

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Rauchabführung aus hohen und weitläufigen  
Bauwerken im Brandfall für den Personenschutz  
Teil 2

89

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER LÄNDER  
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,  
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder,  
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz  
und zivile Verteidigung**

**Forschungsbericht Nr. 89**

**Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken im  
Brandfall für den Personenschutz**

**Fortsetzung von Forschungsbericht Nr. 79**

Von  
Dipl.-Ing. Reiner John  
Dipl.-Ing.(FH) Tanja Stolz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
April 2002

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>0. SYMBOLVERZEICHNIS</b>	<b>IV</b>
<b>BERICHTSKENNBLATT</b>	<b>1</b>
<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>2</b>
<b>2. GEFÄHRDUNG VON PERSONEN DURCH BRANDRAUCH</b>	<b>2</b>
<b>3. AUSLEGUNG VON ANLAGEN ZUR ABFÜHRUNG DES BRANDRAUCH- LUFTGEMISCHES AUS ATRIEN</b>	<b>4</b>
3.1 Allgemeine Grundlagen	4
<b>4 VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG VON AUSLEGUNGSDATEN FÜR RAUCHABZUGSANLAGEN</b>	<b>7</b>
4.1 Beschreibung des Versuchsraumes und der Meßsysteme	7
4.2 Installierte Messsysteme	8
4.2.1 Massenverlust des Brandgutes	8
4.2.2 Temperatur im Brandraum bzw. über der Brandlast	8
4.2.3 Abgasvolumenstrom und dessen Zusammensetzung	8
4.2.4 Temperaturverteilung in der Brandversuchshalle	8
4.2.5 CO <sub>2</sub> -Konzentration innerhalb der Brandversuchshalle	9
4.2.6 Höhenlage der Unterseite des unterhalb des Daches angesammelten Brandrauch- Luftgemisches	9
4.2.7 Durch die Rauchsicht hervorgerufene Druckdifferenz	10
<b>5. DURCHGEFÜHRTE BRANDVERSUCHE</b>	<b>10</b>
5.1 Zimmerbrand, Brandlast 780 kg, Versuch V01	11
5.2 Zimmerbrand, Brandlast 807 kg, Versuch V02	13
5.3 Abbrand von 205 kg Holzkrippen, Versuch V03	14
5.4 Abbrand von 252 kg Holzkrippen, Versuch V04	14
5.5 Abbrand von 18,5 kg Holzkrippen, Versuch V05	15
5.6 Abbrand von 83 kg Kartons, Versuch V06	16
5.7 Abbrand von 423 kg Kartons, mit Sprinklereinsatz, Versuch V07	17
<b>6. MESSERGEBNISSE DER EINZELNEN BRANDVERSUCHE</b>	<b>17</b>
6.1 Abbrandraten, Brandrauchvolumen und theoretische Wärmefreisetzung	17
6.2 Temperaturverteilung in der Rauchsicht unterhalb der Decke	21
6.3 CO <sub>2</sub> -Konzentrationen innerhalb der Versuchshalle	25
6.4 Zusammensetzung der aus der Brandversuchshalle abgesaugten Brandgase	25

## II

6.5 Druckdifferenz zwischen dem Boden und dem Dach der Brandversuchshalle	26
<b>7. BEWERTUNG VON EINZELNEN DATEN</b>	<b>27</b>
7.1 Tatsächlich freigesetzter Wärmestrom	27
7.2 Verdünnung der Brandgase	29
<b>8. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>29</b>
<b>9. LITERATUR</b>	<b>31</b>
<b>10. BILDER</b>	<b>32</b>

