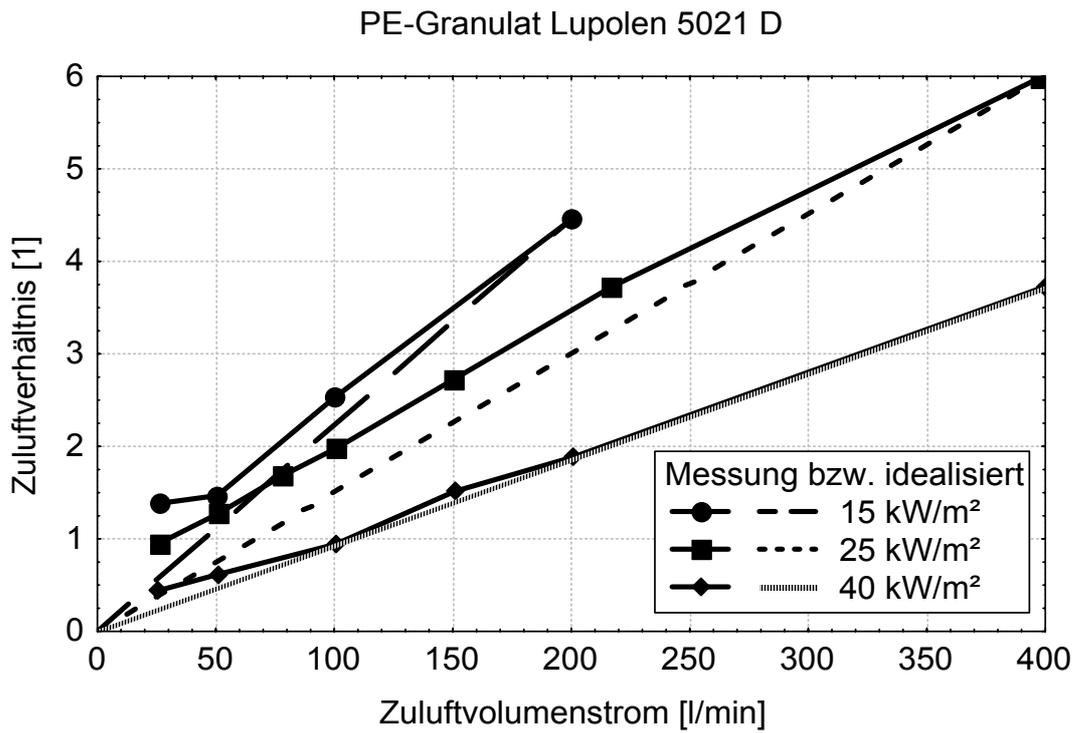


Diagramm B.26 Zuluftverhältnis abhängig von Zuluftvolumenstrom und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

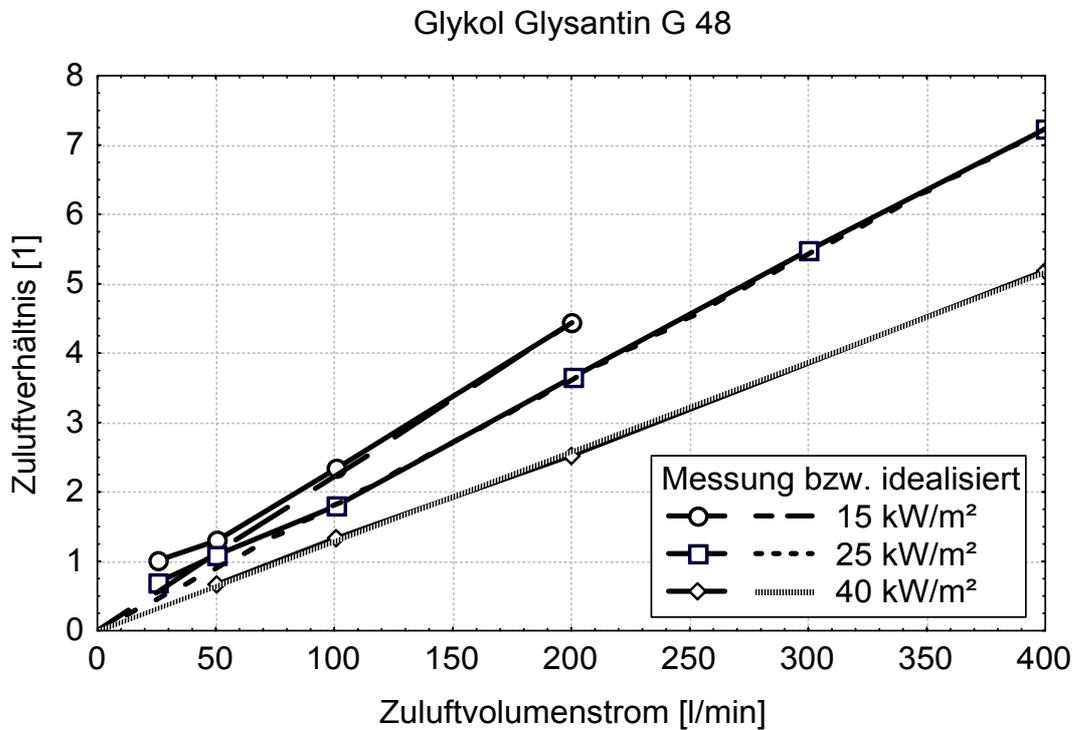


Diagramm B.27 Zuluftverhältnis abhängig von Zuluftvolumenstrom und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

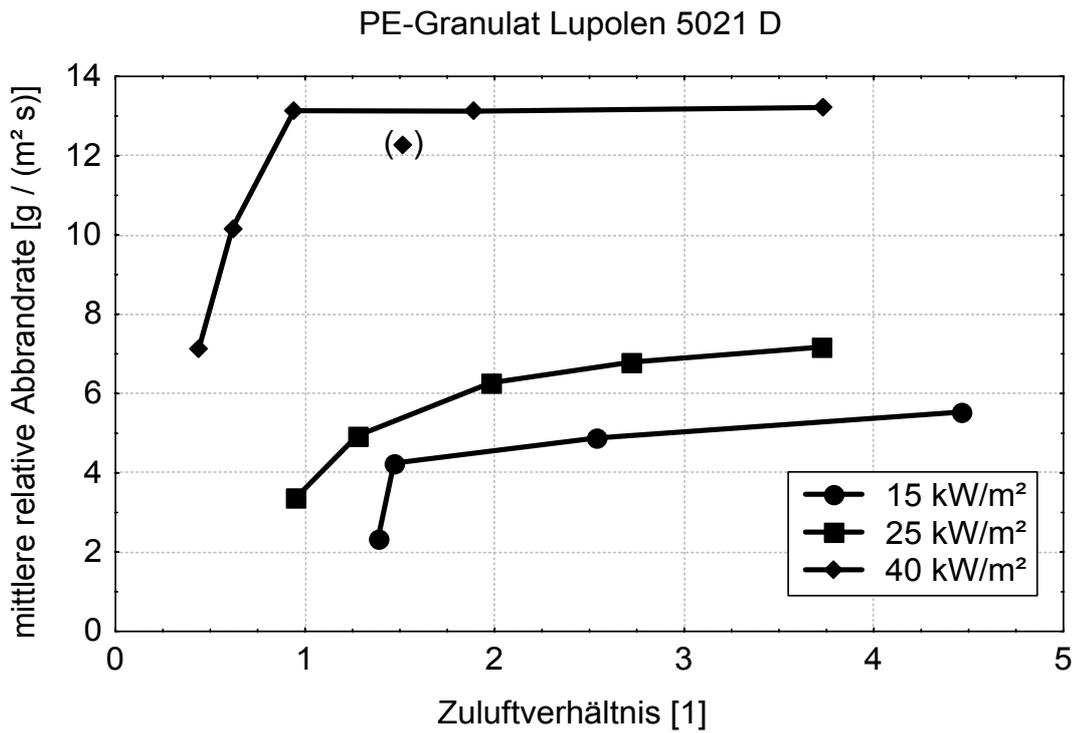


Diagramm B.28 Mittlere relative Abbrandrate abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

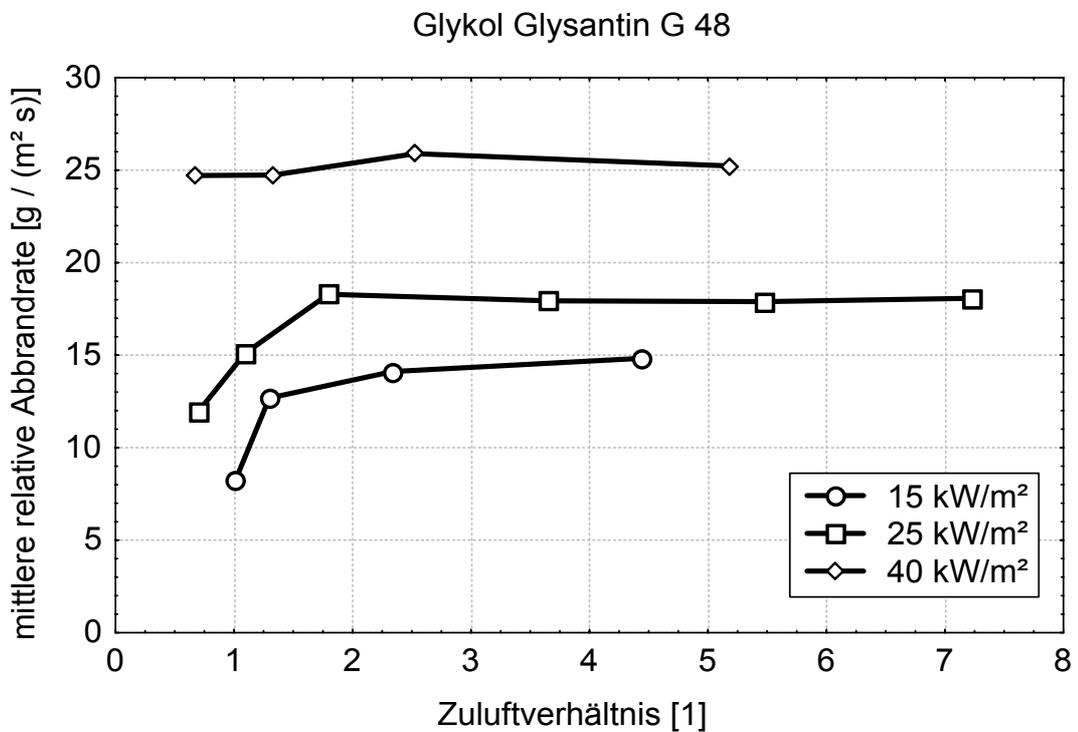


Diagramm B.29 Mittlere relative Abbrandrate abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

Dieses Verhalten hängt sicherlich damit zusammen, dass im Gegensatz zum Glykol, bei dem nur der Phasenübergang von der flüssigen in die gasförmige Phase auftritt, bei PE-Granulat vorher ein Phasenübergang vom festen in den flüssigen Zustand bei der thermischen Aufbereitung überwunden werden muss.

Als nächstes wird die Abhängigkeit der mittleren relativen Energiefreisetzungsrate vom Zuluftverhältnis betrachtet (Diagramm B.30, Diagramm B.31). Wird das jeweilige Material mit 15 kW m^{-2} oder 25 kW m^{-2} thermisch beaufschlagt, so ist die mittlere relative Energiefreisetzungsrate bei niedrigem Zuluftverhältnis bei PE-Granulat kleiner als bei Glykol. Erst mit zunehmendem Luftangebot kann sich der Brand des PE-Granulats voll entwickeln. Bei großer Strahlungsflussdichte (40 kW m^{-2}) verliert die Vorwärmung des Granulats durch die eigene Verbrennung und Energiefreisetzung an Einfluss. Daher ist unter diesen Randbedingungen die relative Energiefreisetzungsrate von PE-Granulat schon bei kleinem Zuluftverhältnis größer als die von Glykol.

Die effektive Verbrennungswärme von PE-Granulat (Diagramm B.32) und von Glykol (Diagramm B.33) liegt in allen Fällen deutlich unter dem jeweiligen Heizwert. Für eine übergreifende Betrachtung ist es sinnvoll, anstelle der effektiven Verbrennungswärme die Verbrennungseffektivität als Verhältnis von effektiver Verbrennungswärme zu unterem Heizwert zu betrachten.

Bei Glykol stellt sich der Zusammenhang zwischen Verbrennungseffektivität und Zuluftverhältnis (Diagramm B.35) relativ einfach dar. Oberhalb eines Zuluftverhältnisses von ca. 1,5 nimmt die Verbrennungseffektivität nur unwesentlich zu und erreicht einen maximalen Wert von ca. 0,9. Unterhalb des Zuluftverhältnisses von 1,5 verringert sich die Verbrennungseffektivität mit abnehmender Zuluftmenge erheblich. Eine Abhängigkeit der Verbrennungseffektivität von der Strahlungsflussdichte ist bei Glykol nicht eindeutig erkennbar.

Für PE-Granulat ist der Zusammenhang zwischen Zuluftverhältnis und Verbrennungseffektivität (Diagramm B.34) nur bei der hohen externen Beaufschlagung (40 kW m^{-2}) mit dem von Glykol vergleichbar. Bei den beiden anderen Niveaus der Strahlungsflussdichte (15 kW m^{-2} , 25 kW m^{-2}) ist dagegen erkennbar, dass bei einem Zuluftverhältnis in der Nähe des Wertes 1 die Verbrennungseffektivität wieder ansteigt.

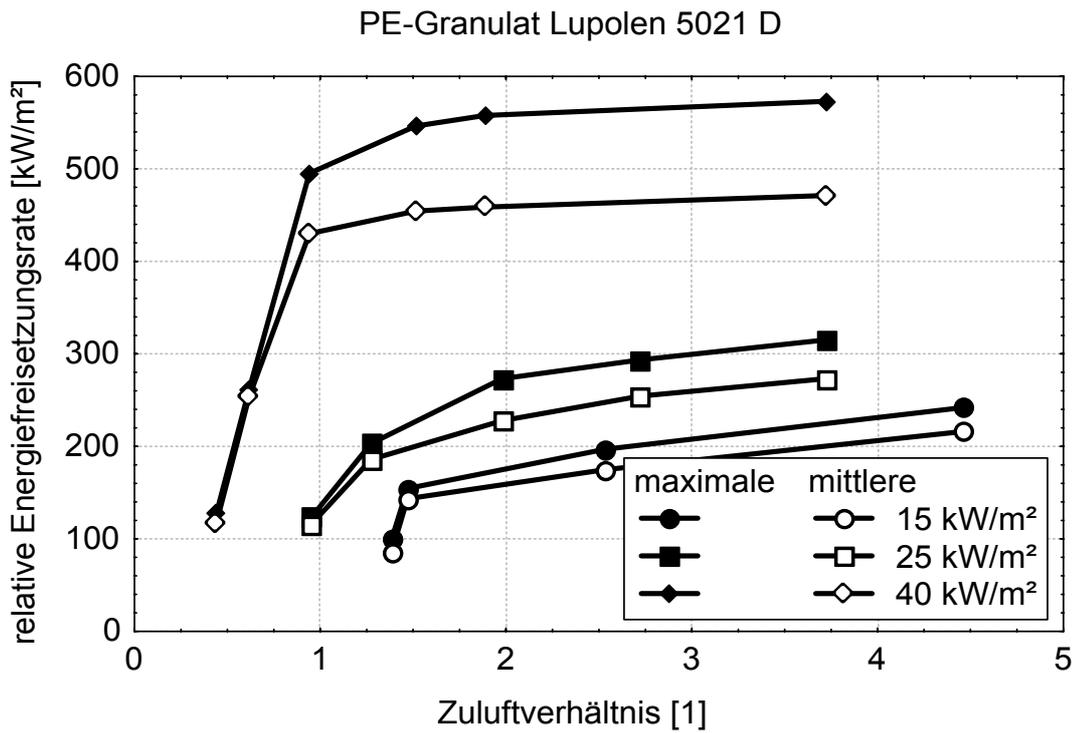


Diagramm B.30 Relative Energiefreisetzungsrate abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

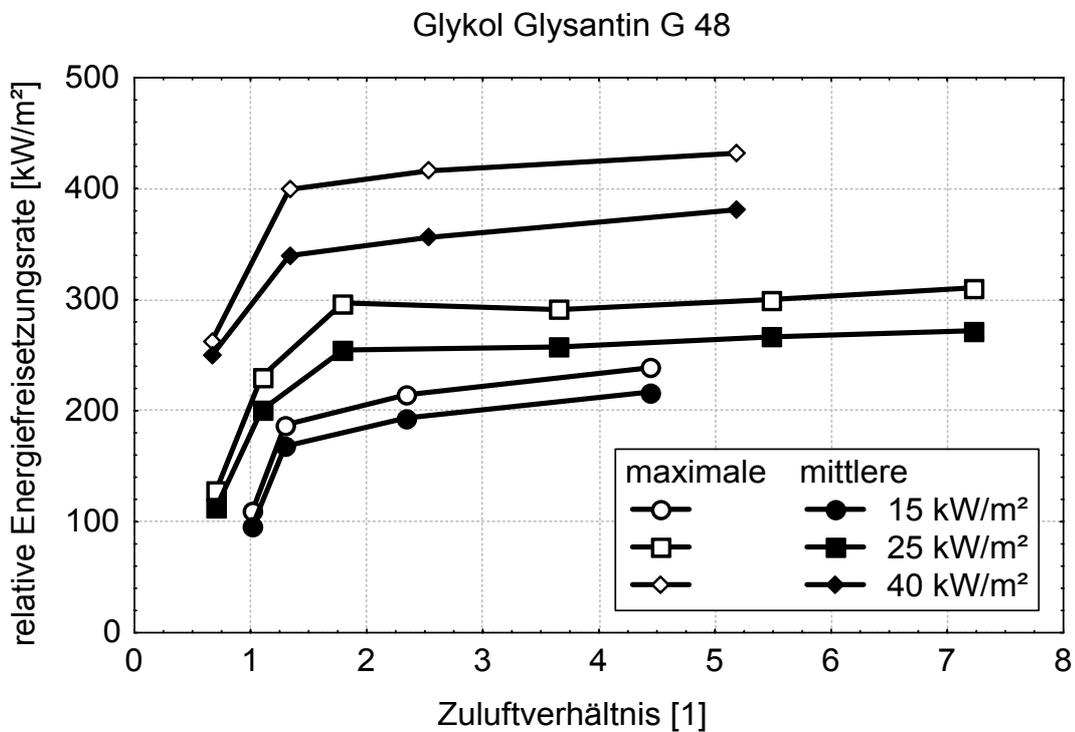


Diagramm B.31 Relative Energiefreisetzungsrate abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

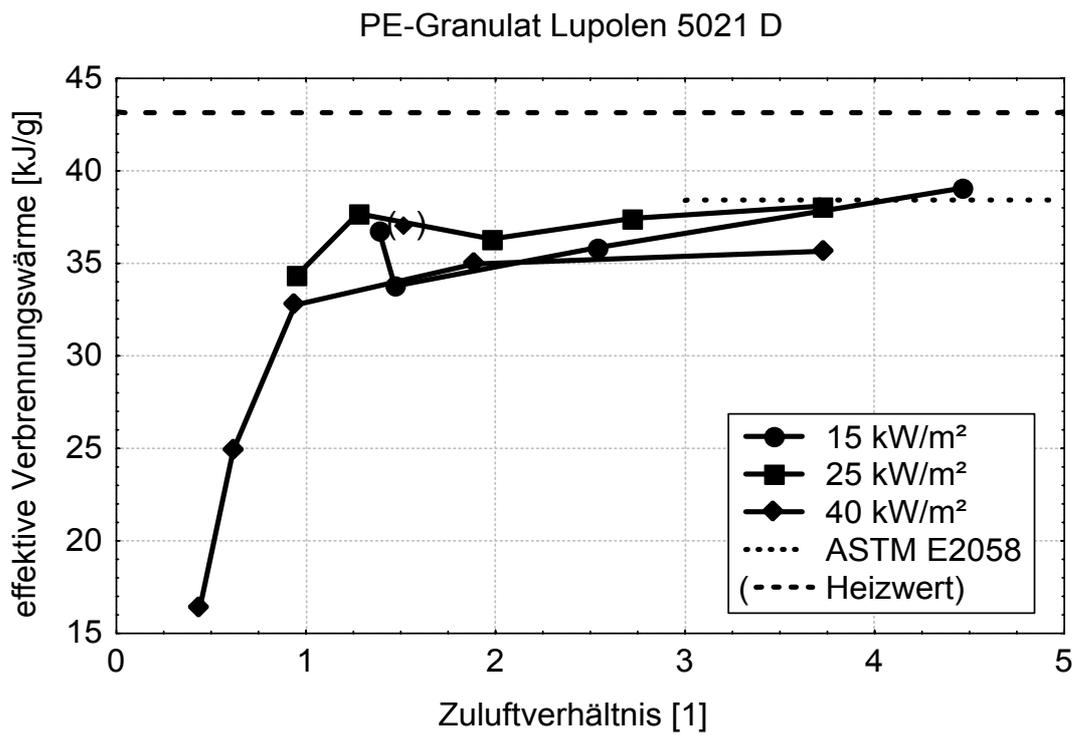


Diagramm B.32 Effektive Verbrennungswärme abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

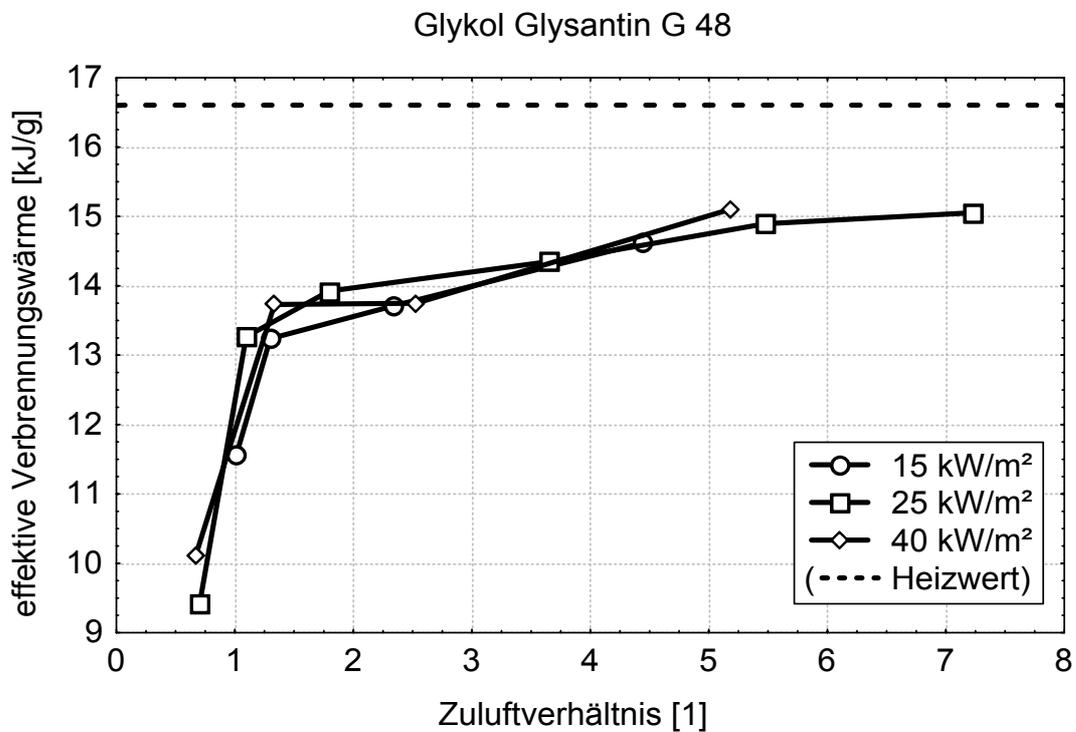


Diagramm B.33 Effektive Verbrennungswärme abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

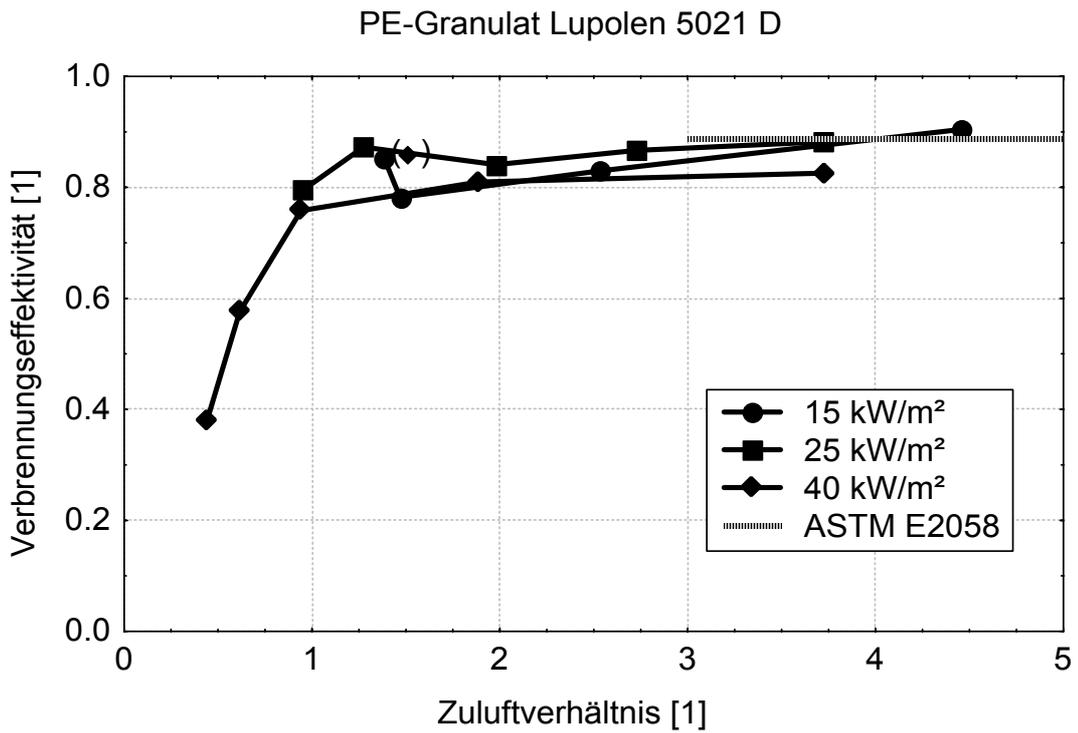


Diagramm B.34 Verbrennungseffektivität χ abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

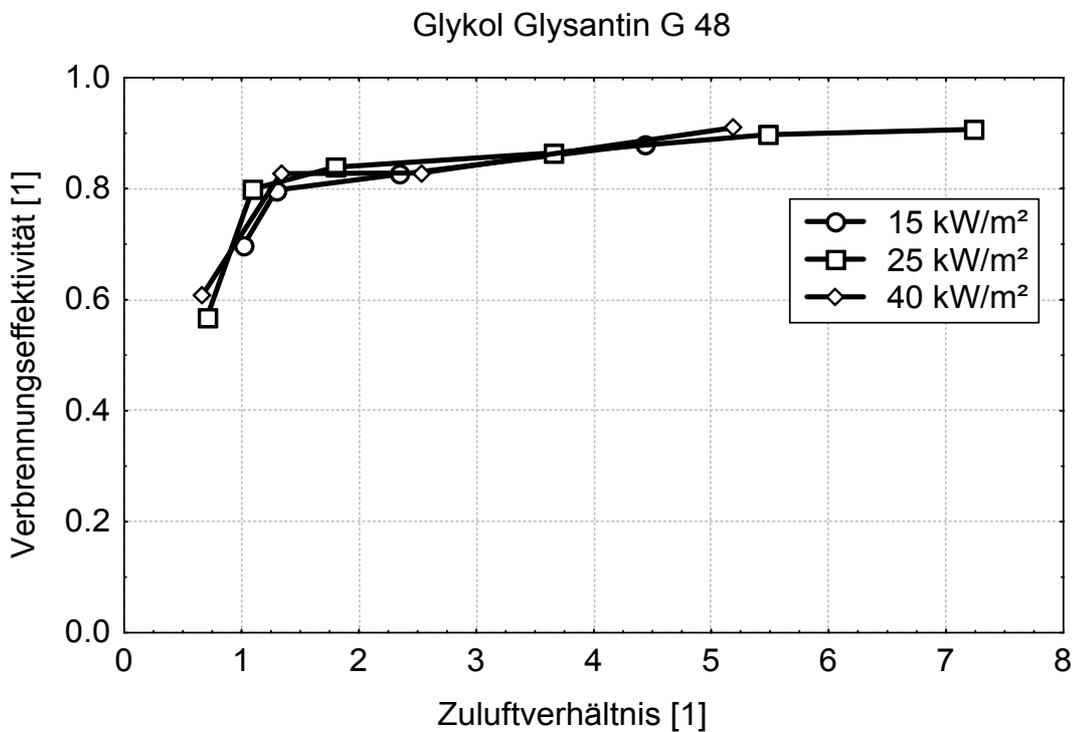


Diagramm B.35 Verbrennungseffektivität χ abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

Die Schadgasausbeute, insbesondere die Ausbeute von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, ist neben der effektiven Verbrennungswärme bzw. der Verbrennungseffektivität eine wichtige Größe zur Charakterisierung der Verbrennungseigenschaften und zur Beschreibung der Risiken für Personen bzw. die Umwelt. Üblicherweise wird die Ausbeute als Verhältnis der entstandenen Masse des jeweiligen Verbrennungsproduktes zur umgesetzten Brennstoffmasse angegeben.

Die Kohlendioxidausbeute von PE-Granulat (Diagramm B.36) bzw. Glykol (Diagramm B.37) verhält sich bezüglich Variationen der Strahlungsflussdichte oder Zuluftmenge analog zur Verbrennungseffektivität. Aufgrund des geringeren Kohlenstoffanteils ist die Kohlendioxidausbeute für Glykol insgesamt erheblich niedriger als bei PE-Granulat.

In den Diagrammen ist zusätzlich die maximale Kohlendioxidausbeute eingetragen. Die maximale Kohlendioxidausbeute $Y_{\text{CO}_2, \text{max}}$ berechnet sich aus der Molmasse des Brennstoffs $M_{\text{Brennstoff}}$, dem molaren Kohlenstoffanteil a und der Molmasse von Kohlendioxid M_{CO_2} :

$$Y_{\text{CO}_2, \text{max}} = \frac{M_{\text{Brennstoff}}}{a \cdot M_{\text{CO}_2}} \quad (27)$$

Es zeigt sich, dass bei beiden Materialien bei weitem keine vollständige Umsetzung erreicht wird. Das Maximum der tatsächlichen Kohlendioxidausbeute liegt bei ca. 80 % der maximal möglichen.

Die Kohlenmonoxidausbeute (Diagramm B.38) verhält sich bei PE-Granulat wie erwartet. Mit zunehmender Strahlungsflussdichte wird die Umsetzung des Kohlenstoffs besser, d. h. es entsteht weniger Kohlenmonoxid. Außerdem zeigt sich bei hoher Strahlungsflussdichte ein ausgeprägtes Minimum der Kohlenmonoxidausbeute bei einem Zuluftverhältnis von ca. 2. Dieses Minimum verschiebt sich scheinbar mit abnehmender Strahlungsflussdichte zu größeren Zuluftverhältnis-Werten. Ein vergleichbarer Effekt ist bei Glykol (Diagramm B.39) nicht nachweisbar. Insgesamt ist die Kohlenmonoxidausbeute bei Glykol mehr als 10-mal kleiner als bei PE-Granulat. Dieser Wert relativiert sich aber, wenn man bedenkt, dass Glykol mit einer zweimal größeren Materialumsetzung abbrennt. Die Bestimmung der Kohlenmonoxidausbeu-

te bei der Verbrennung von Glykol ist allgemein mit einem verhältnismäßig großen Fehler behaftet, da bei einer vergleichsweise großen Abbrandrate wenig Kohlenmonoxid entsteht, der CO-Anteil in der Abluft klein ist und die Bestimmung der CO-Volumenstromänderung damit eine größere Ungenauigkeit aufweist.

Äquivalent zur Verbrennungseffektivität als Verhältnis von tatsächlicher zu maximal möglicher Energiefreisetzung kann eine relative Kohlendioxidausbeute χ_{CO_2} als Verhältnis von tatsächlicher Kohlendioxidausbeute zu maximaler Kohlendioxidausbeute (vollständige Umsetzung des im Brennstoff enthaltenen Kohlenstoffs in Kohlendioxid) angegeben werden:

$$\chi_{\text{CO}_2} = \frac{Y_{\text{CO}_2}}{Y_{\text{CO}_2, \text{st\oichiometrisch}}} \quad (28)$$

Die Gegenüberstellung von Verbrennungseffektivität und relativer Kohlendioxidausbeute zeigt wiederum den Unterschied im Abbrandverhalten zwischen den beiden untersuchten Materialien. Bei PE-Granulat (Diagramm B.40) ist die relative Kohlendioxidausbeute grundsätzlich kleiner als die Verbrennungseffektivität. Dagegen stimmen diese beiden Parameter (χ und χ_{CO_2}) bei Glykol annähernd überein (Diagramm B.41).

Diese Unterschiede lassen sich mit der gemessenen, erheblich höheren Kohlenmonoxidausbeute bei der Verbrennung von PE-Granulat gegenüber Glykol erklären. Bei Glykol entsteht wenig Kohlenmonoxid, d. h. der Sauerstoff wird bei der fast vollständigen Oxidation verbraucht. Damit sind Verbrennungseffektivität und relative Kohlendioxidausbeute annähernd gleich. Die „fehlenden“ Anteile gehen mit unverbranntem Glykol verloren. Bei PE-Granulat trägt im Gegensatz dazu der Brennstoffanteil, der im Vergleich zu Glykol in großer Menge nur zu Kohlenmonoxid oxidiert wird, zwar noch im geringeren Maße zur Energiefreisetzung, aber nicht zur Kohlendioxidentstehung bei, so dass die Verbrennungseffektivität größer ist als die relative Kohlendioxidausbeute.

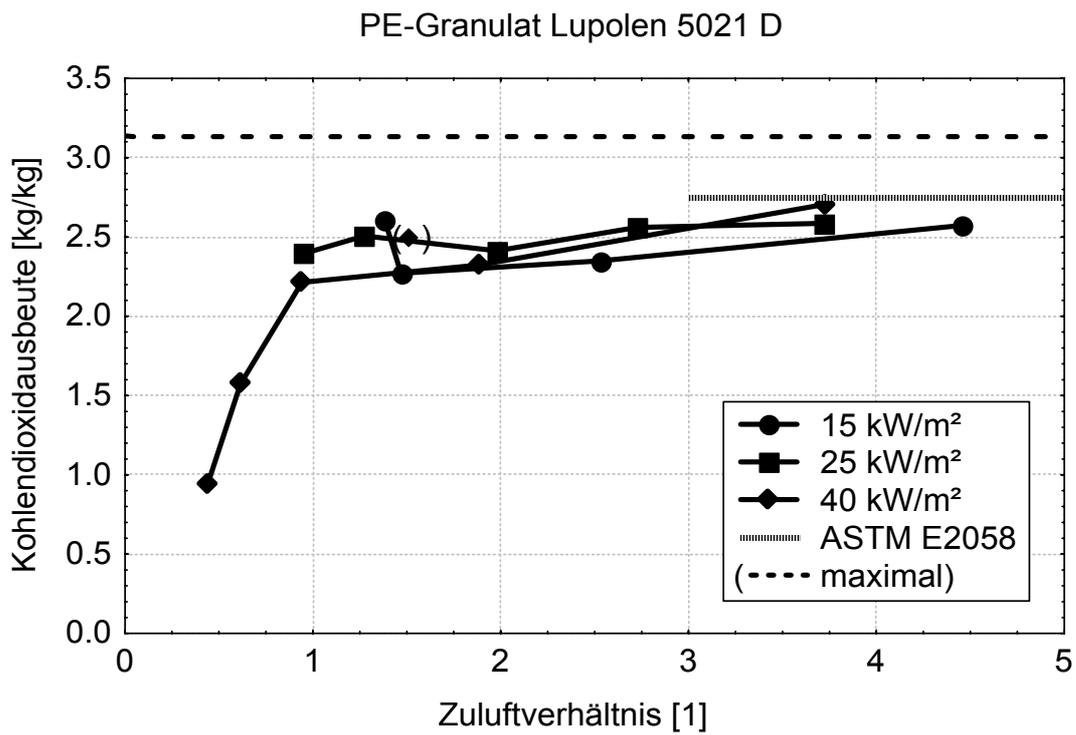


Diagramm B.36 Kohlendioxidausbeute abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

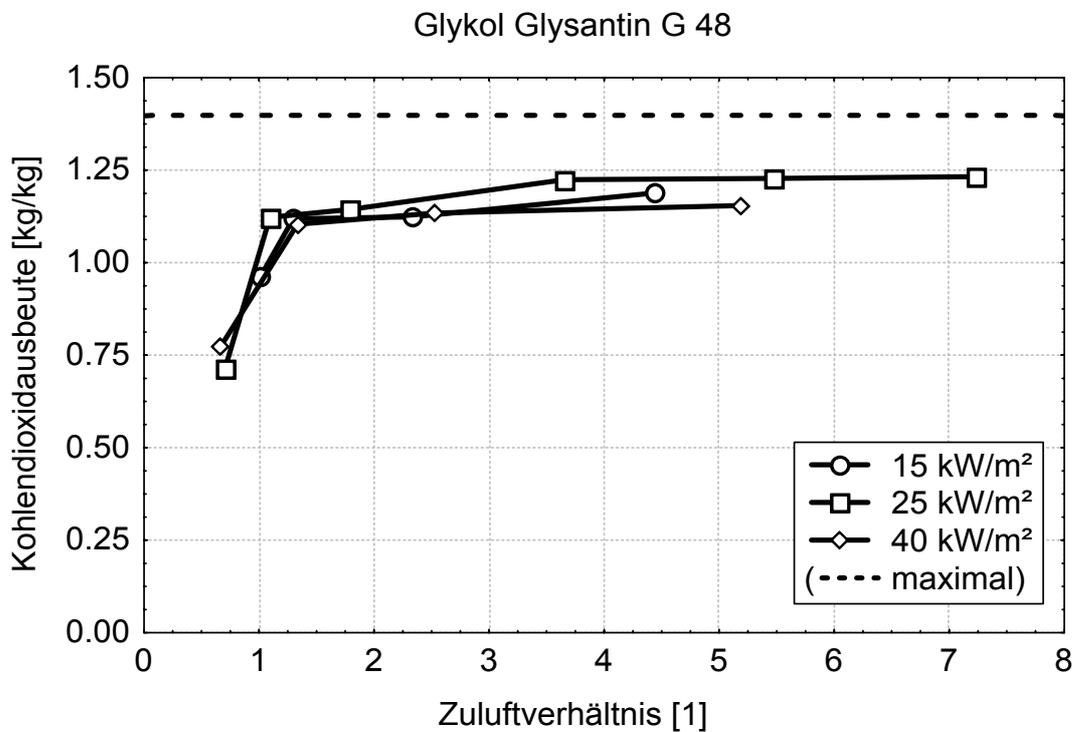


Diagramm B.37 Kohlendioxidausbeute abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

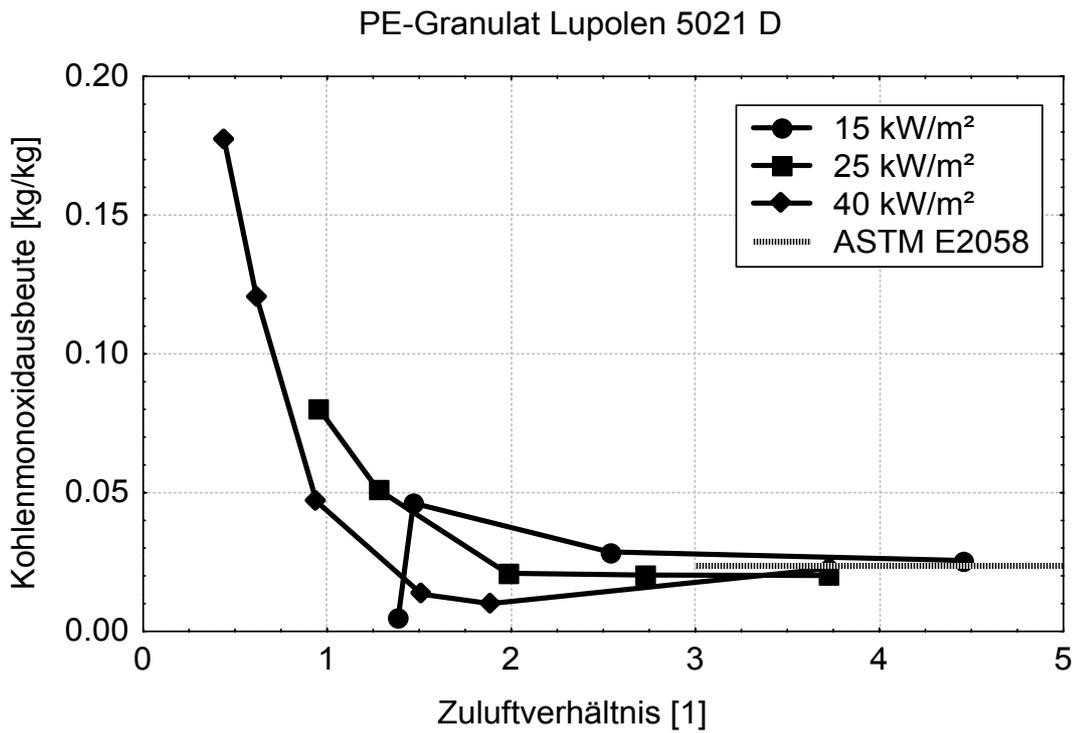


Diagramm B.38 Kohlenmonoxidausbeute abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, PE-Granulat Lupolen 5021 D

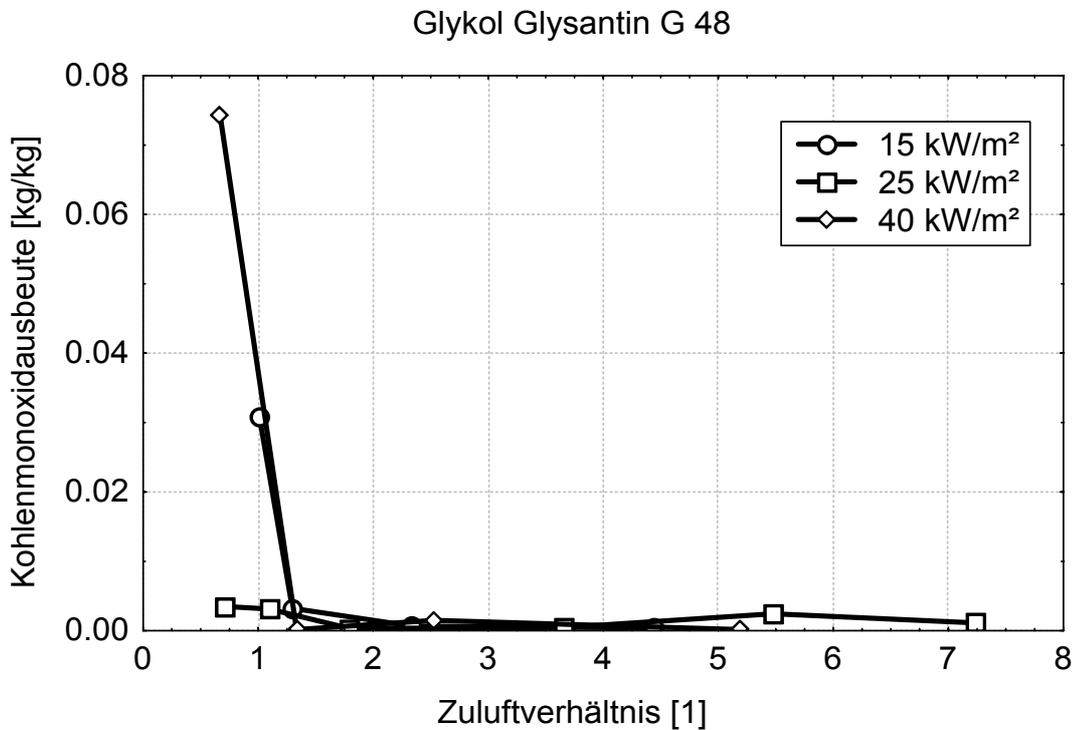


Diagramm B.39 Kohlenmonoxidausbeute abhängig von Zuluftverhältnis und Strahlungsflussdichte, Glykol Glysantin G 48

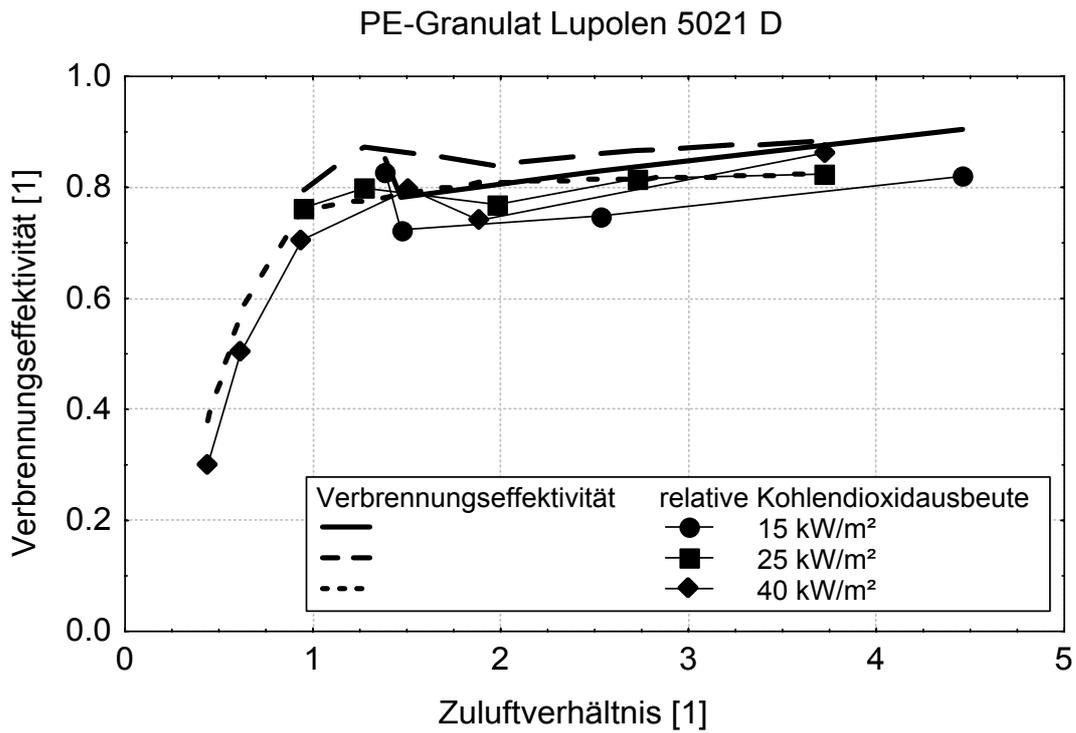


Diagramm B.40 Vergleich von Verbrennungseffektivität χ und relativer Kohlendioxidausbeute χ_{CO_2} , PE-Granulat Lupolen 5021 D

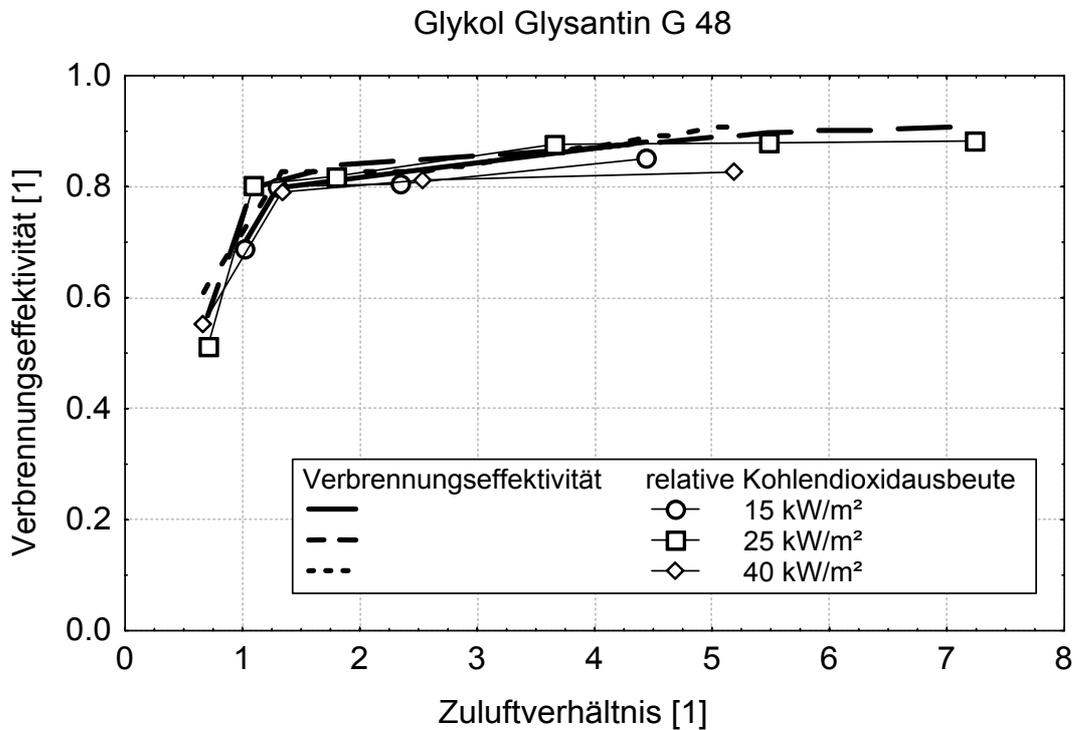


Diagramm B.41 Vergleich von Verbrennungseffektivität χ und relativer Kohlendioxidausbeute χ_{CO_2} , Glykol Glysantin G 48

B.6 Vergleich mit Raumbrandversuchen

Im Rahmen der Entwicklung der ISO 9705 Room-Corner-Test [B-11] und der ISO 5660 Cone-Calorimeter [B-8] konnten Korrelationen zwischen bestimmten Ergebnisgrößen festgestellt werden und ein Modell zur Vorhersage des zeitlichen Verlaufs der Energiefreisetzungsrate im Realmaßstab (Room-Corner-Test) auf Basis von labormaßstäblichen Untersuchungen (Cone-Calorimeter) aufgestellt werden [B-35]. Dieses Modell beruht darauf, dass die Größen Energiefreisetzungsrate und Abbrandrate auf die brennende Fläche bezogen als maßstabsunabhängige Eigenschaften angenommen werden können. Dabei ist zu beachten, dass diese beiden Größen von der thermischen Beaufschlagung abhängen, d. h. bei gleicher auf die Fläche wirkender Wärmestromdichte im Realmaßstab und im Labormaßstab übereinstimmen.

Die effektive Verbrennungswärme und die Ausbeute von Verbrennungsprodukten variieren als auf die umgesetzte Brennstoffmasse bezogene Größen bei der brandlastgesteuerten Verbrennung erfahrungsgemäß in engen Grenzen. Aus diesem Grund erfolgt die Auslegung von Bauteilen in erster Näherung auf Basis der Brandlastdichte als freisetzbare Energiemenge pro Flächeneinheit. Die Auslegung kann verfeinert werden, indem die unvollständige Verbrennung unter Naturbrandbedingungen mit Hilfe der Verbrennungseffektivität berücksichtigt wird. Hierauf beruht das Auslegungsverfahren für kerntechnische Anlagen [B-1, B-2]. Der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzung wird indirekt beim Verfahren der Industriebauform durch Verwendung des Abbrandfaktors m berücksichtigt [B-36]. Der Abbrandfaktor ist keine physikalische Größe, sondern ein Bewertungsfaktor, der die thermische Wirkung in Relation zum Abbrand von Holz stellt und durch vergleichende Messung an einem Referenzbauteil bestimmt wird [B-37].

Parallel zu den Untersuchungen in der Cone-Kammer wurden Raumbrandversuche mit PE-Granulat und Glykol als Pool-Feuer durchgeführt [B-3, B-4]. Diese Raumbrandversuche wurden ebenfalls nach dem Prinzip der Sauerstoffkalorimetrie vermessen und ausgewertet. Durch Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit in den Öffnungen der Brandkammer konnte der Zuluftvolumenstrom berechnet und mit Hilfe der Abbrandrate auf das Zuluftverhältnis ZLV geschlossen werden. Somit stehen neben der Abbrandrate und Energiefreisetzungsrate die Parameter effektive Ver-

brennungswärme, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute als zuluftbezogene Ergebnisgrößen für eine vergleichende Betrachtung zur Verfügung.

B.6.1 Abbrandrate und Energiefreisetzungsrate

Bei den Raumbrandversuchen mit PE-Granulat wurde für ein Zuluftverhältnis von 1 - 4,2 eine relative Abbrandrate im Mittel („MLR 10-80 %“) von $22 - 24 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ berechnet. Bei den Raumbränden mit Glykol als Brandlast wurde eine relative Abbrandrate von $15 - 23 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei einem Zuluftverhältnis von 0,33 - 3 ermittelt. Für PE-Granulat liegt die im Raumbrandversuch ermittelte relative Abbrandrate deutlich über der in der Cone-Kammer bei einer Strahlungsflussdichte von 40 kW m^{-2} gemessenen (Diagramm B.42). Die Messung der Wärmestromdichte in Bodennähe ergab bei den Raumbrandversuchen mit PE-Granulat eine Gesamtwärmestromdichte von $20 - 40 \text{ kW m}^{-2}$ [B-3, B-4]. Berücksichtigt man den größeren Abstand der Detektoren zur Flamme, der auf eine erheblich höhere Wärmestromdichte an der Brennstoffoberfläche schließen lässt, dann ist die höhere relative Abbrandrate im Vergleich zu den Versuchen in der Cone-Kammer plausibel. Die Werte für die relative Abbrandrate von Glykol liegen knapp unter der in der Cone-Kammer für 40 kW m^{-2} bestimmten mittleren relativen Abbrandrate, aber über der für 25 kW m^{-2} (Diagramm B.43). Die spezifische Rauchentwicklung für Glykol ist mit $0,08 - 1,16 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ gegenüber PE-Granulat mit $360 - 400 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ um einen Faktor von etwa 1000 geringer [B-3, B-4]. Damit erklärt sich die kleinere relative Abbrandrate von Glykol bei einem Zuluftverhältnis von ca. 3 mit der sehr geringen Rußbildung und der daraus resultierenden geringen Strahlung von der Flamme und der Heißgasschicht auf die Brennstoffoberfläche.

Der Vergleich der in der Cone-Kammer und im Raumbrandversuch bestimmten relativen Abbrandrate zeigt, dass die mit einer Strahlungsflussdichte von 25 kW m^{-2} und mit 40 kW m^{-2} durchgeführten Versuche in der Cone-Kammer bezüglich der Abbrandrate repräsentativ für vollentwickelte Glykol-Brände in Räumen sind. Um eine vergleichbare Abbrandrate bei PE-Granulat zu erzeugen, müssen in der Cone-Kammer allerdings höhere Strahlungsflussdichten (Größenordnung $50 - 75 \text{ kW m}^{-2}$) eingestellt werden.

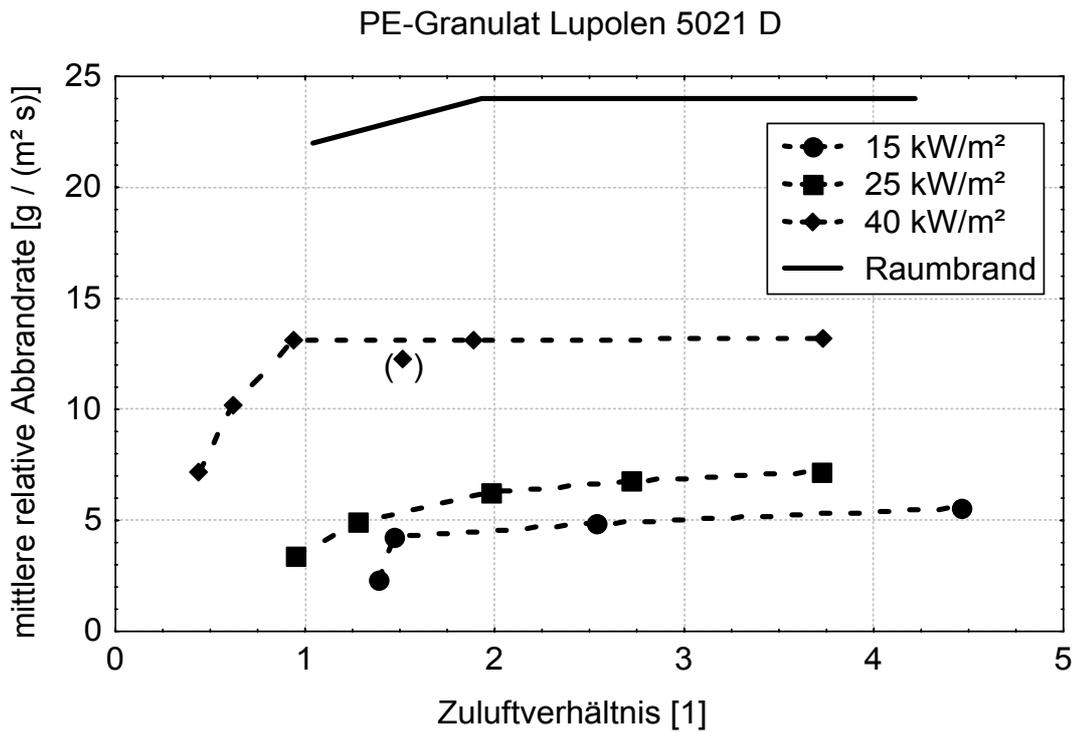


Diagramm B.42 Vergleich der relativen Abbrandrate, PE-Granulat Lupolen 5021 D

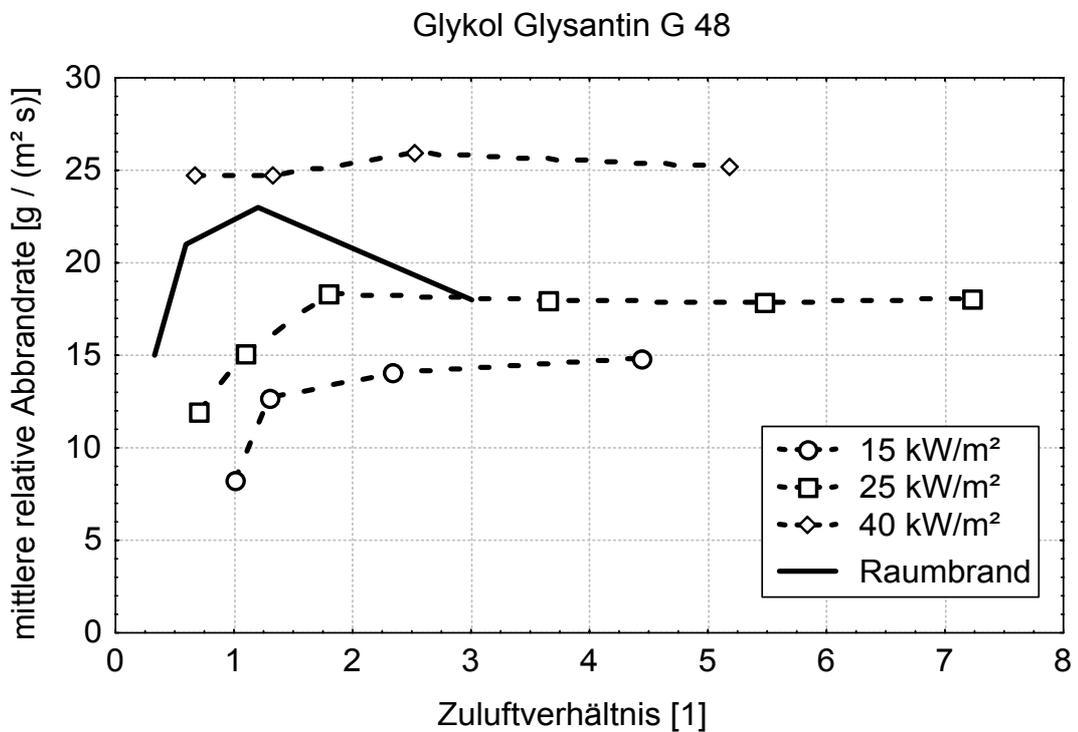


Diagramm B.43 Vergleich der relativen Abbrandrate, Glykol Glysantin G 48

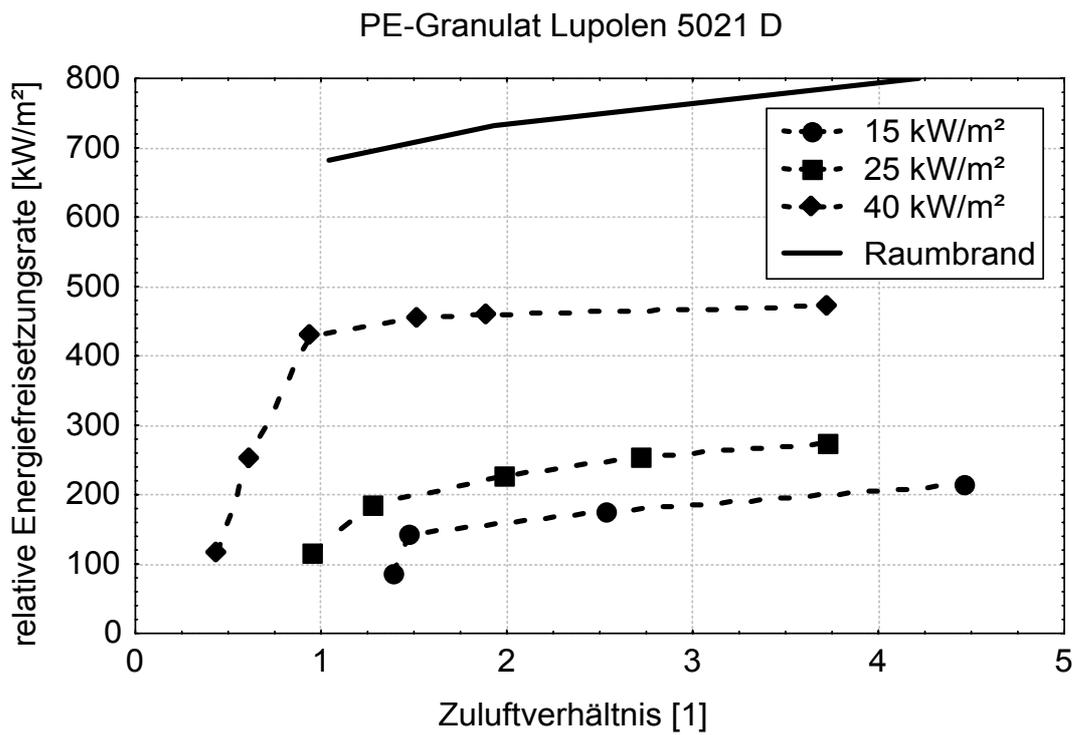


Diagramm B.44 Vergleich der relativen Energiefreisetzungsrate, PE-Granulat Lupolen 5021 D

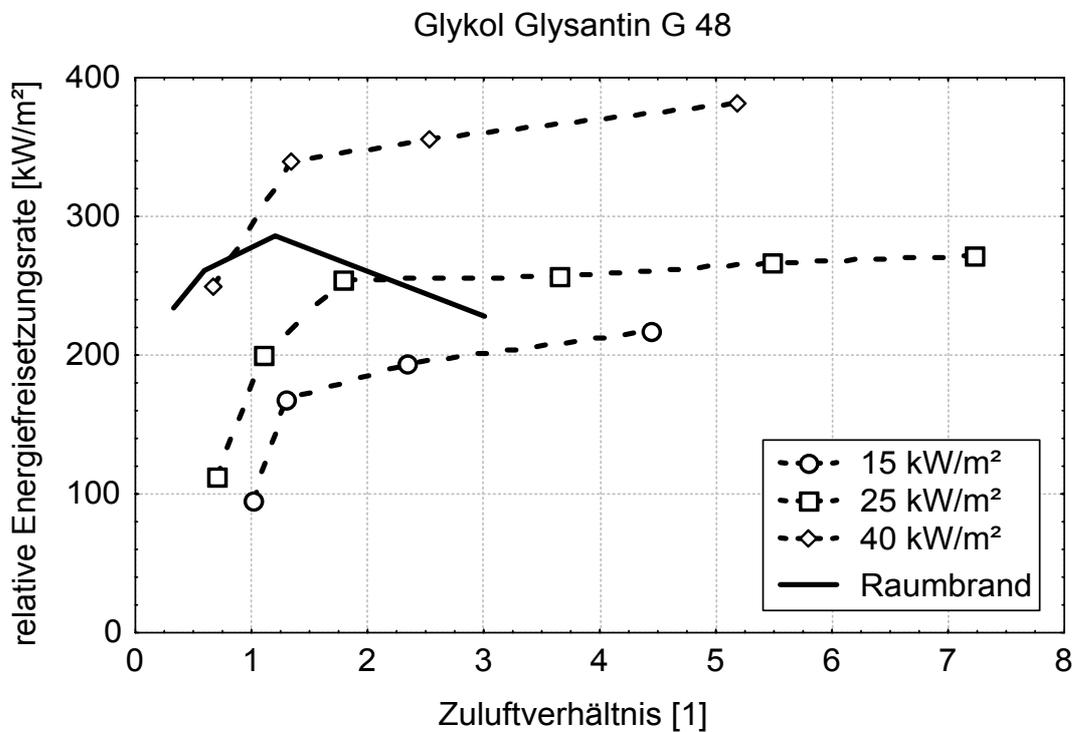


Diagramm B.45 Vergleich der relativen Energiefreisetzungsrate, Glykol Glysantin G 48

Die Gegenüberstellung der relativen Energiefreisetzungsrates bestätigt diese Feststellung im Fall von PE-Granulat (Diagramm B.44) ohne Einschränkung. Bei Glykol stellen die bei einer unterventilierten Verbrennung ($ZLV < 1$) bestimmten Werte der relativen Energiefreisetzungsrates scheinbar eine Abweichung dar (Diagramm B.45). Hierbei liegt die Vermutung nahe und wird auch von Blume [B-2] geäußert, dass der Sauerstoffverbrauch und damit die Energiefreisetzung beim Raumbrandversuch nicht vollständig erfasst worden ist, z. B. könnte Rauchgas durch Leckagen unkontrolliert aus der Brandkammer ausgetreten sein. Außerdem muss man systematische und messtechnische Fehler beim Arbeiten mit einem offenen System (Raumbrandversuch) höher annehmen als beim Arbeiten mit einem geschlossenen System (Cone-Kammer). Energiefreisetzungsrates und Zuluftverhältnis können daher nicht einander zugeordnet werden. Eine Verbrennung außerhalb des Brandraums kann auch nicht ausgeschlossen werden, insbesondere da zeitweise Flammen durch die Brandraumöffnung nach außen geschlagen sind.

B.6.2 Verbrennungseffektivität und Ausbeute von Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid

Eine Gegenüberstellung der mit der Cone-Kammer und im Raumbrandversuch ermittelten Verbrennungseffektivität zeigt - unabhängig davon, dass die Angaben zum Zuluftverhältnis für Glykol beim unterventilierten Brand ($ZLV < 1$) fraglich sind - dass sich bei labormaßstäblichen Verfahren eine höhere Verbrennungseffektivität ergibt als im Realmaßstab (Diagramm B.46, Diagramm B.47). In gleicher Weise verhält sich die Kohlendioxidausbeute (Diagramm B.48, Diagramm B.49). Sie fällt im Raumbrandversuch kleiner aus als bei der labormaßstäblichen Untersuchung. Der tendenzielle Unterschied in der effektiven Verbrennungswärme und der Kohlendioxidausbeute zwischen Cone-Kammer und Raumbrandversuch lässt sich durch die unvollständige Erfassung der Rauchgase im Raumbrandversuch erklären. Insgesamt ist aber unter Berücksichtigung der experimentellen Möglichkeiten eine gute Übereinstimmung bei ausreichend ventilierter Verbrennung ($ZLV \geq 1$) zu erkennen. Für die Kohlenmonoxidausbeute ergibt sich für beide Materialien eine hervorragende Übereinstimmung zwischen Raumbrandversuch und Cone-Kammer (Diagramm B.50, Diagramm B.51), wobei für Glykol aus den genannten Gründen der ansteigende Ast in Richtung kleinerer Zuluftverhältnisse verschoben ist.

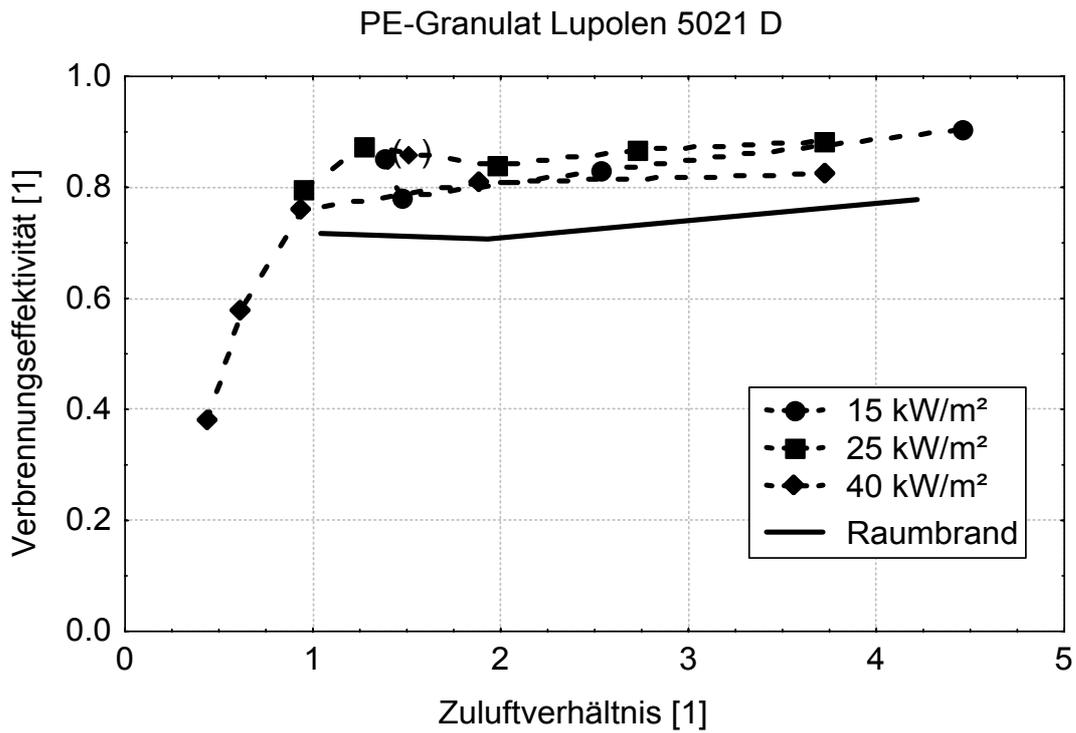


Diagramm B.46 Vergleich der Verbrennungseffektivität χ , PE-Granulat Lupolen 5021 D

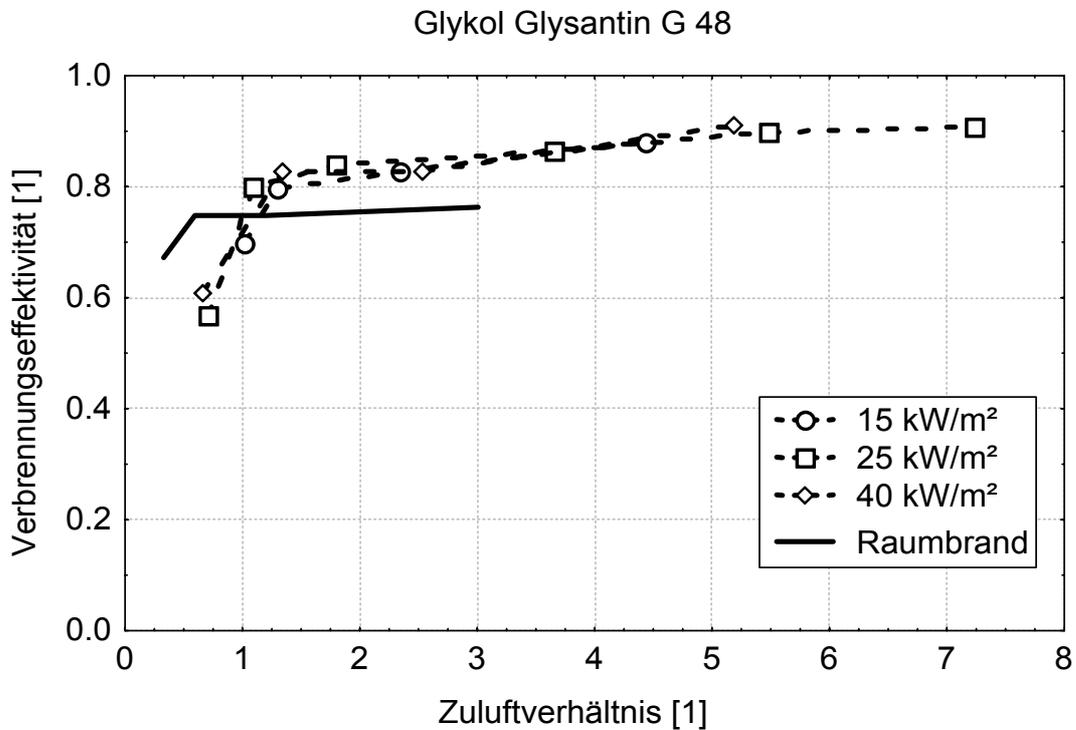


Diagramm B.47 Vergleich der Verbrennungseffektivität χ , Glykol Glysantin G 48

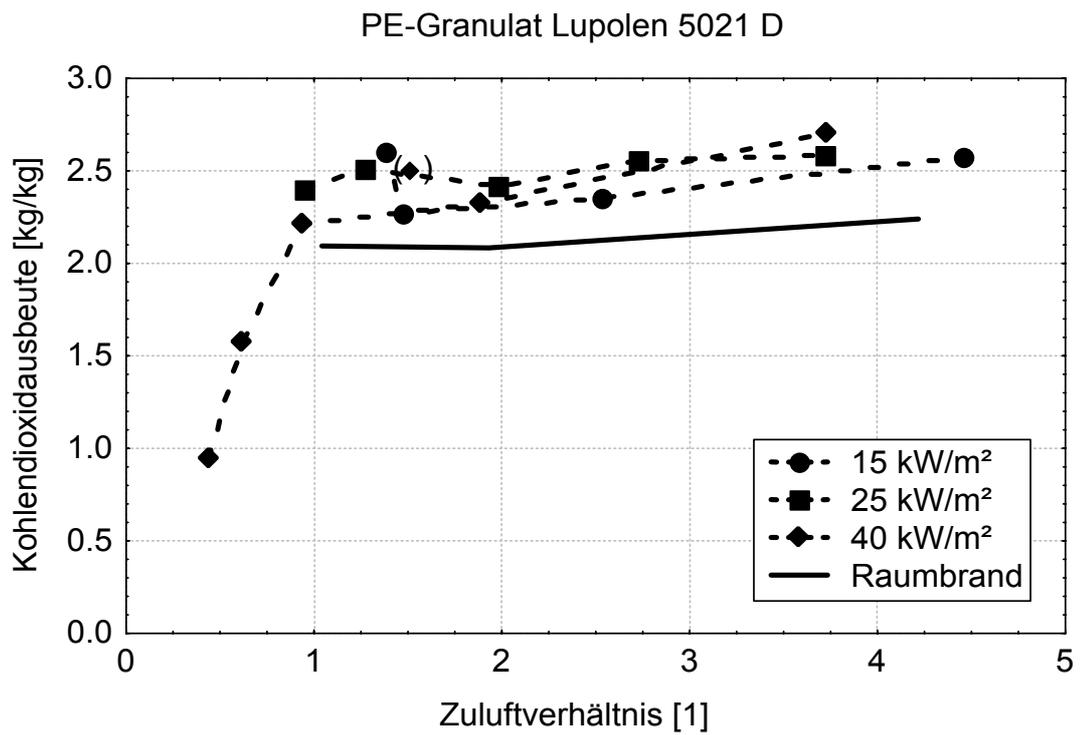


Diagramm B.48 Vergleich der Kohlendioxidausbeute, PE-Granulat Lupolen 5021 D

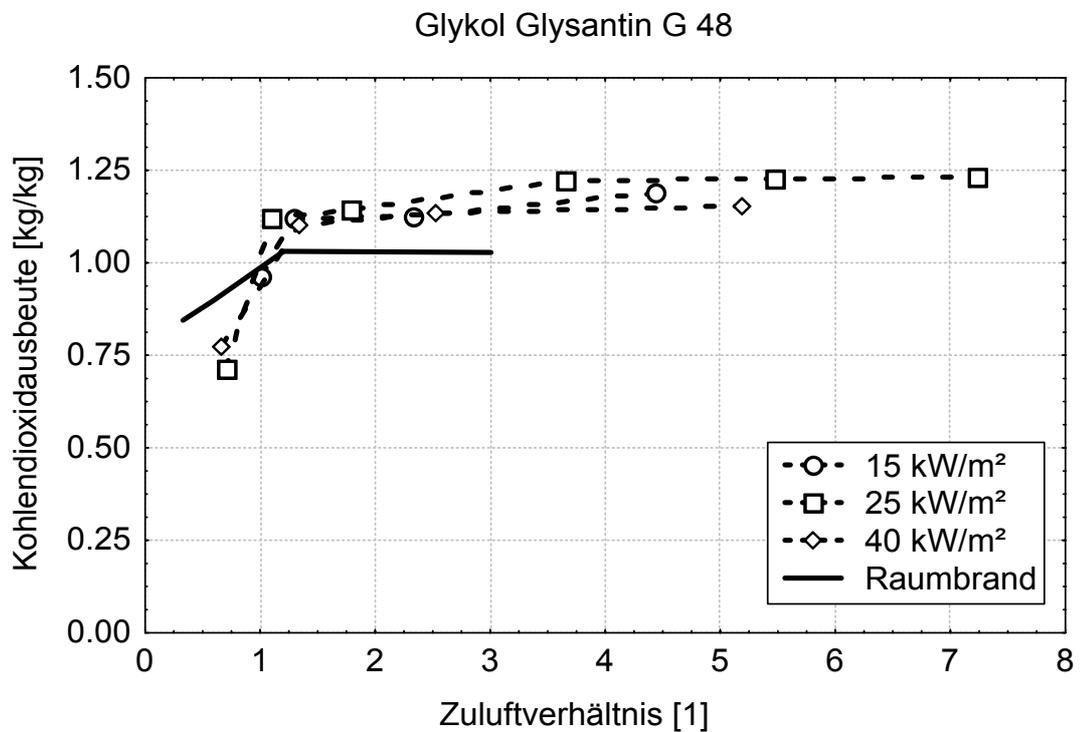


Diagramm B.49 Vergleich der Kohlendioxidausbeute, Glykol Glysantin G 48

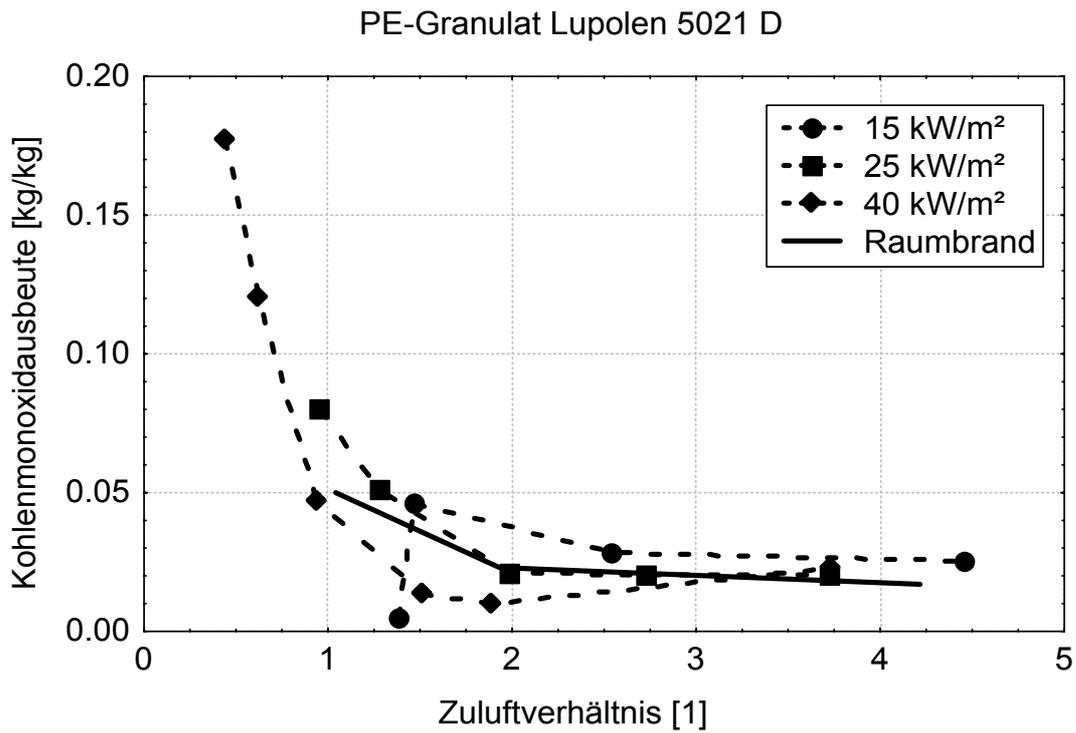


Diagramm B.50 Vergleich Kohlenmonoxidausbeute, PE-Granulat Lupolen 5021 D

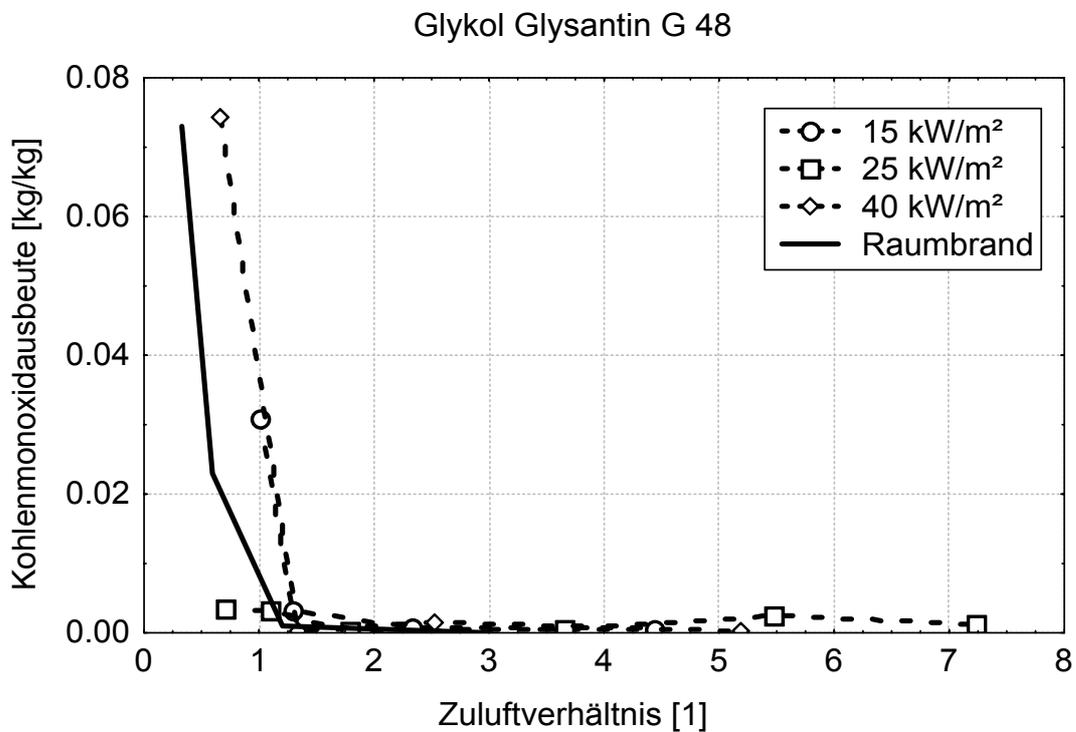


Diagramm B.51 Vergleich der Kohlenmonoxidausbeute, Glykol Glysantin G 48

B.6.3 Übertragbarkeit

Die Randbedingungen beim realen Brandereignis werden bei der Verbrennung in der Cone-Kammer im Labormaßstab durch die thermische Beaufschlagung (Strahlungsflussdichte) und die Ventilation (Zuluftverhältnis) simuliert.

Die Verbrennung und ihre Wirkung lässt sich durch die relative Abbrandrate, die relative Energiefreisetzungsrate und die Brandparameter effektive Verbrennungswärme bzw. Verbrennungseffektivität, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute beschreiben, wobei man unterscheiden muss:

1. Die relative Abbrandrate wird durch den konvektiven und radiativen Wärmestrom auf die Brennstoffoberfläche bestimmt. Im Realmaßstab hängt der Wärmestrom von den Abmessungen der Brandkammer, den Materialeigenschaften der Umfassungsbauteile, der Größe der Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen und der Zusammensetzung der Rauchgasschicht (Ruß-, Wasserdampf, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidanteil) ab. Die relative Energiefreisetzungsrate ergibt sich als Produkt von relativer Abbrandrate und effektiver Verbrennungswärme und ist daher zusätzlich stark von den Ventilationsrandbedingungen abhängig. Aufgrund der genannten Wechselwirkungen ist der Einfluss des Parameters Strahlungsflussdichte auf die relative Abbrandrate und die relative Energiefreisetzungsrate signifikant. Bei Raumbrandversuchen stellt sich die Wärmestromdichte in Abhängigkeit von den o. g. Randbedingungen ein. Somit kann eine relative Abbrandrate oder relative Energiefreisetzungsrate für einen Raumbrand nicht unmittelbar aus den Laboruntersuchungen abgeleitet werden.
2. Effektive Verbrennungswärme („Energieausbeute“) bzw. Verbrennungseffektivität und die Ausbeute von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid hängen als materialabhängige Eigenschaften unmittelbar mit dem Sauerstoffangebot zusammen. Sie sind daher eng an das Zuluftverhältnis gekoppelt und zeigen bei den Versuchen in der Cone-Kammer nur eine geringe Abhängigkeit von der Strahlungsflussdichte.

Die relative Abbrandrate und die relative Energiefreisetzungsrates können für den Raumbrandversuch oder eine reale Situation nicht unmittelbar aus den Untersuchungen in der Cone-Kammer abgeleitet werden.

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

Bei Versuchen im mittleren Maßstab mit Gasflammen unter einer geschlossenen Haube wurden über eine Brandbreite des Zulufverhältnisses von ca. 0,5 bis 5 die Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute bestimmt [B-32]. Über den gesamten Bereich des Zuluftverhältnisses stimmen die Ergebnisse dieser Versuche tendenziell mit denen der Cone-Kammer überein. Dieser Sachverhalt ist noch kein Nachweis, unterstützt aber die Vermutung, dass die Ergebnisse der Cone-Kammer für den ventilationsgesteuerten Brand anwendbar sind.

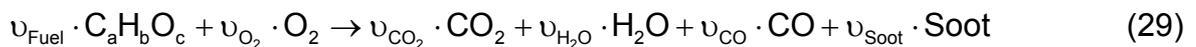
B.7 Anwendung der experimentell bestimmten Brandparameter bei der numerischen Brandsimulation

Bei der numerischen Brandsimulation müssen die geometrischen Randbedingungen und die physikalisch/chemischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile als Eingabeparameter festgelegt werden. Der Brandverlauf wird bei Mehrraum-Zonenmodellen und CFD-Programmen durch Vorgabe des zeitlichen Verlaufs der Abbrandrate simuliert. Das hier eingesetzte CFD-Programm kann alternativ die Entzündung, Brandausbreitung und Brandentwicklung direkt berechnen. Zusätzlich muss bei CFD-Programmen, bei denen ein Verbrennungsmodell implementiert ist, die Freisetzung von Energie und Verbrennungsprodukten sowie der Verbrauch von Sauerstoff definiert werden. Dies geschieht durch Festlegung der chemischen Eigenschaften der Brandlast und der daraus resultierenden Verbrennungsreaktion.

Das vom NIST entwickelte CFD-Modell „Fire Dynamics Simulator“ FDS3 (Version 3.1) [B-38, B-39] und das dazugehörige Programm SMOKEVIEW [B-40] zur Aufbereitung und Visualisierung der Ergebnisse werden verwendet.

B.7.1 Festlegung der Eingabedaten

Bei dem in FDS3 implementierten Verbrennungsmodell wird ein einfacher Hydrocarbon-Brennstoff vorausgesetzt, der mit konstanter Kohlenmonoxid- und Rußausbeute umgesetzt wird. Die chemische Reaktion lautet:



Die stöchiometrischen Koeffizienten (molaren Ausbeuten) für CO_2 (ν_{CO_2}) und H_2O ($\nu_{\text{H}_2\text{O}}$) sowie für O_2 (ν_{O_2}) müssen vorgegeben werden. Sie berechnen sich bei bekannter Brennstoffzusammensetzung und Molmasse sowie vorgegebener Kohlenmonoxid- und Ruß-Ausbeute wie folgt:

$$\nu_{\text{CO}} = \frac{M_{\text{Fuel}}}{M_{\text{CO}}} \cdot Y_{\text{CO}}$$

$$\nu_{\text{Soot}} = \frac{M_{\text{Fuel}}}{M_{\text{C}}} \cdot Y_{\text{Soot}}$$

$$\nu_{\text{O}_2} = \left[(a - \nu_{\text{CO}} - \nu_{\text{Soot}}) + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right] \cdot \nu_{\text{Fuel}} \quad (30)$$

$$\nu_{\text{CO}_2} = (a - \nu_{\text{CO}} - \nu_{\text{Soot}}) \cdot \nu_{\text{Fuel}}$$

$$\nu_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{b}{2} \cdot \nu_{\text{Fuel}}$$

Die effektive Verbrennungswärme $\Delta h_{\text{c,eff}}$ ergibt sich aus dem stöchiometrischen Sauerstoff- und Brennstoff-Koeffizienten, den Molmassen und dem O_2 -Faktor. Umgekehrt kann der O_2 -Faktor bei vorgegebener effektiver Verbrennungswärme berechnet werden:

$$\Delta h_{c,eff} \approx \frac{\nu_{O_2} \cdot M_{O_2}}{\nu_{Fuel} \cdot M_{Fuel}} \cdot E_{O_2,M}^M \quad E_{O_2,M}^M \approx \frac{\nu_{Fuel} \cdot M_{Fuel}}{\nu_{O_2} \cdot M_{O_2}} \cdot \Delta h_{c,eff} \quad (31)$$

Die Brandparameter effektive Verbrennungswärme bzw. Verbrennungseffektivität, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute können aus den Ergebnissen der Untersuchungen in der Cone-Kammer abgeleitet werden (Diagramm B.32, Diagramm B.34, Diagramm B.36, Diagramm B.38) und sind für verschieden Zuluftverhältnisse in Tabelle B.7 zusammengestellt. Lediglich die Rußausbeute muss aus der beim Raumbrandversuch bestimmten spezifischen Rauchentwicklung $\sigma_f = 358 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ unter Verwendung des spezifischen Extinktionskoeffizienten $k_m = 7600 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ berechnet werden. Basierend auf dem Wert für das Zuluftverhältnis 1 wurde die Rußausbeute in Anlehnung an die Korrelation von Koylu und Faeth [B-41] mit Hilfe der in der Cone-Kammer gemessenen Kohlenmonoxidausbeute berechnet.

Die notwendigen Eingabedaten für das CFD-Modell FDS3 wurden mit Hilfe der Gleichungen (30) und (31) aus den Brandparametern berechnet. Damit sich die gewünschte effektive Verbrennungswärme exakt ergibt, wurde der mit Gleichung (31) berechnete O_2 -Faktor angepasst.

Tabelle B.7 Brandparameter für die Simulation unterschiedlicher Zuluftverhältnisse

Zuluftverhältnis (Vorgabe)	4,5	1	0,75	0,5
effektive Verbrennungswärme [kJ g^{-1}]	38,8	32,5	28,0	17,25
Verbrennungseffektivität	0,9	0,75	0,65	0,4
Kohlendioxidausbeute	2,57	2,2	1,85	1,0
Kohlenmonoxidausbeute	0,026	0,05	0,09	0,18
Rußausbeute	0,024	0,047	0,085	0,17

Tabelle B.8 Eingabedaten für FDS3 bei der Simulation unterschiedlicher Zuluftverhältnisse

Zuluftverhältnis (Vorgabe)	4,5	1	0,75	0,5
Brennstoffmolmasse [g mol ⁻¹]	14			
stöchiometrischer Koeffizient O ₂	1,459	1,421	1,356	1,212
stöchiometrischer Koeffizient CO ₂	0,959	0,921	0,856	0,712
stöchiometrischer Koeffizient H ₂ O	1			
Rußausbeute	0.024	0,046	0,09	0,17
CO-Ausbeute	0.026	0,05	0,085	0,18
O ₂ -Faktor [kJ kg ⁻¹]	11922	10492	9999	7807

B.7.2 Simulation eines Referenzversuchs

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Ergebnisse wurde ein Raumbrandversuch aus der Serie des Forschungsvorhabens über Schutzkonzepte für Brandstörfälle in Chemikalienlagern [B-3, B-4] ausgewählt. Dieser Referenzversuch wurde im Room-Corner-Test (Grundfläche 3,6 m × 2,4 m, lichte Höhe 2,4 m) durchgeführt. Die Verbrennung sollte ventilationsgesteuert ablaufen, daher wurde die ursprünglich 1,6 m² große Türöffnung der Brandkammer auf einen 0,4 m² großen, 2 m hohen Spalt reduziert. Für die numerische Simulation werden die Brandkammer mit den Umfassungsbauteilen, der Bereich vor der Öffnung unterhalb der Haube und die Abzughaube vorgegeben (Bild B.4).

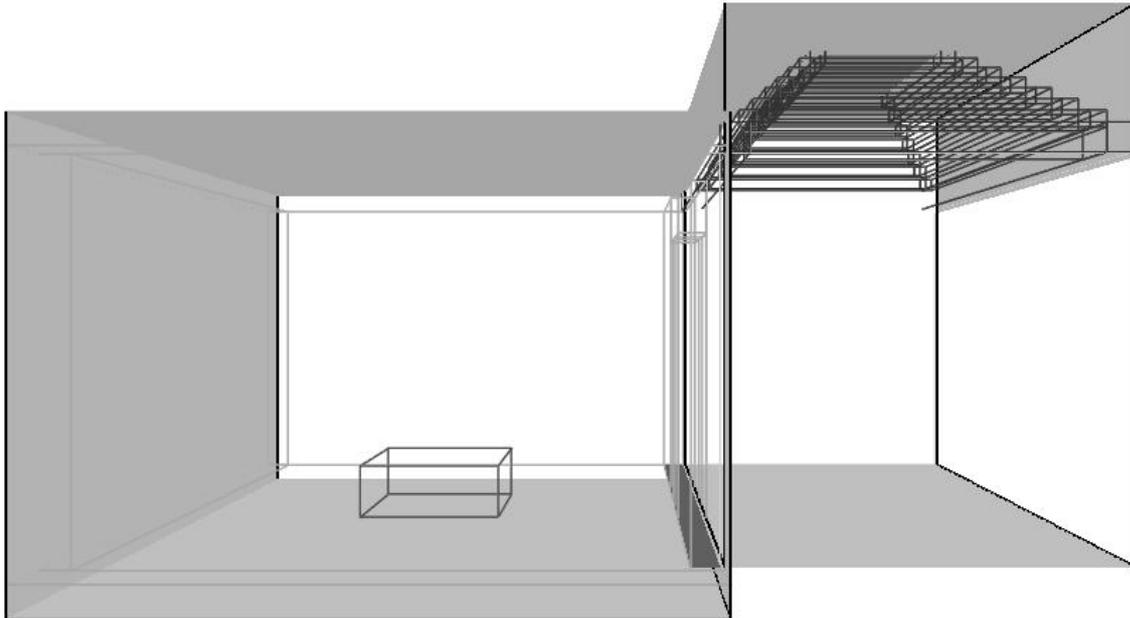


Bild B.4 Room-Corner-Test für die Simulation des Referenzversuchs

Beim Versuch wurden 25 kg PE-Granulat Lupolen 5021 D Granulat in einer 0,5 m² großen Wanne verbrannt. Die aus dem zeitlichen Verlauf der Brandlastmasse berechnete Abbrandrate diente in vereinfachter Form als Eingabeparameter für die Simulationsrechnungen (Diagramm B.52). Bei der Simulation wurde die Entzündungsphase nicht berücksichtigt. Daher ist die Zeitskala der Simulation um 600 Sekunden gegenüber den Zeitangaben beim Versuch versetzt.

Beim Raumbrandversuch hat sich aus der Bestimmung der Abbrandrate und der Massenströme in der Türöffnung ein mittleres Zuluftverhältnis $ZLV = 1$ ergeben. Daher werden die Eingabedaten für die Simulation aus den Brandparametern von PE-Granulat Lupolen 5021 D Granulat für ein dieses Zuluftverhältnis (Tabelle B.7) aus den Untersuchungen in der Cone-Kammer mit Hilfe der Gleichungen (30) und (31) berechnet (Tabelle B.8).

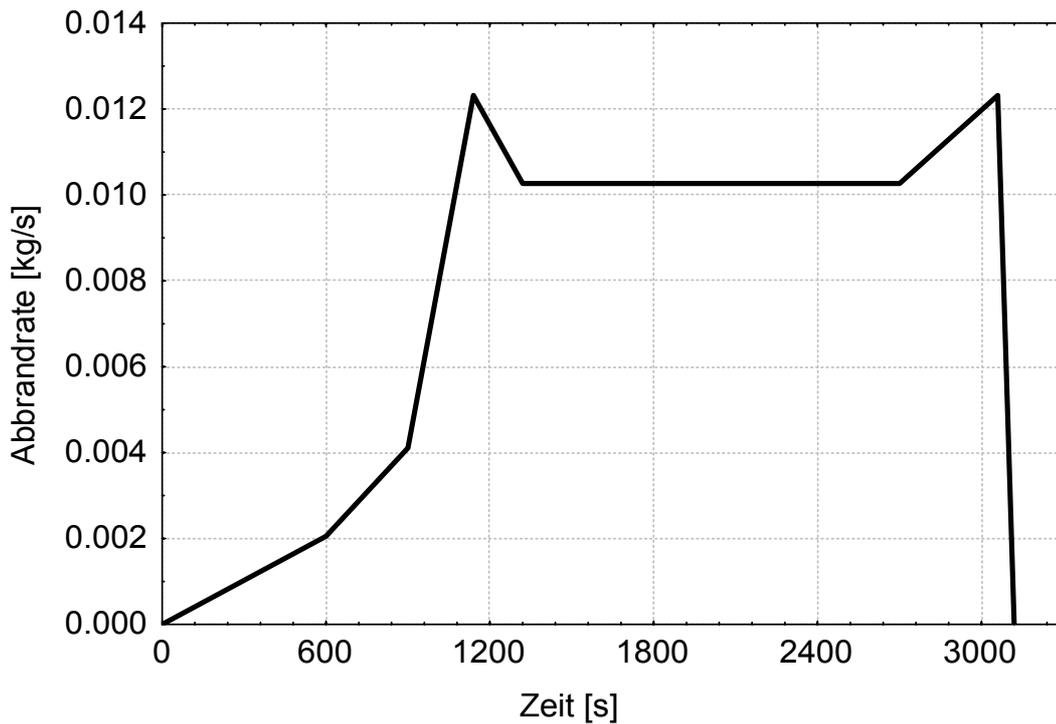


Diagramm B.52 Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate bei der Simulation des Referenzversuchs

Zum Vergleich mit den experimentell bestimmten Massenströmen werden die Ergebnisse der Simulationsrechnung aufbereitet. Durch Summation der in den Brandraum hinein und aus ihm heraus gerichteten Massenströme zu jedem Zeitschritt ergibt sich der in Diagramm B.53 dargestellte Zu- bzw. Abluftmassenstrom. Im Maximum (ca. 900 s) beträgt der Zuluftmassenstrom $0,16 \text{ kg s}^{-1}$ und sinkt im weiteren Verlauf bis auf weniger als $0,05 \text{ kg s}^{-1}$ ab.

Zum Zeitpunkt 900 s existiert eine Heißgasplume über dem Brandherd. In der unteren Hälfte der Öffnung strömt Zuluft in den Brandraum ein und in der oberen Hälfte Rauchgas aus (Bild B.5). Zu diesem Zeitpunkt sind noch eine obere Heißgas- bzw. Rauchgasschicht und eine untere kältere, raucharme Schicht erkennbar, wobei die Brandherdoberseite schon an der Grenze zwischen diesen beiden Schichten liegt (Bild B.6).

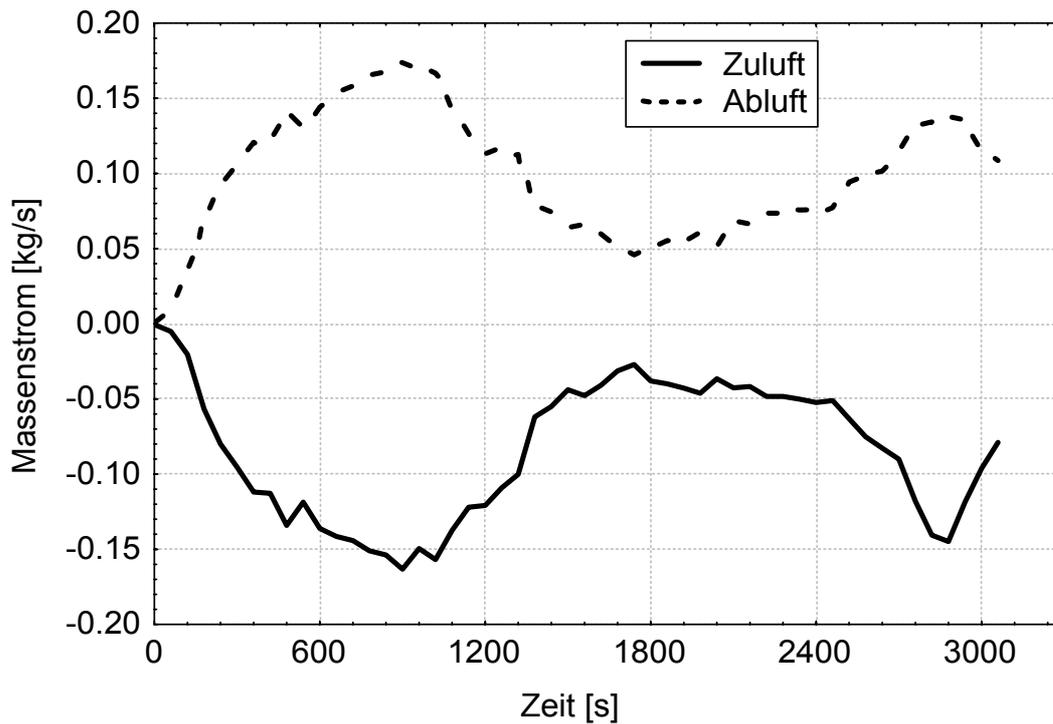


Diagramm B.53 Berechneter Zu- und Abluftmassenstrom in der Öffnung

Zum späteren Zeitpunkt (2400 s) haben sich die Strömungsverhältnisse im Brandraum wesentlich verändert. Ein Heißgasplume ist nicht mehr erkennbar. Zuluft strömt nur noch im unteren Drittel der Öffnung ein, der Zuluftstrom erreicht aber nicht den Brandherd. Stattdessen wird der Zuluftstrom nach kurzer Distanz nach oben gelenkt. In unmittelbarer Umgebung der Öffnung hat sich innerhalb und außerhalb des Brandraums eine senkrechte Strömung gebildet, die innerhalb des Brandraums einen Wirbel induziert. Die Temperaturschichtung im Brandraum ist nicht mehr erkennbar, die Temperaturverteilung wird durch den kreisförmigen Strom bestimmt. Im Bereich der nach oben gerichteten Strömung nahe der Öffnung herrschen die höchsten Temperaturen. Der Brandraum ist über die gesamte Höhe verraucht. Das Strömungsfeld und die Temperaturverteilung zeigen, dass die Verbrennung nicht mehr über dem Brandherd stattfindet, sondern im Bereich des Sauerstoffzustroms.