## TABELLEN

<b>Tabelle 1:</b>	Durchgeführte Brandversuche	11
<b>Tabelle 2:</b>	Maximal freigesetzter theoretischer Wärmestrom	19
<b>Tabelle 3:</b>	Zusammensetzung des Brandrauchs und Brandrauchvolumen bei vollständiger Verbrennung von 1 kg trockenen und aschefreiem Holz	19
<b>Tabelle 4:</b>	Daten für die unvollständige Verbrennung von Holz	20
<b>Tabelle 5:</b>	Zusammensetzung des Brandrauchs und Brandrauchvolumen bei einem Rußfaktor von 0,25, Holz, trocken und aschefrei	21
<b>Tabelle 6:</b>	Maximalwerte der Mittelwerte der Temperaturen in den verschiedenen Messebenen	24
<b>Tabelle 7:</b>	Maximalwerte der Mittelwerte der CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in den verschiedenen Messebenen sowie der abgesaugten Abgase	25
<b>Tabelle 8:</b>	Zusammensetzung der aus der Brandversuchshalle abgesaugten Abgase bei jeweils dem Maximalwert von CO <sub>2</sub>	26
<b>Tabelle 9:</b>	Bei den Versuchen gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen dem Hallendach und der freien Umgebung	27
<b>Tabelle 10:</b>	Vergleich der theoretischen mit der tatsächlichen Wärmefreisetzung	28
<b>Tabelle 11:</b>	Minimale Verdünnungsfaktoren der aus der Brandversuchshalle abgeführten Abgase	29

## 0. SYMBOLVERZEICHNIS

## FORMELZEICHEN

$C_p$	Spezifische Wärme	$\text{kJ/kg K}$
$c$	Geschwindigkeit	$\text{m/s}$
$d$	Durchmesser	$\text{m}$
$D$	Schichtdicke	$\text{m}$
$dm$	differentieller Massenstrom	$\text{kg/s m}$
$dV$	differentieller Volumenstrom	$\text{m}^3/\text{h m}$
$F$	Fläche der Öffnungsquerschnitte	$\text{m}^2$
$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m/s}^2$
$H_O$	Brennwert	$\text{kJ/kg}$
$H_U$	Heizwert	$\text{kJ/kg}$
$k$	Brandausbreitungsexponent	$1/\text{s}$
$K$	Konstante, siehe Gleichung(8)	
$m$	Masse	$\text{kg}$
$\dot{m}$	Abbrandrate	$\text{kg/s}$
$\Delta p$	Druckdifferenz	$\text{N/m}^2$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$\text{kW}$
$t$	Temperatur	$^\circ\text{C}$
$\Delta t$	Temperaturdifferenz	$\text{K}$
$T$	Temperatur	$\text{K}$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\text{m}^3/\text{s}$
$V$	Verdünnungsfaktor	$(v = V_{BrL} / V_{Brst})$
$Z$	Höhe der rauchfreien Zone über der Brandgutoberfläche	$\text{m}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg/m}^3$
$\tau$	Branddauer	$\text{s}$

**INDICES**

a	aerodynamisch
ab	abgesaugt
Br	Brandrauch
Brl	Brandrauch-Luftgemisch
Geb	Gebäude
kon	konvektiv
L	Luft
N	bezogen auf den Normzustand
st	Strömung
th	thermisch
theo	theoretisch
Tp	Taupunkt
verd	Verdampfung
o	Anfangszustand