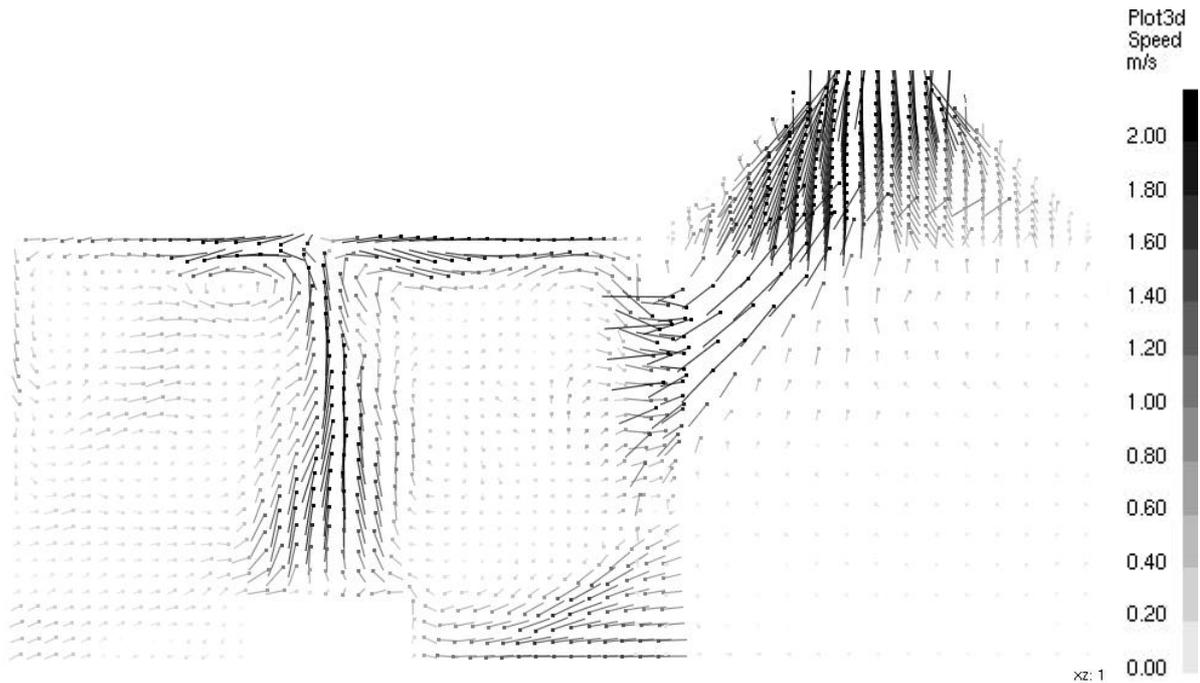


Bild B.5 Strömungsgeschwindigkeit und -richtung zum Zeitpunkt 900 s

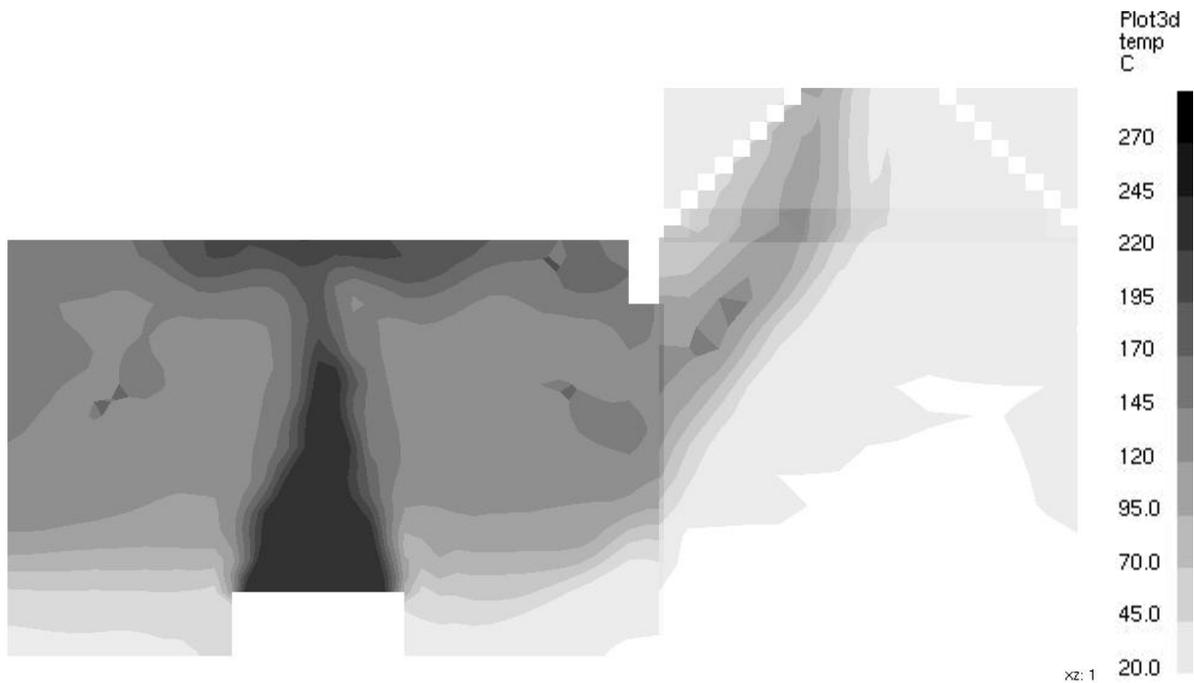


Bild B.6 Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 900 s

Bis zum Zeitpunkt 900 s stimmen die Ergebnisse der Simulationsrechnung mit dem Experiment gut überein. Im weiteren Verlauf wird aber ein ventilationsgesteuerter Brand mit einem erheblich geringeren Zuluftvolumenstrom prognostiziert. Daraus resultiert ein zeitweise vom Experiment abweichendes Brandgeschehen. Diese Un-

terschiede lassen sich dadurch erklären, dass bei der Simulation die strömungstechnischen Randbedingungen nicht in allen Details mit dem Brandversuch übereinstimmen. So konnten eventuell vorhandene, zusätzliche Öffnungen in der Brandkammer (Ritzen, umlaufender Spalt im Brandraumboden) und Raumströmungen vor der Brandkammer nicht berücksichtigt werden.

Untersuchungen zur Validierung von Brandsimulationsprogrammen auf internationaler Ebene haben gezeigt, dass bei unterventilierten Bränden die Ergebnisse der numerischen Simulation zum Teil erheblich von den experimentellen Ergebnissen abweichen können [B-42]. Unter diesem Aspekt ist die bis zum Zeitpunkt 900 s gefundene Übereinstimmung zwischen Brandversuch und numerischer Simulation ein Beleg, dass die mit Hilfe der Cone-Kammer bestimmten Brandparameter zu realistischen Ergebnissen für den realen Maßstab führen.

B.7.3 Durchführung einer Parametervariation

Sollen Brandverläufe simuliert werden, die voraussichtlich bei einem Zuluftverhältnis geringfügig größer als 1 oder kleiner als 1 ablaufen, dann müssen Eingabedaten für das Verbrennungsmodell eingesetzt werden, die an das entsprechende Zuluftverhältnis angepasst sind. Da im vorhinein der Zuluftmassenstrom und damit das Zuluftverhältnis nicht bekannt ist (außer bei maschineller Zuluft), muss man iterativ vorgehen:

Im ersten Schritt wird mit Brandparametern für den ausreichend ventilierten Fall die Simulation durchgeführt. Der Zuluftmassenstrom wird für die ventilationsgesteuerte Brandphase berechnet und das zugehörige Zuluftverhältnis bestimmt.

In den folgenden Schritten werden die Brandparameter für das im vorhergehenden Schritt ermittelte Zuluftverhältnis eingesetzt. Ergibt die Simulation eine befriedigende Übereinstimmung zwischen vorgegebenem und bei der Simulation bestimmtem Zuluftverhältnis, dann kann die Iteration abgebrochen werden. Ansonsten muss dieser Schritt wiederholt werden.

Bei den Berechnungen für die Parametervariation wird an die Simulation des Referenzversuchs angeknüpft, indem ein Brandverlauf in der gleichen Brandkammer si-

muliert wird. Die Breite der Türöffnung muss geringfügig verändert werden, damit die oben erwähnten Leckagen in die Simulation mit einbezogen werden können. Auf die Simulation des Abzugsystems mit der Haube vor der Kammer wird verzichtet, da es keinen unmittelbaren Einfluss auf den Brandverlauf innerhalb der Brandkammer hat.

Es werden drei unterschiedliche Brandverläufe untersucht, die auf den Zuluftverhältnissen 1 (als Anknüpfung an den Referenzversuch), 0,75 und 0,5 basieren. Zur Festlegung der Abbrandrate wird angenommen, dass bei einem ventilationsgesteuerten Brand die Zu- und Abluftmassenströme nicht oder nur geringfügig von der Abbrandrate abhängen und somit die Abbrandrate umgekehrt proportional zum Zuluftverhältnis gewählt werden kann. Würde sich diese Annahme nicht bestätigen, müsste die oben beschriebene Iteration durchgeführt werden.

Die Eingabedaten werden mit Hilfe der Brandparametern für das jeweilige Zuluftverhältnis berechnet. Ergänzend wird eine Simulation durchgeführt, bei der die Abbrandrate für ein Zuluftverhältnis 0,5 vorgegeben wird, die Brandparameter aber für ein Zuluftverhältnis von 4,5 vorausgesetzt werden. Diese Simulation entspricht dem ersten Iterationsschritt.

In allen Fällen wird vorgegeben, dass die Abbrandrate innerhalb von 300 Sekunden parabolisch ansteigt und ab der 300. Sekunde konstant verläuft (Diagramm B.54).

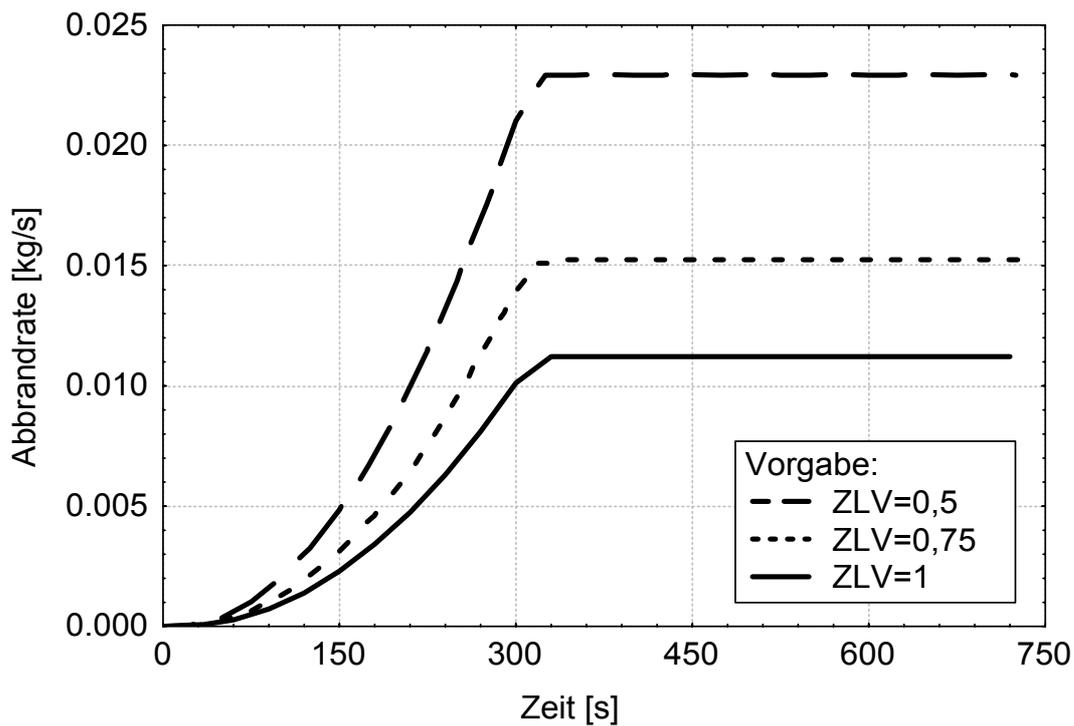


Diagramm B.54 Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate in Abhängigkeit vom vorgegebenen Zuluftverhältnis

Die Auswertung der Massenströme in der Brandraumöffnung zeigt, dass Zu- und Abluftmassenstrom bei ZLV-Vorgabe 1 und 0,75 nahezu übereinstimmen (Diagramm B.55). Für ZLV-Vorgabe 0,5 fallen Zu- und Abluftmassenstrom betragsmäßig geringfügig höher aus. Entsprechend ergibt sich in der ventilationsgesteuerten Phase eine gute Übereinstimmung zwischen dem aus dem Zuluftmassenstrom berechneten und dem für die Festlegung der Brandparameter vorgegebenen Zuluftverhältnis (Diagramm B.56).

Der Zuluftmassenstrom aus der Simulation mit den Brandparametern für ein Zuluftverhältnis von 4,5 ergibt ein Zuluftverhältnis von etwa 0,5. Somit wäre mit dem nächsten Schritt die Iteration bereits beendet.

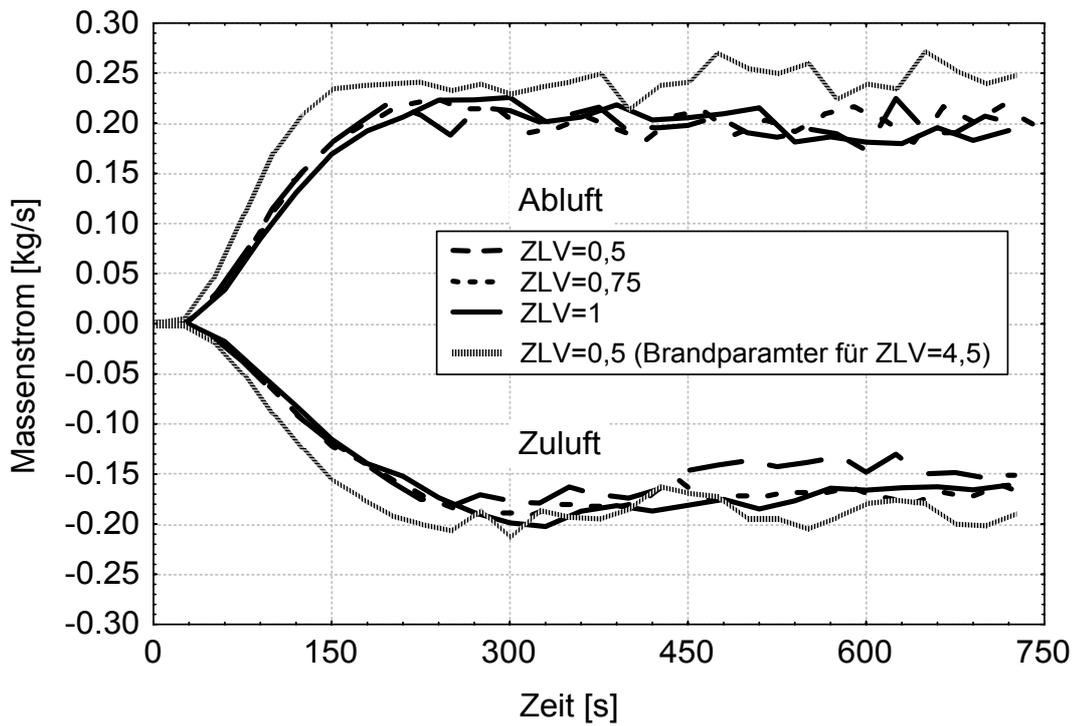


Diagramm B.55 Zeitlicher Verlauf des Zu- und Abluftmassenstroms in Abhängigkeit vom vorgegebenen Zuluftverhältnis

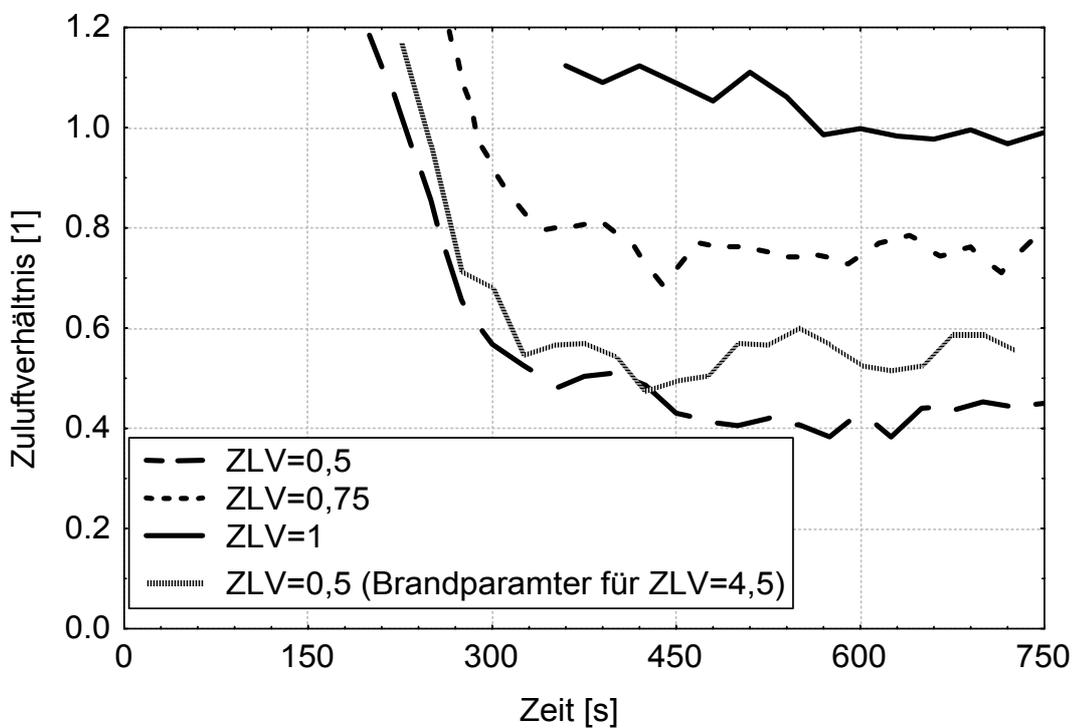


Diagramm B.56 Zeitlicher Verlauf des bei der Simulation berechneten Zuluftverhältnisses in Abhängigkeit vom vorgegebenen Zuluftverhältnis

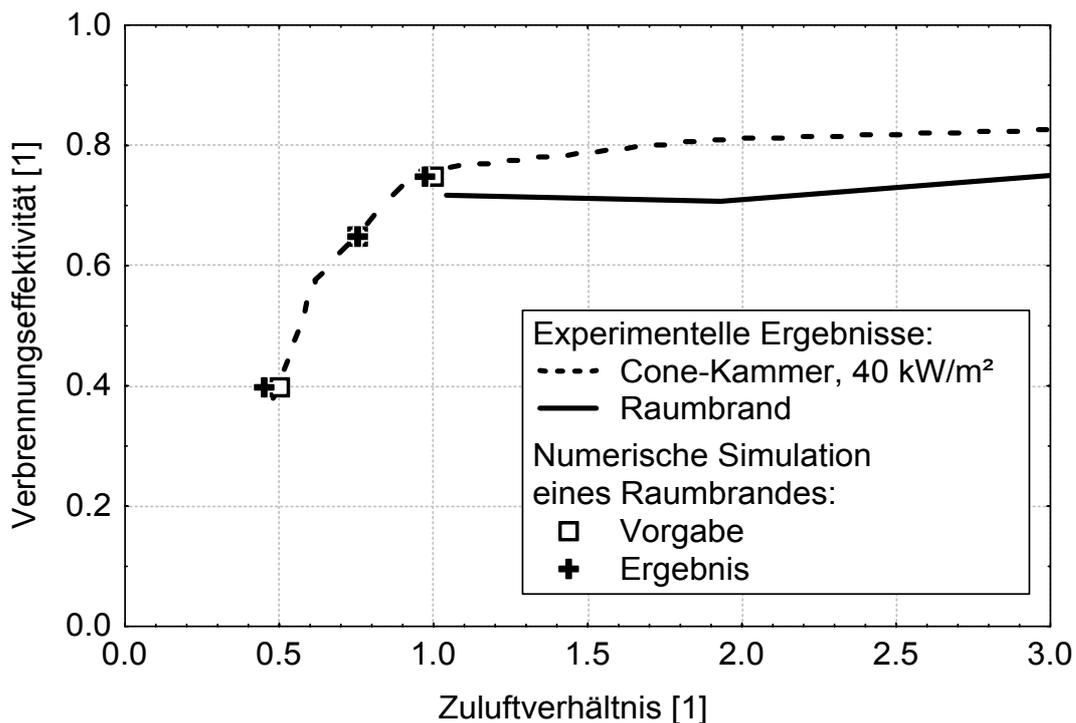


Diagramm B.57 Vergleich von experimentell bestimmter und durch numerische Simulation verifizierter Verbrennungseffektivität

Überträgt man die Ergebnisse der numerischen Simulation auf die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen im realen Maßstab (Raumbrand) und im Labormaßstab (Cone-Kammer), so ergibt sich lediglich für das Zuluftverhältnis 0,5 eine geringfügige Abweichung der Ergebnisse der Simulationsrechnungen von den im Labormaßstab gewonnenen Parametern, in Diagramm B.57 beispielhaft dargestellt für den Brandparameter Verbrennungseffektivität.

Die beschriebenen Ergebnisse der Simulationsrechnungen für verschiedene Zuluftverhältnisse rechtfertigen die o. g. Annahme zur Festlegung der Brandparameter (Tabelle B.7) und der daraus abgeleiteten Eingabedaten (Tabelle B.8).

Sie zeigen, dass die für die numerische Simulation eines ventilationsgesteuerten Brand notwendigen Eingabedaten mit den in der Cone-Kammer bestimmten Brandparametern berechnet werden können.

B.7.4 Vorzüge der in der Cone-Kammer ermittelten Brandparameter

Das verwendete CFD-Programm FDS3 bietet die Möglichkeit, die im Berechnungsgebiet freigesetzte Energie auszuwerten. Unter den vorgegebenen Randbedingungen entwickelt sich die Energiefreisetzungsrate im Brandraum bis zur 200. Sekunde in allen drei Fällen annähernd gleich (Diagramm B.58). Danach stagniert sie zuerst für die hohe Abbrandrate (ZLV-Vorgabe 0,5), zuletzt für die niedrige Abbrandrate (ZLV-Vorgabe 1). Mit Erreichen des Maximums ist der in der Brandkammer vorhandene Sauerstoff verbraucht und der Übergang in den ventilationsgesteuerten Brand markiert. In der ventilationsgesteuerten Phase stellt sich bei Verwendung von angepassten Brandparametern unabhängig von der Abbrandrate annähernd die gleiche Energiefreisetzungsrate ein.

Wurden die Brandparameter nicht dem Zuluftverhältnis angepasst, dann ergibt die Simulation einen steilen Anstieg der Energiefreisetzungsrate in der Brandentwicklungsphase und eine höhere Energiefreisetzungsrate in der ventilationsgesteuerten Phase.

Die Entstehung von Verbrennungsprodukten wird am Beispiel von Kohlenmonoxid untersucht. Die Simulation zeigt, dass die Kohlenmonoxidmenge im Brandraum mit abnehmendem Zuluftverhältnis überproportional steigt (Diagramm B.59). Wird eine Kohlenmonoxidausbeute vorausgesetzt, die nicht den Ventilationsrandbedingungen angepasst ist, dann ergibt sich eine etwa zehnmal kleinere Kohlenmonoxidmenge im Brandraum als bei der Simulation mit angepasster Kohlenmonoxidausbeute. Für die Rußmenge ergeben sich vergleichbare Verläufe.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die numerische Simulation unter Verwendung von Brandparametern, die passend zu den Ventilationsrandbedingungen gewählt und in der Cone-Kammer bestimmt worden sind, eine geringere thermische Belastung und eine deutlich höhere Freisetzung von toxischen Verbrennungsprodukten ergibt. Die Brandrisiken können damit präziser abgeschätzt werden.

B Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden

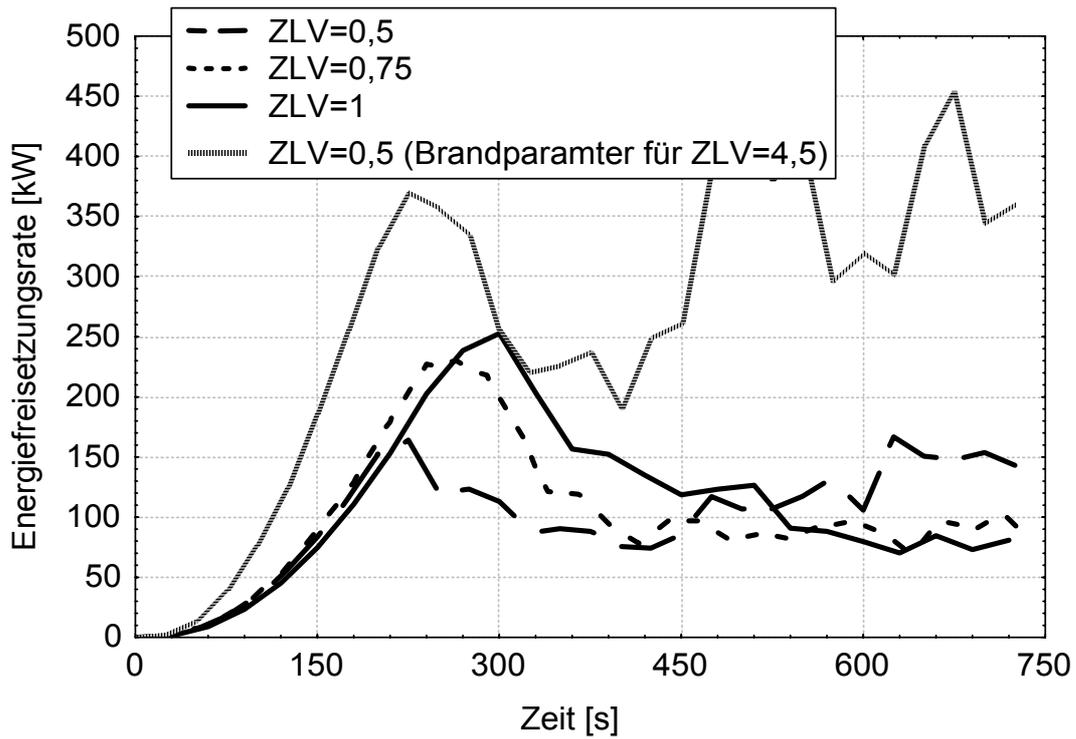


Diagramm B.58 Vergleich der innerhalb der Brandkammer freigesetzten Energie

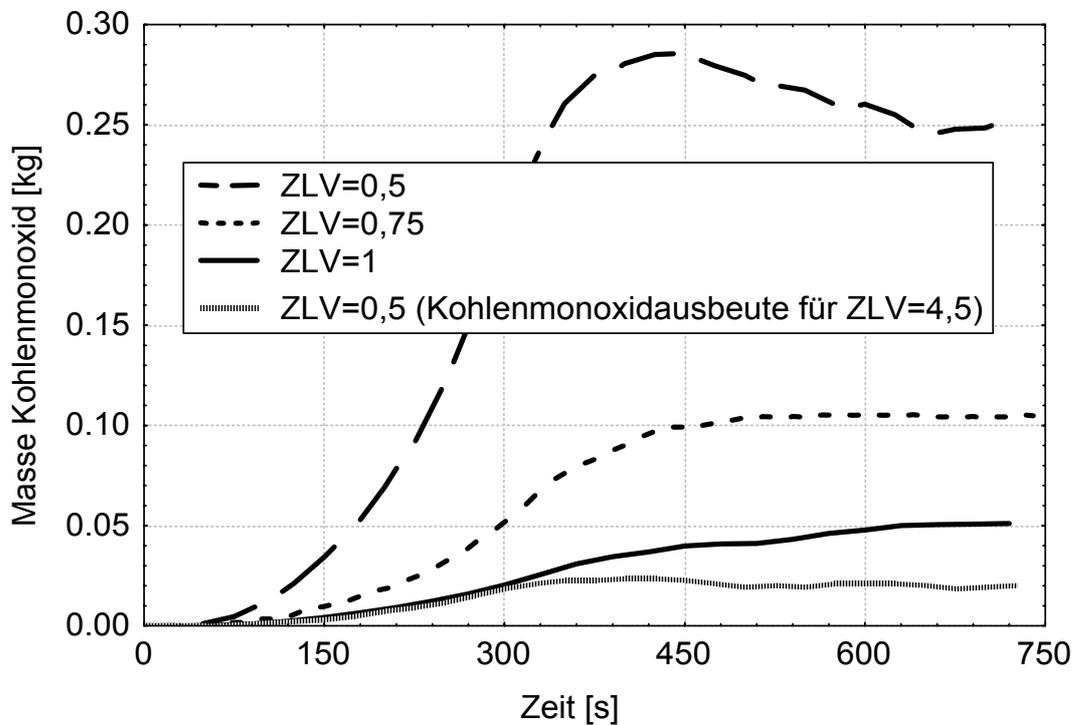


Diagramm B.59 Vergleich der Kohlemonoxidmenge in der Brandkammer

Zusammenfassung

Mit der Cone-Kammer auf Basis des Cone-Calorimeters wurde ein universell nutzbares, labormaßstäbliches Verfahren zur Bestimmung der Brandparameter von Baustoffen und Lagergütern unter Variation der thermischen Beaufschlagung und der Ventilationsbedingungen entwickelt. Mit Hilfe des Prinzips der Sauerstoffkalorimetrie können verschiedene Risiken quantitativ beschrieben werden. Zum einen sind dies die auf der Energiefreisetzung beruhenden Gefährdungen für Bauteile und die Risiken der Brandausbreitung, zum anderen die Gefährdungen für Mensch und Umwelt durch die Freisetzung von toxischen Brandprodukten.

Die Verbrennungseffektivität von Brandlasten, die mit Hilfe der Cone-Kammer auf kostengünstige Art mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann, findet schon jetzt Verwendung in dem von Blume entwickelten „Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen“ [B-2] und bei brandschutztechnischen Nachweisen für kerntechnische Anlagen im Rahmen der KTA 2101.2 [B-1].

Ein weiterer Nutzen dieses Untersuchungsverfahrens in der jetzigen Form liegt in der quantitativen Beschreibung der Freisetzung von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid als Vertreter toxischer Brandprodukte in Abhängigkeit von der externen thermischen Beaufschlagung und den Ventilationsrandbedingungen. Hierbei läuft die Verbrennung in der Cone-Kammer, im Gegensatz zu bisher genutzten Mikroverbrennungsapparaturen, unter praxismgerechten Bedingungen mit einer Diffusionsflamme ab. Auch wird, anders als bei den Mikroverbrennungsapparaturen, die Abbrandrate unmittelbar gemessen. Damit kann der maßstabsübergreifende Parameter zur Beschreibung der Ventilationsrandbedingungen, das Zuluftverhältnis ZLV oder das Globale Äquivalenzverhältnis GER, direkt bestimmt werden.

Die mit Hilfe der Cone-Kammer bestimmten Brandparameter können bei Abschätzung des zu erwartenden Zuluftverhältnisses als Eingabeparameter für eine numerische Brandsimulation mit Hilfe von Mehrraum-Zonenmodellen und CFD-Modellen verwendet werden. Damit kann die Ausbreitung von Rauch und toxischen Verbrennungsprodukten, insbesondere das Erreichen kritischer Konzentrationen, detaillierter beschrieben werden als bisher.

Ausblick

Von Siegfried et al. [B-43] konnte gezeigt werden, dass die Gefährdung durch sicht-trübende Partikel im Rauchgas wesentlich ist. Durch Sicherstellung von ausreichenden Sichtverhältnissen ist in den meisten Fällen auch gewährleistet, dass Personen nicht durch Kohlendioxid oder Kohlenmonoxid gefährdet werden. Daher haben die materialspezifischen Parameter (massenbezogene) Rußausbeute und spezifischer Extinktionskoeffizient eine wesentliche Bedeutung bei der Bestimmung der Rauchausbreitung mit Hilfe von physikalischen Modellversuchen oder der numerischen Simulation mit Hilfe von Zonen- oder Feldmodellen. In Zukunft kann die Cone-Kammer auch mit zusätzlichen Messaufnehmern und Sammelstrecken ausgerüstet werden, um die Menge und Qualität von Brandrauch zu erfassen und die Materialparameter Rußausbeute und spezifischer Extinktionskoeffizient experimentell ermitteln zu können. Die Rauchentstehung kann hierbei, im Gegensatz zum Cone-Calorimeter oder zu Verfahren der Baustoffklassifizierung, in Abhängigkeit von den Ventilationsverhältnissen bestimmt werden. Durch experimentell gewonnenen Daten kann dann quantitativ überprüft werden, ob - wie vereinzelt behauptet [B-44] - die Rauchfreisetzung und Rauchausbreitung in der Brandentstehungs- und Brandentwicklungsphase ein bisher nicht berücksichtigtes Risiko darstellt.

Eine Erweiterung der Messtechnik bzw. der Analysestrecke durch zusätzliche Gasanalysatoren und Probensammler kann in Zukunft die quantitative Bestimmung anderer toxischer Verbrennungsprodukte ermöglichen, wobei die o. g. Vorteile der Cone-Kammer gegenüber Mikroverbrennungsapparaturen - Verbrennung mit Diffusionsflamme und unmittelbare Bestimmung der Abbrandrate - zum Tragen kommen. Durch experimentelle Bestimmung der Schadstoffausbeuten unter praxisgerechten Bedingungen ließe sich das Risiko z. B. bei Brandereignissen in Gefahrstofflagern gegenüber dem jetzigen Kenntnisstand präzisieren. Insgesamt wäre es wünschenswert, dass in Zukunft die Cone-Kammer anstelle von Mikroverbrennungsapparaturen zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Brandrisiken von schädlichen Verbrennungsprodukten eingesetzt wird und auch Einzug in die Materialprüfung und Klassifizierung findet.

Literatur für Teil B

- [B-1] Hosser, D.; Blume, G.; Siegfried, W.; Will, J.: Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2 - Ermittlung effektiver Heizwerte. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU-1999-526, ISSN 0724-3316 (1998).
- [B-2] Blume, G.: Vereinfachte Verfahren zur brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung der Verbrennungseffektivität. TU Braunschweig, Dissertation. Mai 2003.
- [B-3] Hosser, D.; Blume, G.; Will, J.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlager (I),. Abschlussbericht 01RG9503/1, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, 2000.
- [B-4] Hosser, D., Blume, G.; Will, J.: Brandschutz in Chemikalienlagern: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 151, Braunschweig 2000.
- [B-5] ISO 5660 - 1: Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release from building products (Cone Calorimeter Method). 1999.
- ISO 5660 - 2: Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement). 1999.
- ISO DTR 5660 - 3: Reaction to fire tests - Guidance on heat release, smoke production and mass loss rate measurements. 1999.
- [B-6] Babrauskas, V.: Development of the Cone calorimeter - A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption. Fire and Materials, 8, pp. 81-95, 1984.

- [B-7] Twilley, W. H.; Babrauskas, V.: User's guide for the Cone calorimeter, NBS Special Publication SP 745, National Bureau of Standards, U.S., 1988.
- [B-8] ASTM E 1354-90: Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter.
- [B-9] Hosser, D.; Siegfried, W.; Will, J.: Untersuchungen zum Brandverhalten von Kabelanlagen und zur Schutzfunktion von dämmschichtbildenden Anstrichen auf Kabeln. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU-1998-525, ISSN 0724-3316, 1998.
- [B-10] DIN EN 13823: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Deutsche Fassung EN 13823, Juni 2002.
- [B-11] ISO 9705 Fire tests - Full-scale room test for surface products. 1996.
- [B-12] DIN 4102 Teil 19: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Wand- und Deckenbekleidungen in Räumen, Versuchsraum für zusätzliche Beurteilung. Entwurf Dezember 1998.
- [B-13] Hosser, D.; Dobbernack, R.; Will, J.: Großmaßstäbliche Raumbrandversuche zur Überprüfung und Absicherung eines sauerstoffkalorimetrischen Prüfverfahrens für Bauprodukte und eines vertikalen Brandausbreitungsmodells. Vorhaben RS II 2 - 67 41 02 - 93.42 im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, 1995.
- [B-14] Anlagen zum Abschlußbericht „Großmaßstäbliche Raumbrandversuche zur Überprüfung und Absicherung eines sauerstoffkalorimetrischen Prüfverfahrens für Bauprodukte und eines vertikalen Brandausbreitungsmodells“. Forschungsvorhaben RS II 2 - 67 41 02 - 93.42, Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, 20. Februar 1996.

- [B-15] Klingelhöfer, G.; Rademacher, H.: Cone Calorimeter; Erprobung des Prüfverfahrens zur Bestimmung der Wärmeentwicklung nach ISO/DP 5660. Institut für Bautechnik, Berlin, 1993.
- [B-16] DIN 4102 Teil 1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Mai 1998.
- [B-17] DIN 4102 Teil 16: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Durchführung von Brandschachtprüfungen. Mai 1998.
- [B-18] Babrauskas, V.; Twilley, W. H.; Jannsens, M.; Yusa, S.: A Cone Calorimeter for Controlled-atmosphere Studies. Fire and Materials, Vol. 16, p 37 - 43. 1992.
- [B-19] Nasa Handbook NHB 8060. 1C: Flammability, Odor, Offgassing and Compatibility Requirements and Test Procedures for Materials in Enviroments That Support Combustion. NASA Office of Safety and Mission Quality, p 4 - 47, 1991.
- [B-20] Leonard, J. E.; Bowditch, P. A.; Dowling, V. P.: Development of a Controlled-atmosphere Cone-Calorimeter. Fire and Materials, Vol. 24, p 143 - 150, 2000.
- [B-21] Mikkola, E.: Effects of oxygen concentration on cone calorimeter results. In: Carole A. Franks (ed.) Interflam '93. 6th International Fire Conference, Oxford (UK), 30 March . 1 April 1993, Interscience Communications Ltd., p 49 - 56, ISBN 0-9516320-3-5.
- [B-22] Hietaniemi, J., Kallonen, R.; Mikkola, E.: Fires at chemical warehouses. A cone calorimeter study on the burning characteristics and fire effluent composition of chemical compounds. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1810.
- [B-23] DIN 51900 Teil 1: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben- Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes; Allgemeine Angaben, Grunggeräte, Grundverfahren. April 2000.

[B-24] DIN 51900 Teil 2: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben- Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes; Verfahren mit isoperibolem oder static-jacket Kalorimeter. Mai 2003.

[B-25] DIN 51900 Teil 3: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben- Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes; Verfahren mit adiabatischem Mantel. August 1977.

[B-26] DIN 53436 Teil 1: Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxikologische Prüfung; Zersetzungsgerät und Bestimmung der Versuchstemperatur. April 1981.

DIN 53436 Teil 2: Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxikologische Prüfung; Verfahren zur thermischen Zersetzung. August 1986.

DIN 53436 Teil 3: Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxikologische Prüfung; Verfahren zur inhalationstoxikologischen Untersuchung. November 1989.

DIN 53436 Teil 4: Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxikologische Prüfung; Verfahren zur Zersetzung von Flüssigkeiten. Juli 2003.

DIN 53436 Teil 5: Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxikologische Prüfung; Verfahren zur rechnerischen Bestimmung der Toxizität. Juli 2003.

[B-27] Else, C.; Großkurth, K. P. ;Leck, M.: Ein Beitrag zur Untersuchung von Freisetzungsmechanismen von Cyanwasserstoff bei Bränden in Gegenwart stickstoffhaltiger Substanzen. In Forschungsarbeiten 1995 - 1999, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 151, Braunschweig, 1999.

- [B-28] Bahadir, M.; Lorenz, W.; Richter, H.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlager (II), Schlussbericht 01RG9503/2, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, 1999.
- [B-29] Richter, H.: Brandsimulation durch Mikroverbrennung. TU Braunschweig, Dissertation, 1999.
- [B-30] Pleß, G., Seeliger, U.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlager (IV), 01RG9503/4, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, 2000.
- [B-31] Donner, H.; Baumann, G.: Grossbrandversuche, Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepten für Brandstörfälle in Chemikalienlager (III), Abschlussbericht. 01RG9503/3, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, 2000.
- [B-32] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA, USA, 2002.
- [B-33] Hosser, D. und Will, J.: Brandverhalten von Kabelanlagen unter Berücksichtigung von Dämmschichtbildnern. vfdB Zeitschrift Forschung und Technik 46 (1997) 3, S.117-123, ISSN 0042-1804, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.
- [B-34] Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics. 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., 1999.
- [B-35] Heat Release in Fires. ed. Babrauskas, V.; Grayson, S.. Elsevier Science Publishers. 1992.
- [B-36] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz in Industriebauten; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Mai 1998.

[B-37] DIN 18230-2: Baulicher Brandschutz in Industriebauten; Teil 2: Ermittlung des Abbrandfaktors m , Mai 1998.

[B-38] McGrattan, K. B.; Baum, H. R.; Rehm, R. G.; Hamis, A.; Forney, G. P.; Floyd, J. E.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator (Version 3) - Technical Reference Guide. NISTIR 6783, 2002 Ed., National Institute of Standards and Technology, November 2002.

[B-39] McGrattan, K. B.; Forney, G. P.; Floyd, J. E.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator (Version 3) - User's Guide. NISTIR 6784, 2002 Ed., National Institute of Standards and Technology, November 2002.

[B-40] Forney, G. P.; McGrattan, K. B.: User's Guide for Smokeview Version 3.1 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. NISTIR 6761, National Institute of Standards and Technology, April 2003.

[B-41] Koylu, U. O.; Faeth, G. M.: Carbon Monoxide and Soot Emissions from Liquid-Fueled Buoyant Turbulent Diffusion Flames. Combustion and Flame, 87, p 61 - 76, 1991.

[B-42] Dey, M. K.: Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Cable Tray Fires. International Panel Report, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, April 2002.

[B-43] Siegfried, W. und Will, J.: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. vfdb Zeitschrift Forschung und Technik 51 (2002) 3, S. 101 - 107, ISSN 0042-1804, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.

[B-44] Jung, G.: Rauchfreisetzung und Rauchausbreitung in der Brandentstehungs- und Brandentwicklungsphase. VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (8): Rauchausbreitung und Rauchfreihaltung, 26. Juni 2003, VdS Schadenverhütung, Köln.

C Anhang zu Teil A: Systematischer Fehler als Folge von Vereinfachungen in den Auswertungsverfahren

Erläuterung:

Die Stoffumsetzung wird mit den Gleichungen in Abschnitt A.9.2 „Systematischer Fehler durch die festgelegte Dichte der Abluft“ und Abschnitt A.9.3 „Systematischer Fehler bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrates“ berechnet. Bei der Betrachtung für die Energiefreisetzungsrates werden zum einen die standardisierten, zum anderen die materialspezifischen Parameter eingesetzt und die Auswertungsformeln Gleichung (7.5) gemäß ISO 5660 (Cone-Calorimeter) und Gleichung (7.11) gemäß ISO 9705 (Room-Corner-Test) verwendet. Ein positiver Wert für die relative Abweichung der Energiefreisetzungsrates bedeutet eine Überbewertung bei Anwendung des Auswertungsverfahrens gemäß ISO 5660 bzw. ISO 9705, ein negativer Wert entsprechend eine Unterbewertung.

Es bedeuten im Einzelnen:

für die Vorgabe der Dichte und die Volumenstrombestimmung nach Abschnitt A.9.2

Δ relative Abweichung der Dichte des Rauchgases von der Dichte der Zuluft,

◆ relative Abweichung des gemessenen vom exakten Volumenstrom,

relative Abweichung der Energiefreisetzungsrates nach Abschnitt A.9.3, berechnet mit

○ standardisierte Parameter, Auswertungsverfahren nach ISO 5660,

— standardisierte Parameter, Auswertungsverfahren nach ISO 9705,

□ materialspezifische Parameter, Auswertungsverfahren nach ISO 5660,

----- materialspezifische Parameter, Auswertungsverfahren nach ISO 9705.

C Anhang zu Teil A: Systematischer Fehler als Folge von Vereinfachungen in den Auswertungsverfahren

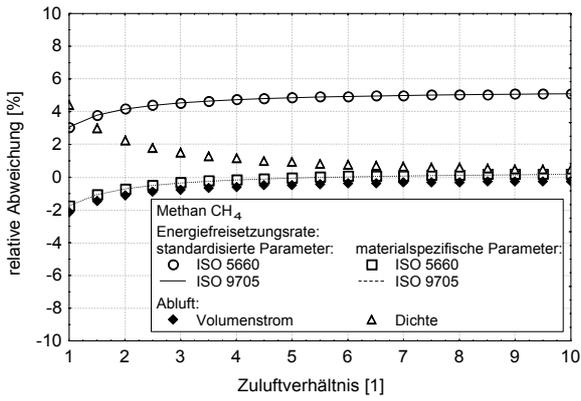


Diagramm C.1 Methan (Index 1, 19)

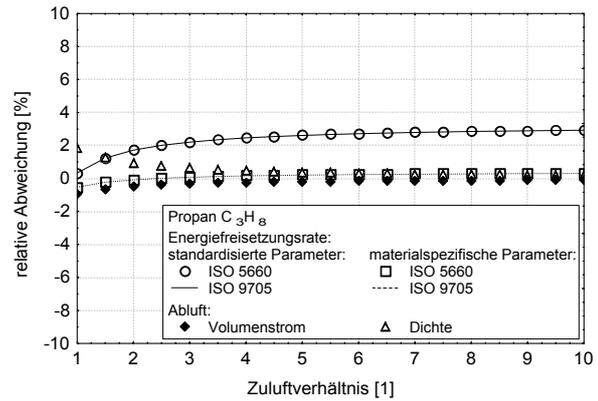


Diagramm C.2 Propan (Index 2, 23)

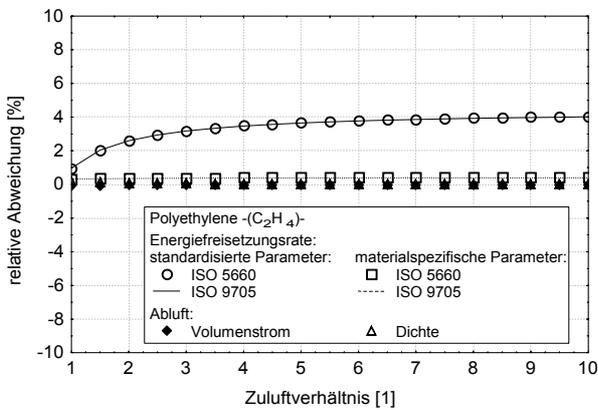


Diagramm C.3 Polyethylen (Index 3)

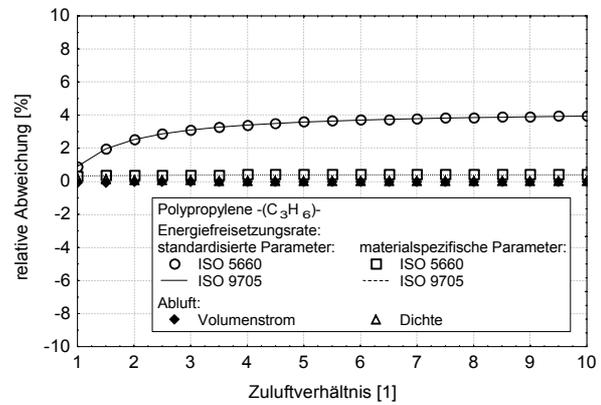


Diagramm C.4 Polypropylen (Index 4)

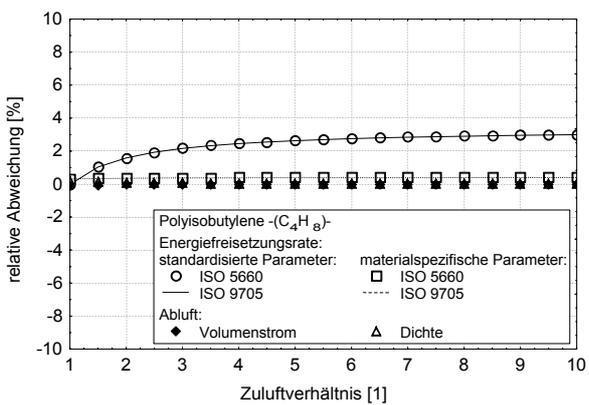


Diagramm C.5 Polyisobutylene (Index 5)

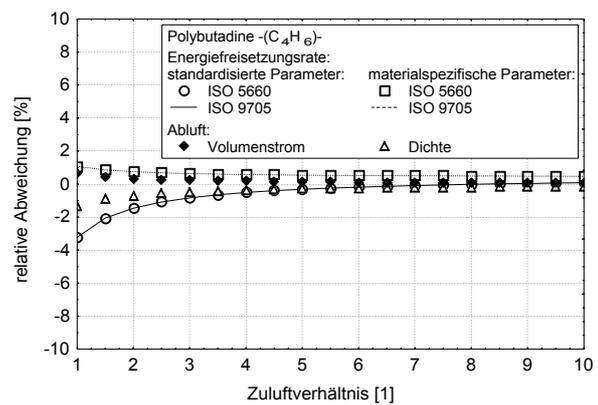


Diagramm C.6 Polyisobutadiene (Index 6)

C Anhang zu Teil A: Systematischer Fehler als Folge von Vereinfachungen in den Auswertungsverfahren

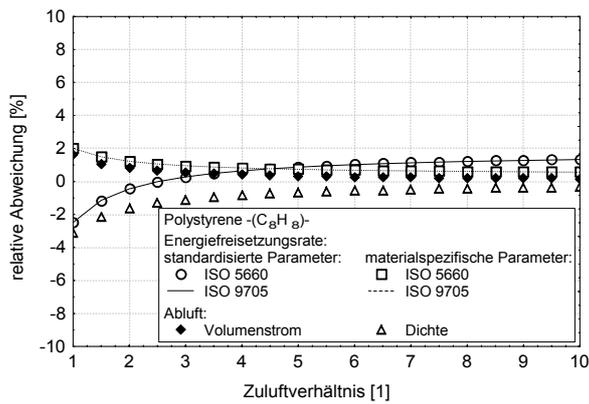


Diagramm C.7 Polystyrene (Index 7)

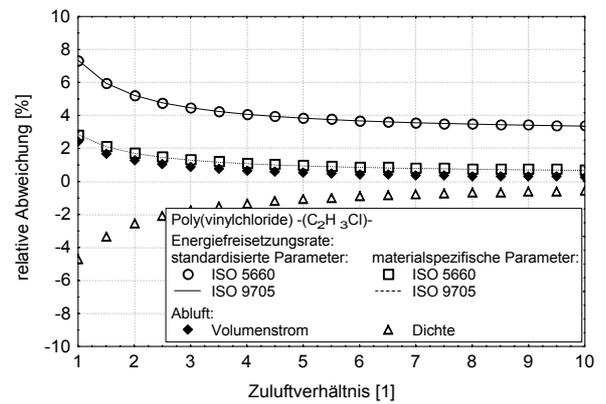


Diagramm C.8 Poly(vinylchloride) (Index 8)

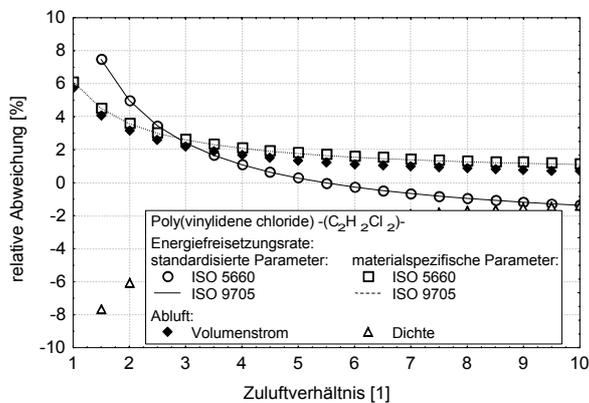


Diagramm C.9 Poly(vinylidene chloride) (Index 9)

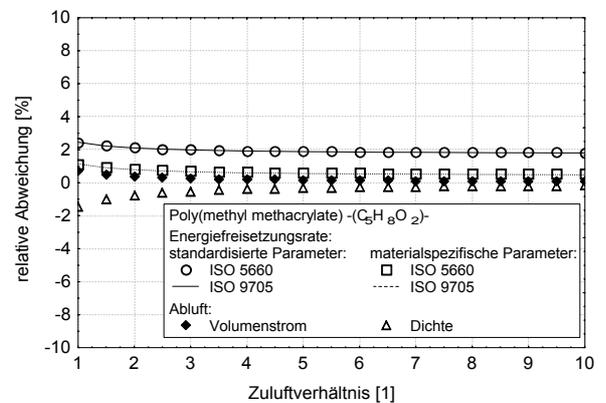


Diagramm C.10 Poly(methyl methacrylate) (Index 10)

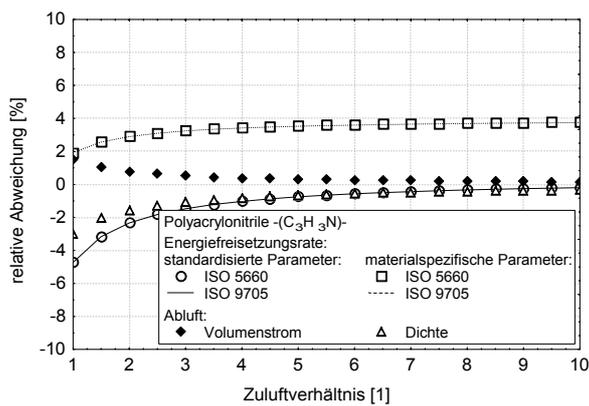


Diagramm C.11 Polyacrylonitrile (Index 11)

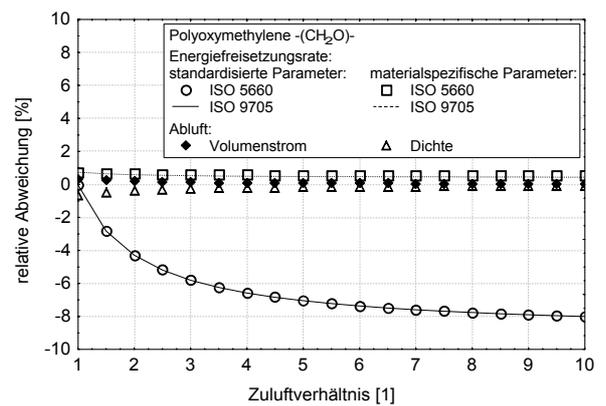


Diagramm C.12 Polyoxymethylene (Index 12)

C Anhang zu Teil A: Systematischer Fehler als Folge von Vereinfachungen in den Auswertungsverfahren

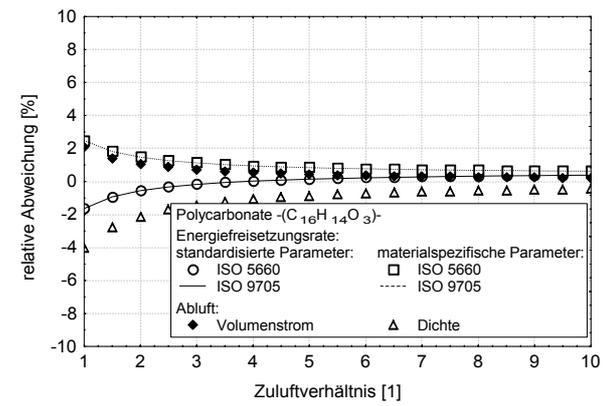
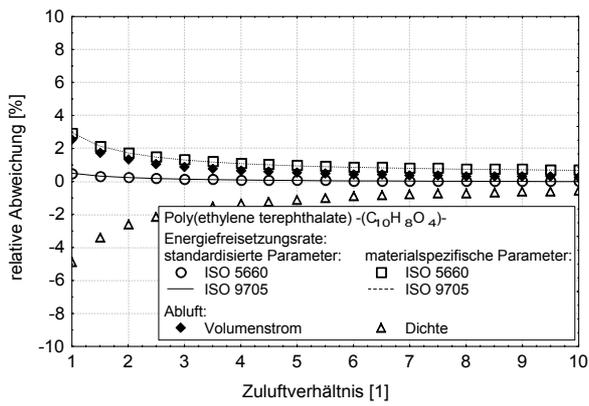


Diagramm C.13 Poly(ethylene terephthalate) (Index 13)

Diagramm C.14 Polycarbonate (Index 14)

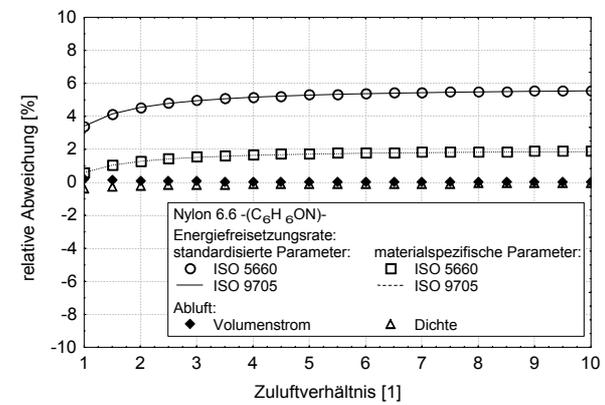
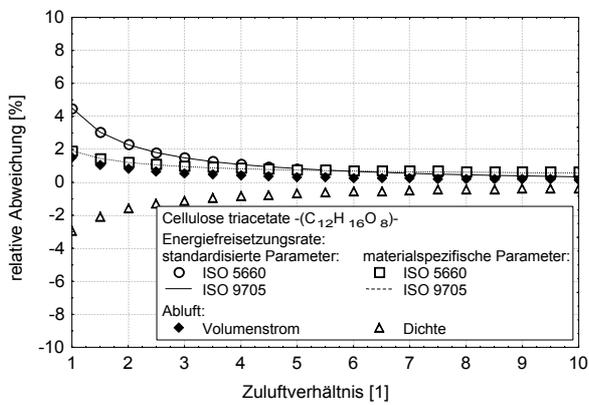


Diagramm C.15 Cellulose triacetate (Index 15)

Diagramm C.16 Nylon 6.6 (Index 16)

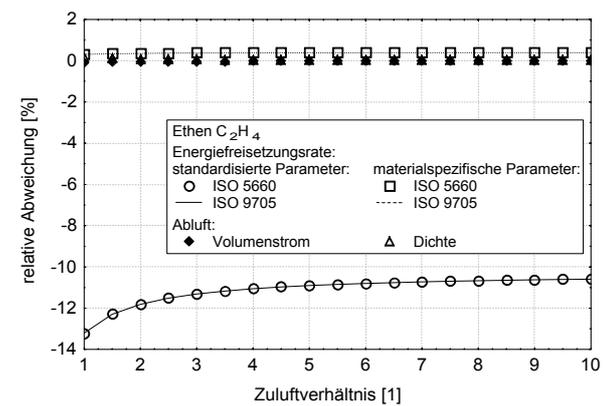
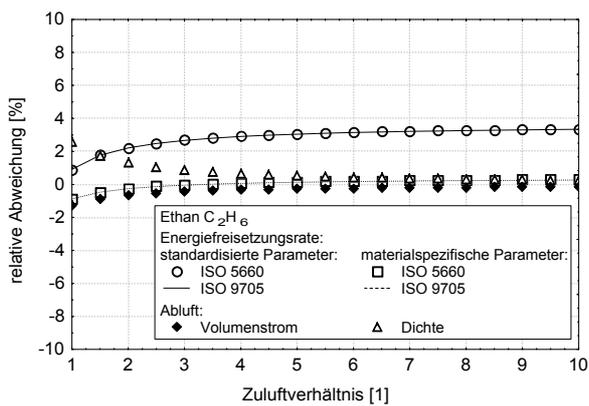


Diagramm C.17 Ethan (Index 20)

Diagramm C.18 Ethen (Index 21)

C Anhang zu Teil A: Systematischer Fehler als Folge von Vereinfachungen in den Auswertungsverfahren

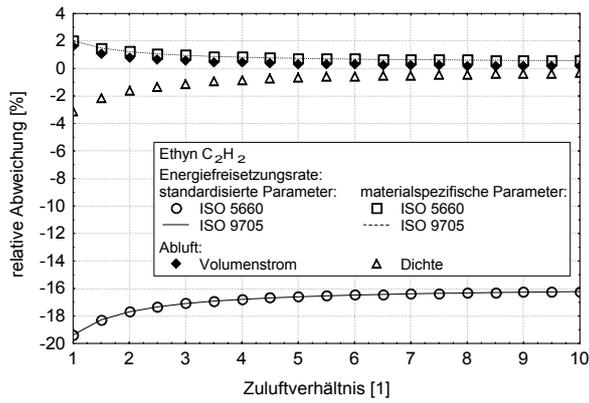


Diagramm C.19 Ethyn (Index 22)

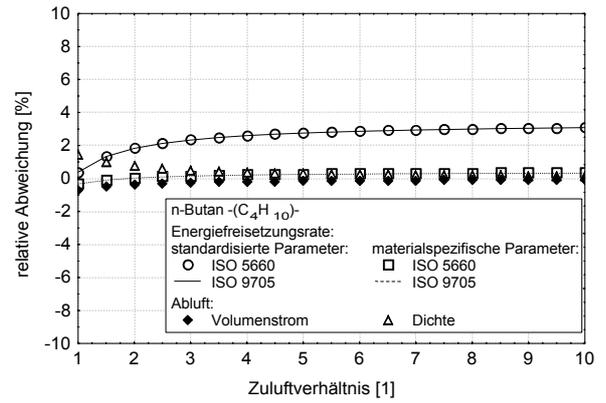


Diagramm C.20 n-Butan (Index 24)

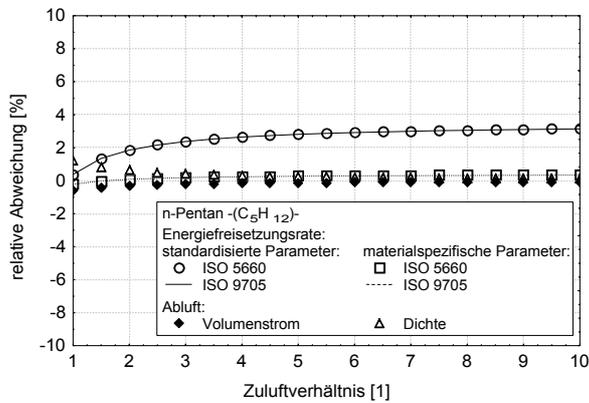


Diagramm C.21 n-Pentan (Index 25)

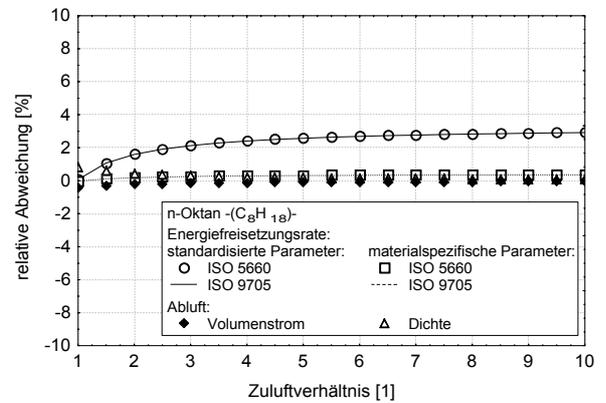


Diagramm C.22 n-Oktan (Index 26)

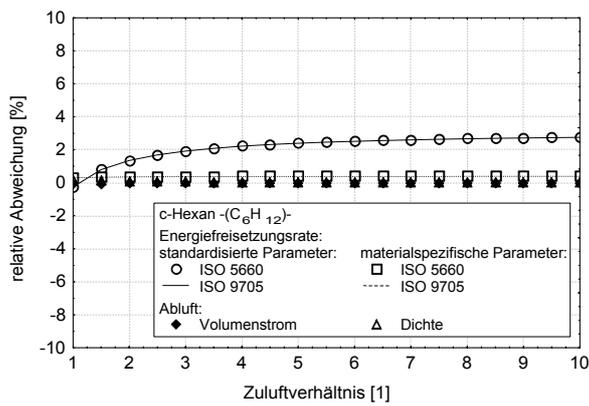


Diagramm C.23 c-Hexan (Index 27)

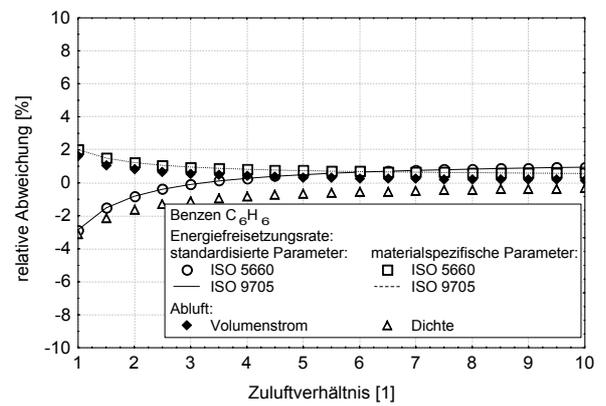


Diagramm C.24 Benzen (Index 28)

C Anhang zu Teil A: Systematischer Fehler als Folge von Vereinfachungen in den Auswertungsverfahren

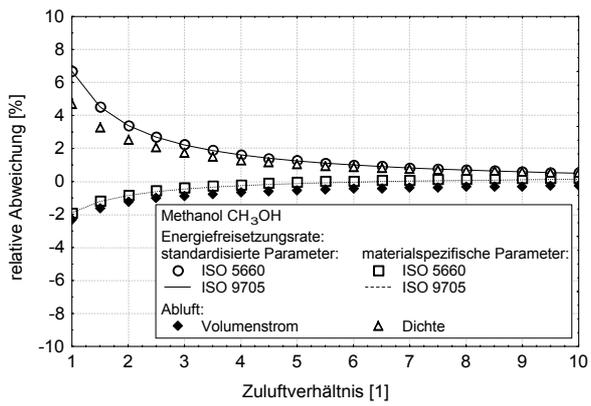


Diagramm C.25 Methanol (Index 29)

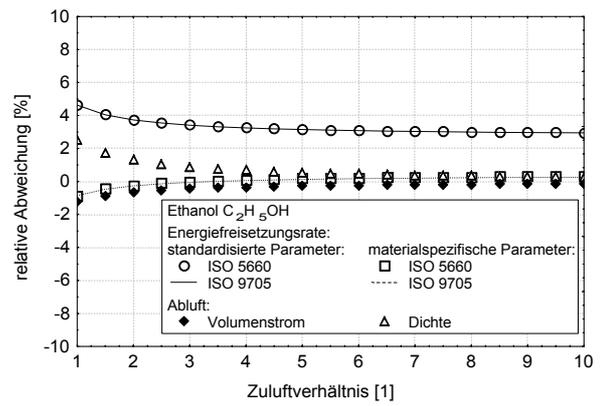


Diagramm C.26 Ethanol (Index 30)

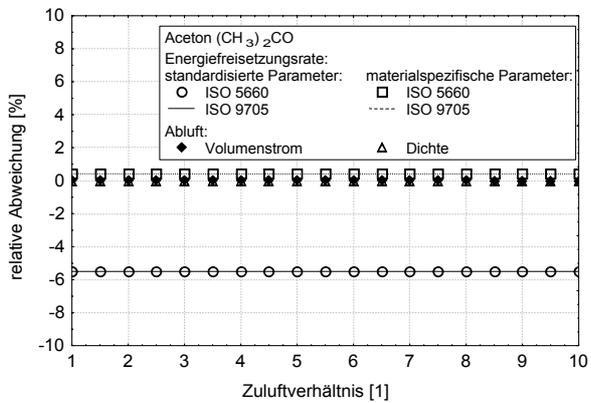


Diagramm C.27 Aceton (Index 31)

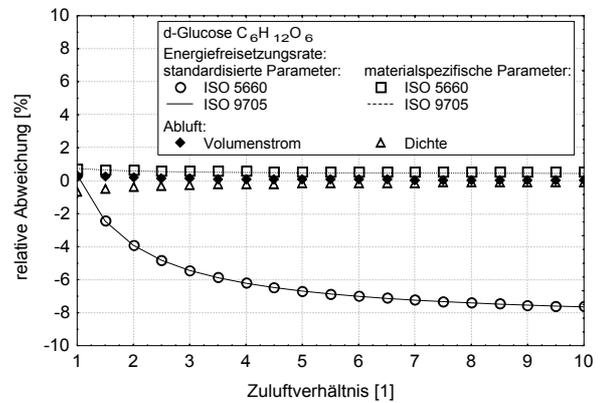


Diagramm C.28 d-Glucose (Index 32)

D Anhang zu Teil A: Systematischer, relativer Fehler der Energiefreisetzungsrates gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz

Erläuterung:

Der relative Fehler der Energiefreisetzungsrates wird zum einen für die einzelnen Parameter $E_{O_2}^V$, α , β und den Abluftvolumenstrom mit Gleichung (9.19), zum anderen insgesamt mit Gleichung (9.20) aus Abschnitt A.9.4 „Bewertung des systematischen Fehlers mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz“ berechnet. Ein positiver Wert für den relativen Fehler bedeutet eine Überbewertung der Energiefreisetzungsrates bei Anwendung des Auswertungsverfahrens nach ISO 5660, ein negativer Wert entsprechend eine Unterbewertung.

Es bedeuten im Einzelnen:

relativer Fehler der Energiefreisetzungsrates gemäß Gleichung (9.19), beruhend auf der Abweichung von standardisierten zu materialspezifischen

- Sauerstoffverbrauchsfaktor $E_{O_2}^V$,
- △ Expansionsfaktor infolge chemischer Reaktion α ,
- ◆ molarem Verhältnis der entstehenden Produkte zum verbrauchten Sauerstoff β ,

und

- beruhend auf der Abweichung des Volumenstroms ohne Dichtekorrektur zum exakten Volumenstrom,

— Gesamtfehler aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz gemäß Gleichung (9.20), basierend auf den Abweichungen der Parameter.

D Anhang zu Teil A: Systematischer, relativer Fehler der Energiefreisetzungsrate gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz

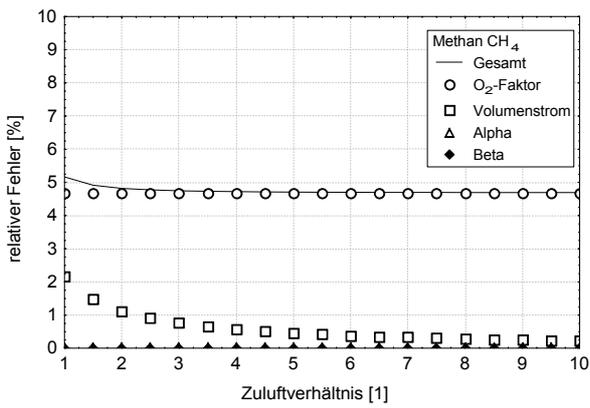


Diagramm D.1 Methan (Index 1, 19)

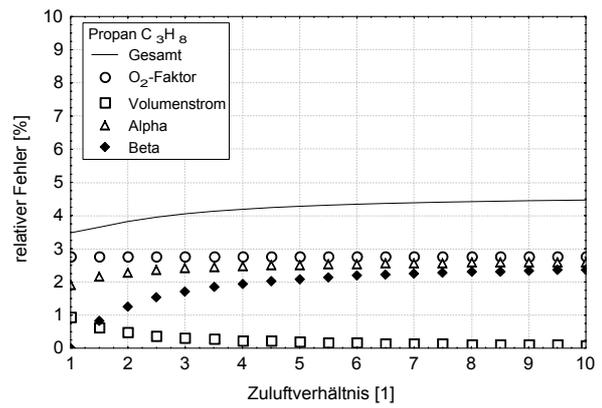


Diagramm D.2 Propan (Index 2, 23)

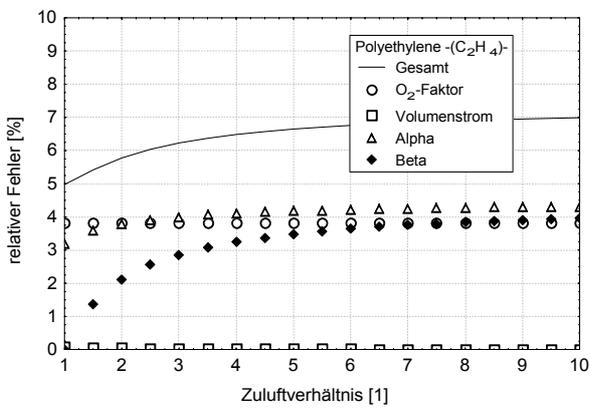


Diagramm D.3 Polyethylene (Index 3)

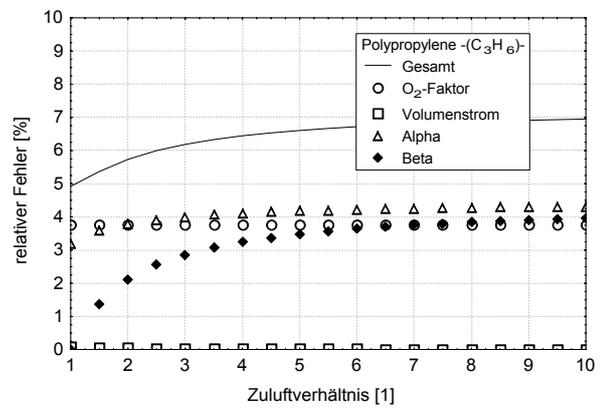


Diagramm D.4 Polypropylene (Index 4)

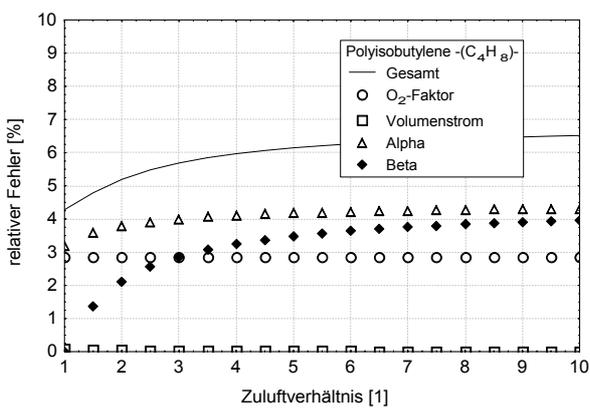


Diagramm D.5 Polyisobutylene (Index 5)

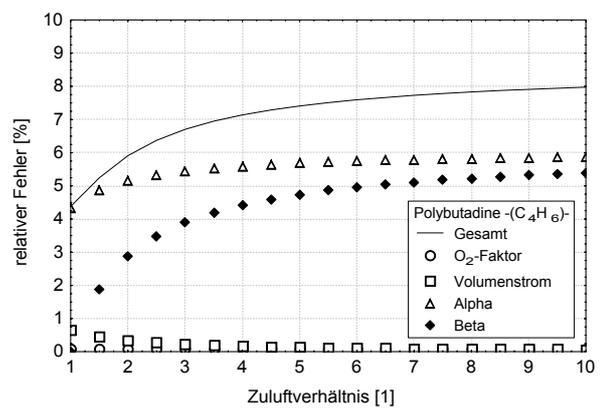


Diagramm D.6 Polyisobutadiene (Index 6)

D Anhang zu Teil A: Systematischer, relativer Fehler der Energiefreisetzungsrate gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz

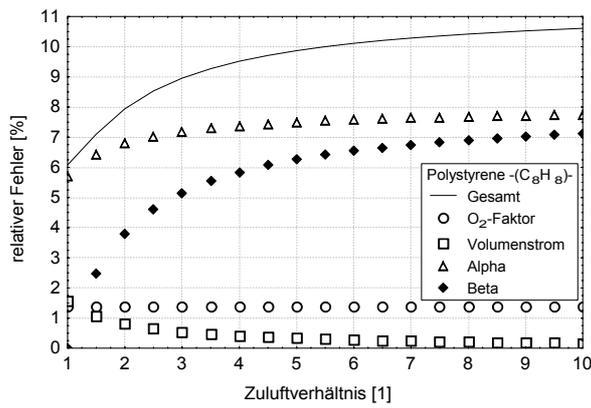


Diagramm D.7 Polystyrene (Index 7)

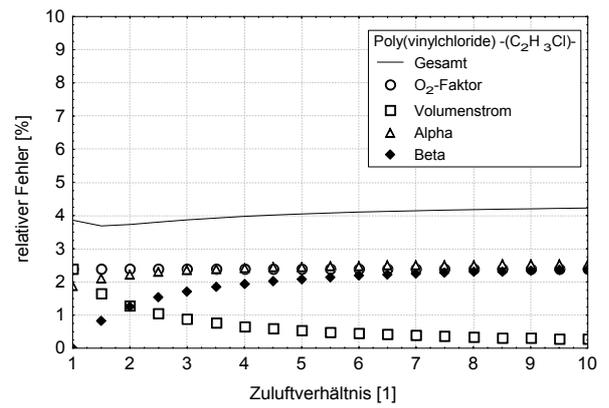


Diagramm D.8 Poly(vinylchloride) (Index 8)

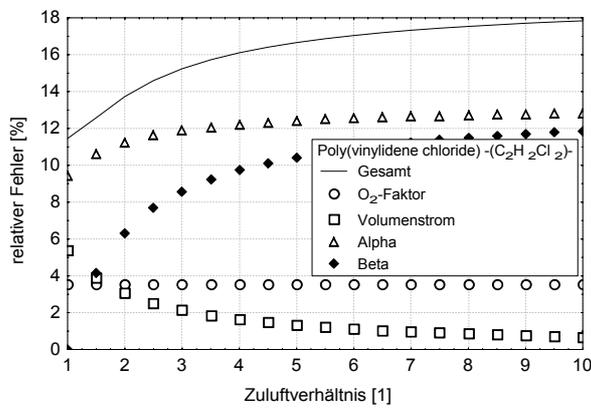


Diagramm D.9 Poly(vinylidene chloride) (Index 9)

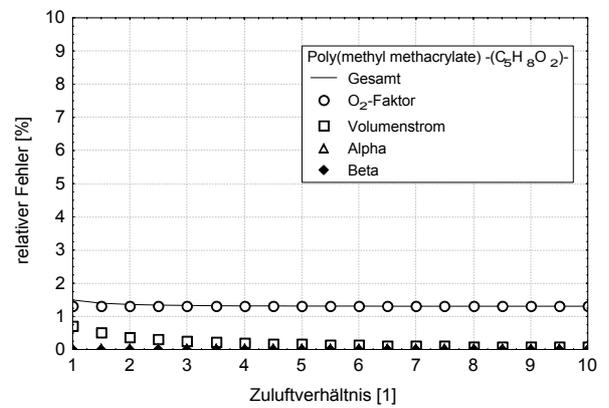


Diagramm D.10 Poly(methyl methacrylate) (Index 10)

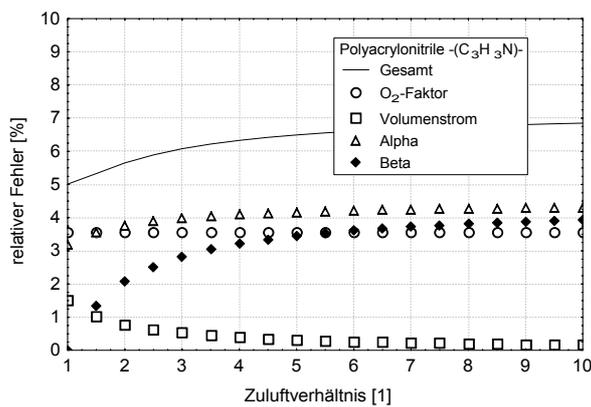


Diagramm D.11 Polyacrylonitrile (Index 11)

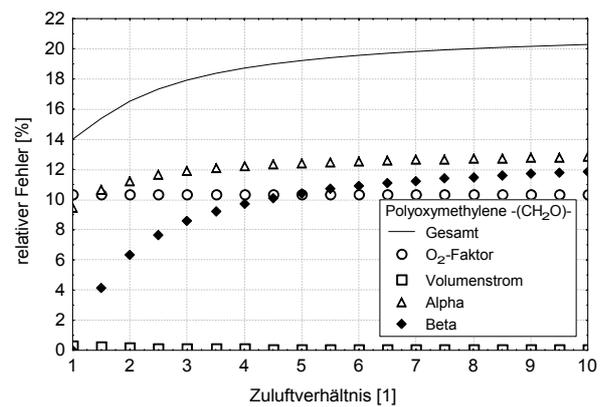


Diagramm D.12 Polyoxymethylene (Index 12)

D Anhang zu Teil A: Systematischer, relativer Fehler der Energiefreisetzungsrate gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz

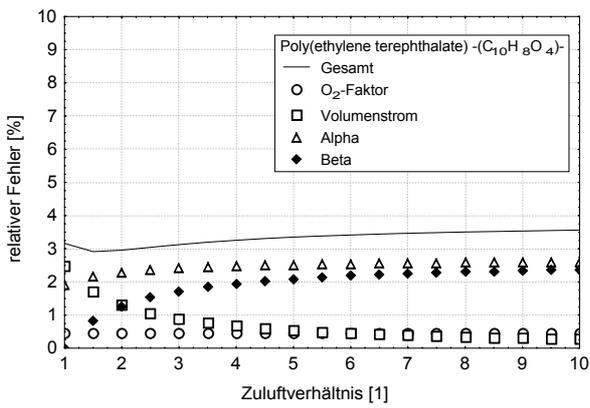


Diagramm D.13 Poly(ethylene terephthalate) (Index 13)

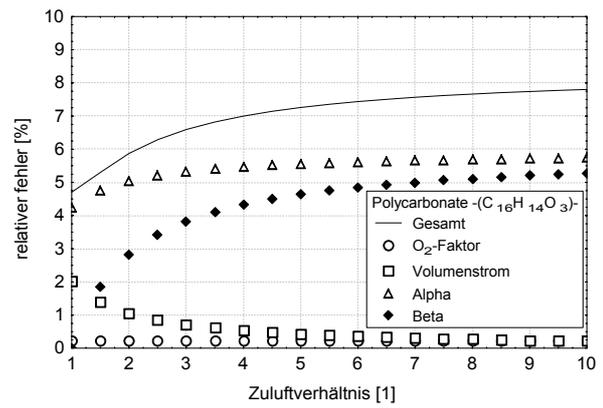


Diagramm D.14 Polycarbonate (Index 14)

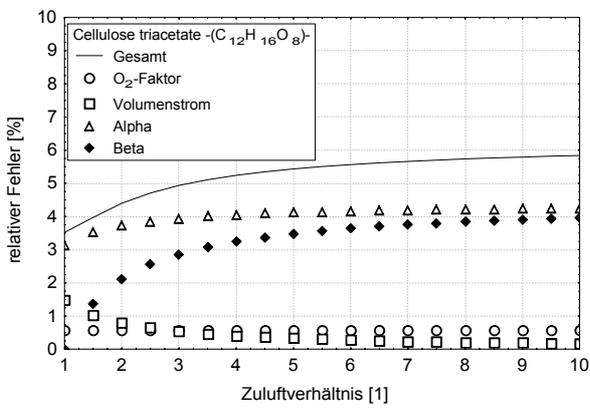


Diagramm D.15 Cellulose triacetate (Index 15)

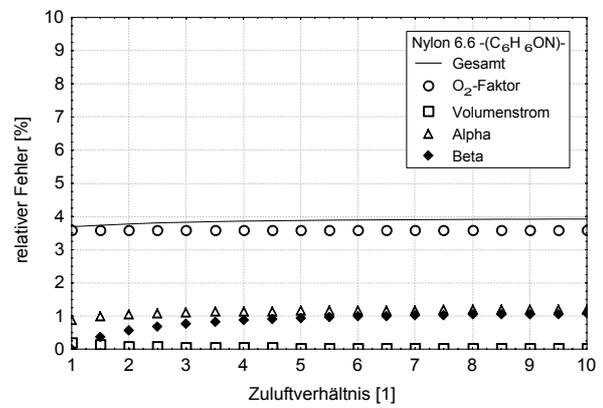


Diagramm D.16 Nylon 6.6 (Index 16)

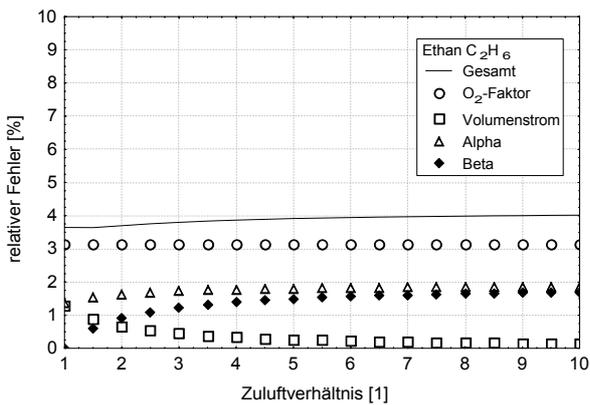


Diagramm D.17 Ethan (Index 20)

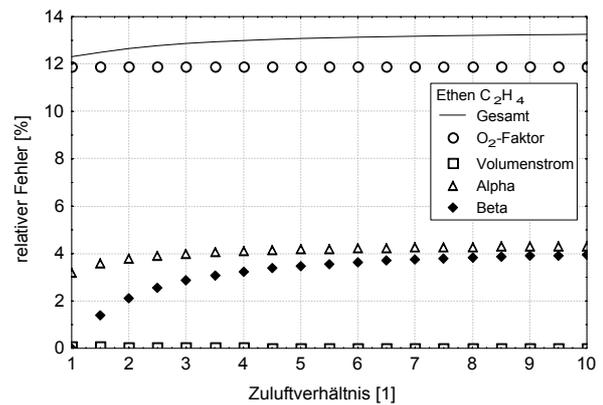


Diagramm D.18 Ethen (Index 21)

D Anhang zu Teil A: Systematischer, relativer Fehler der Energiefreisetzungsrate gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz

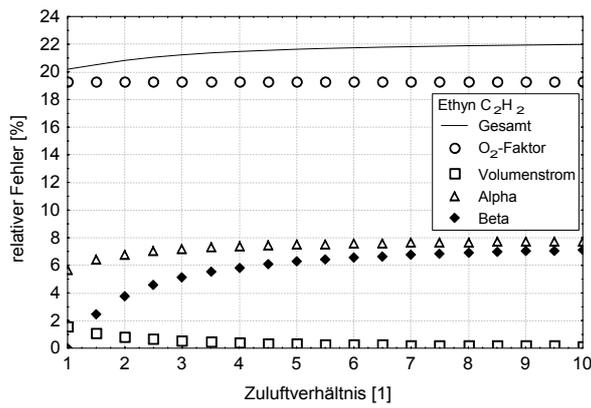


Diagramm D.19 Ethyn (Index 22)

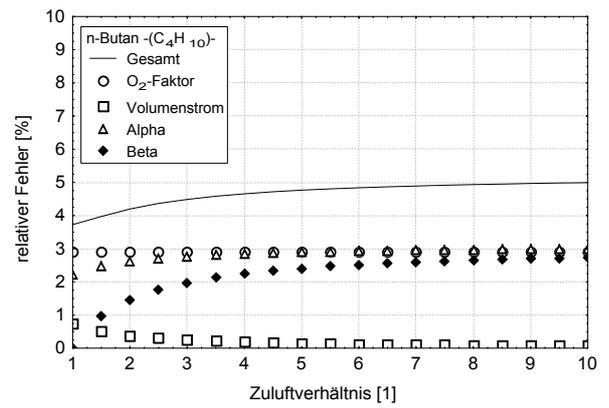


Diagramm D.20 n-Butan (Index 24)

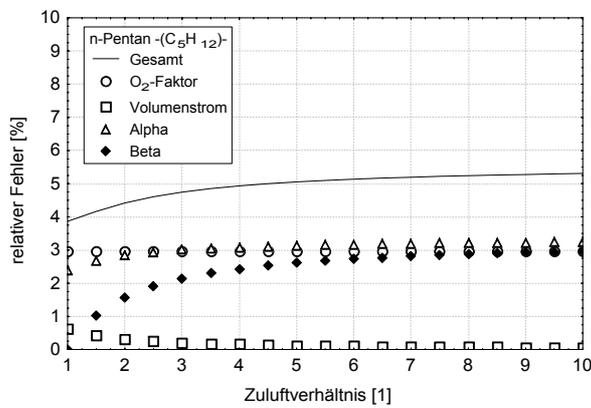


Diagramm D.21 n-Pentan (Index 25)

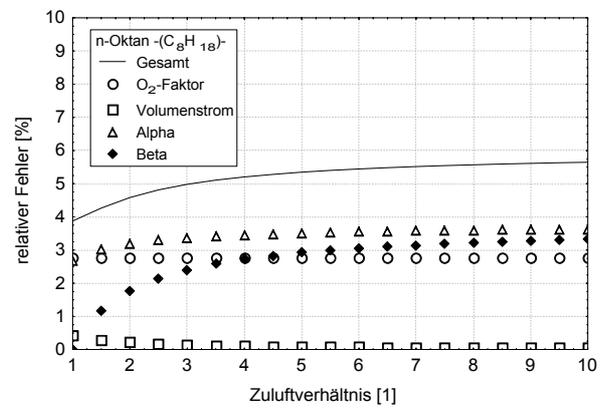


Diagramm D.22 n-Oktan (Index 26)

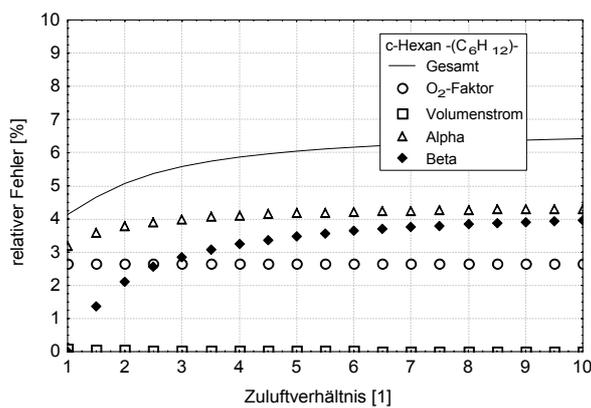


Diagramm D.23 c-Hexan (Index 27)

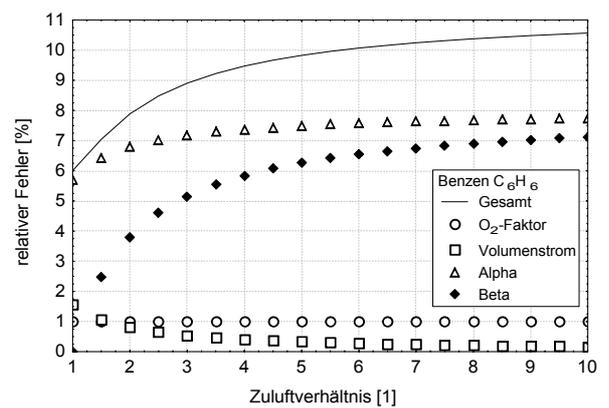


Diagramm D.24 Benzen (Index 28)

D Anhang zu Teil A: Systematischer, relativer Fehler der Energiefreisetzungsrate gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz

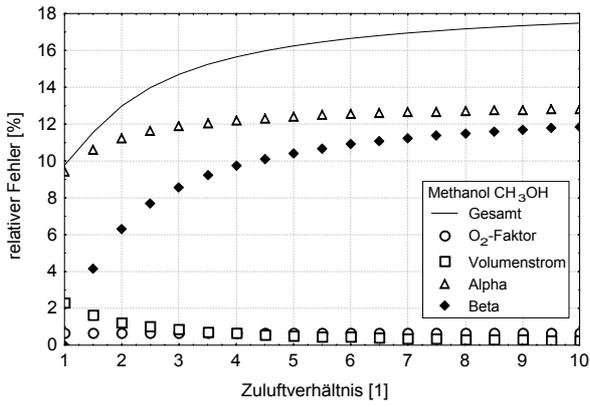


Diagramm D.25 Methanol (Index 29)

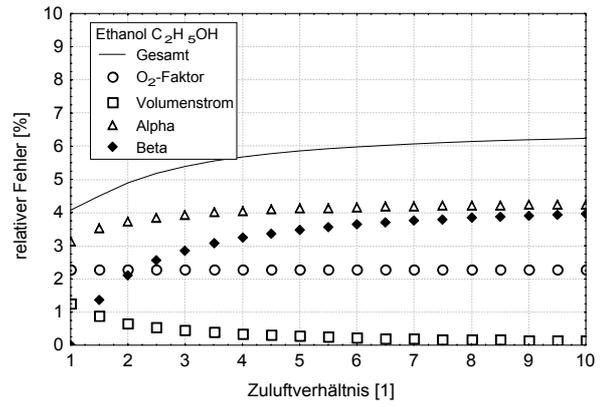


Diagramm D.26 Ethanol (Index 30)

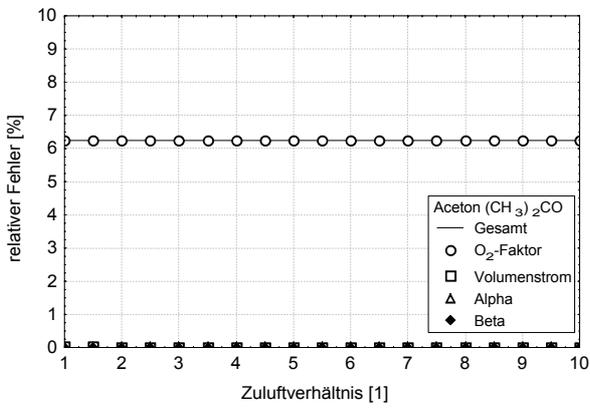


Diagramm D.27 Aceton (Index 31)

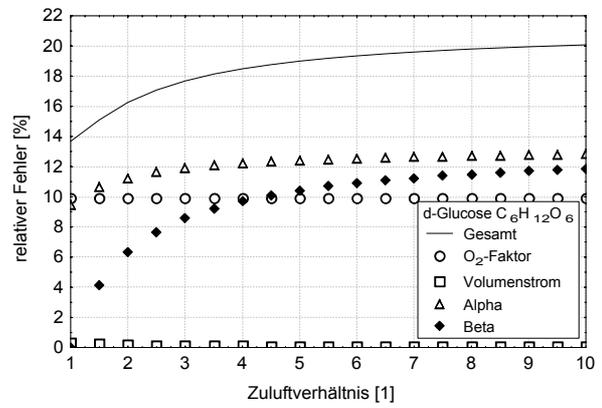


Diagramm D.28 d-Glucose (Index 32)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

E.1 Übersicht PE-Granulat Lupolen 5021 D

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 007, Versuch: 98071001.STA)

Zuluft: 107.6+72.9 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 1974.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 575.89 [kW/m²] zum Zeitpunkt 2287.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall	
	rel. Energiefreisetzungsrate [kW/m ²]	rel. Abbrandrate [g/(s*m ²)]	eff. Verbrennungswärme [kJ/g]	Kohlen-dioxid-Ausbeute [kg/kg]	Kohlen-monoxid-Ausbeute [kg/kg]	Zulufverhältnis **) [1]	Dauer, Beginn bis Ende [s]	
MLR 10-90 %	254.89	6.641	38.3783	2.6235	.02531	1.994	1035: 2203. bis 3238.	
180 s	78.01	3.682	21.1833	1.1590	.02480	3.597	180: 1978. bis 2158.	
300 s	111.59	3.979	28.0449	1.7006	.03424	3.329	300: 1978. bis 2278.	
ab Entzündung	194.46	5.075	38.3195	2.6132	.02664	2.610	1695: 1978. bis 3673.	
insgesamt	90.61	2.219	40.8296	2.7597	.03394	5.968	3670: 3. bis 3673.	
0%-Krit. *)	194.46	5.075	38.3195	2.6132	.02664	2.610	1695: 1978. bis 3673.	
5%-Krit. *)	221.91	5.800	38.2580	2.6085	.02606	2.283	1475: 2038. bis 3513.	
10%-Krit. *)	231.46	6.052	38.2472	2.6039	.02609	2.188	1400: 2068. bis 3468.	
25%-Krit. *)	242.34	6.354	38.1421	2.5932	.02627	2.085	1290: 2113. bis 3403.	
50%-Krit. *)	425.02	6.076	69.9495	5.3541	.05060	2.180	40: 2283. bis 2323.	

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 575.89 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m²]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.1 Strahlungsflußdichte 10 - 15 kW m⁻², Zuluft 100 - 200 l min⁻¹ (20 °C), Index 7 (Versuch 98071001)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 012, Versuch: 98071702.STA)

Zuluft: 26.3+13 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 129.1 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 99.94 [kW/m²] zum Zeitpunkt 2377.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall	
	rel. Energiefreisetzungsrate [kW/m ²]	rel. Abbrandrate [g/(s*m ²)]	eff. Verbrennungswärme [kJ/g]	Kohlen-dioxid-Ausbeute [kg/kg]	Kohlen-monoxid-Ausbeute [kg/kg]	Zulufverhältnis **) [1]	Dauer, Beginn bis Ende [s]	
MLR 10-90 %	85.99	2.337	36.7933	2.5992	.00468	1.385	3070: 633. bis 3703.	
180 s	28.68	1.714	16.7352	1.0436	.00020	1.889	180: 133. bis 313.	
300 s	42.33	1.872	22.6113	1.4530	.00014	1.729	300: 133. bis 433.	
ab Entzündung	67.55	1.900	35.5500	2.4864	.00743	1.703	4725: 133. bis 4858.	
insgesamt	65.74	1.888	34.8137	2.4349	.00728	1.714	4855: 3. bis 4858.	
0%-Krit. *)	67.55	1.900	35.5500	2.4864	.00743	1.703	4725: 133. bis 4858.	
5%-Krit. *)	73.10	2.033	35.9619	2.5197	.00742	1.592	4355: 148. bis 4503.	
10%-Krit. *)	75.28	2.090	36.0206	2.5257	.00715	1.549	4215: 158. bis 4373.	
25%-Krit. *)	78.50	2.174	36.1116	2.5356	.00613	1.489	3995: 208. bis 4203.	
50%-Krit. *)	81.88	2.240	36.5589	2.5698	.00518	1.445	3665: 303. bis 3968.	