## BERICHTSKENNBLATT

<b>Nummer des Berichtes:</b> 89	<b>Titel des Berichtes:</b> Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken im Brandfall für den Personenschutz. Fortsetzung von Forschungsbericht Nr. 79	<b>ISSN:</b> 0170-0060	
<b>Autor:</b> Dipl.-Ing. Reiner John Dipl.-Ing. (FH) Tanja Stolz		<b>durchführende Institution:</b> Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Hertzstraße 16 D-76187 Karlsruhe	
<b>Nummer des Auftrages:</b>		<b>auftraggebende Institution:</b> Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
<b>Abschlussdatum:</b> September 2004			
<b>Seitenzahl:</b> 72 (37 Seiten in Farbe) *	<b>Bilder:</b> 77	<b>Tabellen:</b> 11	<b>Literaturverweise:</b> 9
<b>Kurzfassung:</b> Brände in Räumen führen je nach den gegebenen Randbedingungen zu einer unterschiedlich schnellen Verqualmung dieser Räume und damit zu einer Gefährdung der Personen bei der Evakuierung und bei der Rettung von Verletzten sowie zu Behinderungen beim Löscheinsatz der Feuerwehr. Um dieses Problem zu verhindern bzw. zu verringern, muss Brandrauch aus dem brennenden Raum abgeführt werden. Die Auslegung eines Systems zur Rauchabführung sollte dabei so erfolgen, dass es unter allen bei unterschiedlichen Brandereignissen in dem betreffenden Raum auftretenden Möglichkeiten und bei den für die geographische Lage anzusetzenden extremen meteorologischen Bedingungen die geforderte Schutzwirkung erreicht. Der bei einem Brand entstehende Brandrauch kühlt sich durch das Einmischen von Raumluft ab und sammelt sich unterhalb der Decke. Da dieses Brandrauch-Luftgemisch eine höhere Temperatur als die Umgebungsluft besitzt, ergibt sich eine Druckdifferenz gegenüber der freien Umgebung. Bei hohen Räumen ist die Decke gleichzeitig das Dach und so sorgen Öffnungen dafür, dass ein Teil des Brandrauch-Luftgemisches abströmen kann und Frischluft in den Raum einströmt. Somit bildet sich eine rauchfreie Zone über dem Boden und der Brandrauch wird abgekühlt. Je nach Wetterlage sammelt sich das Brandrauch-Luftgemisch in einer bestimmten Höhe an und kann nicht ins Freie abströmen. Das Brandrauch-Luftgemisch sinkt bis auf den Boden und somit tritt eine Gefährdung der zu evakuierenden Personen ein. Somit müssen technische Maßnahmen verhindern, dass kein Brandrauch-Luftgemisch in Bereiche einströmt, in denen sich Personen aufhalten. Je großflächiger das Gebäude und je größer die Anzahl der Personen in einem Gebäude ist, um so wichtiger ist die Ausführung solcher Anlagen, um eine sichere Rauchfreihaltung aller Rettungswege unter allen betrieblichen und klimatischen Bedingungen zu gewährleisten. Die Auslegung solcher baulicher Anlagen zur Abführung des Brandrauch-Luftgemisches aus Atrien erfolgt nach Berechnungsmethoden, die aufgrund von durchgeführten Versuchen und theoretischen Überlegungen aufgestellt wurden. Die Höhe der Temperatur des Brandrauch-Luftgemisches unterhalb der Decke sowie die Höhe der rauchfreien Zone hängen hauptsächlich von dem bei einem Brand freigesetzten Wärmestrom, der Gesamthöhe des Raumes und der Öffnungen im Dach ab. Die Ergebnisse der in diesem Bericht beschriebenen Brandversuche sollen zur weiteren Verbesserung der Auslegungskriterien für Rauchabzugssysteme aus Atrien sowie zu Aussagen zum Anwendungsbereich unterschiedlicher Modellvorgaben führen. Zur Bewertung der Rauchabführung wurden verschieden Messsysteme eingesetzt. Es wurde bei allen Versuchen eine insbesondere vertikale Temperaturverteilung in der Rauchschrift unterhalb des Daches der Versuchshalle festgestellt. In den einzelnen Ebenen ergab sich eine eindeutige Staffelung der Temperaturen, die bei kleinen Wärmefreisetzungsraten geringer ausfielen. Die Temperaturen sind generell bei Bränden mit größerer Energiefreisetzung höher.			
<b>Schlagwörter:</b> Hohes-Haus; Hochhaus; Lichthof; Rauch; Luft; Mischung; Brand; Rauchfreihaltung; Auftrieb; Berechnung			