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 99.94 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m²]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.2 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 25 l min⁻¹ (20 °C), Index 12 (Versuch 98071702)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 010, Versuch: 98071302.STA)

Zuluft: 50.7+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 153.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 154.46 [kW/m²] zum Zeitpunkt 2207.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	143.39	4.245	33.7801	2.2713	.04618	1.469	1630: 538. bis 2168.
180 s	49.18	1.766	27.8521	1.6191	.00283	3.532	180: 158. bis 338.
300 s	64.52	2.080	31.0174	1.9367	.00482	2.998	300: 158. bis 458.
ab Entzündung	108.75	3.044	35.7268	2.4002	.04585	2.049	2850: 158. bis 3008.
insgesamt	103.15	2.844	36.2692	2.4362	.04662	2.193	3005: 3. bis 3008.
0%-Krit. *)	108.75	3.044	35.7268	2.4002	.04585	2.049	2850: 158. bis 3008.
5%-Krit. *)	122.91	3.435	35.7811	2.4069	.04597	1.815	2515: 163. bis 2678.
10%-Krit. *)	125.86	3.526	35.6989	2.4012	.04586	1.769	2450: 168. bis 2618.
25%-Krit. *)	131.64	3.708	35.4994	2.3881	.04588	1.682	2315: 213. bis 2528.
50%-Krit. *)	138.97	3.959	35.1062	2.3619	.04701	1.575	2100: 353. bis 2453.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 154.46 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.3 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 50 l min⁻¹ (20 °C), Index 10 (Versuch 98071302)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 008, Versuch: 98071002.STA)

Zuluft: 100.3+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 146.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 196.95 [kW/m²] zum Zeitpunkt 2027.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	174.76	4.876	35.8423	2.3491	.02863	2.533	1390: 488. bis 1878.
180 s	66.19	1.823	36.3071	2.2200	.00142	6.773	180: 148. bis 328.
300 s	84.54	2.318	36.4696	2.3546	.00528	5.326	300: 148. bis 448.
ab Entzündung	133.22	3.519	37.8605	2.4672	.02786	3.509	2415: 148. bis 2563.
insgesamt	125.71	3.218	39.0684	2.5453	.02884	3.838	2560: 3. bis 2563.
0%-Krit. *)	133.22	3.519	37.8605	2.4672	.02786	3.509	2415: 148. bis 2563.
5%-Krit. *)	152.45	4.048	37.6582	2.4659	.02780	3.050	2100: 153. bis 2253.
10%-Krit. *)	156.15	4.161	37.5238	2.4595	.02774	2.967	2045: 158. bis 2203.
25%-Krit. *)	161.71	4.334	37.3129	2.4490	.02776	2.849	1955: 193. bis 2148.
50%-Krit. *)	171.71	4.649	36.9357	2.4257	.02882	2.656	1745: 358. bis 2103.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 196.95 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.4 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 100 l min⁻¹ (20 °C), Index 8 (Versuch 98071002)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 009, Versuch: 98071301.STA)

Zuluft: 200.3+- .05 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 147.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 241.93 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1557.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	216.11	5.531	39.0691	2.5731	.02555	4.459	1195: 498. bis 1693.
180 s	71.63	1.609	44.5181	2.2865	.00013	15.330	175: 153. bis 328.
300 s	90.75	2.197	41.3037	2.3270	.00382	11.226	295: 153. bis 448.
ab Entzündung	172.05	4.278	40.2123	2.6305	.02390	5.765	1940: 153. bis 2093.
insgesamt	159.76	3.965	40.2884	2.6344	.02405	6.220	2090: 3. bis 2093.
0%-Krit. *)	172.05	4.278	40.2123	2.6305	.02390	5.765	1940: 153. bis 2093.
5%-Krit. *)	183.09	4.580	39.9769	2.6165	.02380	5.386	1820: 153. bis 1973.
10%-Krit. *)	186.78	4.691	39.8192	2.6055	.02375	5.258	1780: 158. bis 1938.
25%-Krit. *)	194.71	4.936	39.4513	2.5835	.02381	4.997	1685: 203. bis 1888.
50%-Krit. *)	210.79	5.400	39.0356	2.5706	.02497	4.568	1460: 398. bis 1858.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 241.93 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.5 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 200 l min⁻¹ (20 °C), Index 9 (Versuch 98071301)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 011, Versuch: 98071701.STA)

Zuluft: 26.1+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 64.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 123.41 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1642.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	115.78	3.371	34.3447	2.3957	.08053	.952	2105: 498. bis 2603.
180 s	38.89	1.794	21.6793	1.2512	.00212	1.790	180: 68. bis 248.
300 s	54.15	1.930	28.0631	1.7607	.00404	1.664	300: 68. bis 368.
ab Entzündung	90.07	2.492	36.1484	2.4994	.07000	1.289	3570: 68. bis 3638.
insgesamt	88.46	2.473	35.7665	2.4730	.06926	1.298	3635: 3. bis 3638.
0%-Krit. *)	90.07	2.492	36.1484	2.4994	.07000	1.289	3570: 68. bis 3638.
5%-Krit. *)	91.64	2.523	36.3210	2.5139	.07040	1.273	3505: 83. bis 3588.
10%-Krit. *)	98.71	2.710	36.4204	2.5321	.07111	1.185	3230: 98. bis 3328.
25%-Krit. *)	105.54	2.901	36.3856	2.5375	.07192	1.107	2970: 143. bis 3113.
50%-Krit. *)	109.78	3.048	36.0180	2.5146	.07289	1.053	2770: 218. bis 2988.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 123.41 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.6 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 25 l min⁻¹ (20 °C), Index 11 (Versuch 98071701)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 003, Versuch: 98070301.STA)

Zuluft: 51.0+-.03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 64.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 203.16 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1117.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	185.92	4.933	37.6900	2.5069	.05119	1.274	1320: 393. bis 1713.
180 s	58.94	1.807	32.6280	2.0510	.00127	3.478	180: 68. bis 248.
300 s	82.09	2.400	34.2046	2.1736	.00918	2.618	300: 68. bis 368.
ab Entzündung	136.39	3.530	38.6333	2.5701	.04786	1.780	2315: 68. bis 2383.
insgesamt	132.67	3.290	40.3310	2.6829	.04997	1.910	2380: 3. bis 2383.
0%-Krit. *)	136.39	3.530	38.6333	2.5701	.04786	1.780	2315: 68. bis 2383.
5%-Krit. *)	154.72	4.019	38.4957	2.5614	.04780	1.564	2035: 78. bis 2113.
10%-Krit. *)	159.30	4.155	38.3406	2.5493	.04770	1.512	1970: 88. bis 2058.
25%-Krit. *)	166.63	4.375	38.0870	2.5290	.04776	1.436	1860: 133. bis 1993.
50%-Krit. *)	176.65	4.678	37.7609	2.5063	.04934	1.343	1670: 283. bis 1953.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 203.16 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.7 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 50 l min⁻¹ (20 °C), Index 3 (Versuch 98070301)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 005, Versuch: 98070901.STA)

Zuluft: 80.6+-.03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 62.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 271.04 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1117.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	228.36	6.343	36.0041	2.4652	.02415	1.565	1080: 388. bis 1468.
180 s	71.40	1.871	38.1594	2.3125	.00453	5.305	175: 68. bis 243.
300 s	96.76	2.537	38.1406	2.4241	.01435	3.913	295: 68. bis 363.
ab Entzündung	149.08	3.995	37.3134	2.5220	.02501	2.485	2145: 68. bis 2213.
insgesamt	144.70	3.885	37.2510	2.5177	.02498	2.555	2210: 3. bis 2213.
0%-Krit. *)	149.08	3.995	37.3134	2.5220	.02501	2.485	2145: 68. bis 2213.
5%-Krit. *)	187.13	5.119	36.5565	2.4936	.02475	1.939	1690: 73. bis 1763.
10%-Krit. *)	192.73	5.290	36.4319	2.4850	.02470	1.876	1635: 88. bis 1723.
25%-Krit. *)	201.17	5.560	36.1794	2.4687	.02473	1.785	1545: 138. bis 1683.
50%-Krit. *)	215.74	6.049	35.6676	2.4374	.02530	1.641	1345: 308. bis 1653.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 271.04 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.8 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 80 l min⁻¹ (20 °C), Index 5 (Versuch 98070901)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 013, Versuch: 98072101.STA)

Zuluft: 77.9+-13.8 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 64.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 243.91 [kW/m²] zum Zeitpunkt 822.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	162.30	5.706	28.4439	1.8859	.01785	1.680	740: 278. bis 1018.
180 s	81.16	2.308	35.1604	2.1435	.01072	4.153	180: 68. bis 248.
300 s	114.11	3.136	36.3844	2.2860	.01893	3.057	300: 68. bis 368.
ab Entzündung	132.60	4.895	27.0873	1.7746	.01616	1.958	1085: 68. bis 1153.
insgesamt	125.13	4.468	28.0086	1.8347	.01674	2.146	1150: 3. bis 1153.
0%-Krit. *)	132.60	4.895	27.0873	1.7746	.01616	1.958	1085: 68. bis 1153.
5%-Krit. *)	136.75	4.915	27.8216	1.8237	.01658	1.950	1050: 73. bis 1123.
10%-Krit. *)	137.31	4.940	27.7956	1.8227	.01657	1.941	1045: 78. bis 1123.
25%-Krit. *)	171.03	4.908	34.8433	2.2943	.02088	1.953	755: 133. bis 888.
50%-Krit. *)	189.30	5.009	37.7918	2.4807	.02352	1.914	620: 213. bis 833.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 243.91 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.9 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 80 l min⁻¹ (20 °C), Index 13 (Versuch 98072101)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 014, Versuch: 98072102.STA)

Zuluft: 80.9+- .03 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 64.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 288.87 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1022.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	243.88	6.590	37.0056	2.4046	.01992	1.511	1035: 358. bis 1393.
180 s	80.75	2.341	34.4959	2.1117	.00704	4.254	180: 68. bis 248.
300 s	110.48	3.052	36.2025	2.2482	.01823	3.263	300: 68. bis 368.
ab Entzündung	165.15	4.271	38.6679	2.4716	.02160	2.332	2015: 68. bis 2083.
insgesamt	160.01	4.008	39.9247	2.5516	.02232	2.485	2080: 3. bis 2083.
0%-Krit. *)	165.15	4.271	38.6679	2.4716	.02160	2.332	2015: 68. bis 2083.
5%-Krit. *)	200.50	5.222	38.3932	2.4663	.02156	1.907	1650: 73. bis 1723.
10%-Krit. *)	206.04	5.383	38.2800	2.4609	.02150	1.850	1600: 83. bis 1683.
25%-Krit. *)	215.85	5.668	38.0791	2.4523	.02158	1.757	1505: 138. bis 1643.
50%-Krit. *)	228.39	6.057	37.7072	2.4301	.02182	1.644	1345: 268. bis 1613.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 288.87 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.10 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 80 l min⁻¹ (20 °C), Index 14 (Versuch 98072102)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 001, Versuch: 98070201.STA)

Zuluft: 100.8+- .04 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 71.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 273.12 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1147.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	227.79	6.272	36.3194	2.4134	.02092	1.979	1110: 348. bis 1458.
180 s	86.52	2.383	36.3145	2.2093	.00762	5.210	180: 73. bis 253.
300 s	123.54	3.408	36.2504	2.2724	.01753	3.643	300: 73. bis 373.
ab Entzündung	180.26	4.937	36.5120	2.4048	.02115	2.514	1770: 73. bis 1843.
insgesamt	173.43	4.660	37.2144	2.4508	.02158	2.664	1840: 3. bis 1843.
0%-Krit. *)	180.26	4.937	36.5120	2.4048	.02115	2.514	1770: 73. bis 1843.
5%-Krit. *)	195.92	5.403	36.2608	2.3904	.02104	2.298	1625: 78. bis 1703.
10%-Krit. *)	199.18	5.507	36.1672	2.3846	.02101	2.254	1595: 83. bis 1678.
25%-Krit. *)	207.08	5.761	35.9444	2.3739	.02108	2.155	1515: 133. bis 1648.
50%-Krit. *)	217.08	6.097	35.6037	2.3560	.02147	2.036	1380: 243. bis 1623.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 273.12 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.11 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 100 l min⁻¹ (20 °C), Index 1 (Versuch 98070201)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 004, Versuch: 98070801.STA)

Zuluft: 150.3+- .05 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 68.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 293.54 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1002.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	254.38	6.795	37.4336	2.5600	.02032	2.723	1015: 348. bis 1363.
180 s	93.78	2.417	38.8040	2.1194	.00591	7.657	180: 73. bis 253.
300 s	133.98	3.496	38.3199	2.3274	.01566	5.293	300: 73. bis 373.
ab Entzündung	206.26	5.529	37.3057	2.5260	.02030	3.347	1575: 73. bis 1648.
insgesamt	197.54	5.596	35.3000	2.3896	.01925	3.307	1645: 3. bis 1648.
0%-Krit. *)	206.26	5.529	37.3057	2.5260	.02030	3.347	1575: 73. bis 1648.
5%-Krit. *)	218.49	5.888	37.1100	2.5112	.02021	3.143	1485: 73. bis 1558.
10%-Krit. *)	221.82	5.982	37.0791	2.5081	.02020	3.093	1460: 78. bis 1538.
25%-Krit. *)	230.15	6.234	36.9192	2.5040	.02032	2.968	1390: 128. bis 1518.
50%-Krit. *)	244.15	6.626	36.8493	2.5154	.02097	2.793	1240: 258. bis 1498.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 293.54 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.12 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 150 l min⁻¹ (20 °C), Index 4 (Versuch 98070801)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 002, Versuch: 98070202.STA)

Zuluft: 216.7+- .04 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.10 [g]

Zündzeitpunkt: 68.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 315.04 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1012.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	273.23	7.171	38.1007	2.5857	.02017	3.720	950: 353. bis 1303.
180 s	94.92	2.197	43.2103	2.0747	.00250	12.146	180: 73. bis 253.
300 s	133.62	3.307	40.4071	2.2346	.01246	8.068	300: 73. bis 373.
ab Entzündung	212.34	5.464	38.8624	2.5698	.01993	4.883	1565: 73. bis 1638.
insgesamt	203.30	4.897	41.5159	2.7446	.02132	5.448	1635: 3. bis 1638.
0%-Krit. *)	219.35	5.654	38.7955	2.5654	.01990	4.719	1515: 73. bis 1588.
5%-Krit. *)	232.96	6.035	38.6017	2.5537	.01982	4.421	1425: 73. bis 1498.
10%-Krit. *)	235.88	6.114	38.5777	2.5531	.01984	4.363	1405: 78. bis 1483.
25%-Krit. *)	244.37	6.368	38.3767	2.5523	.01997	4.190	1340: 128. bis 1468.
50%-Krit. *)	261.23	6.902	37.8466	2.5443	.02058	3.865	1185: 263. bis 1448.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 315.04 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.13 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 200 l min⁻¹ (20 °C), Index 12 (Versuch 98070202)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 006, Versuch: 98070902.STA)

Zuluft: 397.7+-7.12 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 72.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 358.71 [kW/m²] zum Zeitpunkt 932.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	315.24	8.183	38.5248	2.4843	.02758	5.984	810: 413. bis 1223.
180 s	89.33	1.769	50.4835	2.1590	.00290	27.673	180: 73. bis 253.
300 s	125.22	2.197	56.9979	2.8840	.01776	22.288	300: 73. bis 373.
ab Entzündung	236.10	5.726	41.2349	2.5599	.02709	8.552	1455: 73. bis 1528.
insgesamt	225.30	5.396	41.7490	2.5914	.02754	9.074	1525: 3. bis 1528.
0%-Krit. *)	236.10	5.726	41.2349	2.5599	.02709	8.552	1455: 73. bis 1528.
5%-Krit. *)	247.44	6.050	40.9007	2.5452	.02691	8.094	1385: 78. bis 1463.
10%-Krit. *)	252.30	6.187	40.7763	2.5425	.02690	7.914	1355: 83. bis 1438.
25%-Krit. *)	267.89	6.624	40.4389	2.5432	.02721	7.392	1250: 153. bis 1403.
50%-Krit. *)	294.33	7.469	39.4083	2.5133	.02791	6.556	1050: 318. bis 1368.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 358.71 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.14 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 400 l min⁻¹ (20 °C), Index 6 (Versuch 98070902)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 020, Versuch: 98072401.STA)

Zuluft: 25.6+-.03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 35.1 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 127.79 [kW/m²] zum Zeitpunkt 297.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	117.12	7.149	16.3828	.9429	.17697	.441	1020: 313. bis 1333.
180 s	59.62	2.740	21.7629	1.3371	.01618	1.152	180: 38. bis 218.
300 s	85.37	3.540	24.1188	1.5427	.05986	.891	300: 38. bis 338.
ab Entzündung	88.96	4.370	20.3580	1.2054	.17999	.722	2095: 38. bis 2133.
insgesamt	87.50	4.200	20.8324	1.2335	.18418	.751	2130: 3. bis 2133.
0%-Krit. *)	88.96	4.370	20.3580	1.2054	.17999	.722	2095: 38. bis 2133.
5%-Krit. *)	89.37	4.396	20.3271	1.2036	.17975	.718	2085: 48. bis 2133.
10%-Krit. *)	98.33	4.853	20.2629	1.2035	.18067	.650	1875: 58. bis 1933.
25%-Krit. *)	108.61	5.436	19.9784	1.1862	.18140	.580	1655: 88. bis 1743.
50%-Krit. *)	115.54	5.964	19.3728	1.1463	.18179	.529	1485: 138. bis 1623.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 127.79 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.15 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 25 l min⁻¹ (20 °C), Index 20 (Versuch 98072401)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 018, Versuch: 98072302.STA)

Zuluft: 50.9+-.03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 38.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 260.61 [kW/m²] zum Zeitpunkt 937.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	253.07	10.168	24.8879	1.5748	.12067	.616	660: 283. bis 943.
180 s	101.22	3.028	33.4330	2.0122	.02314	2.069	180: 43. bis 223.
300 s	142.61	4.304	33.1381	2.0827	.05239	1.455	300: 43. bis 343.
ab Entzündung	144.32	5.059	28.5268	1.7885	.11137	1.238	1680: 43. bis 1723.
insgesamt	140.98	4.814	29.2879	1.8361	.11433	1.301	1720: 3. bis 1723.
0%-Krit. *)	144.32	5.059	28.5268	1.7885	.11137	1.238	1680: 43. bis 1723.
5%-Krit. *)	192.03	6.832	28.1088	1.7906	.11173	.917	1240: 48. bis 1288.
10%-Krit. *)	209.75	7.544	27.8030	1.7742	.11151	.830	1125: 58. bis 1183.
25%-Krit. *)	227.01	8.274	27.4371	1.7478	.11192	.757	1020: 93. bis 1113.
50%-Krit. *)	239.48	8.883	26.9593	1.7199	.11417	.705	925: 168. bis 1093.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 260.61 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.16 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 50 l min⁻¹ (20 °C), Index 18 (Versuch 98072302)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 016, Versuch: 98072202.STA)

Zuluft: 100.5+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 48.9 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 495.19 [kW/m²] zum Zeitpunkt 657.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	430.09	13.133	32.7482	2.2136	.04683	.942	530: 248. bis 778.
180 s	141.61	4.183	33.8552	2.0524	.01953	2.958	180: 53. bis 233.
300 s	205.24	6.054	33.8987	2.1464	.01804	2.044	300: 53. bis 353.
ab Entzündung	240.03	6.865	34.9652	2.3416	.04205	1.802	1275: 53. bis 1328.
insgesamt	231.08	6.504	35.5264	2.3783	.04296	1.902	1325: 3. bis 1328.
0%-Krit. *)	240.03	6.865	34.9652	2.3416	.04205	1.802	1275: 53. bis 1328.
5%-Krit. *)	340.49	9.911	34.3539	2.3191	.04192	1.248	885: 58. bis 943.
10%-Krit. *)	349.27	10.181	34.3074	2.3139	.04194	1.215	860: 68. bis 928.
25%-Krit. *)	370.53	10.818	34.2522	2.3124	.04250	1.144	795: 118. bis 913.
50%-Krit. *)	417.14	12.532	33.2872	2.2593	.04347	.987	635: 238. bis 873.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 495.19 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.17 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 100 l min⁻¹ (20 °C), Index 16 (Versuch 98072202)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 017, Versuch: 98072301.STA)

Zuluft: 150.8+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 41.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 546.44 [kW/m²] zum Zeitpunkt 657.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	454.34	12.257	37.0676	2.4999	.01342	1.514	555: 243. bis 798.
180 s	151.14	3.986	37.9139	2.3582	.01547	4.656	180: 43. bis 223.
300 s	215.09	5.692	37.7852	2.3884	.01682	3.261	300: 43. bis 343.
ab Entzündung	299.20	7.945	37.6573	2.5431	.01424	2.336	1080: 43. bis 1123.
insgesamt	288.58	7.878	36.6326	2.4736	.01388	2.356	1120: 3. bis 1123.
0%-Krit. *)	299.20	7.945	37.6573	2.5431	.01424	2.336	1080: 43. bis 1123.
5%-Krit. *)	362.14	9.602	37.7157	2.5361	.01430	1.933	890: 48. bis 938.
10%-Krit. *)	371.20	9.869	37.6139	2.5289	.01431	1.881	865: 63. bis 928.
25%-Krit. *)	393.04	10.486	37.4811	2.5254	.01453	1.770	800: 118. bis 918.
50%-Krit. *)	444.71	11.948	37.2191	2.5152	.01357	1.554	620: 248. bis 868.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 546.44 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.18 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 150 l min⁻¹ (20 °C), Index 17 (Versuch 98072301)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 015, Versuch: 98072201.STA)

Zuluft: 201.0+- .04 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 45.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 557.72 [kW/m²] zum Zeitpunkt 647.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	458.79	13.122	34.9639	2.3237	.01002	1.886	565: 218. bis 783.
180 s	161.37	5.613	28.7518	1.7494	.01076	4.410	180: 48. bis 228.
300 s	230.85	8.830	26.1453	1.6477	.01098	2.803	300: 48. bis 348.
ab Entzündung	290.23	8.272	35.0875	2.3439	.01104	2.992	1130: 48. bis 1178.
insgesamt	279.20	7.878	35.4403	2.3669	.01137	3.142	1175: 3. bis 1178.
0%-Krit. *)	291.52	8.310	35.0822	2.3436	.01103	2.978	1125: 48. bis 1173.
5%-Krit. *)	376.06	10.837	34.7020	2.3076	.01093	2.284	870: 53. bis 923.
10%-Krit. *)	381.78	11.038	34.5881	2.3001	.01091	2.242	855: 63. bis 918.
25%-Krit. *)	404.72	11.786	34.3385	2.2872	.01104	2.100	790: 113. bis 903.
50%-Krit. *)	456.98	12.654	36.1123	2.4071	.01066	1.956	615: 248. bis 863.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 557.72 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.19 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 200 l min⁻¹ (20 °C), Index 15 (Versuch 98072201)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

PE-Granulat Lupolen 5021 D von BASF für BMFT / DLR (Index: 019, Versuch: 98072303.STA)

Zuluft: 400.1+- .04 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 17.0 [mm], Masse: 100.00 [g]

Zündzeitpunkt: 35.8 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 573.12 [kW/m²] zum Zeitpunkt 632.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungs- rate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	471.22	13.214	35.6601	2.7055	.02268	3.728	505: 263. bis 768.
180 s	128.49	2.914	44.0918	2.6267	.00635	16.903	180: 38. bis 218.
300 s	201.72	5.449	37.0170	2.5116	.01715	9.040	300: 38. bis 338.
ab Entzündung	310.09	8.509	36.4407	2.7855	.02182	5.789	990: 38. bis 1028.
insgesamt	299.51	8.474	35.3451	2.7016	.02116	5.813	1025: 3. bis 1028.
0%-Krit. *)	356.92	9.861	36.1968	2.7442	.02167	4.996	860: 38. bis 898.
5%-Krit. *)	362.81	10.113	35.8755	2.7182	.02151	4.871	845: 48. bis 893.
10%-Krit. *)	372.33	10.400	35.8013	2.7140	.02155	4.737	820: 68. bis 888.
25%-Krit. *)	403.03	11.346	35.5227	2.7080	.02204	4.342	735: 143. bis 878.
50%-Krit. *)	458.02	12.833	35.6912	2.7224	.02287	3.839	570: 248. bis 818.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 573.12 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 43.19 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16509 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht E.20 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 400 l min⁻¹ (20 °C), Index 19 (Versuch 98072303)

E.2 Relative Energiefreisetzungsrate PE-Granulat Lupolen 5021 D

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (007, 98071001.STA)

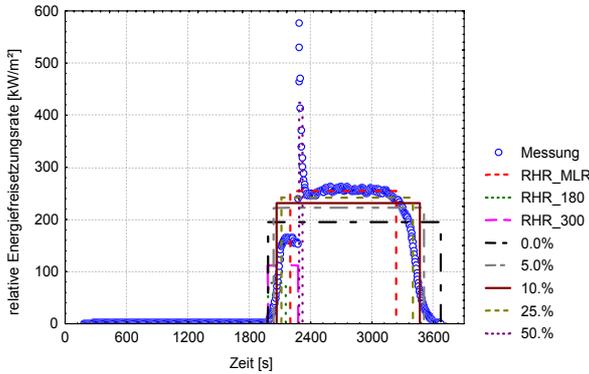


Diagramm E.1 10 - 15 kW m⁻², 100 - 200 l min⁻¹, Index 7 (Versuch 98071001)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (012, 98071702.STA)

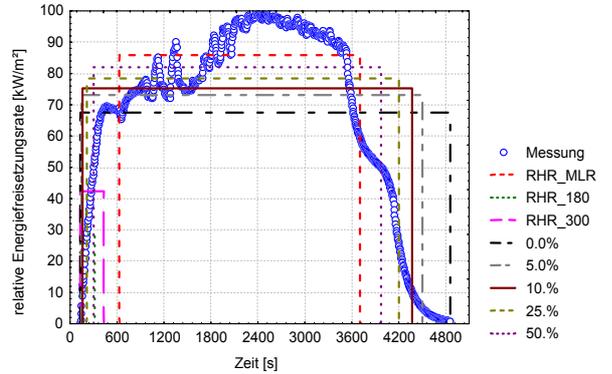


Diagramm E.2 15 kW m⁻², ca. 25 l min⁻¹, Index 12 (Versuch 98071702)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (010, 98071302.STA)

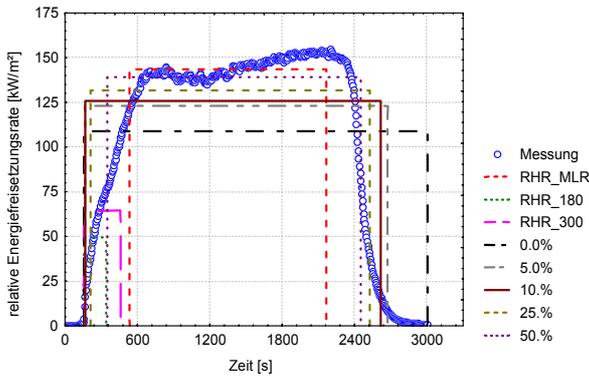


Diagramm E.3 15 kW m⁻², ca. 50 l min⁻¹, Index 10 (Versuch 98071302)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (008, 98071002.STA)

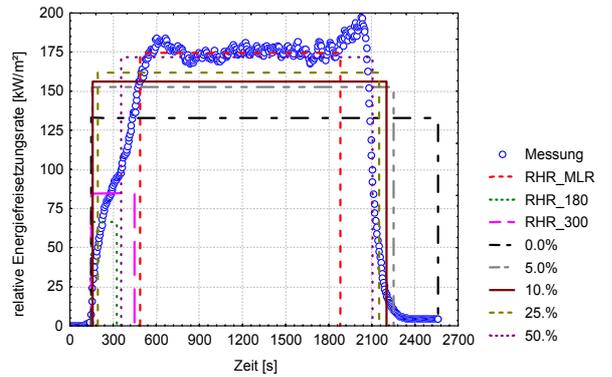


Diagramm E.4 15 kW m⁻², ca. 100 l min⁻¹, Index 8 (Versuch 98071002)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (009, 98071301.STA)

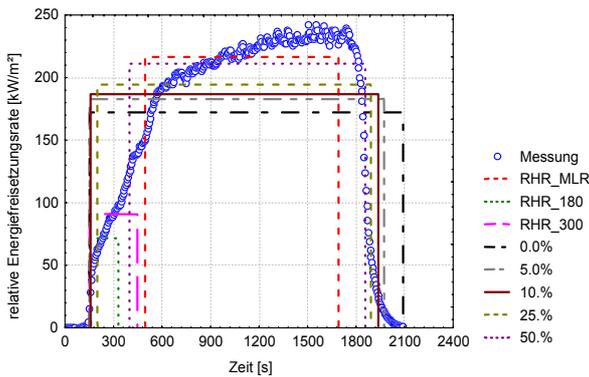


Diagramm E.5 15 kW m⁻², ca. 200 l min⁻¹, Index 9 (Versuch 98071301)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (011, 98071701.STA)

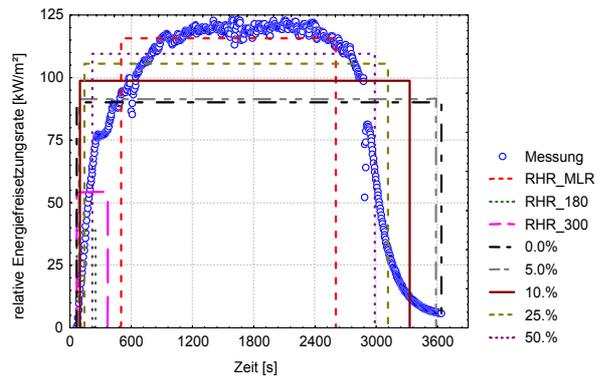


Diagramm E.6 25 kW m⁻², ca. 25 l min⁻¹, Index 11 (Versuch 98071701)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (003, 98070301.STA)

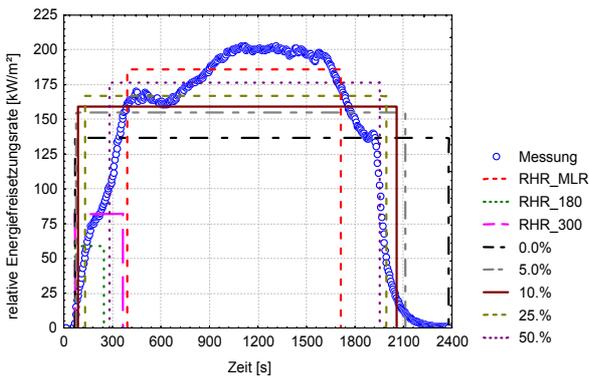


Diagramm E.7 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 3 (Versuch 98070301)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (005, 98070901.STA)

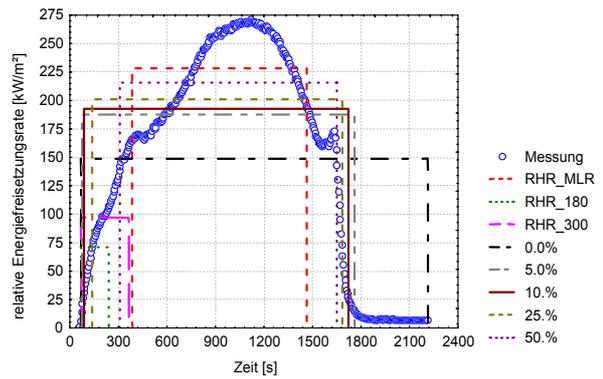


Diagramm E.8 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 5 (Versuch 98070901)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (013, 98072101.STA)

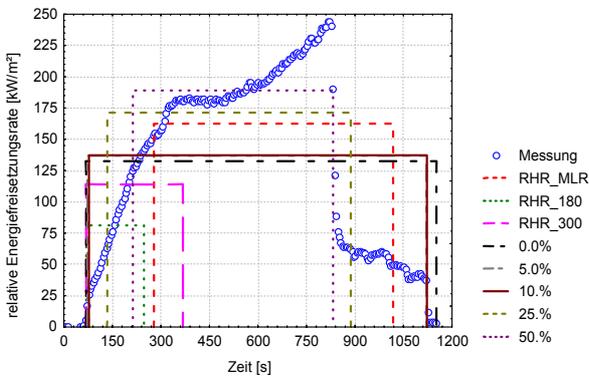


Diagramm E.9 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 13 (Versuch 98072101)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (014, 98072102.STA)

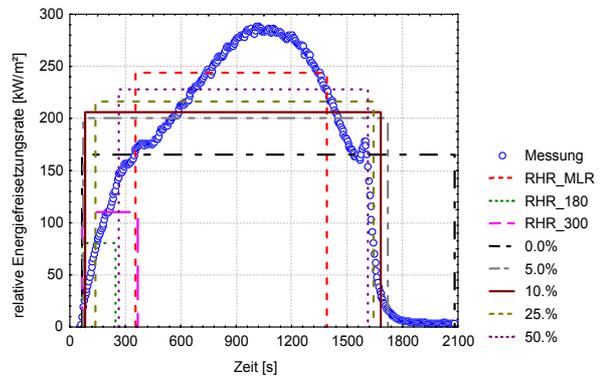


Diagramm E.10 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 14 (Versuch 98072102)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (001, 98070201.STA)

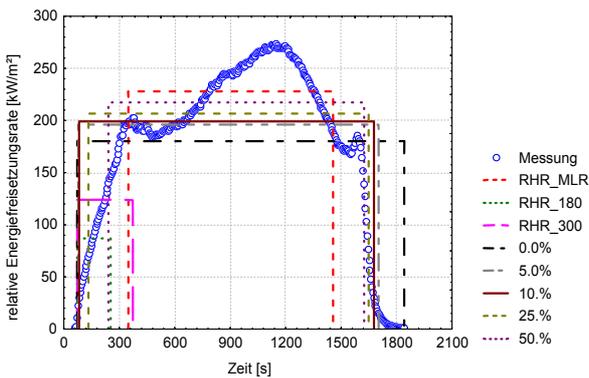


Diagramm E.11 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 1 (Versuch 98070201)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (004, 98070801.STA)

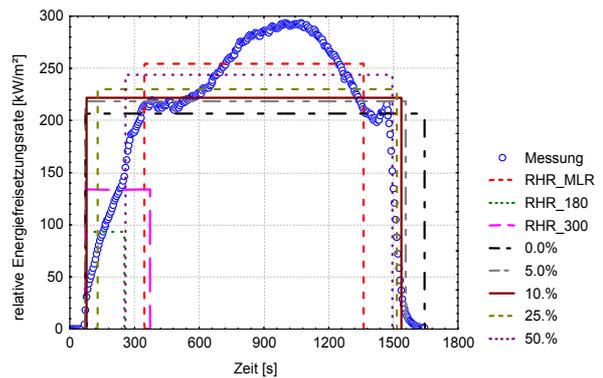


Diagramm E.12 25 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 4 (Versuch 98070801)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (002, 98070202.STA)

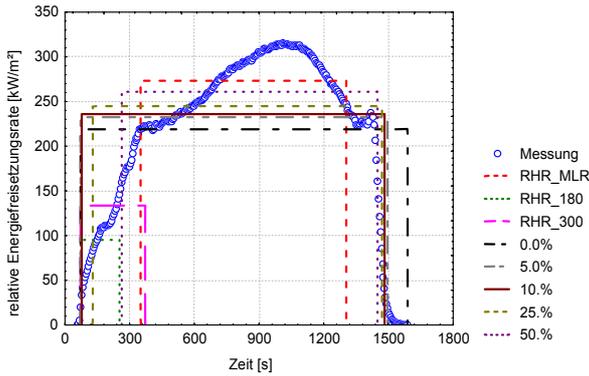


Diagramm E.13 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 2 (Versuch 98070202)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (006, 98070902.STA)

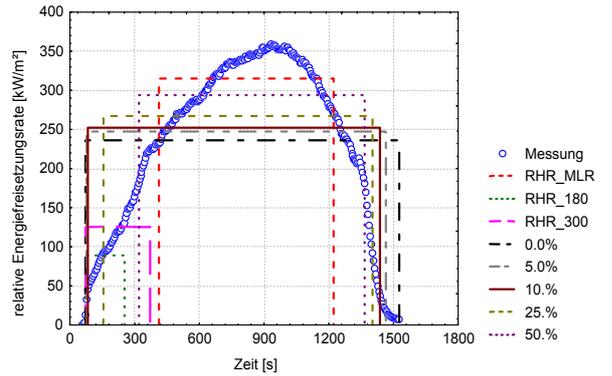


Diagramm E.14 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 6 (Versuch 98070902)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (020, 98072401.STA)

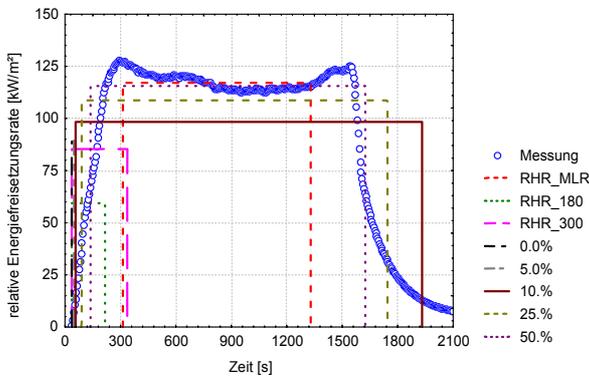


Diagramm E.15 40 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 20 (Versuch 98072401)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (018, 98072302.STA)

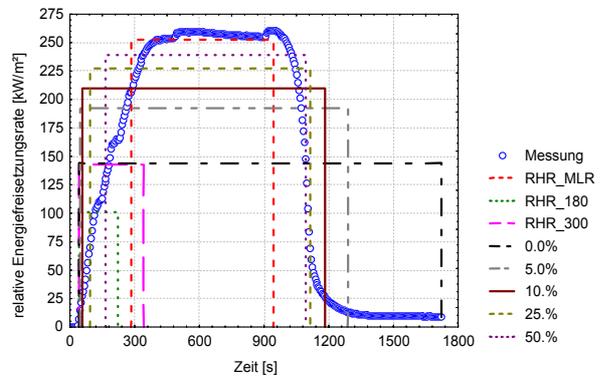


Diagramm E.16 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 18 (Versuch 98072302)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (016, 98072202.STA)

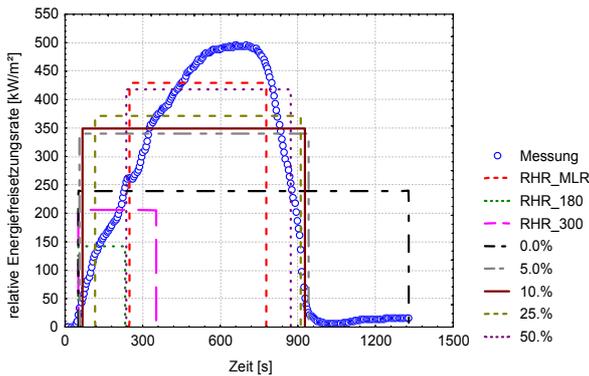


Diagramm E.17 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 16 (Versuch 98072202)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (017, 98072301.STA)

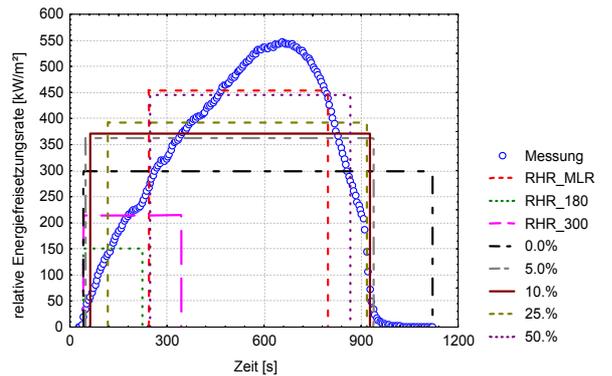


Diagramm E.18 40 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 17 (Versuch 98072301)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (015, 98072201.STA)

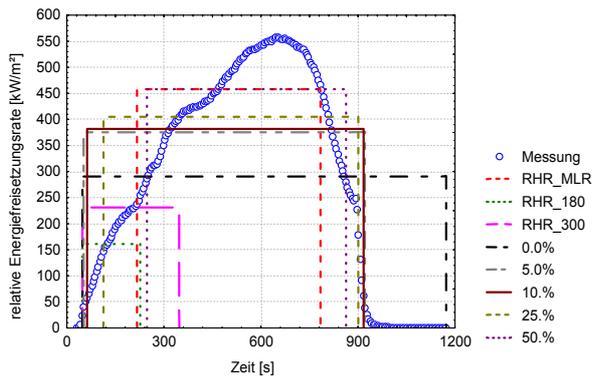


Diagramm E.19 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 15 (Versuch 98072201)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (019, 98072303.STA)

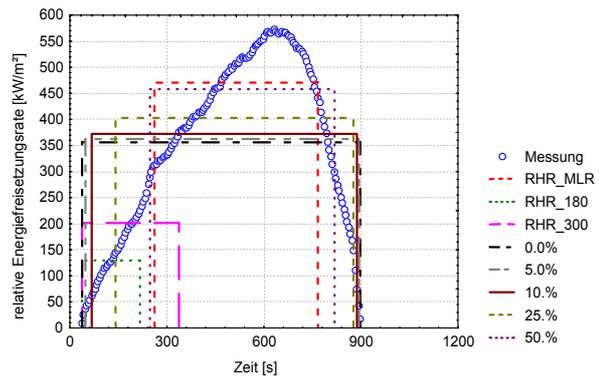


Diagramm E.20 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 19 (Versuch 98072303)

E.3 Relative Abbrandrate PE-Granulat Lupolen 5021 D

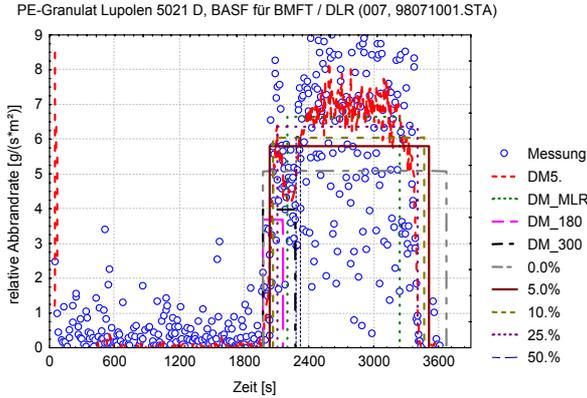


Diagramm E.21 10 - 15 kW m⁻², 100 - 200 l min⁻¹, Index 7 (Versuch 98071001)

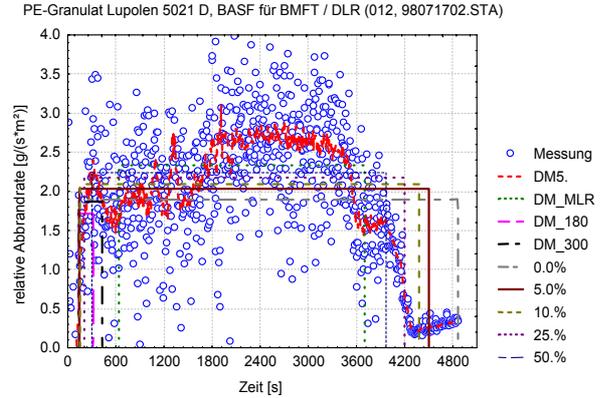


Diagramm E.22 15 kW m⁻², ca. 25 l min⁻¹, Index 12 (Versuch 98071702)

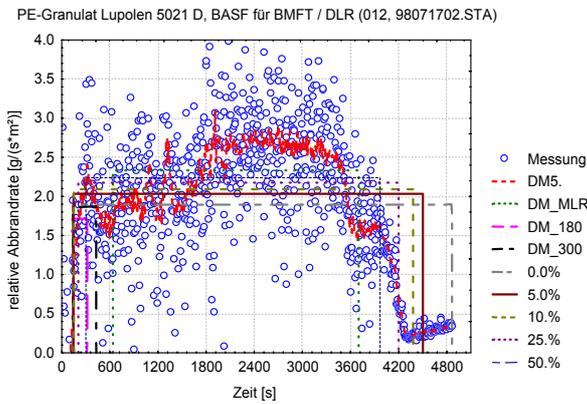


Diagramm E.23 15 kW m⁻², ca. 50 l min⁻¹, Index 10 (Versuch 98071302)

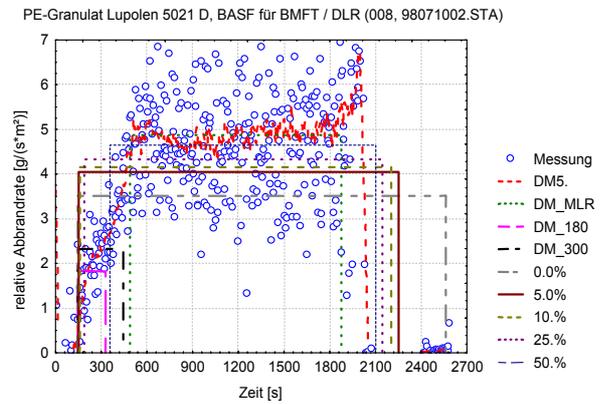


Diagramm E.24 15 kW m⁻², ca. 100 l min⁻¹, Index 8 (Versuch 98071002)

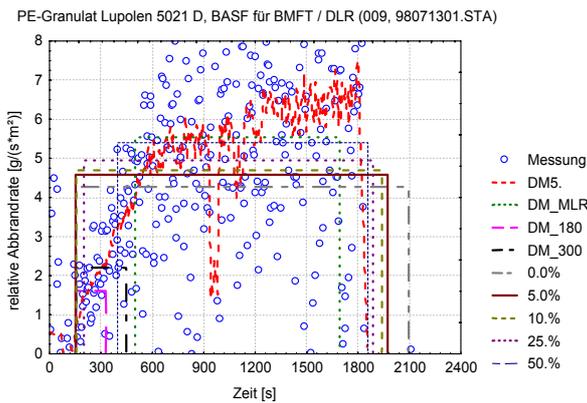


Diagramm E.25 15 kW m⁻², ca. 200 l min⁻¹, Index 9 (Versuch 98071301)

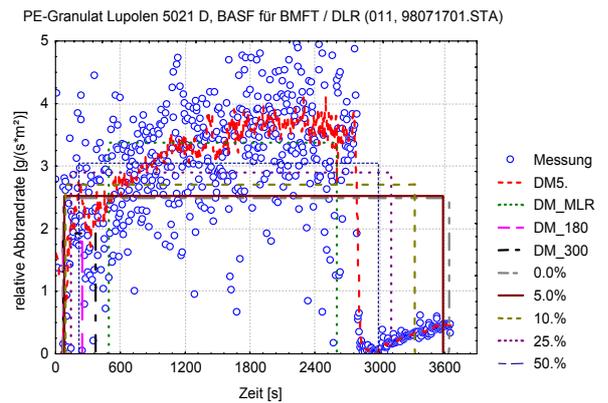


Diagramm E.26 25 kW m⁻², ca. 25 l min⁻¹, Index 11 (Versuch 98071701)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

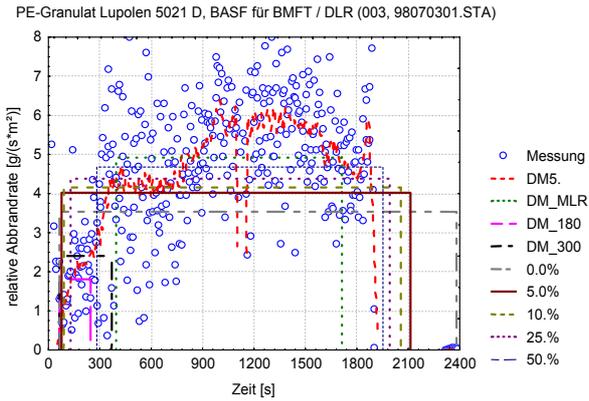


Diagramm E.27 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 3 (Versuch 98070301)

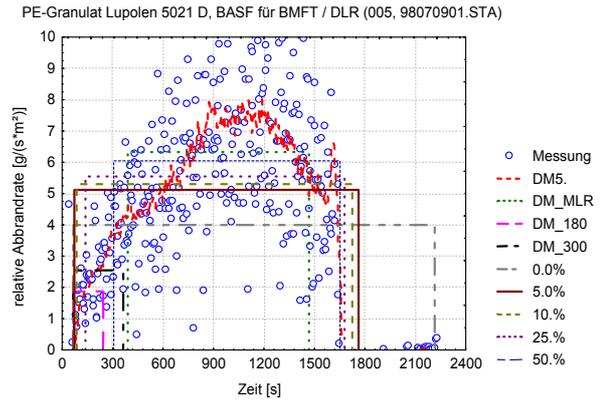


Diagramm E.28 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 5 (Versuch 98070901)

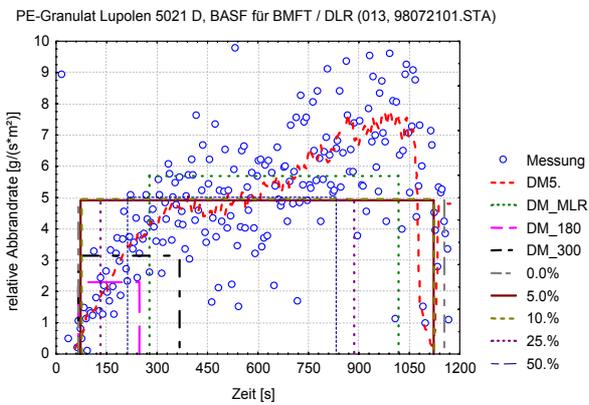


Diagramm E.29 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 13 (Versuch 98072101)

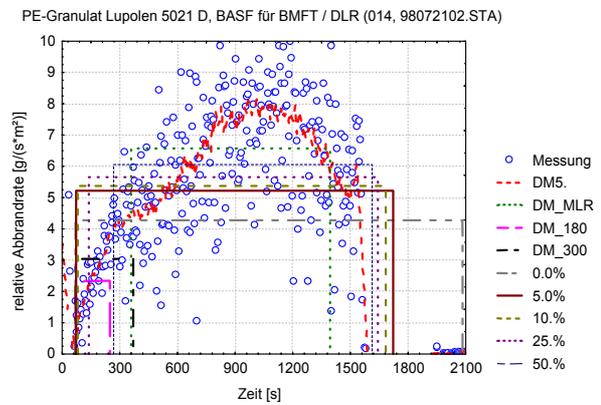


Diagramm E.30 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 14 (Versuch 98072102)

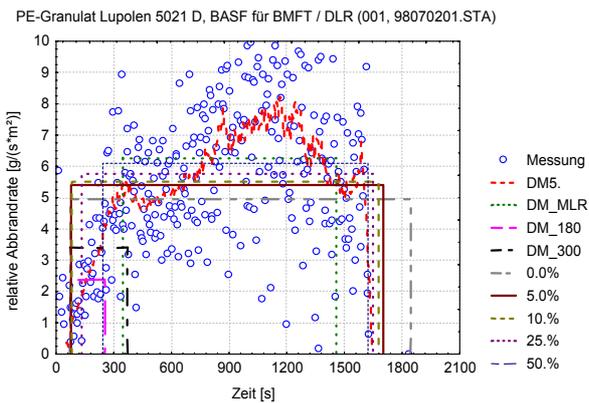


Diagramm E.31 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 1 (Versuch 98070201)

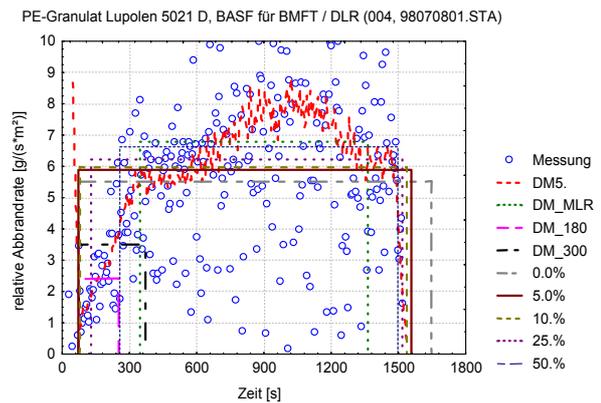


Diagramm E.32 25 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 4 (Versuch 98070801)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

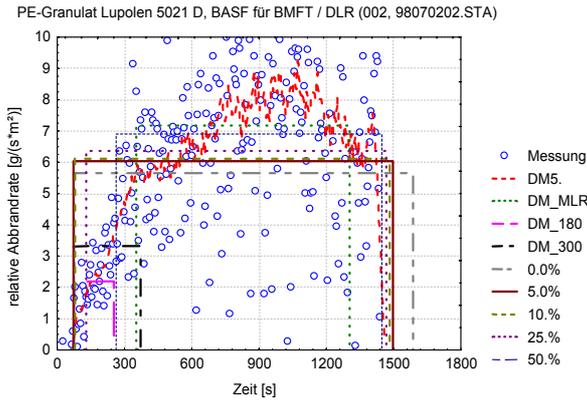


Diagramm E.33 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 2 (Versuch 98070202)

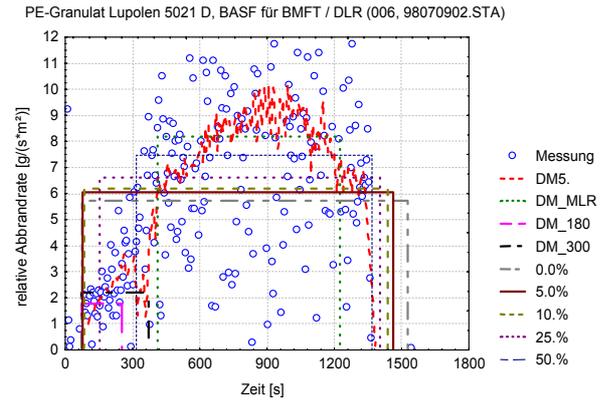


Diagramm E.34 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 6 (Versuch 98070902)

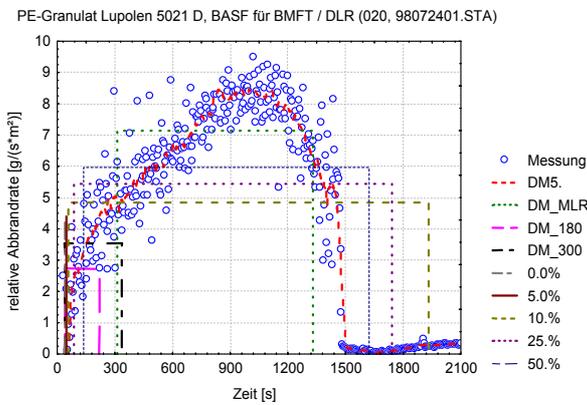


Diagramm E.35 40 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 20 (Versuch 98072401)

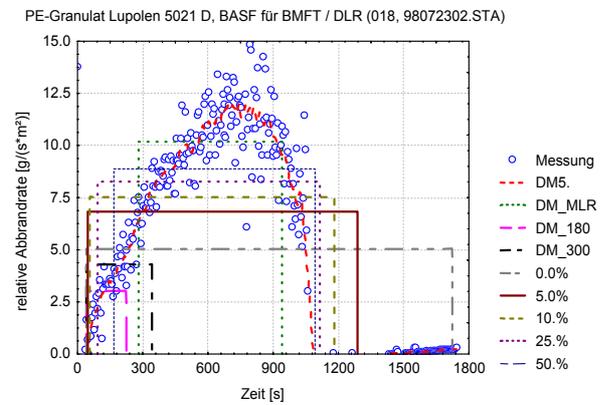


Diagramm E.36 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 18 (Versuch 98072302)

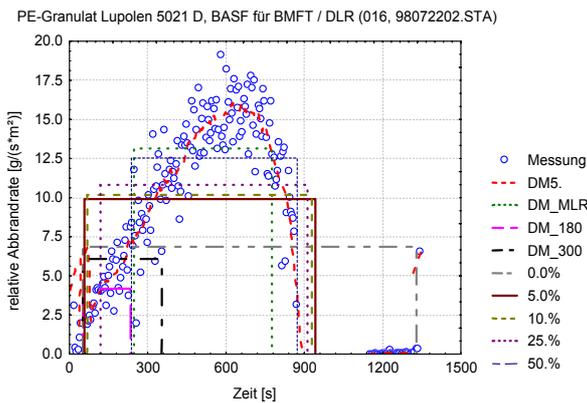


Diagramm E.37 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 16 (Versuch 98072202)

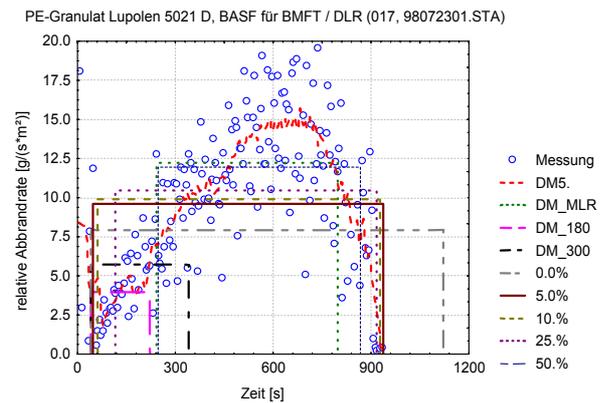


Diagramm E.38 40 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 17 (Versuch 98072301)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

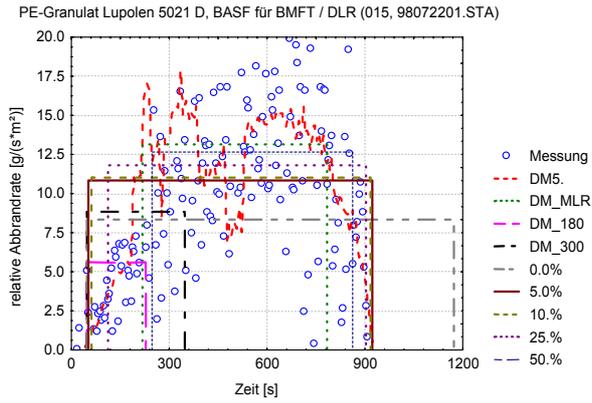


Diagramm E.39 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 15 (Versuch 98072201)

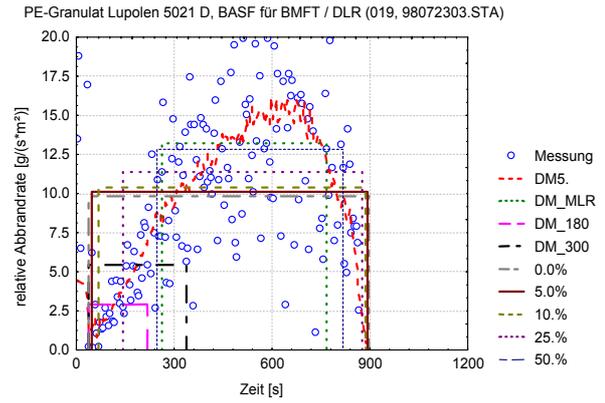


Diagramm E.40 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 19 (Versuch 98072303)

E.4 Effektive Verbrennungswärme PE-Granulat Lupolen 5021 D

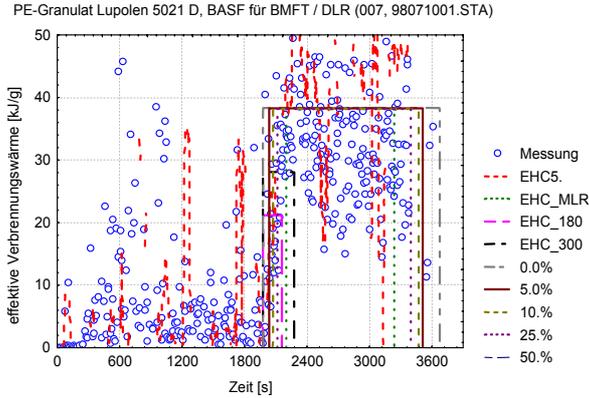


Diagramm E.41 $10 - 15 \text{ kW m}^{-2}$, $100 - 200 \text{ l min}^{-1}$, Index 7 (Versuch 98071001)

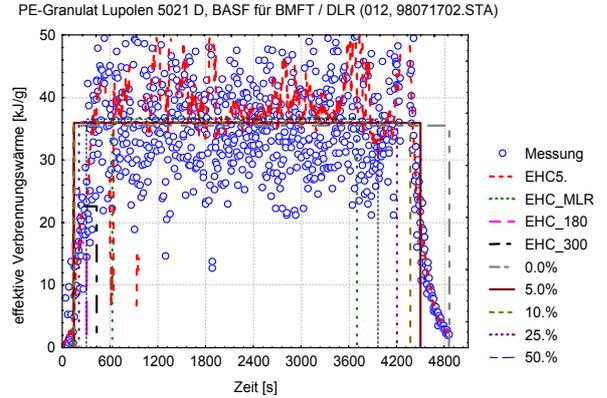


Diagramm E.42 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 12 (Versuch 98071702)

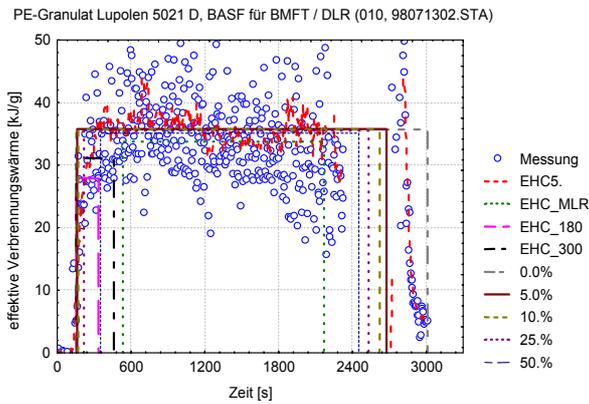


Diagramm E.43 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 10 (Versuch 98071302)

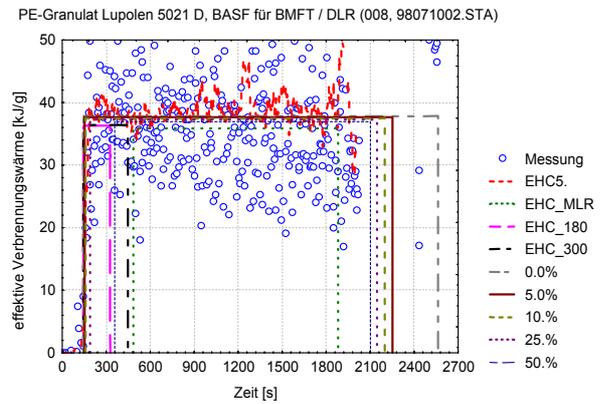


Diagramm E.44 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 8 (Versuch 98071002)

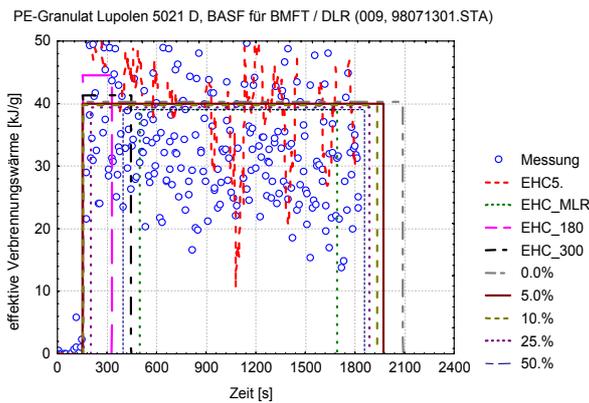


Diagramm E.45 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 9 (Versuch 98071301)

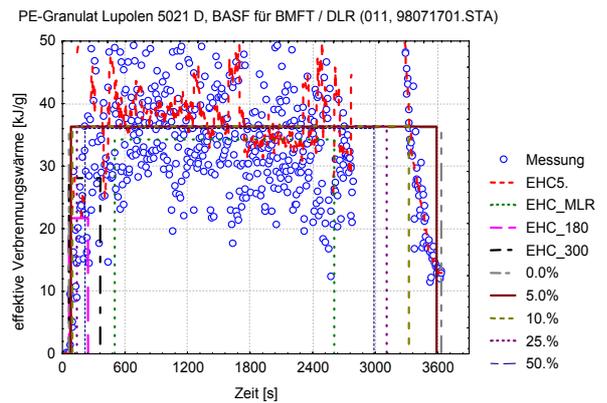


Diagramm E.46 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 11 (Versuch 98071701)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

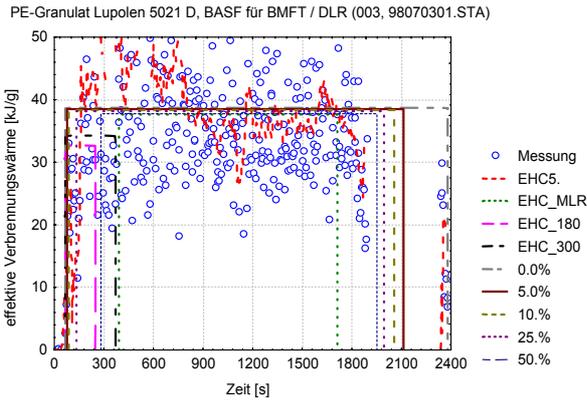


Diagramm E.47 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 3 (Versuch 98070301)

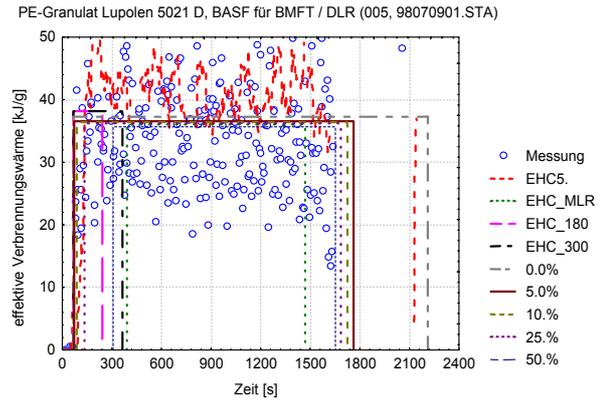


Diagramm E.48 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 5 (Versuch 98070901)

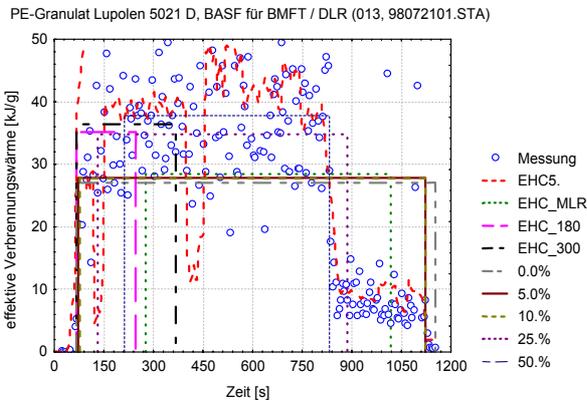


Diagramm E.49 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 13 (Versuch 98072101)

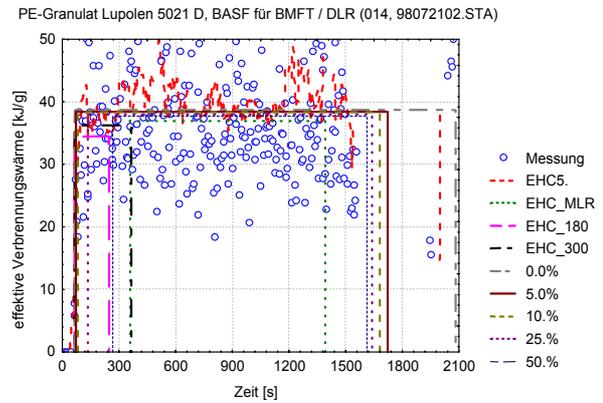


Diagramm E.50 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 14 (Versuch 98072102)

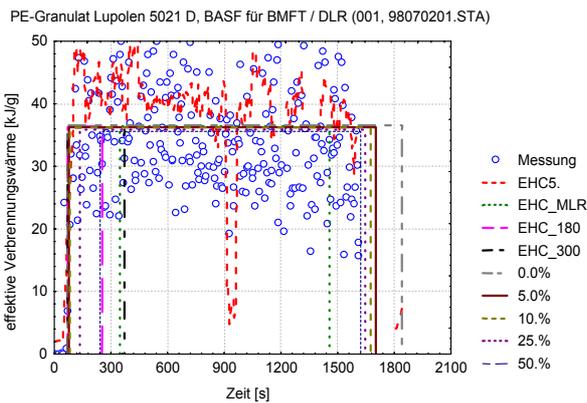


Diagramm E.51 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 1 (Versuch 98070201)

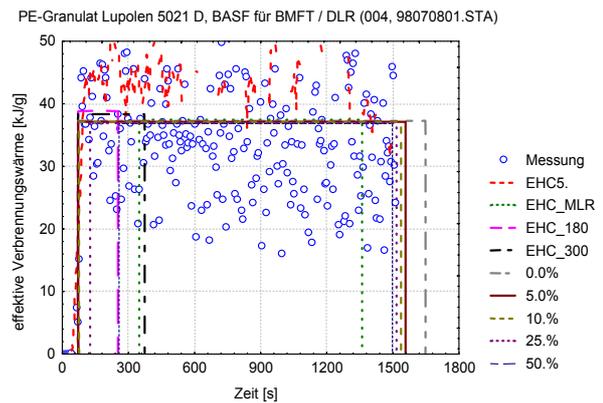


Diagramm E.52 25 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 4 (Versuch 98070801)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (002, 98070202.STA)

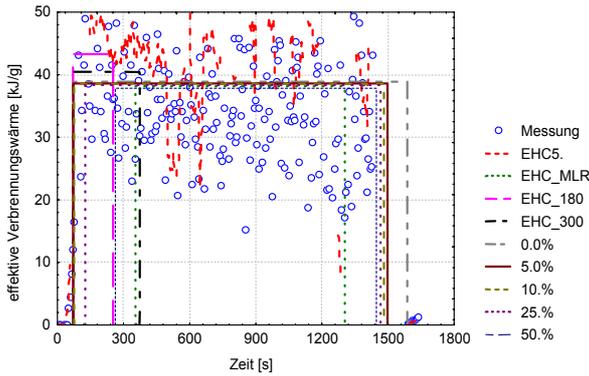


Diagramm E.53 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 2 (Versuch 98070202)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (006, 98070902.STA)

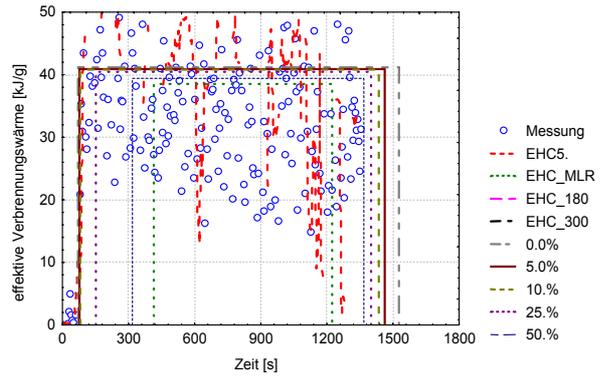


Diagramm E.54 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 6 (Versuch 98070902)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (020, 98072401.STA)

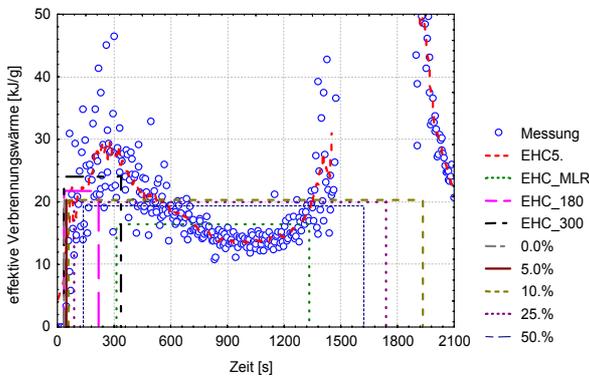


Diagramm E.55 40 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 20 (Versuch 98072401)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (018, 98072302.STA)

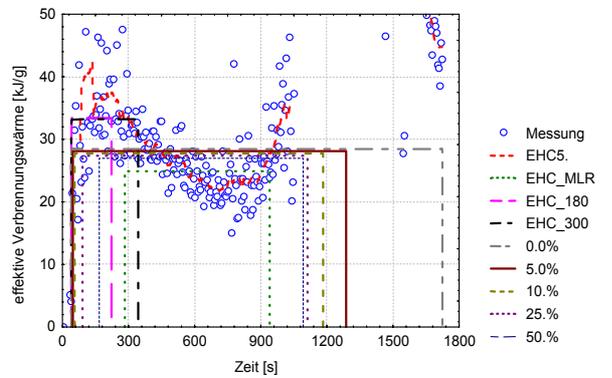


Diagramm E.56 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 18 (Versuch 98072302)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (016, 98072202.STA)

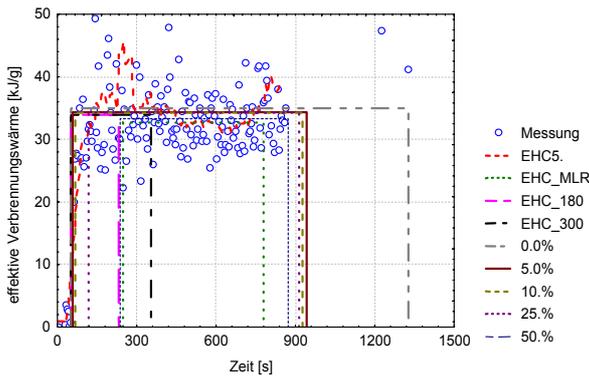


Diagramm E.57 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 16 (Versuch 98072202)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (017, 98072301.STA)

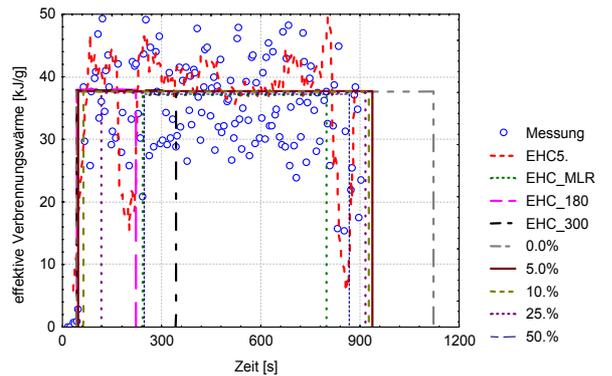


Diagramm E.58 40 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 17 (Versuch 98072301)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (015, 98072201.STA)

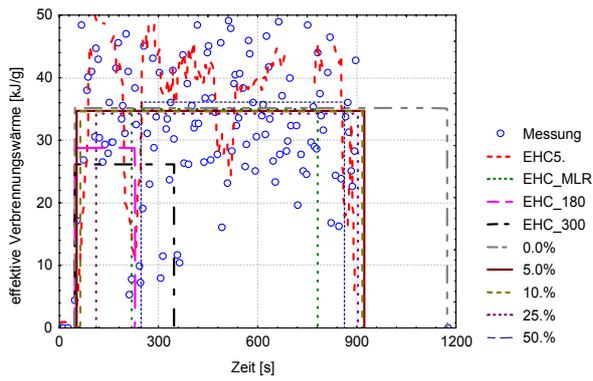


Diagramm E.59 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 15 (Versuch 98072201)

PE-Granulat Lupolen 5021 D, BASF für BMFT / DLR (019, 98072303.STA)

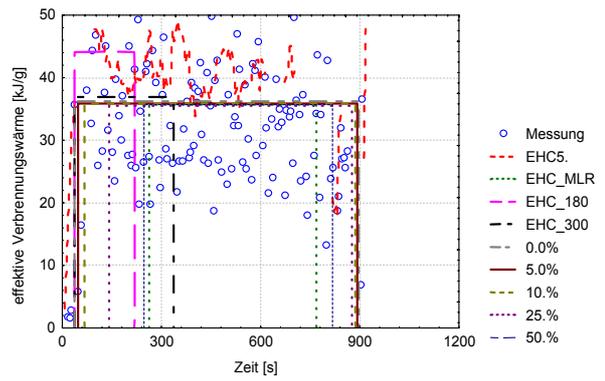


Diagramm E.60 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 19 (Versuch 98072303)

E.5 Kohlendioxidausbeute PE-Granulat Lupolen 5021 D

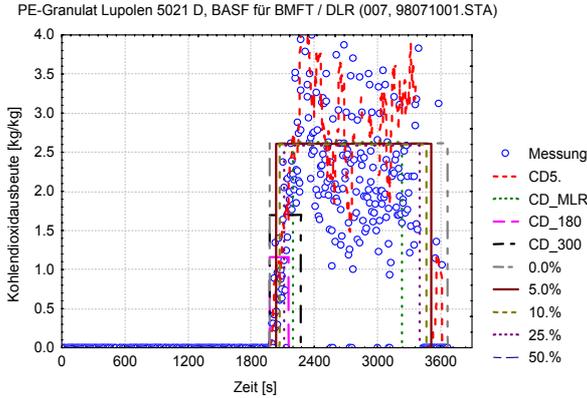


Diagramm E.61 $10 - 15 \text{ kW m}^{-2}$, $100 - 200 \text{ l min}^{-1}$, Index 7 (Versuch 98071001)

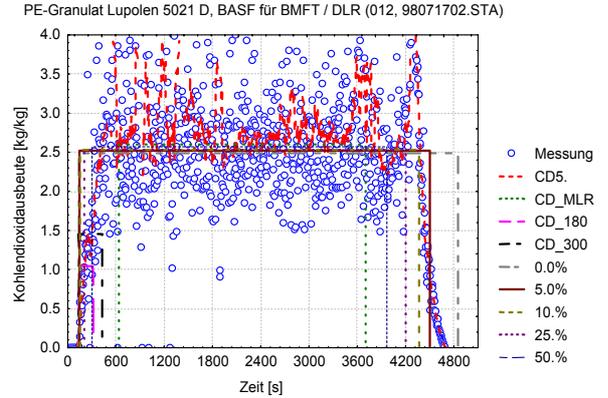


Diagramm E.62 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 12 (Versuch 98071702)

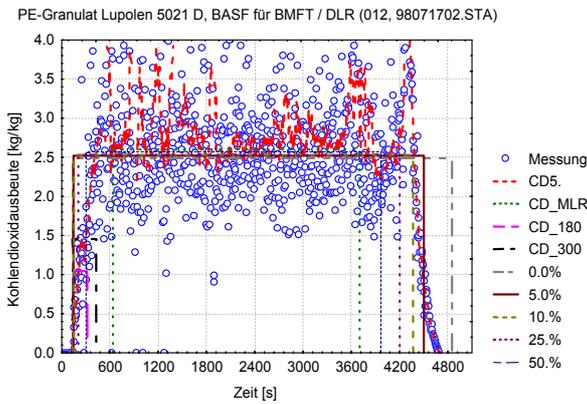


Diagramm E.63 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 10 (Versuch 98071302)

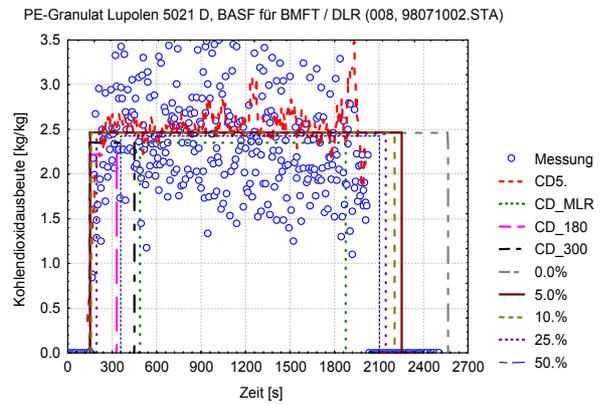


Diagramm E.64 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 8 (Versuch 98071002)

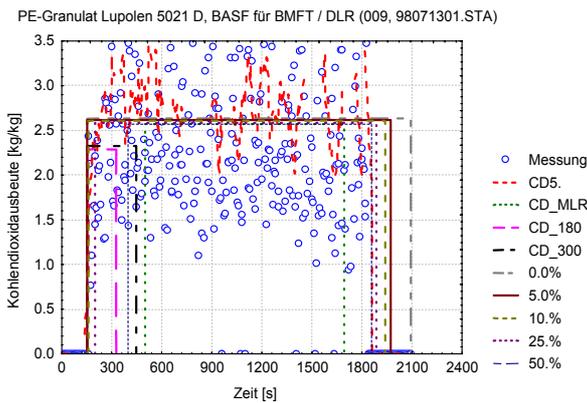


Diagramm E.65 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 9 (Versuch 98071301)

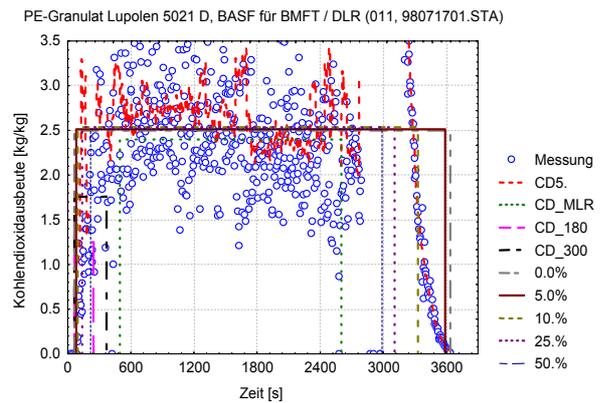


Diagramm E.66 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 11 (Versuch 98071701)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

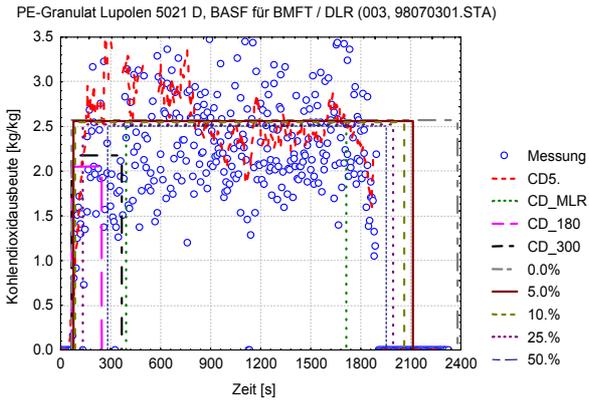


Diagramm E.67 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 3 (Versuch 98070301)

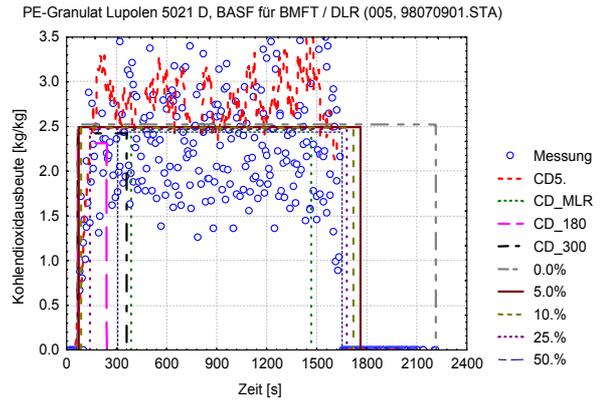


Diagramm E.68 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 5 (Versuch 98070901)

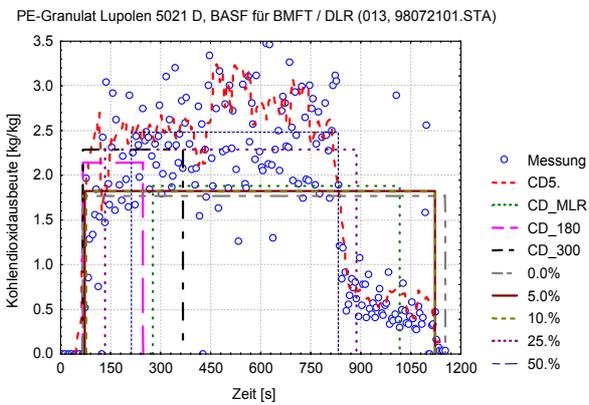


Diagramm E.69 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 13 (Versuch 98072101)

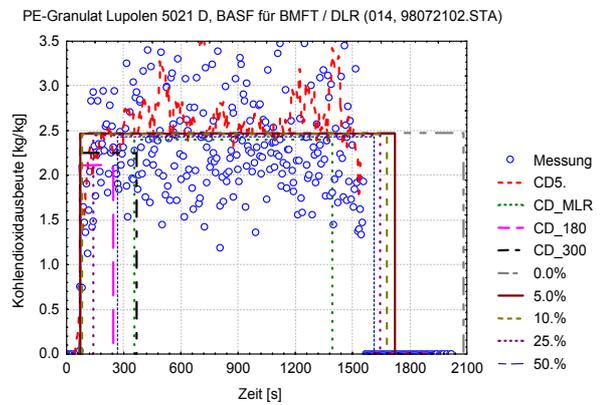


Diagramm E.70 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 14 (Versuch 98072102)

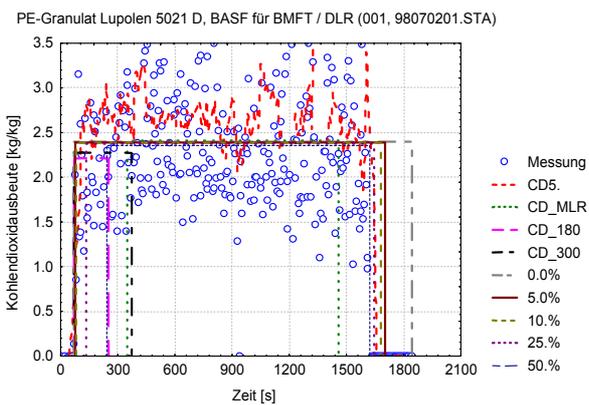


Diagramm E.71 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 1 (Versuch 98070201)

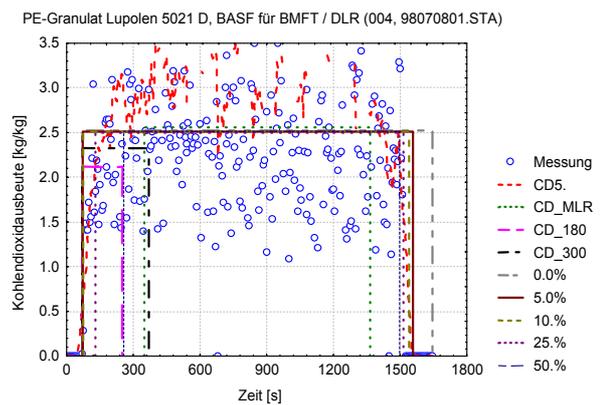


Diagramm E.72 25 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 4 (Versuch 98070801)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

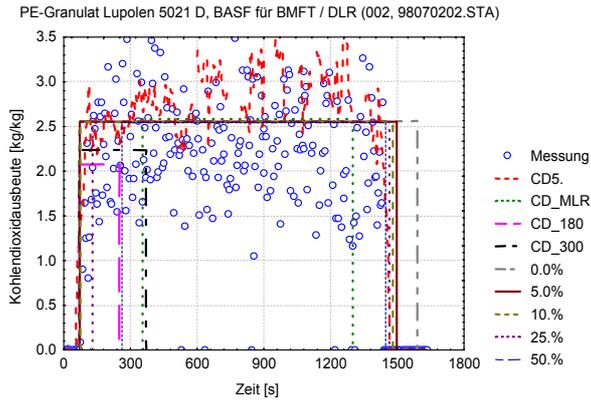


Diagramm E.73 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 2 (Versuch 98070202)

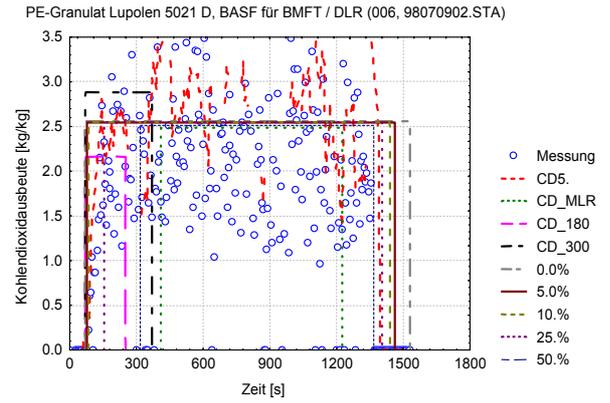


Diagramm E.74 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 6 (Versuch 98070902)

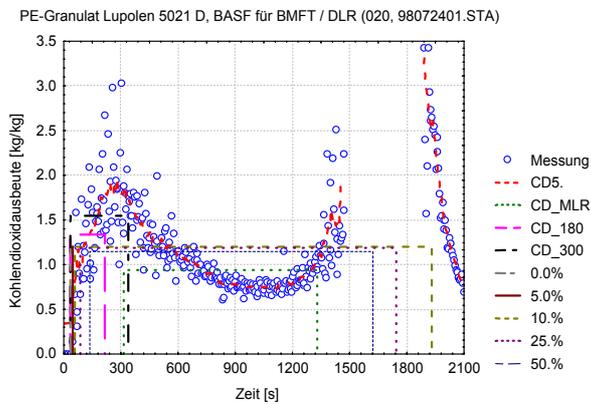


Diagramm E.75 40 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 20 (Versuch 98072401)

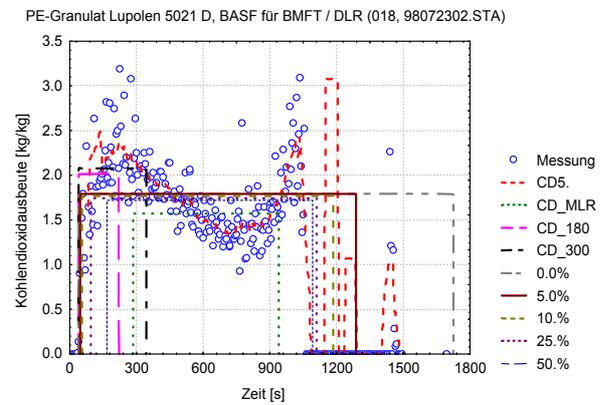


Diagramm E.76 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 18 (Versuch 98072302)

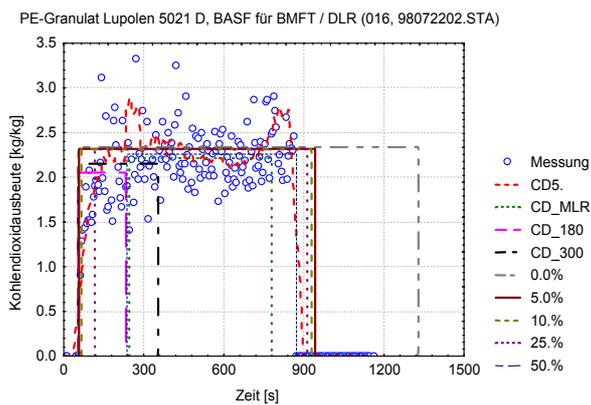


Diagramm E.77 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 16 (Versuch 98072202)

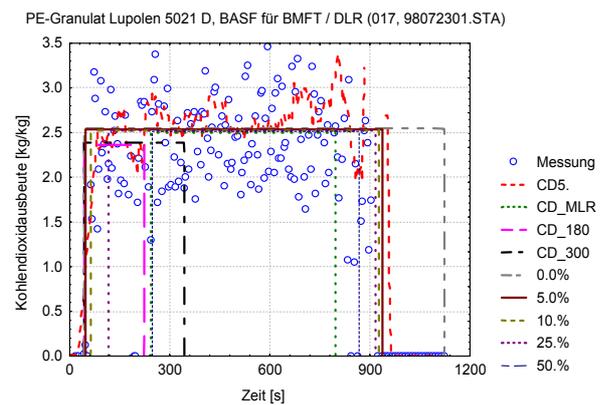


Diagramm E.78 40 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 17 (Versuch 98072301)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

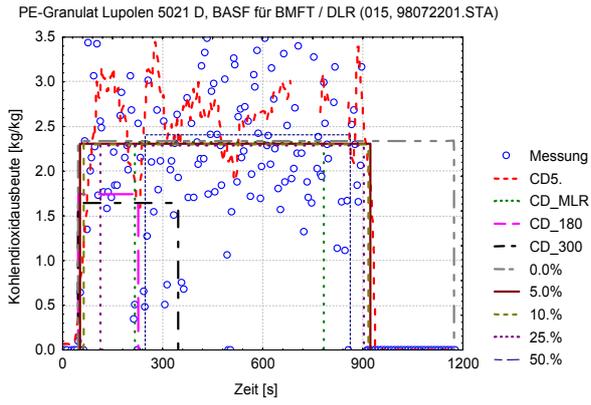


Diagramm E.79 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} ,
Index 15 (Versuch 98072201)

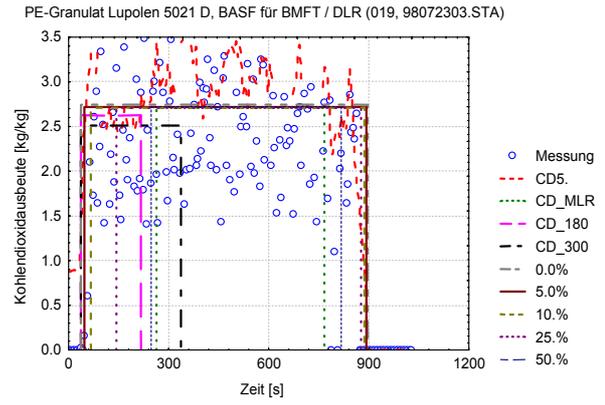


Diagramm E.80 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} ,
Index 19 (Versuch 98072303)

E.6 Kohlenmonoxidausbeute PE-Granulat Lupolen 5021 D

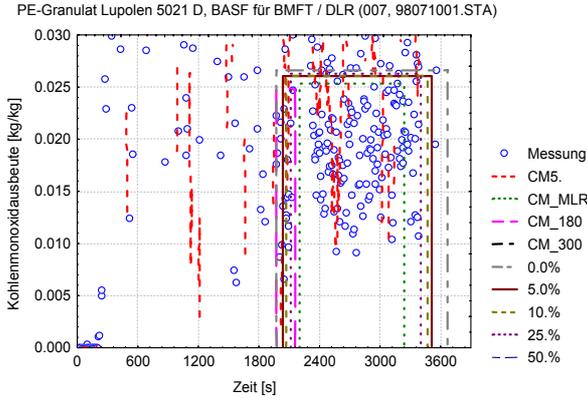


Diagramm E.81 $10 - 15 \text{ kW m}^{-2}$, $100 - 200 \text{ l min}^{-1}$, Index 7 (Versuch 98071001)

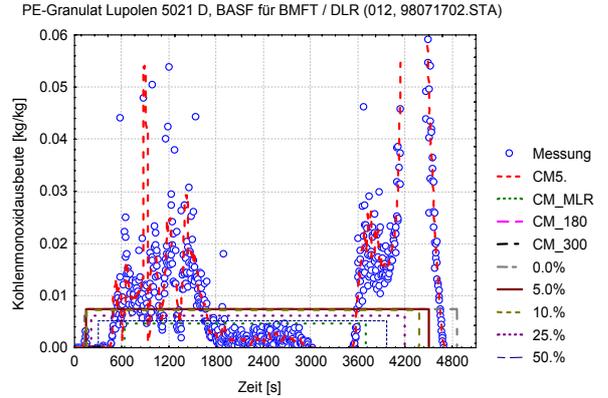


Diagramm E.82 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 12 (Versuch 98071702)

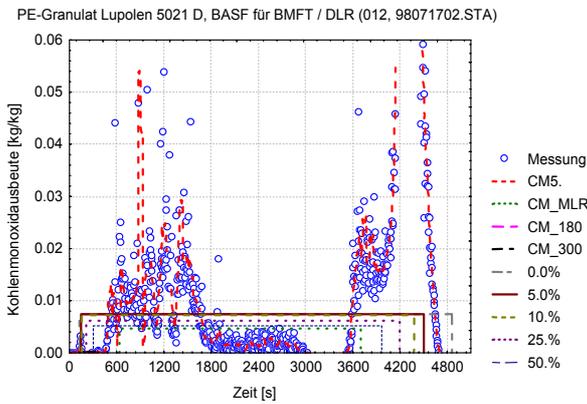


Diagramm E.83 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 10 (Versuch 98071302)

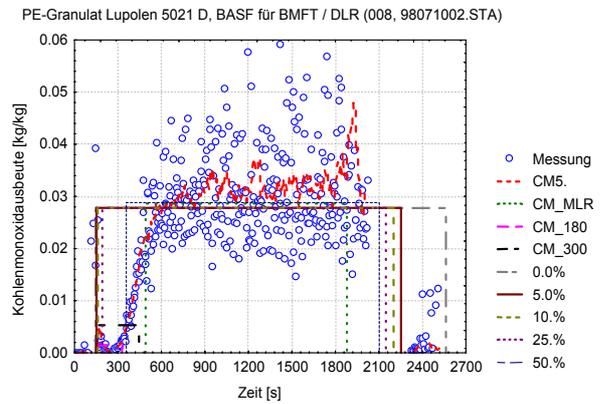


Diagramm E.84 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 8 (Versuch 98071002)

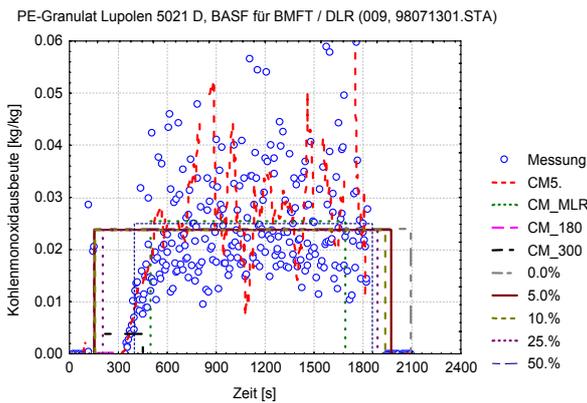


Diagramm E.85 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 9 (Versuch 98071301)

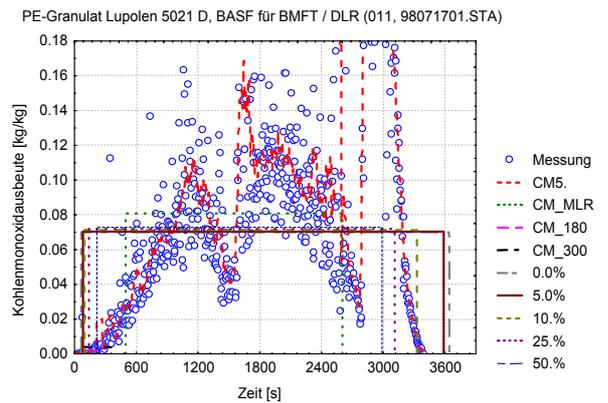


Diagramm E.86 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 11 (Versuch 98071701)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

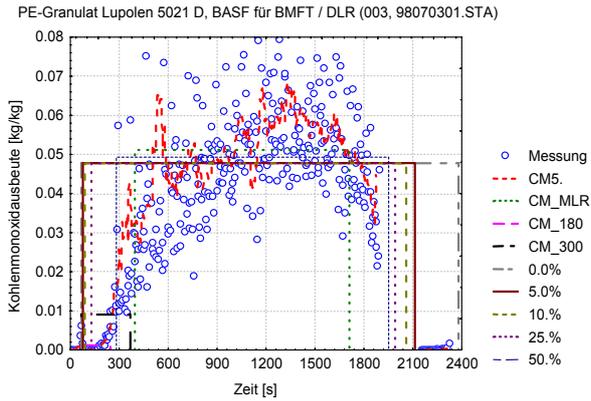


Diagramm E.87 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 3 (Versuch 98070301)

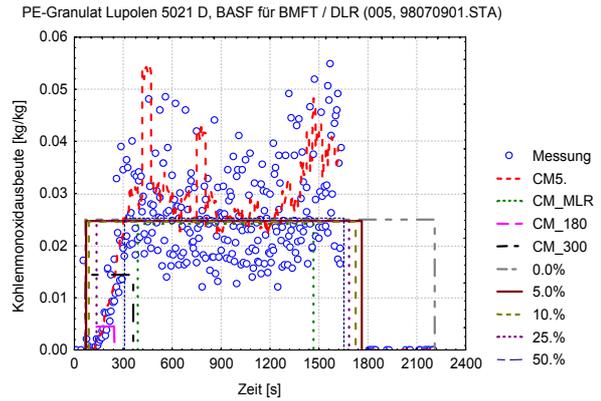


Diagramm E.88 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 5 (Versuch 98070901)

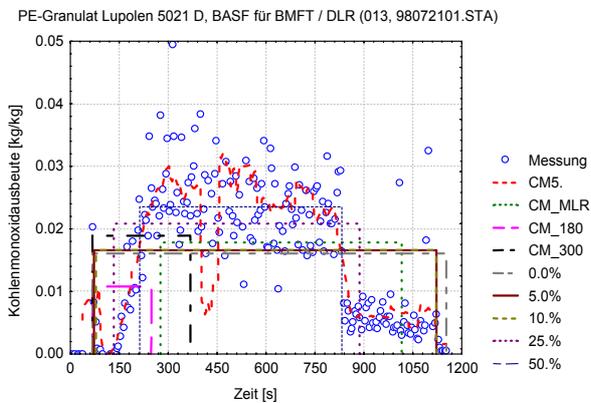


Diagramm E.89 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 13 (Versuch 98072101)

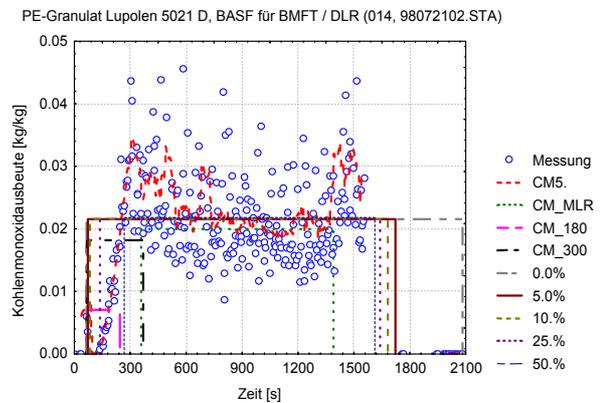


Diagramm E.90 25 kW m^{-2} , ca. 80 l min^{-1} , Index 14 (Versuch 98072102)

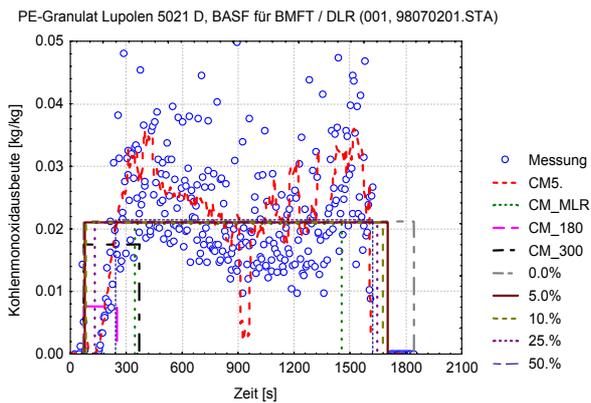


Diagramm E.91 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 1 (Versuch 98070201)

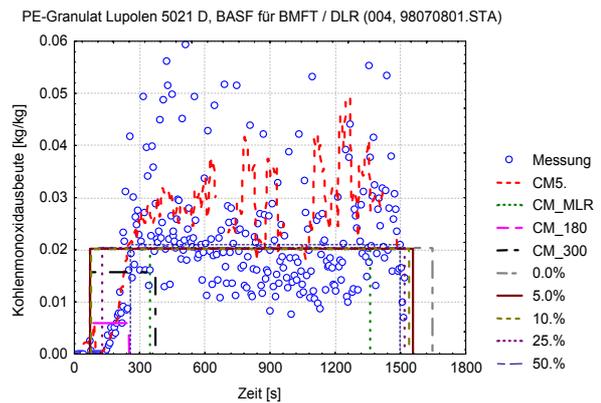


Diagramm E.92 25 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 4 (Versuch 98070801)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

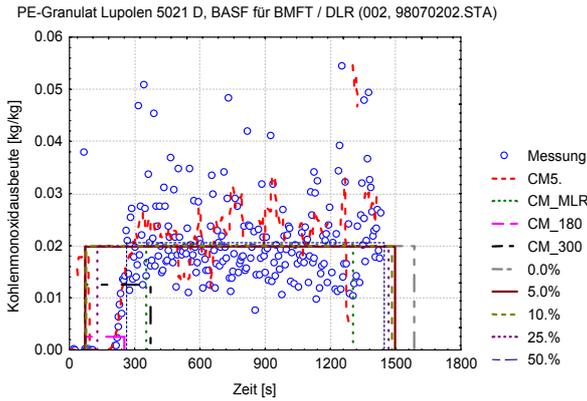


Diagramm E.93 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 2 (Versuch 98070202)

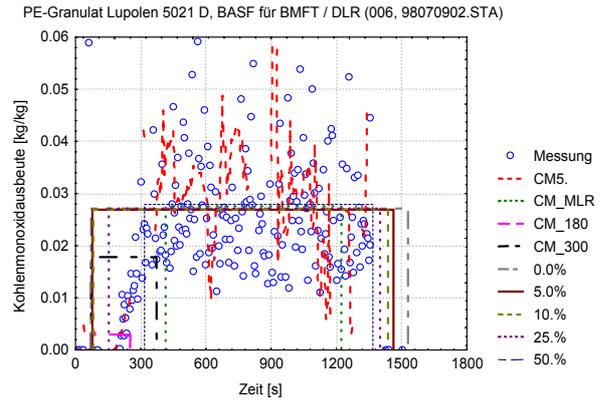


Diagramm E.94 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 6 (Versuch 98070902)

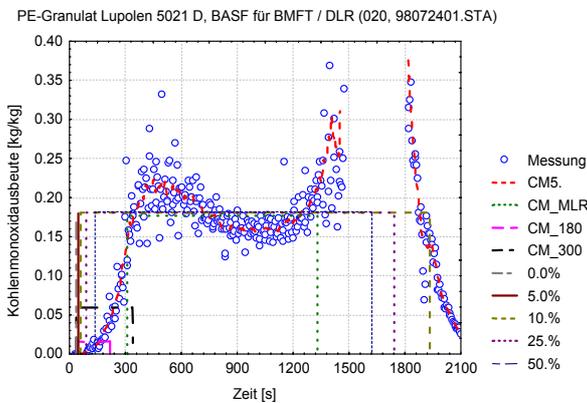


Diagramm E.95 40 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 20 (Versuch 98072401)