\* Farbseiten auf CD-ROM gegen Kostenerstattung (5,00€) erhältlich

## 1. EINLEITUNG

Brände in Räumen führen je nach den gegebenen Randbedingungen zu einer unterschiedlich schnellen Verqualmung dieser Räume und damit zu einer Gefährdung der Personen bei der Evakuierung und bei der Rettung von Verletzten sowie zu Behinderungen beim Löscheinsatz der Feuerwehr. Um dieses Problem zu verhindern bzw. zu verringern, muss Brandrauch aus dem brennenden Raum abgeführt werden. Die Auslegung eines Systems zur Rauchabführung muss dabei so erfolgen, dass es unter allen bei unterschiedlichen Brandereignissen in dem betreffenden Raum auftretenden Möglichkeiten und bei den für die geographische Lage anzusetzenden extremen meteorologischen Bedingungen die geforderte Schutzwirkung erreicht.

## 2. GEFÄHRDUNG VON PERSONEN DURCH BRANDRAUCH

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch enthält alle bei der Aufheizung des Brandgutes entstehenden Dämpfe und die bei der anschließenden Verbrennung eines Teils dieser Dämpfe entstehenden Reaktionsprodukte. Da die Verbrennungsreaktionen nicht vollständig ablaufen, ist im Brandrauch neben den z.T. wieder kondensierten Anteilen auch Ruß enthalten. Auf diesen Rußpartikeln kondensieren die höhersiedenden Produkte des Brandrauches bzw. die bei der Aufheizung entstandenen nicht verbrannten Dämpfe. Ebenso wie von den entstehenden Gasen von Verbrennungsprodukten und von den unverbrannten Dämpfen geht auch von diesen mit Schadstoffen belegten Rußpartikeln eine hohe toxische Gefährdung aus, da diese Rußpartikel zum größten Teil einen Durchmesser kleiner  $1\ \mu\text{m}$  besitzen /1/ und damit lungengängig sind.

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch steigt aufgrund des thermischen Auftriebes nach oben auf. Dabei wird Luft aus der Umgebung mitgerissen. Für Personen ergeben sich durch dieses Brandrauch-Luftgemisch zusätzlich zur direkten gesundheitlichen Gefährdung durch die toxische Wirkung auch indirekte Gefahren durch die Sichtbehinderung, die das Verlassen des Gebäudes erschwert - Erhöhung der toxischen Gefährdung durch verlängerte Aufnahmezeiten der Schadstoffe - bzw. unmöglich macht. Eine Sichtbehinderung erschwert auch den Rettungskräften, Verletzte und nicht gehfähige Personen rasch zu retten und eine wirkungsvolle Brandbekämpfung durchzuführen.

Das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch nimmt durch weitere Lufteinmischung an Volumen zu und kühlt sich ab. Dabei verringert sich auch der thermische Auftrieb. Das Aufsteigen des

Brandrauch-Luftgemisches kommt in derjenigen Höhe zum Stillstand, in der die umgebende Luft die gleiche Dichte wie das Brandrauch-Luftgemisch hat. Bei der dabei vorhandenen großen Verdünnung des Brandrauches mit Luft ist dies dann der Fall, wenn die Temperatur des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches nicht mehr über der Umgebungstemperatur liegt.

Innerhalb eines Raumes gelten für das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch die gleichen Bedingungen wie im Freien, allerdings ist die freie Aufstiegshöhe durch das Dach begrenzt. Bei großen Höhen eines Raumes kann es wie bei einer Inversions-Wetterlage im Freien dazu kommen, dass die Aufstiegshöhe des Brandrauch-Luftgemisches durch die Dichtegleichheit des Brandrauch-Luftgemisches mit der Luft im Raum infolge dieser Sperrschicht begrenzt wird. Das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch sammelt sich dann in dieser Höhe.

Kann dieses Brandrauch-Luftgemisch, das sich unterhalb des Daches oder der Sperrschicht ansammelt nicht ins Freie abströmen, dann sinkt die Unterseite des Brandrauch-Luftgemisches bis auf den Boden des Brandraumes ab und der Brandrauch breitet sich in alle Bereiche aus, die vom Brandort nicht hermetisch abgetrennt sind.