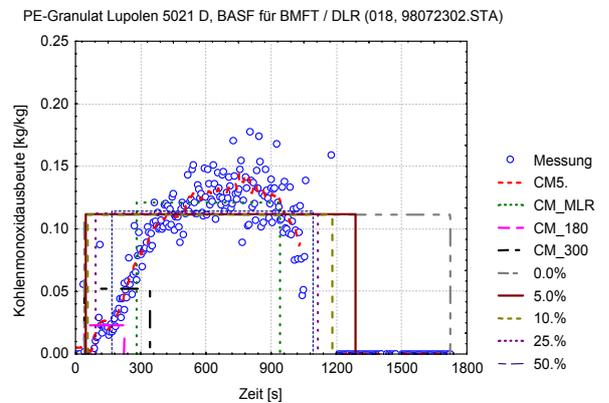


Diagramm E.96 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 18 (Versuch 98072302)

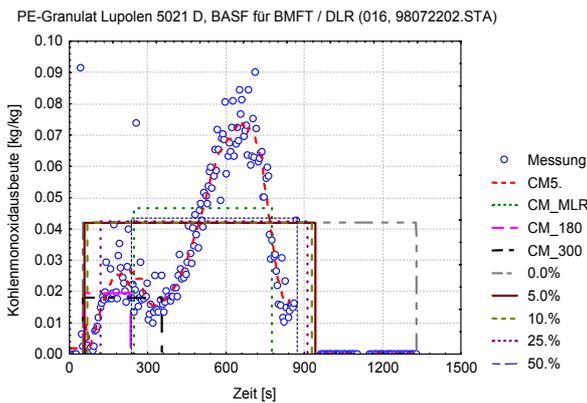


Diagramm E.97 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 16 (Versuch 98072202)

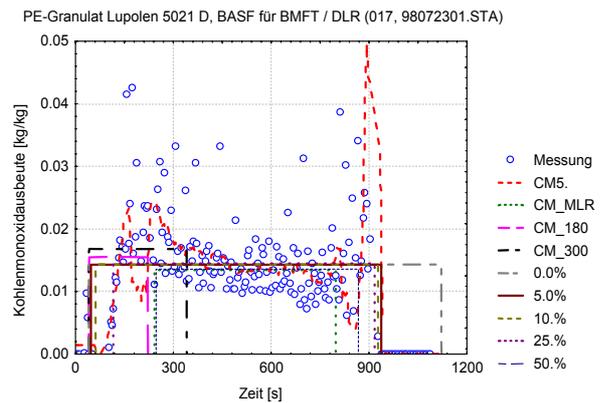


Diagramm E.98 40 kW m^{-2} , ca. 150 l min^{-1} , Index 17 (Versuch 98072301)

E Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit PE-Granulat Lupolen 5021 D

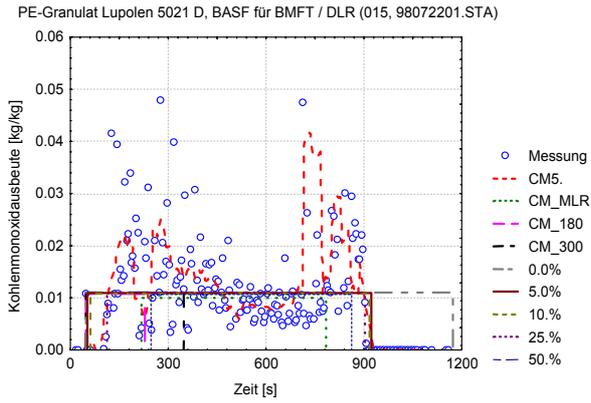


Diagramm E.99 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} ,
Index 15 (Versuch 98072201)

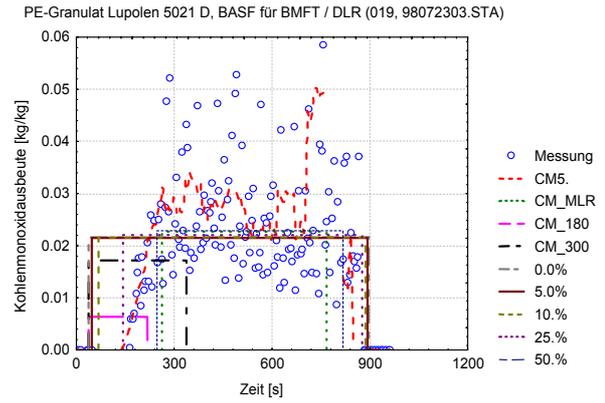


Diagramm E.100 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} ,
Index 19 (Versuch 98072303)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

F.1 Übersicht Glykol Glysantin G 48

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 033, Versuch: 98100502.STA)

Zuluft: 25.6+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.60 [g]

Zündzeitpunkt: 165.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 109.98 [kW/m²] zum Zeitpunkt 1047.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	95.53	8.258	11.5680	.9625	.03077	1.013	920: 253. bis 1173.
180 s	67.27	9.630	6.9855	.5360	.00253	.868	180: 168. bis 348.
300 s	73.25	8.794	8.3299	.6618	.00402	.951	300: 168. bis 468.
ab Entzündung	59.63	4.998	11.9301	.9964	.02894	1.673	1910: 168. bis 2078.
insgesamt	54.90	4.868	11.2770	.9418	.02735	1.718	2075: 3. bis 2078.
0%-Krit. *)	59.63	4.998	11.9301	.9964	.02894	1.673	1910: 168. bis 2078.
5%-Krit. *)	70.13	5.853	11.9831	1.0070	.02934	1.429	1605: 173. bis 1778.
10%-Krit. *)	80.02	6.684	11.9712	1.0076	.02955	1.251	1385: 178. bis 1563.
25%-Krit. *)	89.07	7.551	11.7968	.9873	.02938	1.108	1210: 183. bis 1393.
50%-Krit. *)	94.13	8.008	11.7548	.9793	.02986	1.044	1095: 208. bis 1303.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 109.98 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m²]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.1 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 25 l min⁻¹ (20 °C), Index 33 (Versuch 98100502)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 032, Versuch: 98100501.STA)

Zuluft: 50.4+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.70 [g]

Zündzeitpunkt: 165.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 187.22 [kW/m²] zum Zeitpunkt 657.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	167.93	12.687	13.2372	1.1187	.00322	1.298	575: 243. bis 818.
180 s	116.95	12.124	9.6462	.7312	.00075	1.358	180: 168. bis 348.
300 s	134.91	12.447	10.8389	.8608	.00101	1.323	300: 168. bis 468.
ab Entzündung	93.41	6.930	13.4800	1.1657	.00336	2.376	1325: 168. bis 1493.
insgesamt	83.09	6.544	12.6978	1.0978	.00317	2.516	1490: 3. bis 1493.
0%-Krit. *)	93.41	6.930	13.4800	1.1657	.00336	2.376	1325: 168. bis 1493.
5%-Krit. *)	135.90	10.025	13.5562	1.1607	.00335	1.642	905: 173. bis 1078.
10%-Krit. *)	143.02	10.608	13.4832	1.1501	.00328	1.552	855: 173. bis 1028.
25%-Krit. *)	153.58	11.451	13.4119	1.1373	.00318	1.438	780: 183. bis 963.
50%-Krit. *)	162.68	12.146	13.3934	1.1323	.00311	1.355	700: 208. bis 908.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 187.22 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m²]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.2 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 50 l min⁻¹ (20 °C), Index 32 (Versuch 98100501)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 027, Versuch: 98091604.STA)

Zuluft: 100.9+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.80 [g]

Zündzeitpunkt: 68.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 214.36 [kW/m²] zum Zeitpunkt 587.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	193.47	14.112	13.7095	1.1240	.00067	2.338	550: 153. bis 703.
180 s	156.88	13.026	12.0439	.9308	.00050	2.533	180: 73. bis 253.
300 s	166.50	13.164	12.6473	1.0081	.00056	2.506	300: 73. bis 373.
ab Entzündung	121.51	8.820	13.7763	1.1332	.00102	3.741	1105: 73. bis 1178.
insgesamt	114.39	8.372	13.6642	1.1237	.00102	3.941	1175: 3. bis 1178.
0%-Krit. *)	121.51	8.820	13.7763	1.1332	.00102	3.741	1105: 73. bis 1178.
5%-Krit. *)	159.15	11.510	13.8266	1.1328	.00095	2.866	840: 73. bis 913.
10%-Krit. *)	167.28	12.130	13.7906	1.1277	.00088	2.720	795: 73. bis 868.
25%-Krit. *)	178.88	13.030	13.7282	1.1188	.00074	2.532	730: 78. bis 808.
50%-Krit. *)	185.83	13.592	13.6719	1.1137	.00068	2.427	680: 93. bis 773.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 214.36 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.3 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 100 l min⁻¹ (20 °C), Index 27 (Versuch 98091604)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 028, Versuch: 98091605.STA)

Zuluft: 200.3+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 15.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.80 [g]

Zündzeitpunkt: 103.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 238.67 [kW/m²] zum Zeitpunkt 602.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	216.89	14.836	14.6193	1.1885	.00040	4.413	520: 193. bis 713.
180 s	170.60	12.802	13.3261	1.0265	.00036	5.114	180: 108. bis 288.
300 s	185.03	13.521	13.6850	1.0820	.00037	4.843	300: 108. bis 408.
ab Entzündung	133.86	9.059	14.7760	1.1978	.00076	7.227	1070: 108. bis 1178.
insgesamt	122.02	8.524	14.3144	1.1606	.00074	7.681	1175: 3. bis 1178.
0%-Krit. *)	133.86	9.059	14.7760	1.1978	.00076	7.227	1070: 108. bis 1178.
5%-Krit. *)	180.36	12.164	14.8283	1.1986	.00068	5.383	790: 108. bis 898.
10%-Krit. *)	190.17	12.855	14.7931	1.1939	.00059	5.093	745: 108. bis 853.
25%-Krit. *)	202.07	13.681	14.7702	1.1892	.00048	4.786	690: 113. bis 803.
50%-Krit. *)	208.61	14.195	14.6957	1.1837	.00043	4.612	650: 123. bis 773.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 238.67 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.4 Strahlungsflußdichte 15 kW m⁻², Zuluft ca. 200 l min⁻¹ (20 °C), Index 28 (Versuch 98091605)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 025, Versuch: 98091602.STA)

Zuluft: 25.8+- .03 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.70 [g]

Zündzeitpunkt: 22.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 128.40 [kW/m²] zum Zeitpunkt 762.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	113.00	11.994	9.4215	.7141	.00350	.704	635: 113. bis 748.
180 s	81.40	11.104	7.3303	.5654	.00208	.760	175: 28. bis 203.
300 s	90.49	10.705	8.4530	.6704	.00292	.789	295: 28. bis 323.
ab Entzündung	69.13	6.622	10.4383	.8061	.00539	1.275	1450: 28. bis 1478.
insgesamt	67.98	6.525	10.4184	.8044	.00538	1.294	1475: 3. bis 1478.
0%-Krit. *)	69.13	6.622	10.4383	.8061	.00539	1.275	1450: 28. bis 1478.
5%-Krit. *)	77.30	7.423	10.4145	.8067	.00523	1.138	1285: 28. bis 1313.
10%-Krit. *)	92.19	8.925	10.3288	.7988	.00448	.946	1055: 33. bis 1088.
25%-Krit. *)	103.02	10.101	10.1987	.7827	.00393	.836	915: 43. bis 958.
50%-Krit. *)	110.92	11.039	10.0479	.7651	.00367	.765	800: 73. bis 873.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 128.40 [kW/m²]

***) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.5 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 25 l min⁻¹ (20 °C), Index 25 (Versuch 98091602)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 022, Versuch: 98091402.STA)

Zuluft: 50.2+- .03 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.80 [g]

Zündzeitpunkt: 37.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 188.83 [kW/m²] zum Zeitpunkt 507.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	158.45	16.346	9.6938	.8068	.00328	1.003	460: 123. bis 583.
180 s	104.96	12.610	8.3236	.6489	.00052	1.301	175: 43. bis 218.
300 s	122.15	13.790	8.8580	.7134	.00116	1.189	295: 43. bis 338.
ab Entzündung	84.23	8.347	10.0914	.8547	.00353	1.965	1140: 43. bis 1183.
insgesamt	81.66	8.050	10.1433	.8583	.00354	2.037	1180: 3. bis 1183.
0%-Krit. *)	84.23	8.347	10.0914	.8547	.00353	1.965	1140: 43. bis 1183.
5%-Krit. *)	121.15	12.026	10.0737	.8474	.00344	1.364	785: 43. bis 828.
10%-Krit. *)	128.34	12.822	10.0099	.8400	.00334	1.279	735: 43. bis 778.
25%-Krit. *)	142.56	14.499	9.8328	.8195	.00308	1.131	640: 48. bis 688.
50%-Krit. *)	153.43	15.593	9.8396	.8196	.00307	1.052	555: 88. bis 643.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 188.83 [kW/m²]

***) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.6 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 50 l min⁻¹ (20 °C), Index 22 (Versuch 98091402)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 029, Versuch: 98091701.STA)

Zuluft: 50.6+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.90 [g]

Zündzeitpunkt: 36.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 230.73 [kW/m²] zum Zeitpunkt 522.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	200.47	15.110	13.2676	1.1226	.00314	1.095	465: 143. bis 608.
180 s	129.71	10.587	12.2520	.9626	.00077	1.563	180: 38. bis 218.
300 s	151.54	11.986	12.6423	1.0253	.00109	1.381	300: 38. bis 338.
ab Entzündung	90.73	6.317	14.3643	1.2408	.00411	2.620	1415: 38. bis 1453.
insgesamt	88.55	5.608	15.7917	1.3642	.00452	2.951	1450: 3. bis 1453.
0%-Krit. *)	90.73	6.317	14.3643	1.2408	.00411	2.620	1415: 38. bis 1453.
5%-Krit. *)	141.17	10.211	13.8257	1.1871	.00371	1.621	900: 43. bis 943.
10%-Krit. *)	157.42	11.495	13.6945	1.1722	.00336	1.440	795: 48. bis 843.
25%-Krit. *)	179.90	13.388	13.4370	1.1396	.00294	1.236	670: 58. bis 728.
50%-Krit. *)	192.31	14.368	13.3848	1.1312	.00288	1.152	590: 88. bis 678.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 230.73 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.7 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 50 l min⁻¹ (20 °C),
Index 29 (Versuch 98091701)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 021, Versuch: 98091401.STA)

Zuluft: 100.7+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.70 [g]

Zündzeitpunkt: 50.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 209.82 [kW/m²] zum Zeitpunkt 452.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	174.56	16.631	10.4961	.8744	.00048	1.979	465: 98. bis 563.
180 s	127.93	15.831	8.0809	.6237	.00034	2.079	180: 53. bis 233.
300 s	147.85	16.453	8.9860	.7205	.00035	2.000	300: 53. bis 353.
ab Entzündung	99.75	9.678	10.3066	.8714	.00080	3.400	1010: 53. bis 1063.
insgesamt	95.13	9.148	10.3987	.8789	.00081	3.597	1060: 3. bis 1063.
0%-Krit. *)	99.75	9.678	10.3066	.8714	.00080	3.400	1010: 53. bis 1063.
5%-Krit. *)	137.51	13.397	10.2642	.8621	.00074	2.456	730: 53. bis 783.
10%-Krit. *)	147.34	14.467	10.1850	.8531	.00061	2.275	675: 53. bis 728.
25%-Krit. *)	158.25	15.740	10.0534	.8388	.00052	2.091	615: 58. bis 673.
50%-Krit. *)	168.53	15.954	10.5630	.8832	.00050	2.063	540: 88. bis 628.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 209.82 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.8 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 100 l min⁻¹ (20 °C),
Index 21 (Versuch 98091401)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 für BASF von BMFT / DLR (Index: 031, Versuch: 98091703.STA)

Zuluft: 100.5+- .03 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.80 [g]

Zündzeitpunkt: 28.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 297.08 [kW/m²] zum Zeitpunkt 447.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	254.73	18.293	13.9246	1.1440	.00032	1.795	430: 113. bis 543.
180 s	175.36	14.160	12.3842	.9858	.00041	2.319	180: 33. bis 213.
300 s	206.26	16.121	12.7940	1.0357	.00036	2.037	300: 33. bis 333.
ab Entzündung	118.67	8.449	14.0460	1.1618	.00084	3.887	1175: 33. bis 1208.
insgesamt	115.89	8.763	13.2251	1.0940	.00080	3.748	1205: 3. bis 1208.
0%-Krit. *)	118.67	8.449	14.0460	1.1618	.00084	3.887	1175: 33. bis 1208.
5%-Krit. *)	190.65	13.394	14.2342	1.1712	.00072	2.452	725: 33. bis 758.
10%-Krit. *)	207.21	14.643	14.1509	1.1623	.00057	2.243	660: 33. bis 693.
25%-Krit. *)	229.19	16.381	13.9910	1.1443	.00039	2.005	580: 38. bis 618.
50%-Krit. *)	243.30	17.415	13.9705	1.1440	.00034	1.886	515: 68. bis 583.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 297.08 [kW/m²]

***) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.9 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 100 l min⁻¹ (20 °C),
Index 31 (Versuch 98091703)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 023, Versuch: 98091403.STA)

Zuluft: 200.7+- .06 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.70 [g]

Zündzeitpunkt: 40.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 216.57 [kW/m²] zum Zeitpunkt 452.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m ²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m ²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	192.87	17.879	10.7874	.8856	.00029	3.670	405: 138. bis 543.
180 s	140.57	12.444	11.2966	.8485	.00032	5.272	180: 43. bis 223.
300 s	161.20	14.781	10.9058	.8512	.00030	4.439	300: 43. bis 343.
ab Entzündung	114.53	10.178	11.2528	.9330	.00058	6.446	900: 43. bis 943.
insgesamt	109.80	9.752	11.2592	.9333	.00059	6.728	940: 3. bis 943.
0%-Krit. *)	114.53	10.178	11.2528	.9330	.00058	6.446	900: 43. bis 943.
5%-Krit. *)	151.00	13.448	11.2287	.9249	.00051	4.879	680: 43. bis 723.
10%-Krit. *)	165.37	14.816	11.1611	.9138	.00039	4.428	615: 43. bis 658.
25%-Krit. *)	174.22	16.000	10.8885	.8872	.00031	4.100	575: 48. bis 623.
50%-Krit. *)	181.30	16.694	10.8601	.8858	.00028	3.930	530: 68. bis 598.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 216.57 [kW/m²]

***) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.10 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 200 l min⁻¹ (20 °C),
Index 23 (Versuch 98091403)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glystantin G 48

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 030, Versuch: 98091702.STA)

Zuluft: 200.6+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.70 [g]

Zündzeitpunkt: 29.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 291.11 [kW/m²] zum Zeitpunkt 447.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	257.39	17.936	14.3506	1.2245	.00047	3.655	420: 118. bis 538.
180 s	187.21	13.525	13.8415	1.1148	.00047	4.847	180: 33. bis 213.
300 s	214.36	15.417	13.9036	1.1496	.00048	4.252	300: 33. bis 333.
ab Entzündung	140.36	9.558	14.6858	1.2771	.00119	6.859	995: 33. bis 1028.
insgesamt	136.41	9.707	14.0524	1.2224	.00115	6.753	1025: 3. bis 1028.
0%-Krit. *)	140.36	9.558	14.6858	1.2771	.00119	6.859	995: 33. bis 1028.
5%-Krit. *)	187.73	12.777	14.6931	1.2692	.00101	5.131	740: 33. bis 773.
10%-Krit. *)	221.35	15.213	14.5499	1.2462	.00061	4.309	615: 33. bis 648.
25%-Krit. *)	234.90	16.220	14.4817	1.2325	.00051	4.042	570: 38. bis 608.
50%-Krit. *)	244.61	16.946	14.4350	1.2275	.00047	3.869	525: 58. bis 583.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 291.11 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.11 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 200 l min⁻¹ (20 °C),
Index 30 (Versuch 98091702)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 026, Versuch: 98091603.STA)

Zuluft: 299.8+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.70 [g]

Zündzeitpunkt: 26.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 300.07 [kW/m²] zum Zeitpunkt 462.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	266.51	17.893	14.8946	1.2278	.00243	5.477	415: 118. bis 533.
180 s	181.43	12.696	14.2900	1.0240	.00078	7.718	180: 28. bis 208.
300 s	214.35	14.937	14.3505	1.0956	.00097	6.561	300: 28. bis 328.
ab Entzündung	166.06	10.931	15.1919	1.2685	.00296	8.965	855: 28. bis 883.
insgesamt	161.47	10.992	14.6902	1.2260	.00287	8.915	880: 3. bis 883.
0%-Krit. *)	183.21	12.064	15.1857	1.2655	.00296	8.123	775: 28. bis 803.
5%-Krit. *)	209.30	13.816	15.1492	1.2553	.00283	7.093	675: 28. bis 703.
10%-Krit. *)	225.86	14.963	15.0948	1.2426	.00269	6.549	620: 28. bis 648.
25%-Krit. *)	239.49	15.978	14.9890	1.2251	.00261	6.133	575: 33. bis 608.
50%-Krit. *)	251.79	16.790	14.9967	1.2303	.00263	5.837	520: 63. bis 583.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 300.07 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.12 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 300 l min⁻¹ (20 °C),
Index 26 (Versuch 98091603)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 024, Versuch: 98091601.STA)

Zuluft: 400.0+- .05 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 25.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.70 [g]

Zündzeitpunkt: 32.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 310.78 [kW/m²] zum Zeitpunkt 452.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	272.16	18.081	15.0525	1.2326	.00114	7.232	415: 123. bis 538.
180 s	189.35	13.251	14.2894	1.0498	.00119	9.868	175: 38. bis 213.
300 s	222.96	15.364	14.5113	1.1189	.00119	8.511	295: 38. bis 333.
ab Entzündung	144.63	9.511	15.2063	1.2803	.00147	13.749	990: 38. bis 1028.
insgesamt	140.08	9.338	15.0011	1.2619	.00147	14.004	1025: 3. bis 1028.
0%-Krit. *)	159.09	10.433	15.2483	1.2818	.00147	12.534	900: 38. bis 938.
5%-Krit. *)	219.30	14.380	15.2508	1.2636	.00135	9.094	650: 38. bis 688.
10%-Krit. *)	232.19	15.266	15.2096	1.2518	.00125	8.566	610: 38. bis 648.
25%-Krit. *)	243.03	16.049	15.1425	1.2364	.00117	8.148	575: 38. bis 613.
50%-Krit. *)	257.79	17.025	15.1423	1.2380	.00112	7.681	510: 73. bis 583.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 310.78 [kW/m²]

***) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.13 Strahlungsflußdichte 25 kW m⁻², Zuluft ca. 400 l min⁻¹ (20 °C),
Index 24 (Versuch 98091601)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glystantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 036, Versuch: 98100505.STA)

Zuluft: 50.6+- .03 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.80 [g]

Zündzeitpunkt: 12.0 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 263.14 [kW/m²] zum Zeitpunkt 417.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	249.91	24.712	10.1128	.7738	.07443	.669	335: 83. bis 418.
180 s	178.90	19.236	9.2999	.6875	.01324	.860	180: 13. bis 193.
300 s	211.76	22.446	9.4345	.7159	.05074	.737	300: 13. bis 313.
ab Entzündung	98.01	8.955	10.9446	.8576	.06254	1.847	1165: 13. bis 1178.
insgesamt	97.19	9.224	10.5367	.8255	.06020	1.793	1175: 3. bis 1178.
0%-Krit. *)	98.01	8.955	10.9446	.8576	.06254	1.847	1165: 13. bis 1178.
5%-Krit. *)	158.80	13.941	11.3912	.8895	.06562	1.186	710: 18. bis 728.
10%-Krit. *)	176.37	15.582	11.3187	.8828	.06589	1.061	630: 23. bis 653.
25%-Krit. *)	216.03	19.715	10.9574	.8484	.06682	.839	485: 33. bis 518.
50%-Krit. *)	240.02	22.450	10.6914	.8229	.06969	.737	405: 58. bis 463.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 263.14 [kW/m²]

***) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.14 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 50 l min⁻¹ (20 °C),
Index 36 (Versuch 98100505)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 035, Versuch: 98100504.STA)

Zuluft: 101.0+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.80 [g]

Zündzeitpunkt: 26.4 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 399.43 [kW/m²] zum Zeitpunkt 312.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	339.66	24.737	13.7310	1.1042	.00017	1.334	300: 93. bis 393.
180 s	234.47	19.289	12.1556	.8923	.00037	1.711	180: 28. bis 208.
300 s	290.28	22.495	12.9041	1.0005	.00024	1.467	300: 28. bis 328.
ab Entzündung	146.28	10.091	14.4962	1.2019	.00169	3.271	940: 28. bis 968.
insgesamt	142.58	10.288	13.8594	1.1485	.00162	3.208	965: 3. bis 968.
0%-Krit. *)	146.28	10.091	14.4962	1.2019	.00169	3.271	940: 28. bis 968.
5%-Krit. *)	217.75	15.110	14.4114	1.1899	.00138	2.184	625: 28. bis 653.
10%-Krit. *)	246.97	17.151	14.4003	1.1863	.00087	1.924	540: 33. bis 573.
25%-Krit. *)	298.41	21.293	14.0141	1.1321	.00025	1.550	425: 38. bis 463.
50%-Krit. *)	332.30	23.743	13.9956	1.1356	.00017	1.390	340: 93. bis 433.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 399.43 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.15 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 100 l min⁻¹ (20 °C),
Index 35 (Versuch 98100504)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 034, Versuch: 98100503.STA)

Zuluft: 200.3+- .03 [l/min (20 °C)], Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.80 [g]

Zündzeitpunkt: 13.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 416.00 [kW/m²] zum Zeitpunkt 307.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall Dauer, Beginn bis Ende [s]
	rel. Energie- freisetzungsr- ate [kW/m²]	rel. Abbrand- rate [g/(s*m²)]	eff. Verbren- nungs- wärme [kJ/g]	Kohlen- dioxid- Ausbeute [kg/kg]	Kohlen- monoxid- Ausbeute [kg/kg]	Zulufver- hältnis **) [1]	
MLR 10-90 %	356.08	25.896	13.7506	1.1343	.00150	2.529	310: 88. bis 398.
180 s	253.66	19.676	12.8918	.9512	.00275	3.328	180: 18. bis 198.
300 s	309.14	23.317	13.2578	1.0369	.00183	2.808	300: 18. bis 318.
ab Entzündung	164.40	11.718	14.0298	1.2126	.00586	5.588	860: 18. bis 878.
insgesamt	161.83	12.009	13.4763	1.1637	.00562	5.453	875: 3. bis 878.
0%-Krit. *)	204.91	14.483	14.1483	1.2169	.00583	4.521	690: 18. bis 708.
5%-Krit. *)	226.94	16.051	14.1387	1.2087	.00536	4.080	620: 18. bis 638.
10%-Krit. *)	242.04	17.214	14.0605	1.1985	.00436	3.804	575: 18. bis 593.
25%-Krit. *)	314.13	22.683	13.8487	1.1420	.00206	2.887	420: 23. bis 443.
50%-Krit. *)	344.49	24.864	13.8551	1.1485	.00179	2.634	345: 73. bis 418.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 416.00 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.16 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 200 l min⁻¹ (20 °C),
Index 34 (Versuch 98100503)

Untersuchung in der Cone-Kammer:

Glykol Glysantin G 48 von BASF für BMFT / DLR (Index: 037, Versuch: 99092102.STA)

Zuluft: 400.5+-.08 l/min (20 °C), Strahlungsflußdichte: 40.0 [kW/m²], Fläche: 110.25 [cm²], Dicke: 9.1 [mm], Masse: 112.50 [g]

Zündzeitpunkt: 15.5 [s], max. rel. Energiefreisetzungsrate: 432.06 [kW/m²] zum Zeitpunkt 317.5 [s]

Kriterium	Mittelwerte für						Zeitintervall	
	rel. Energiefreisetzungsrate [kW/m ²]	rel. Abbrandrate [g/(s*m ²)]	eff. Verbrennungswärme [kJ/g]	Kohlen-dioxid-Ausbeute [kg/kg]	Kohlen-monoxid-Ausbeute [kg/kg]	Zuluftverhältnis **) [1]	Dauer, Beginn bis Ende [s]	
MLR 10-90 %	381.14	25.231	15.1060	1.1545	.00017	5.189	300:	88. bis 388.
180 s	272.12	19.441	13.9976	.9094	.00007	6.734	180:	18. bis 198.
300 s	328.50	22.687	14.4798	1.0365	.00015	5.771	300:	18. bis 318.
ab Entzündung	199.32	12.848	15.5138	1.1772	.00122	10.190	740:	18. bis 758.
insgesamt	195.50	12.702	15.3918	1.1671	.00122	10.307	755:	3. bis 758.
0%-Krit. *)	199.32	12.848	15.5138	1.1772	.00122	10.190	740:	18. bis 758.
5%-Krit. *)	247.79	16.052	15.4369	1.1807	.00096	8.156	590:	18. bis 608.
10%-Krit. *)	318.92	20.920	15.2445	1.1628	.00019	6.258	445:	23. bis 468.
25%-Krit. *)	336.47	22.182	15.1688	1.1497	.00014	5.902	415:	28. bis 443.
50%-Krit. *)	363.66	23.967	15.1733	1.1590	.00015	5.462	355:	63. bis 418.

*) bezogen auf maximale relative Energiefreisetzungsrate von 432.06 [kW/m²]

**) unterer Heizwert 16.60 [kJ/g], Betrag Sauerstoff-Faktor 16846 [kJ/m³]

Dipl.-Phys. J. Will
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Übersicht F.17 Strahlungsflußdichte 40 kW m⁻², Zuluft ca. 400 l min⁻¹ (20 °C),
Index 37 (Versuch 99092102)

F.2 Relative Energiefreisetzungsrate Glykol Glysantin G 48

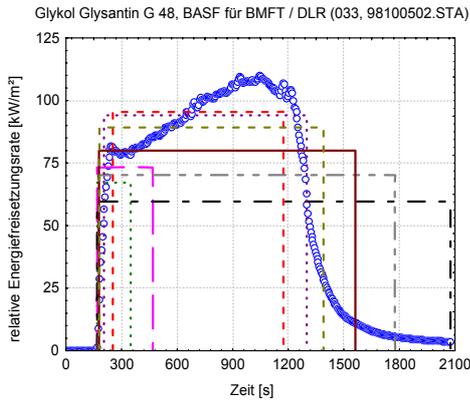


Diagramm F.1 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 33 (Versuch 98100502)

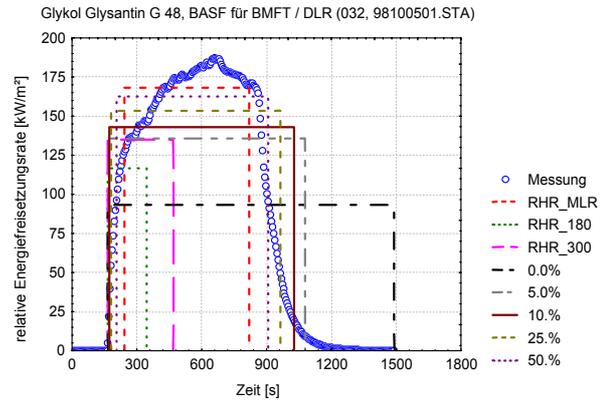


Diagramm F.2 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 32 (Versuch 98100501)

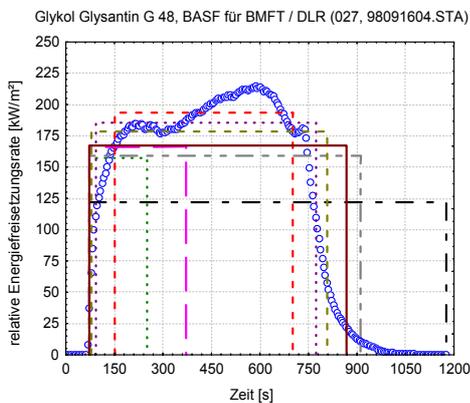


Diagramm F.3 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 27 (Versuch 98091604)

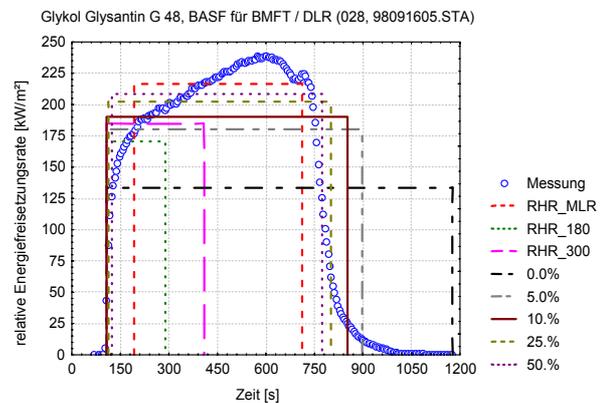


Diagramm F.4 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 28 (Versuch 98091605)

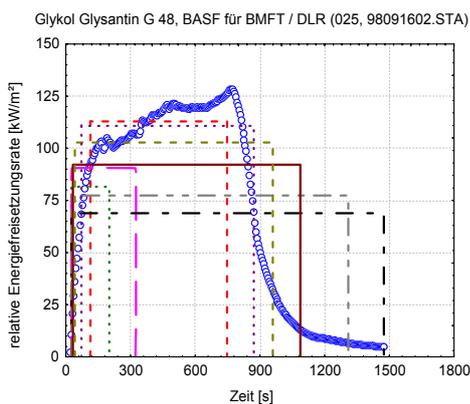


Diagramm F.5 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 25 (Versuch 98091602)

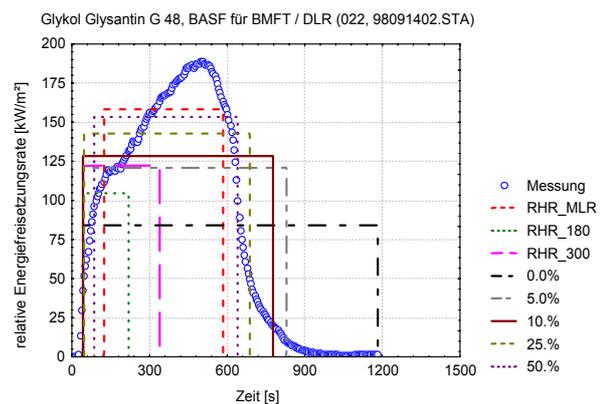


Diagramm F.6 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 22 (Versuch 98091402)

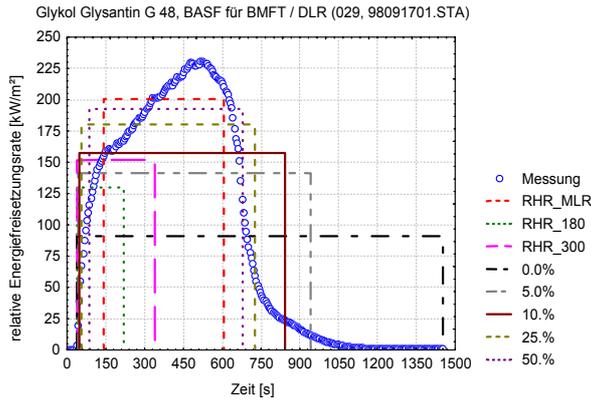


Diagramm F.7 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 29 (Versuch 98091701)

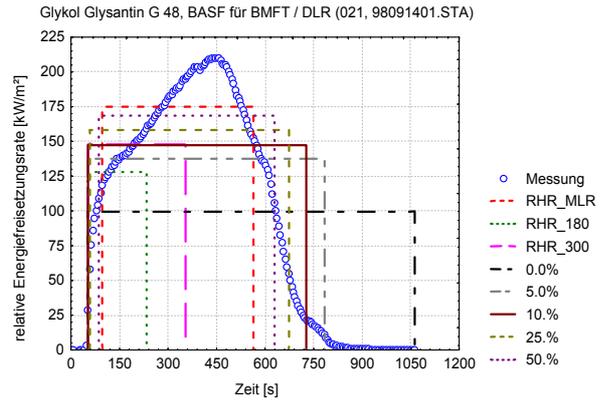


Diagramm F.8 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 21 (Versuch 98091401)

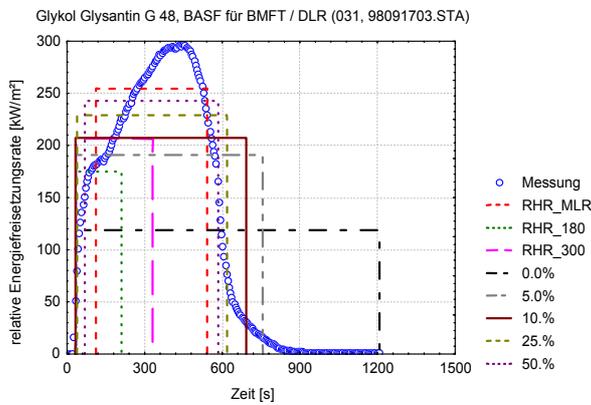


Diagramm F.9 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 31 (Versuch 98091703)

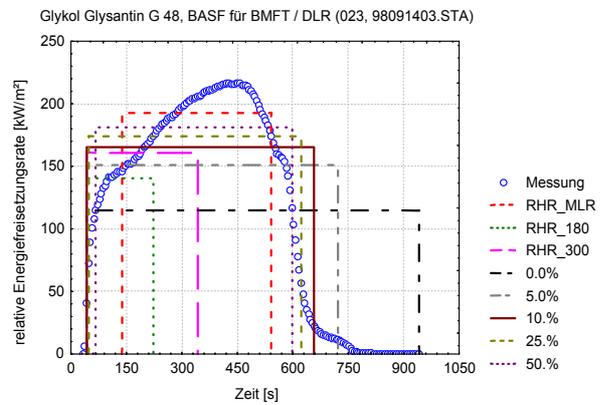


Diagramm F.10 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 23 (Versuch 98091403)

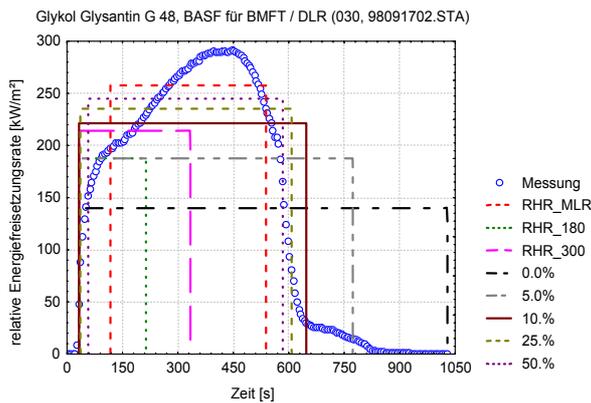


Diagramm F.11 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 30 (Versuch 98091702)

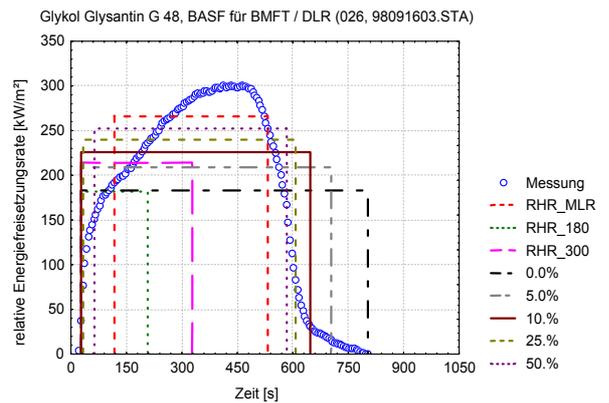


Diagramm F.12 25 kW m^{-2} , ca. 300 l min^{-1} , Index 26 (Versuch 98091603)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

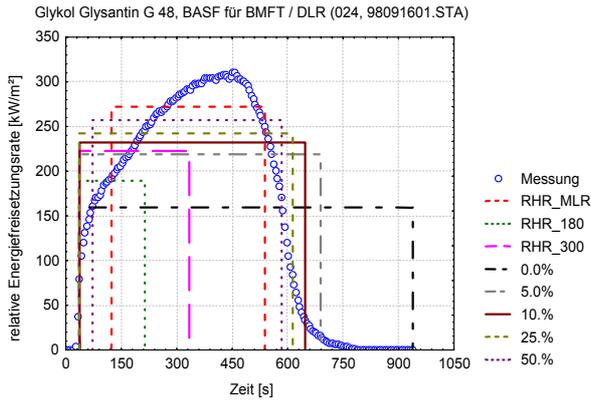


Diagramm F.13 25 kW m⁻², ca. 400 l min⁻¹, Index 24 (Versuch 98091601)

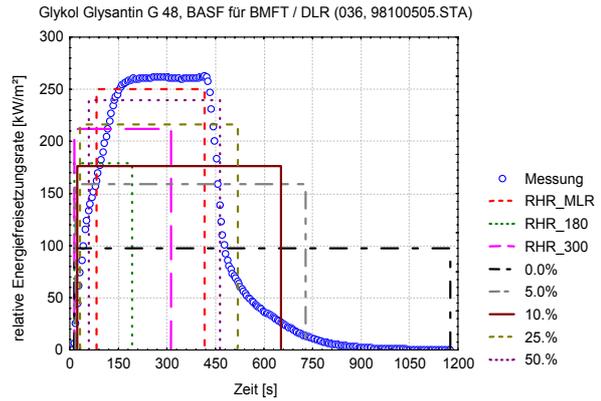


Diagramm F.14 40 kW m⁻², ca. 50 l min⁻¹, Index 36 (Versuch 98100505)

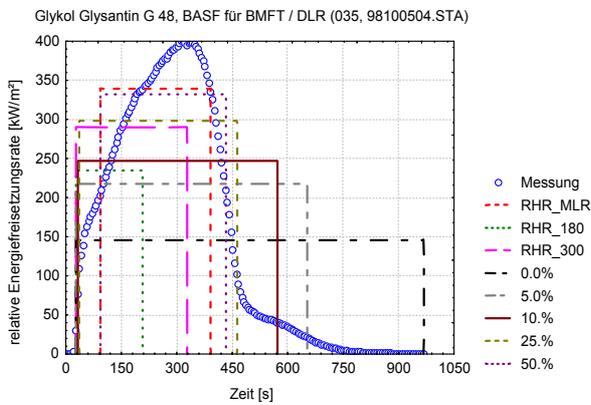


Diagramm F.15 40 kW m⁻², ca. 100 l min⁻¹, Index 35 (Versuch 98100504)

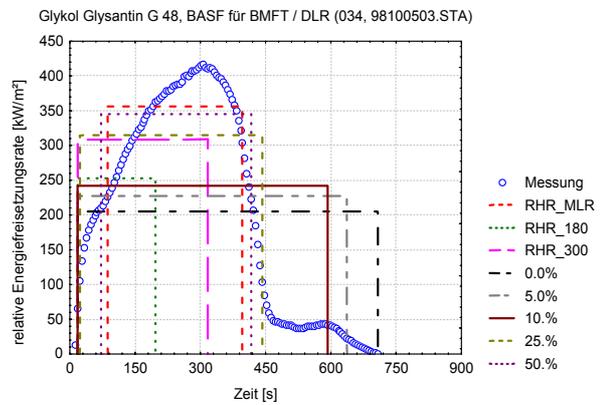


Diagramm F.16 40 kW m⁻², ca. 200 l min⁻¹, Index 34 (Versuch 98100503)

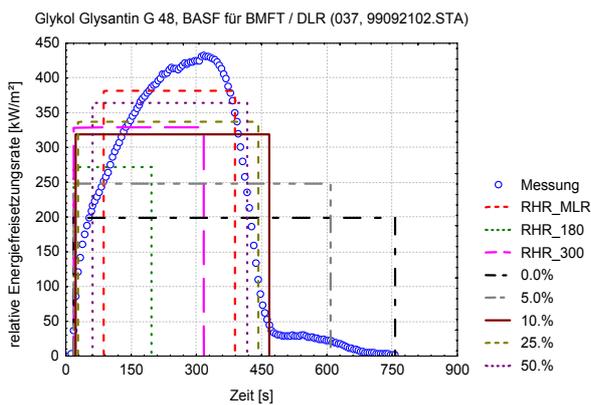


Diagramm F.17 40 kW m⁻², ca. 400 l min⁻¹, Index 37 (Versuch 99092102)

F.3 Relative Abbrandrate Glykol Glysantin G 48

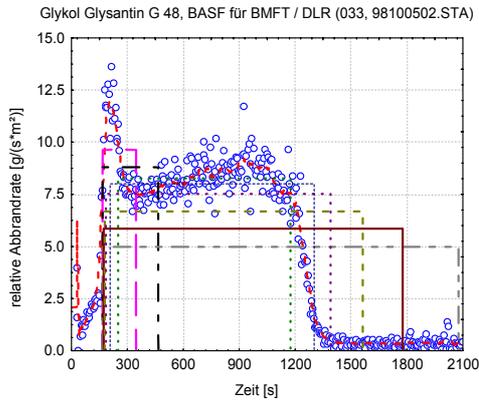


Diagramm F.18 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 33 (Versuch 98100502)

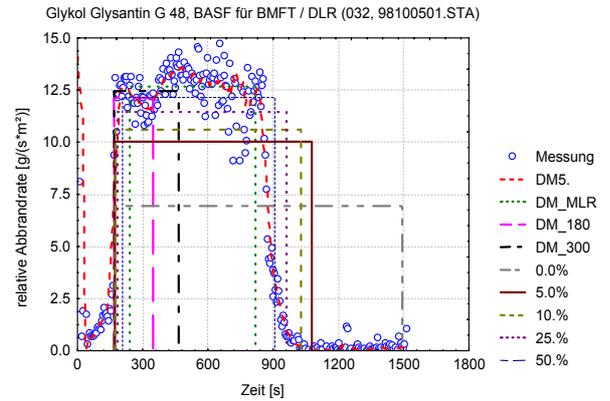


Diagramm F.19 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 32 (Versuch 98100501)

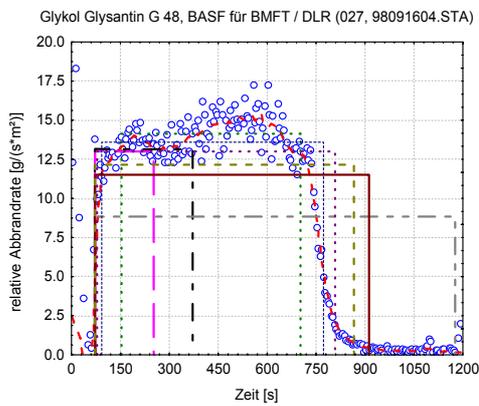


Diagramm F.20 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 27 (Versuch 98091604)

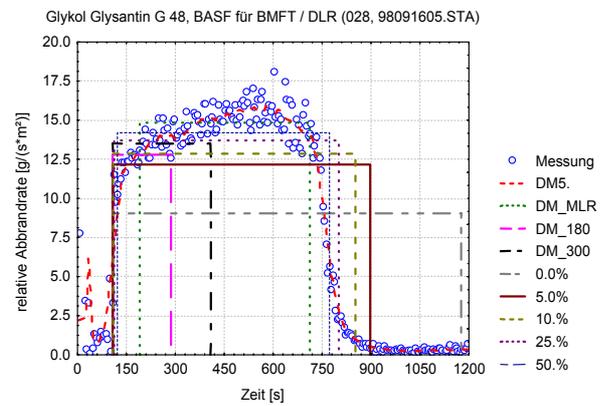


Diagramm F.21 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 28 (Versuch 98091605)

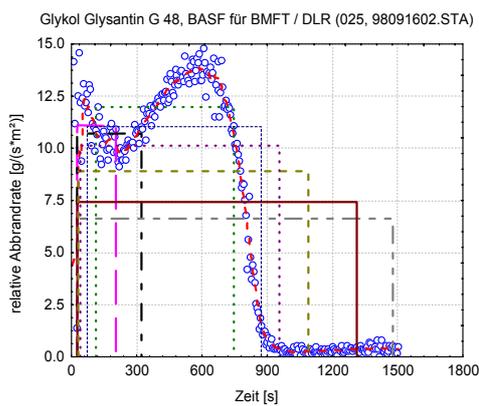


Diagramm F.22 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 25 (Versuch 98091602)

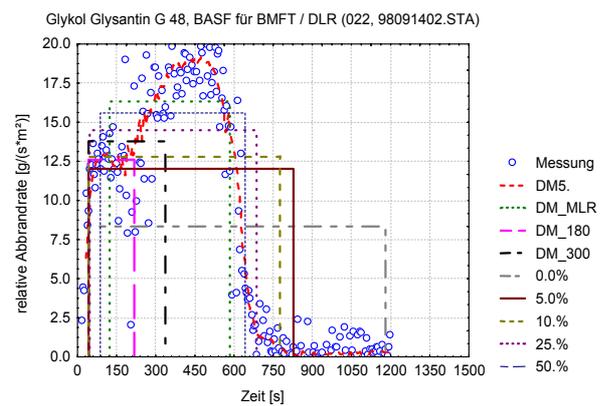


Diagramm F.23 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 22 (Versuch 98091402)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

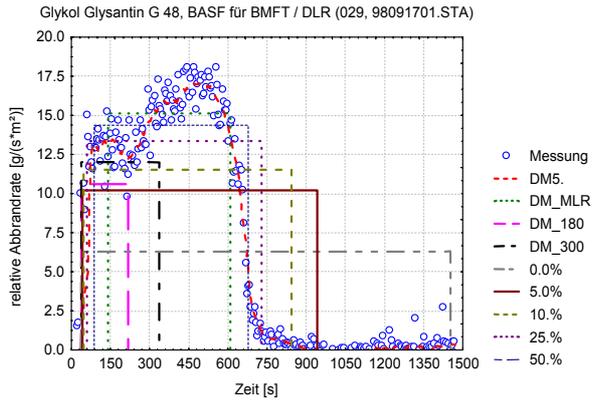


Diagramm F.24 25 kW m⁻², ca. 50 l min⁻¹, Index 29 (Versuch 98091701)

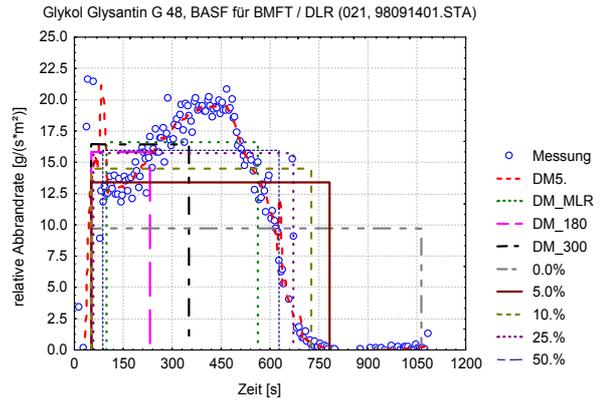


Diagramm F.25 25 kW m⁻², ca. 100 l min⁻¹, Index 21 (Versuch 98091401)

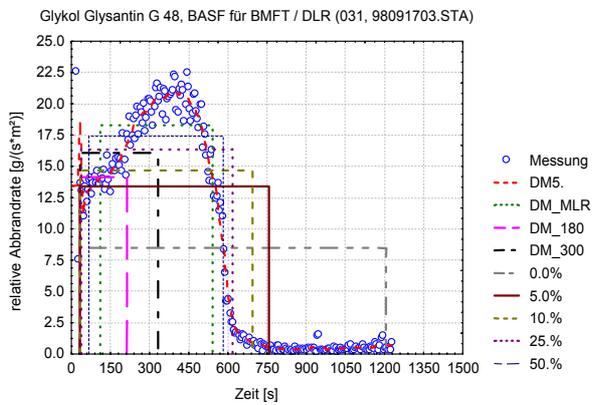


Diagramm F.26 25 kW m⁻², ca. 100 l min⁻¹, Index 31 (Versuch 98091703)