Reichert sich das Brandrauch-Luftgemisch in den Bereichen an, über die die Personen das Gebäude verlassen müssen, so führt dies zu den zuvor genannten Gefährdungen - gesundheitliche Gefahren durch die toxische Wirkung sowie indirekte Gefahren durch die Sichtbehinderung, die das Verlassen des Gebäudes erschwert bzw. unmöglich macht -.

Durch technische Maßnahmen muss daher verhindert werden, dass das Brandrauch-Luftgemisch in Bereiche einströmen bzw. sich dort ansammeln kann, wo sich Personen aufhalten bzw. durch welche die Personen das Gebäude verlassen müssen. Je großflächiger zusammenhängende Bereiche in Gebäuden und baulichen Anlagen sind und je mehr Personen sich in einem Gebäude aufhalten, desto wichtiger wird die Ausführung der Anlagen, die das in einem Brandfall entstehende Brandrauch-Luftgemisch so ins Freie abführen, dass eine Beeinträchtigung von Personen ausgeschlossen werden kann. Die sichere Freihaltung aller Rettungswege von Brandrauch-Luftgemisch muss dabei unter allen betrieblichen und klimatischen Bedingungen gewährleistet werden. Die erforderliche Zeitdauer für diese Maßnahme ergibt sich aus dem Brandschutzkonzept und dem zu führenden Nachweis über die Einhaltung der Schutzziele.

Bezüglich der Gefährdung von Personen durch Brandrauch wird auf die entsprechenden

Ausführungen in /2/ sowie auf die in /3/, /4/ und /5/ dargelegten Verhaltensweisen und Gefährdungen von Personen durch einen Brand allgemein und insbesondere durch Brandrauch hingewiesen.

Aus /3/, /4/ und /6/ ergibt sich, dass Brandrauch die häufigste Ursache für Gesundheitsschädigungen und für Todesfälle als Folge von Bränden ist.

### **3. AUSLEGUNG VON ANLAGEN ZUR ABFÜHRUNG DES BRANDRAUCH-LUFTGEMISCHES AUS ATRIEN**

Die Auslegung von Anlagen zur Abführung des Brandrauch-Luftgemisches aus überdachten Innenhöfen und hohen Hallen, im Folgenden als Atrien bezeichnet, erfolgt nach Berechnungsmethoden, die aufgrund von bisher durchgeführten Versuchen sowie theoretischen Überlegungen aufgestellt wurden.

Wesentlich für die Art der (technischen) Auslegung einer Anlage zur Abführung des im Brandfall entstehenden Brandrauch-Luftgemisches sind die von dieser Anlage zu erfüllenden Aufgaben. So ergeben sich wesentliche Unterschiede bei der Auslegung einer Anlage zur Rauchfreihaltung einer Zone von 2 m Höhe bei einer Gesamthöhe des betreffenden Gebäudeteils von 10 m, die für einen durch Brandrauch unbehinderten Einsatz der Feuerwehr erforderlich ist, gegenüber den Anforderungen an eine Anlage, mit der eine rauchfreie Zone von 20 m in einem 24 m hohen Atrium erreicht werden muss, um Rettungswege vom Beginn des Brandes an rauchfrei zu halten.

Im Hinblick auf den vorbeugenden und auch den abwehrenden Brandschutz sind daher die Geräte und Einrichtungen zur Brandrauchabführung aus einem Gebäude wichtige Komponenten des gesamten Brandschutzkonzeptes. Die für dieselbe Funktion der Abführung von Brandrauch eingesetzten Geräte werden in verschiedenen Vorschriften und Richtlinien unterschiedlich benannt:

RWA = Rauch- und Wärmeabzugsanlage

RWG = Rauch- und Wärmeabzugsgerät

RWK = Rauch- und Wärmeabzugsklappen

#### **3.1 Allgemeine Grundlagen**

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch steigt aufgrund des thermischen Auftriebs nach oben und saugt Luft aus der Umgebung ein. Das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch nimmt

daher an Volumen zu und kühlt sich ab. Dabei verringert sich auch der thermische Auftrieb.