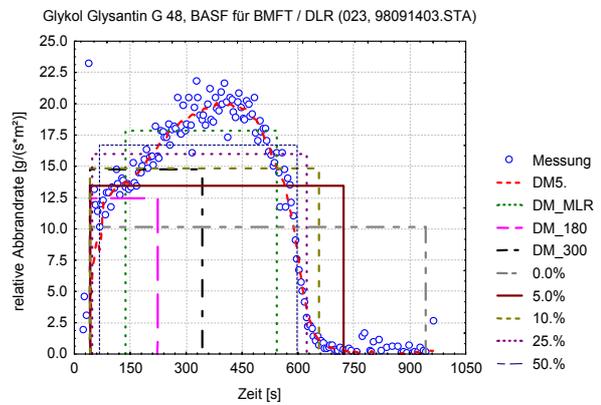


Diagramm F.27 25 kW m⁻², ca. 200 l min⁻¹, Index 23 (Versuch 98091403)

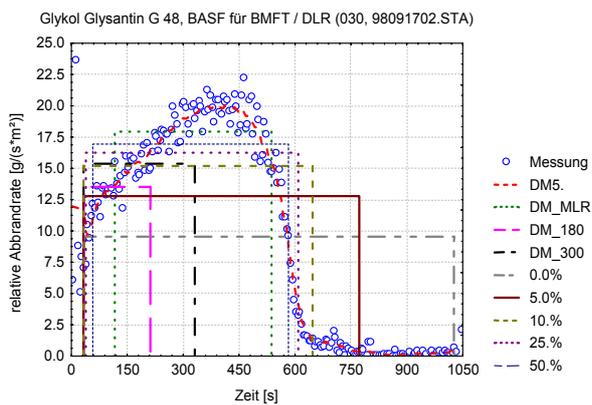


Diagramm F.28 25 kW m⁻², ca. 200 l min⁻¹, Index 30 (Versuch 98091702)

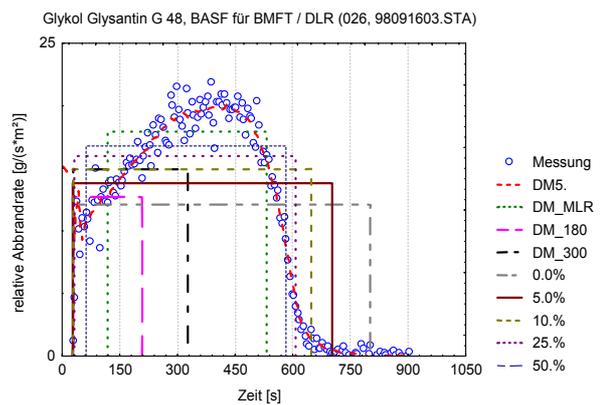


Diagramm F.29 25 kW m⁻², ca. 300 l min⁻¹, Index 26 (Versuch 98091603)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

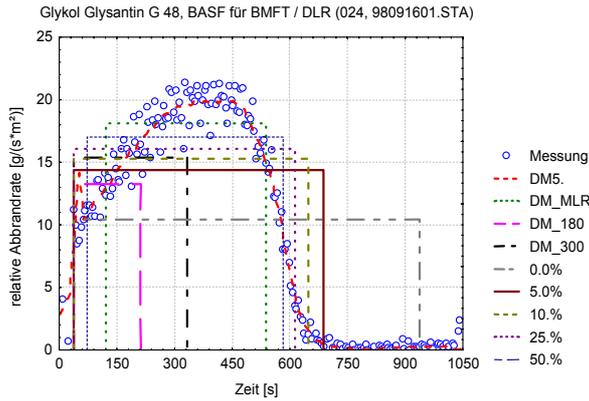


Diagramm F.30 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 24 (Versuch 98091601)

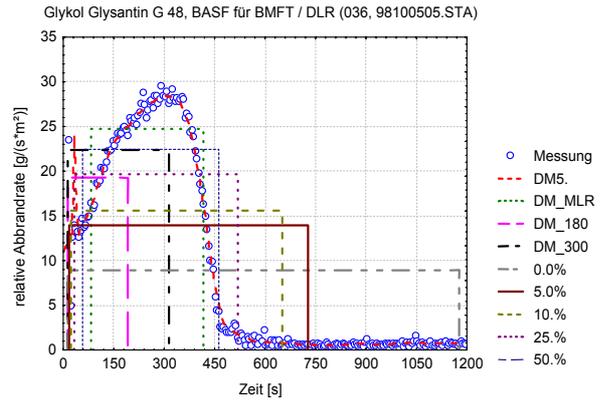


Diagramm F.31 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 36 (Versuch 98100505)

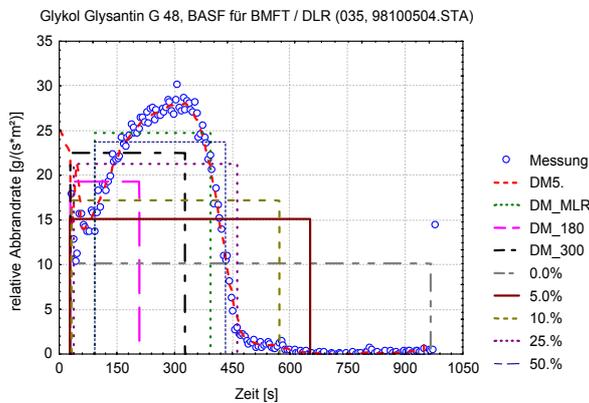


Diagramm F.32 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 35 (Versuch 98100504)

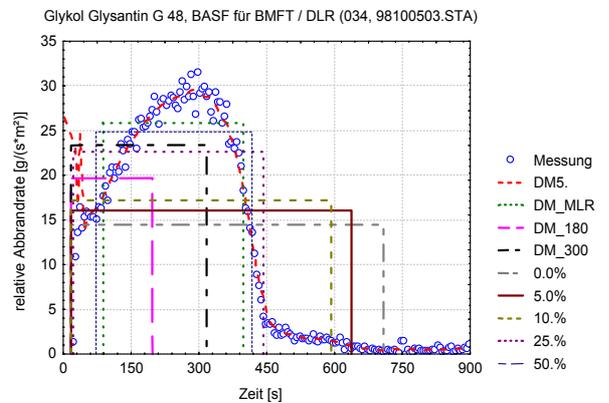


Diagramm F.33 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 34 (Versuch 98100503)

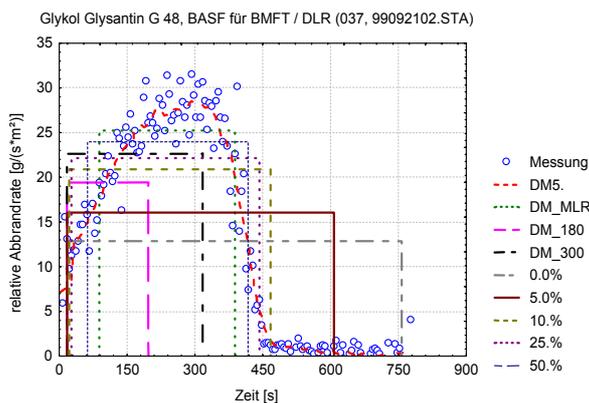


Diagramm F.34 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 37 (Versuch 99092102)

F.4 Effektive Verbrennungswärme Glykol Glysantin G 48

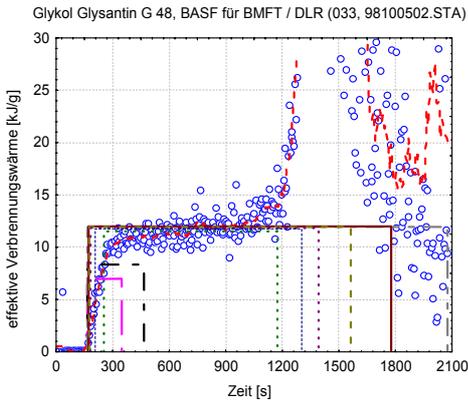


Diagramm F.35 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 33 (Versuch 98100502)

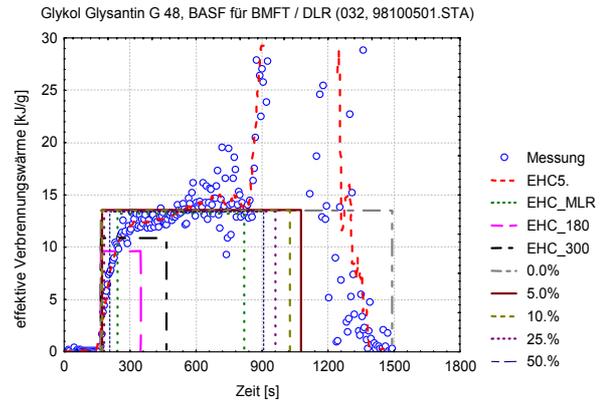


Diagramm F.36 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 32 (Versuch 98100501)

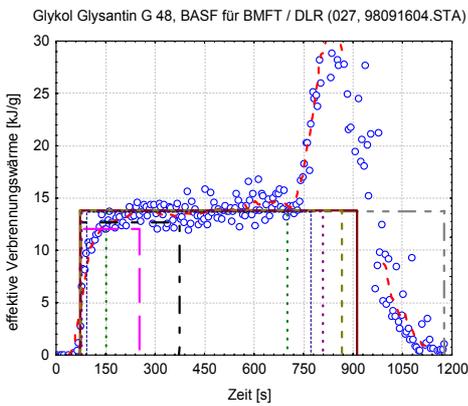


Diagramm F.37 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 27 (Versuch 98091604)

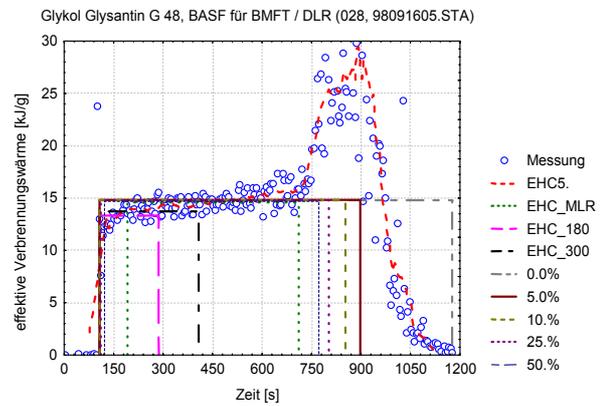


Diagramm F.38 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 28 (Versuch 98091605)

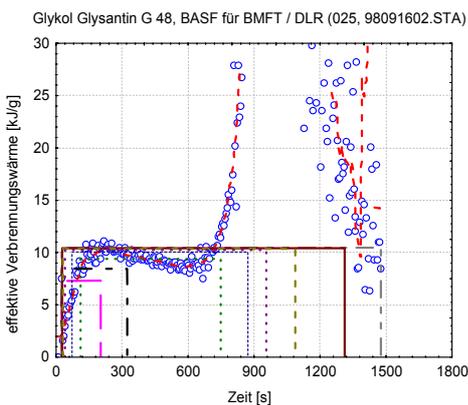


Diagramm F.39 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 25 (Versuch 98091602)

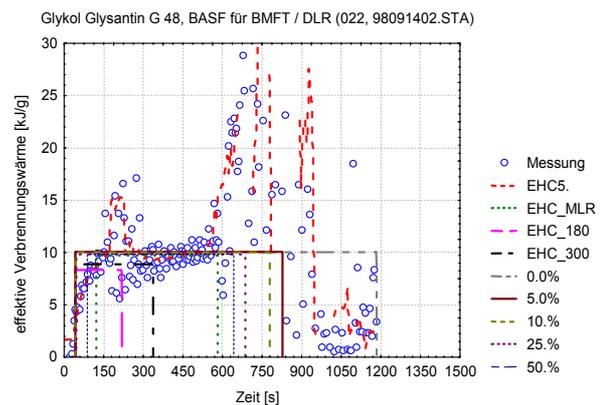


Diagramm F.40 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 22 (Versuch 98091402)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

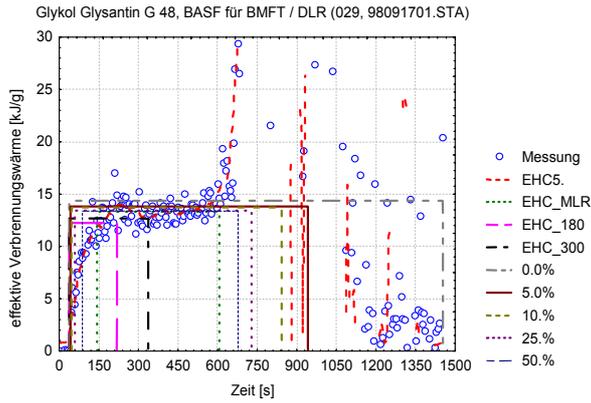


Diagramm F.41 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 29 (Versuch 98091701)

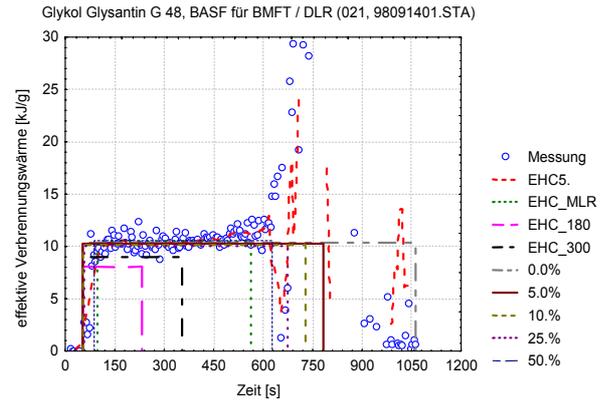


Diagramm F.42 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 21 (Versuch 98091401)

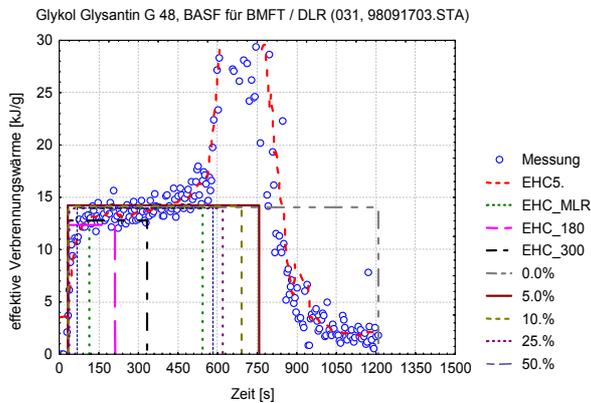


Diagramm F.43 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 31 (Versuch 98091703)

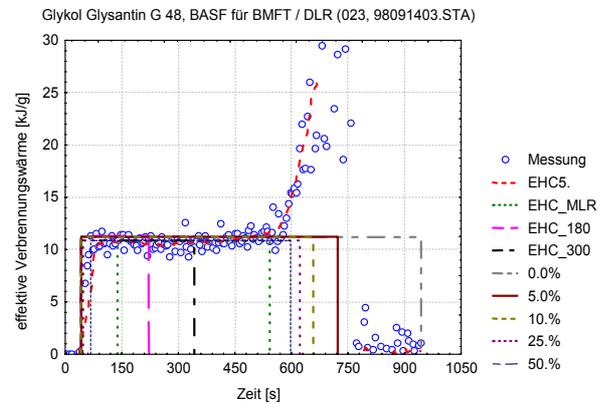


Diagramm F.44 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 23 (Versuch 98091403)

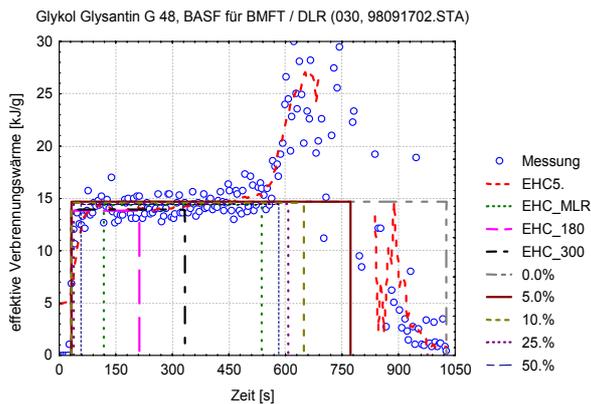


Diagramm F.45 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 30 (Versuch 98091702)

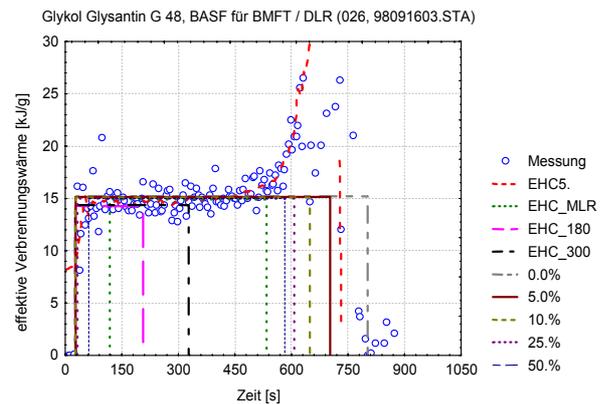


Diagramm F.46 25 kW m^{-2} , ca. 300 l min^{-1} , Index 26 (Versuch 98091603)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

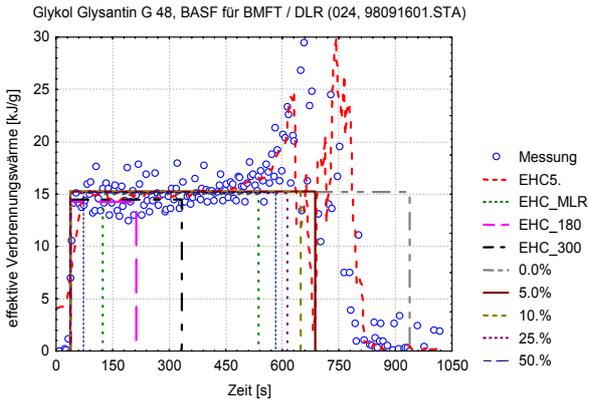


Diagramm F.47 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 24 (Versuch 98091601)

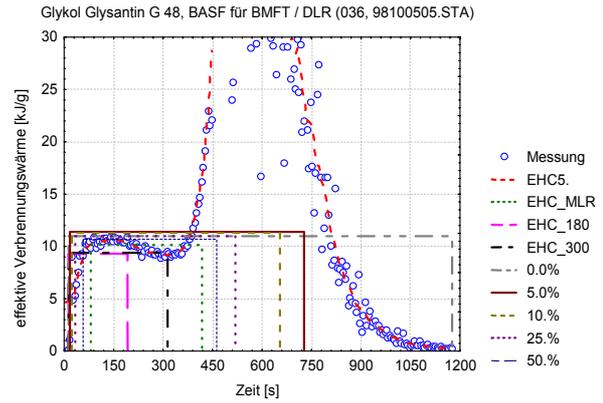


Diagramm F.48 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 36 (Versuch 98100505)

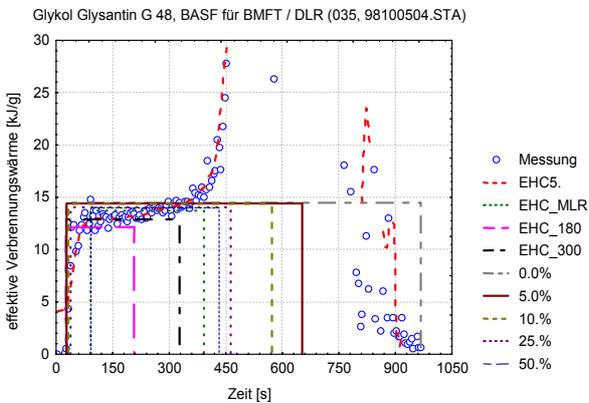


Diagramm F.49 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 35 (Versuch 98100504)

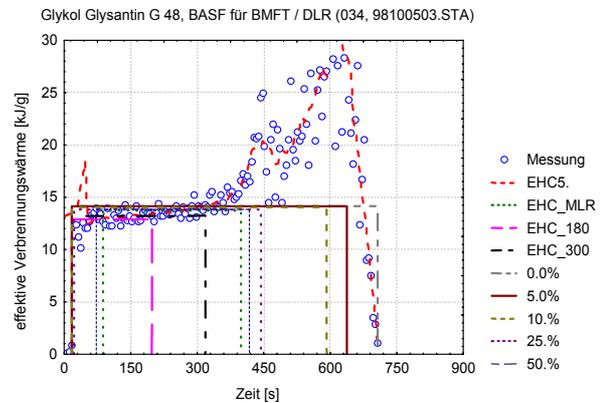


Diagramm F.50 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 34 (Versuch 98100503)

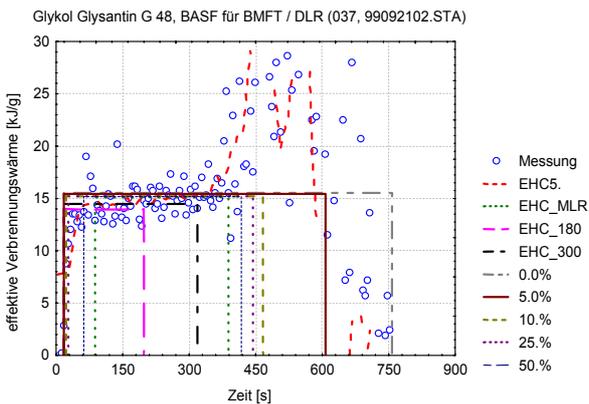


Diagramm F.51 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 37 (Versuch 99092102)

F.5 Kohlendioxidausbeute Glykol Glysantin G 48

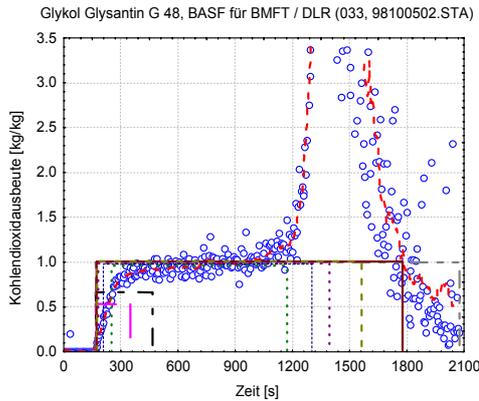


Diagramm F.52 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} ,
Index 33 (Versuch 98100502)

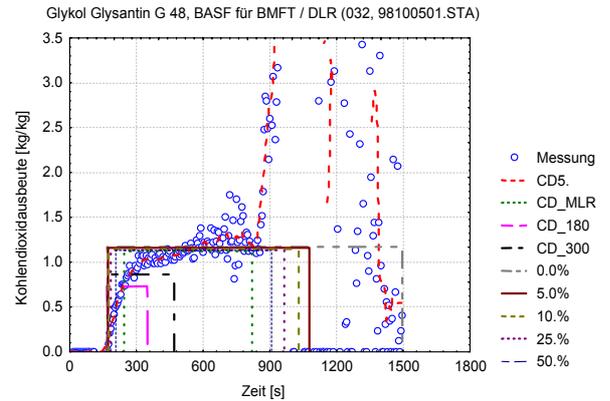


Diagramm F.53 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} ,
Index 32 (Versuch 98100501)

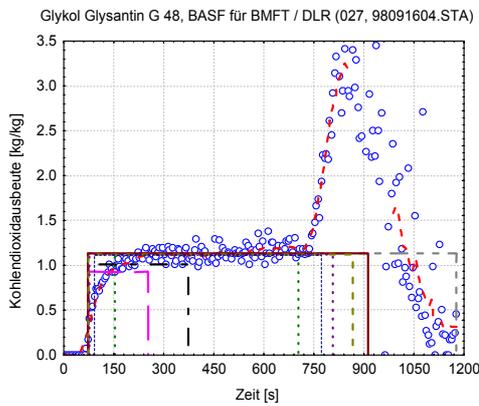


Diagramm F.54 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} ,
Index 27 (Versuch 98091604)

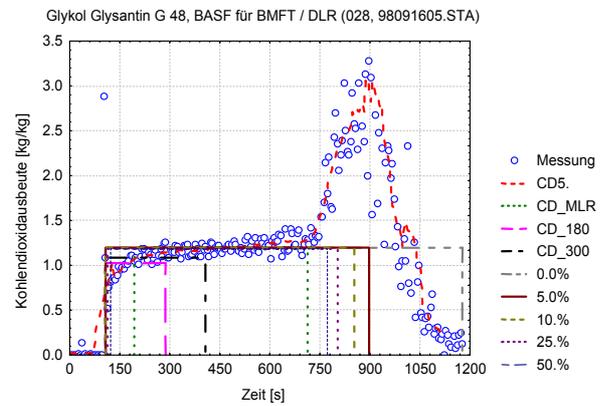


Diagramm F.55 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} ,
Index 28 (Versuch 98091605)

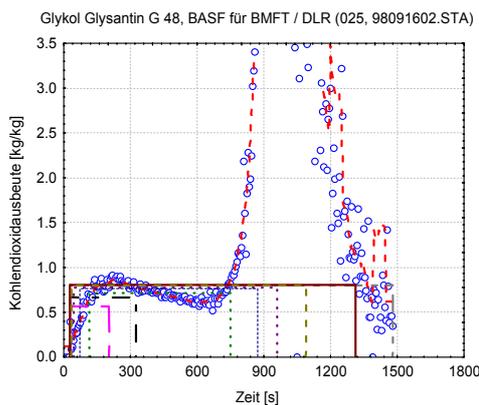


Diagramm F.56 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} ,
Index 25 (Versuch 98091602)

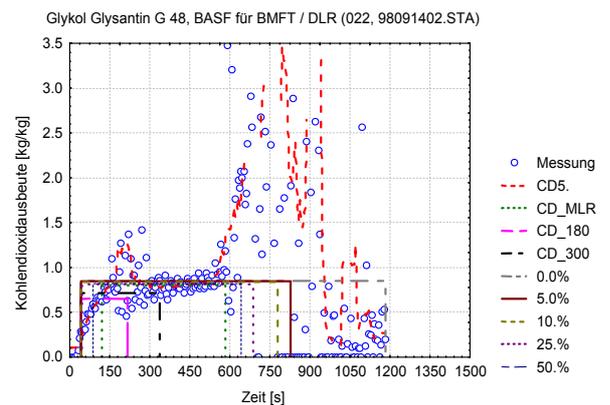


Diagramm F.57 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} ,
Index 22 (Versuch 98091402)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

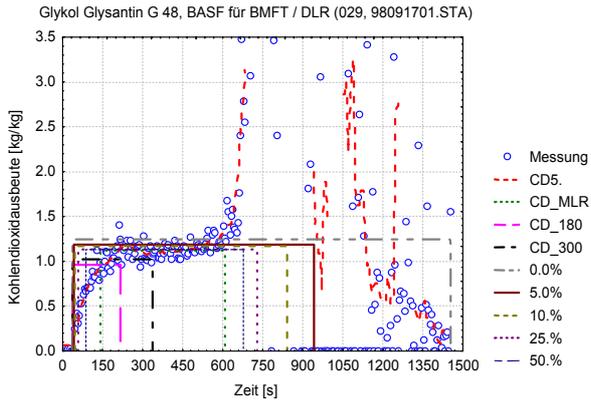


Diagramm F.58 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 29 (Versuch 98091701)

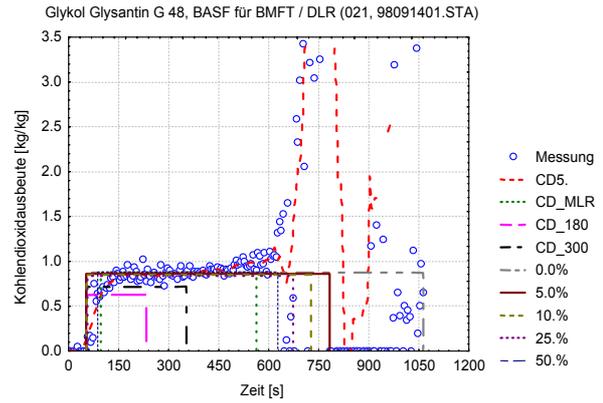


Diagramm F.59 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 21 (Versuch 98091401)

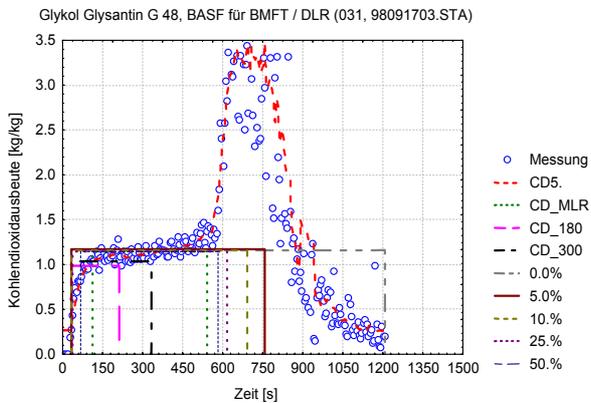


Diagramm F.60 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 31 (Versuch 98091703)

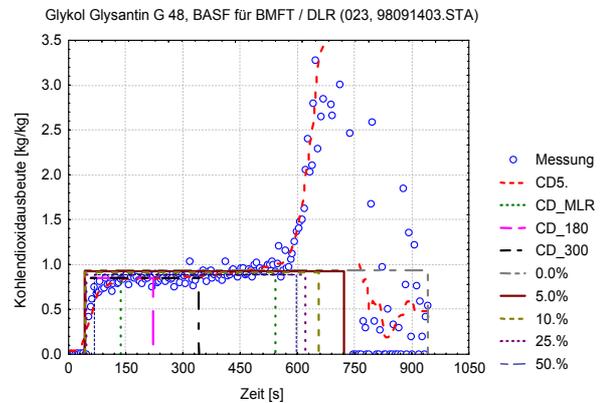


Diagramm F.61 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 23 (Versuch 98091403)

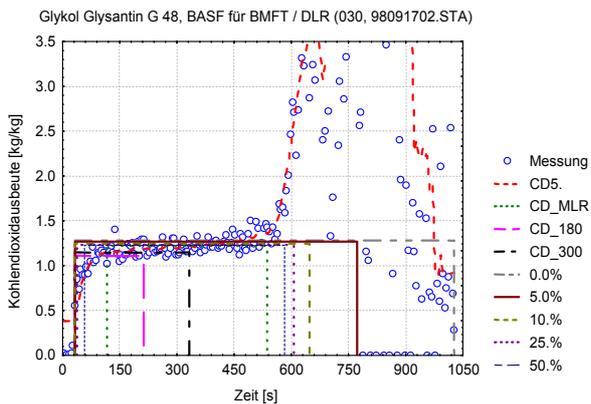


Diagramm F.62 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 30 (Versuch 98091702)

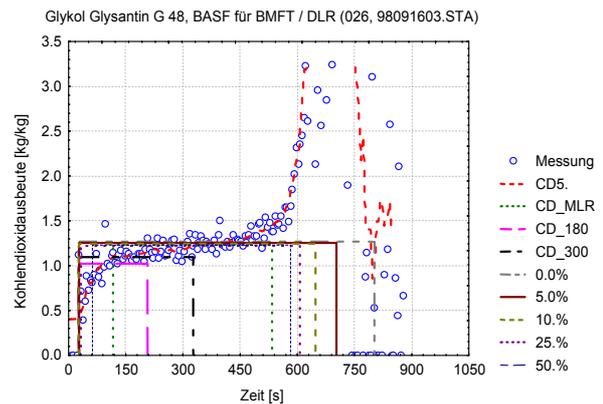


Diagramm F.63 25 kW m^{-2} , ca. 300 l min^{-1} , Index 26 (Versuch 98091603)

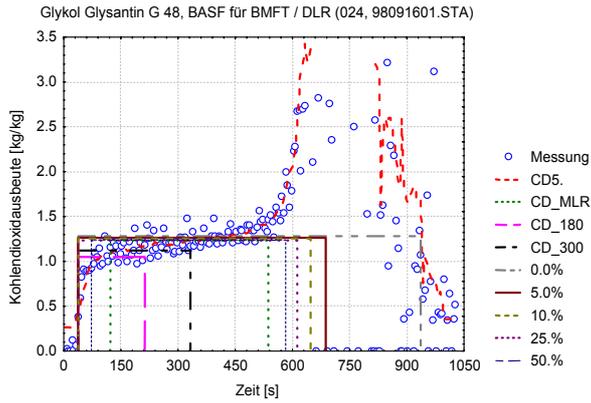


Diagramm F.64 25 kW m⁻², ca. 400 l min⁻¹, Index 24 (Versuch 98091601)

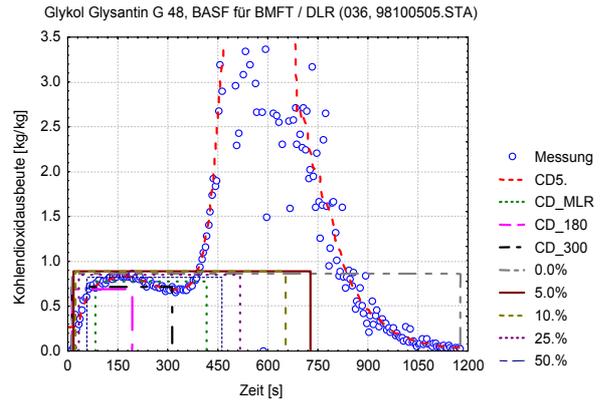


Diagramm F.65 40 kW m⁻², ca. 50 l min⁻¹, Index 36 (Versuch 98100505)

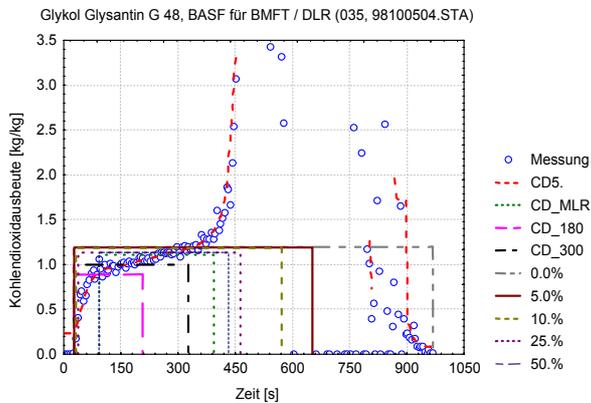


Diagramm F.66 40 kW m⁻², ca. 100 l min⁻¹, Index 35 (Versuch 98100504)

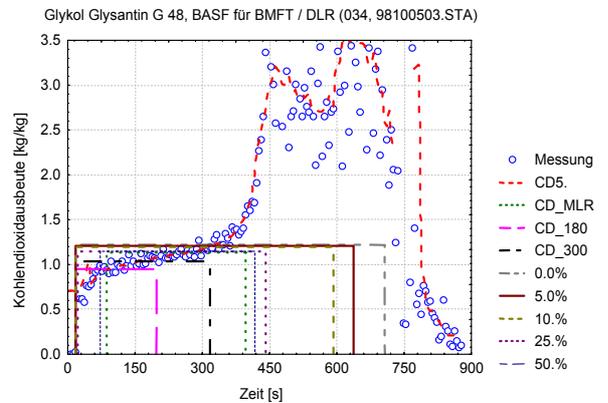


Diagramm F.67 40 kW m⁻², ca. 200 l min⁻¹, Index 34 (Versuch 98100503)

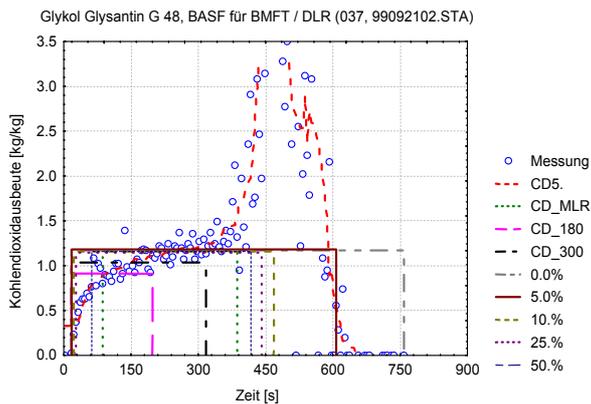


Diagramm F.68 40 kW m⁻², ca. 400 l min⁻¹, Index 37 (Versuch 99092102)

F.6 Kohlenmonoxid Glykol Glysantin G 48

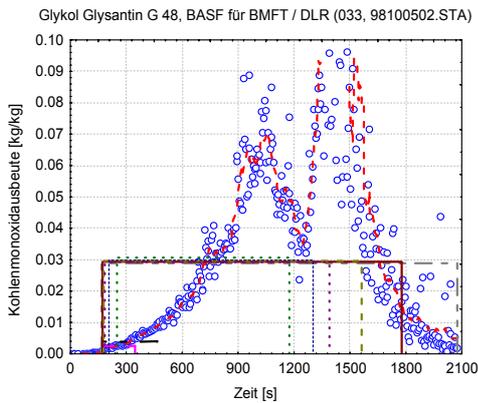


Diagramm F.69 15 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 33 (Versuch 98100502)

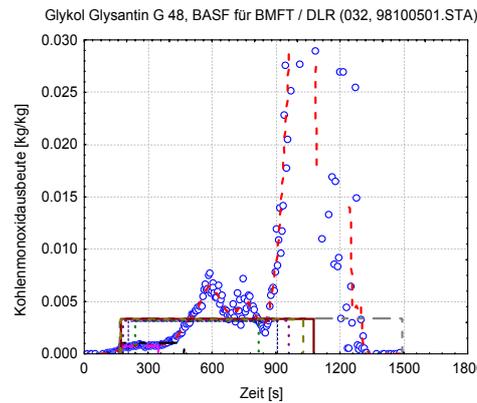


Diagramm F.70 15 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 32 (Versuch 98100501)

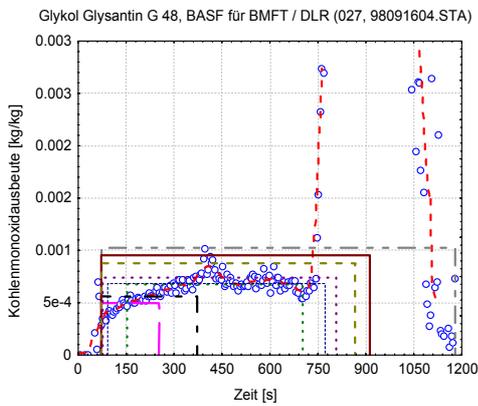


Diagramm F.71 15 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 27 (Versuch 98091604)

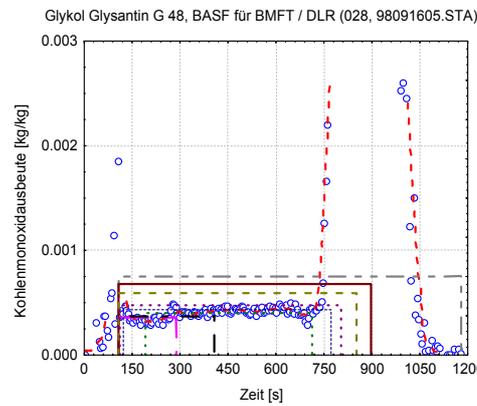


Diagramm F.72 15 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 28 (Versuch 98091605)

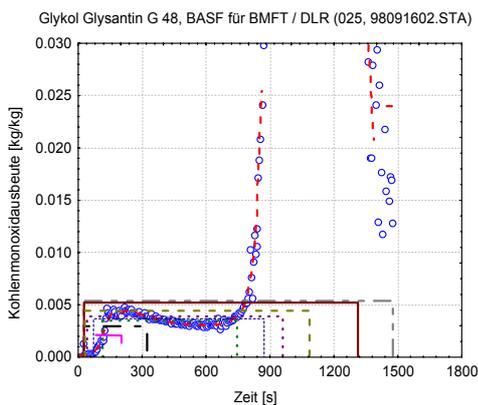


Diagramm F.73 25 kW m^{-2} , ca. 25 l min^{-1} , Index 25 (Versuch 98091602)

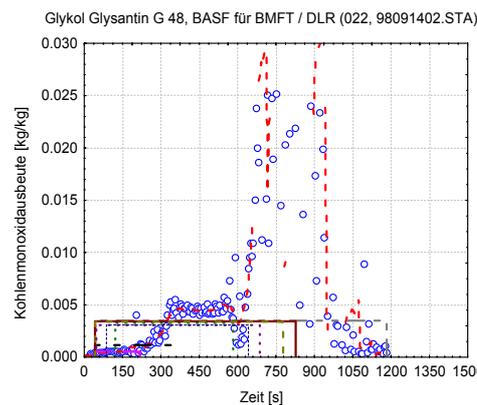


Diagramm F.74 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 22 (Versuch 98091402)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

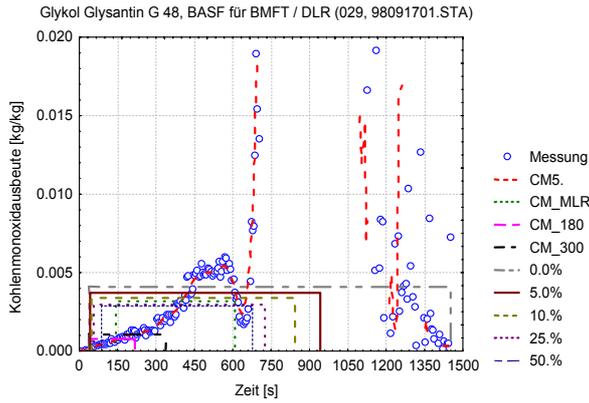


Diagramm F.75 25 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 29 (Versuch 98091701)

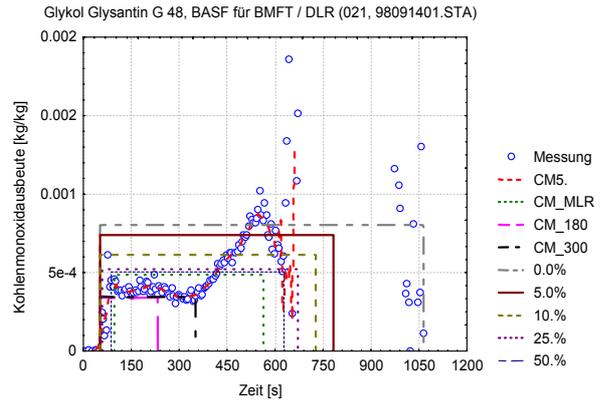


Diagramm F.76 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 21 (Versuch 98091401)

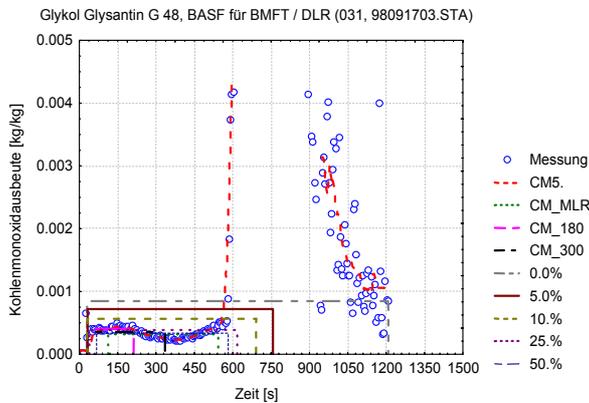


Diagramm F.77 25 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 31 (Versuch 98091703)

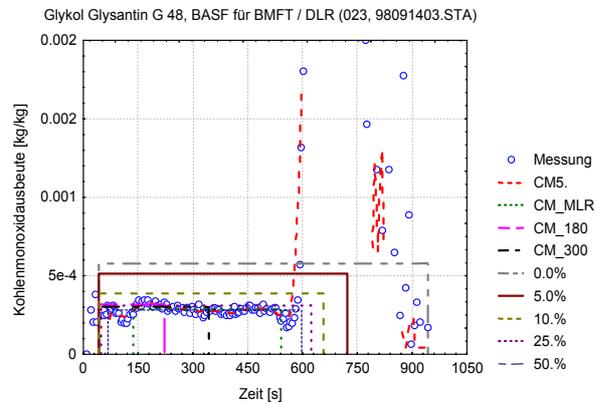


Diagramm F.78 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 23 (Versuch 98091403)

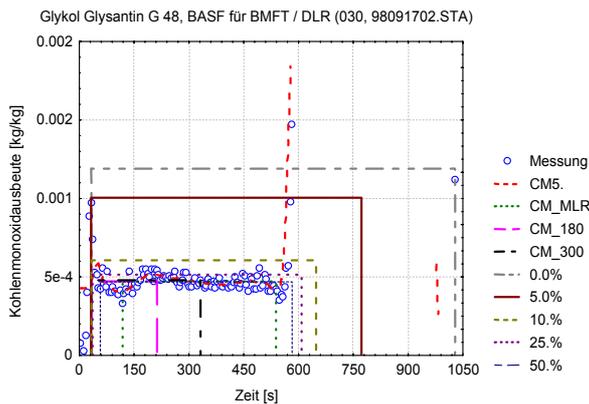


Diagramm F.79 25 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 30 (Versuch 98091702)

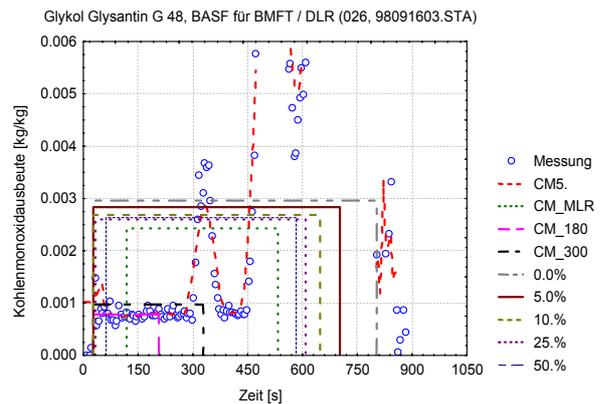


Diagramm F.80 25 kW m^{-2} , ca. 300 l min^{-1} , Index 26 (Versuch 98091603)

F Anhang zu Teil B: Ergebnisse der Versuche mit Glykol Glysantin G 48

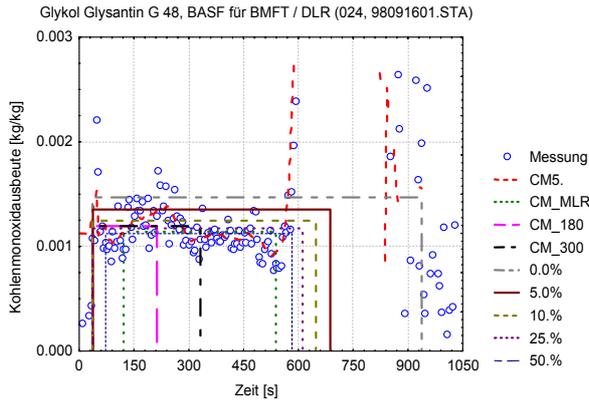


Diagramm F.81 25 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 24 (Versuch 98091601)

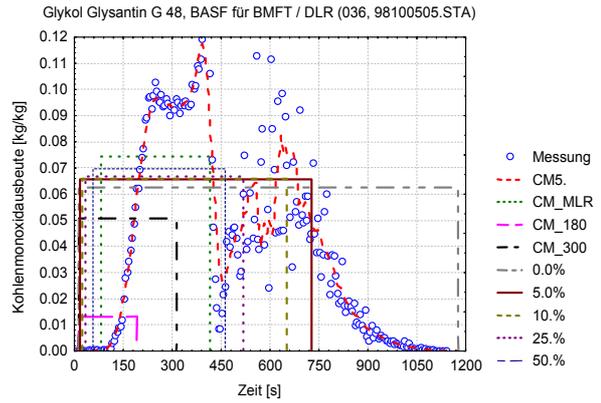


Diagramm F.82 40 kW m^{-2} , ca. 50 l min^{-1} , Index 36 (Versuch 98100505)

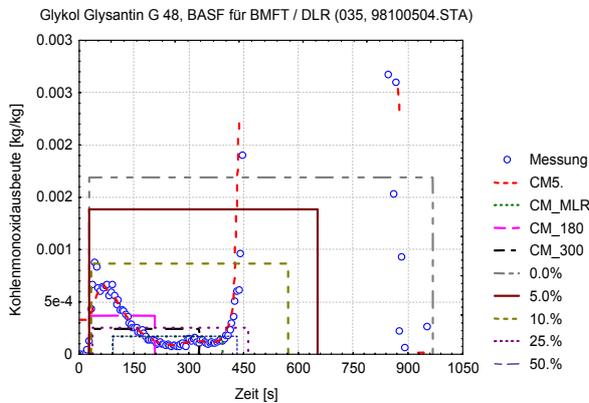


Diagramm F.83 40 kW m^{-2} , ca. 100 l min^{-1} , Index 35 (Versuch 98100504)

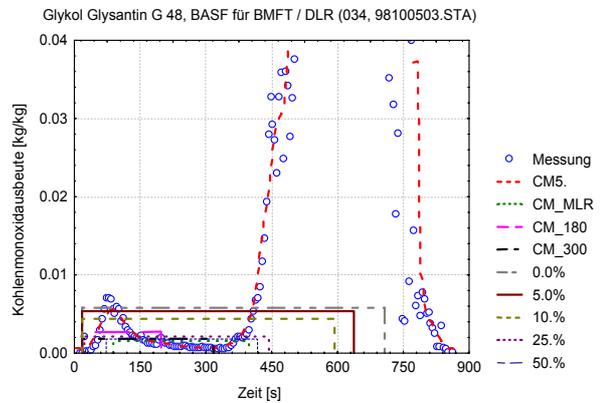


Diagramm F.84 40 kW m^{-2} , ca. 200 l min^{-1} , Index 34 (Versuch 98100503)

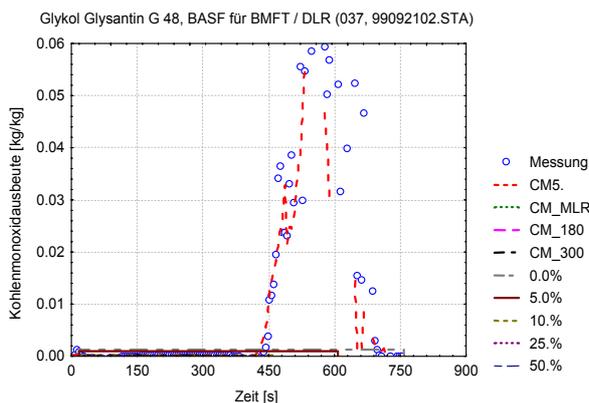


Diagramm F.85 40 kW m^{-2} , ca. 400 l min^{-1} , Index 37 (Versuch 99092102)

Lebenslauf

Zur Person:

Name: Jürgen Will

Geburtsdatum: 26. Dezember 1962

Geburtsort: Düsseldorf

Familienstand: verheiratet mit Dr. Annegrete Meyer-Will, geb. Meyer,
seit dem 4. August 1995,
ein Kind, Alexander Sebastian Will, geb. 1. August 2000

Eltern: Hallü Will, Technischer Regierungshauptsekretär i. R.,
Rosemarie Will, geb. Ellerbeck, Hausfrau

Schul- und Berufsausbildung:

August 1969 - Juli 1973 Grundschule Gettorf

Juli 1973 - Juni 1982 Jungmannschule Eckernförde
mit Abschluss des Abiturs

Juli 1982 - Juni 1984 Wehrdienst mit Ausbildung zum Unteroffizier,
letzter Dienstgrad: Stabsunteroffizier d. R.

Oktober 1984 - Mai 1992 Studium der Physik an der
Technischen Universität Braunschweig,
Diplomarbeit am Institut für Halbleiterphysik und Optik,
Diplomprüfungen im Mai 1992

Berufstätigkeit:

01.09.1992 - 30.09.2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe,
Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen
Universität Braunschweig, Fachgebiet Brandschutz und
Grundlagen des Massivbaus

seit 01.10.2001 Mitarbeiter bei HHP Nord/Ost Beratende Ingenieure
GmbH, Braunschweig

Braunschweig, August 2005