Der Massenstrom  $\dot{m}_{\text{BrL}}$  des bei Bränden über dem Brandherd aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches ist z. B. nach /7/ oberhalb der Flammenzone von näherungsweise axialsymmetrischen Brandquellen proportional zum Wert des freigesetzten Wärmestromes  $^{1/3}$  und dem Wert  $Z^{5/3}$ . Dabei ist  $Z$  die Aufstiegshöhe des Brandrauch-Luftgemisches über dem Brandgut.

$$\dot{m}_{\text{BrL}} \approx \dot{Q}^{1/3} \times Z^{5/3} \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

Der Volumenstrom ergibt sich daraus zu:

$$\dot{V}_{\text{BrL}} = \dot{m}_{\text{BrL}} / \rho_{\text{BrL}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2)$$

Die Rauchsäule oberhalb einer Brandfläche wird auch als „Plume“ (engl.) bezeichnet. Letzterer Begriff hat sich allgemein eingebürgert. Die Temperatur in der Symmetrieachse des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches senkrecht über dem Brandgut in Abhängigkeit von der

Wärmefreisetzung  $\dot{Q}$  und der Höhe  $Z$  über dem Brandgut ergibt sich ebenfalls nach /7/ aus Bild 1.

Zur Einsaugung von Umgebungsluft in die Rauchsäule, die sich oberhalb der Brandflächen ausbildet, existiert umfangreiche Literatur. Der in Gleichung (1) für die Masseneinsaugung dargestellte qualitative Zusammenhang beschreibt den Einfluss der wesentlichen variablen Größen, unter den genannten Randbedingungen.

Einen Einblick in die Vielfalt der für unterschiedliche Geometrien von Brandquellen gefundenen Gleichungen und in die Anwendungsgrenzen der jeweiligen Formeln findet man z.B. in /8/.

Für die vorliegende Arbeit wird jedoch die in Gleichung (1) dargestellte Form bevorzugt.

Der Mittelwert der Temperatur des sich unterhalb der Decke eines Raumes ansammelnden Brandrauch-Luftgemisches ergibt sich aus dem konvektiven Wärmestrom abzüglich des an das Gebäude abgegebenen Wärmestromes und dem Massenstrom des Brandrauch-Luftgemisches in derjenigen Höhe, in welcher er in die Rauchsicht eintritt, zu:

$$t_{\text{BrL}} = (\dot{Q}_{\text{konv}} - \dot{Q}_{\text{Geb}}) / (\dot{m}_{\text{BrL}} \times C_{p\text{BrL}}) + t_{\text{L}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

Das frei über dem Brandherd aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch vergrößert mit zunehmender Höhe über dem Brandherd stetig seinen Durchmesser. Der sichtbare Bereich des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemischkegels ergibt sich nach /9/ zu:

$$d_{\text{BrL}} = 0,48 (t_{\text{BrL}} / t_{\text{L}}) \times Z \quad [\text{m}] \quad (4)$$

oder bei großen Höhen Z:

$$d_{\text{BrL}} = 0,5 \times Z \quad [\text{m}] \quad (5)$$

Innerhalb dieses Kegels des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches herrscht ein Unterdruck gegenüber der Umgebung, infolge dessen Luft aus der Umgebung dem Kegel zuströmt. Trifft das mit einer höheren Temperatur als die Umgebung aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch auf die Decke eines Raumes, so staut es sich. Das sich anstauende Brandrauch-Luftgemisch erzeugt einen mit der Dicke der angestauten Schicht und der Temperaturdifferenz zur freien Umgebung zunehmenden Überdruck gegenüber angrenzenden Bereichen. Aus diesem Grund breitet sich das Brandrauch-Luftgemisch unterhalb der ganzen Decke sehr schnell aus und strömt durch vorhandene Öffnungen im Dach ins Freie ab und/oder dringt durch in den Seitenbegrenzungen vorhandene Öffnungen in die dahinter liegenden Räume ein. Diese Grundlagen werden genutzt, um Berechnungen zur Auslegung von Systemen zur Abführung von Brandrauch durchzuführen. Häufig werden hierfür Zonenmodelle verwendet, bei denen angesetzt wird, dass sich unterhalb der Decke eines Raumes eine Rauchsicht mit einer konstanten Temperatur ausbildet. Die Temperatur dieser Rauchsicht wird aus der Wärmefreisetzung des Brandes, der Lufteinmischung in den Brandrauch sowie der Wärmeabgabe an die Umgebung (Gebäude) berechnet. Die Dicke der Rauchsicht ergibt sich aus der Massenbilanz aus dem aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisch und dem über Öffnungen oder Ventilatoren abgeführten Massenstrom. Aus der Dicke der Rauchsicht und deren Temperaturdifferenz zur freien Umgebung kann der thermische Auftrieb berechnet werden, der bei thermisch wirksamen Anlagen zum Ansaugen der Frischluft in den Raum und zum Abführen des Brandrauch-Luftgemisches aus dem Raum zur Verfügung steht.

## 4 VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG VON AUSLEGUNGSDATEN FÜR RAUCHABZUGSANLAGEN

In Fortführung der in /2/ begonnenen Untersuchungen zur Rauchabführung werden in diesem Bericht Brandversuche in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik beschrieben, deren Ergebnisse zur weiteren Verbesserung der Auslegungskriterien für Rauchabzugssysteme aus überdachten Innenhöfen, im folgenden als Atrium bezeichnet, sowie zu Aussagen zum Anwendungsbereich unterschiedlicher Modellvorgaben führen.

### 4.1 Beschreibung des Versuchsraumes und der Meßsysteme

Die Brandversuche wurden in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführt.

Diese Halle ist 30 m lang, 15 m breit, Grundfläche  $450 \text{ m}^2$ , und an den Längsseiten 8 m hoch. Über diesen Längsseiten schließt ein Tonnendach an, das im Scheitel eine Höhe von 12 m über dem Hallenboden hat. Dieses Tonnendach ist einschließlich der Anschlussstellen an den Umfassungswänden so rauchdicht ausgeführt, dass auch bei dem bei großen Brandversuchen auftretenden Überdruck von maximal  $50 \text{ N/m}^2$  kein Brandrauch austritt. Brandrauch, der bei den Versuchen entsteht, kann nur über die unterhalb des Hallendaches verlegten Absaugrohre abgeführt werden (siehe Bilder 2 und 3). Die aus der Halle abgesaugten Abgase werden einer Abgasreinigungsanlage mit thermischer Nachverbrennung zugeführt. Bezogen auf den Normzustand können aus der Brandversuchshalle maximal  $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$  abgesaugt werden. Der Abgasvolumenstrom kann über eine Dralldrossel kontinuierlich bis auf einen Wert von  $7.000 \text{ m}^3/\text{h}$  reduziert werden.

Zuluft strömt bei geschlossenem Hallentor über die seitlich in den Hallenboden eingelassenen beiden Zuluftkanäle in die Halle ein (siehe Bild 2 und 3). Diese Kanäle sind ca. 1,5 m tief und 1,0 m breit. Auf ihrer Länge von jeweils 25 m (siehe Bild 3) sind sie nur mit Gitterrosten abgedeckt. Bei einer freien Austrittsfläche der Luft aus den Kanälen in die Versuchshalle von ca.  $32 \text{ m}^2$  ergibt sich bei dem maximalen Abgasvolumenstrom von  $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$  eine Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft von 0,3 m/s. Diese Strömungsgeschwindigkeit ist so gering, dass dadurch der Brandablauf nicht beeinflusst wird.

Die von den in der Versuchshalle installierten Messaufnehmern und Videokameras ausgehenden

elektrischen Signale werden auf jeweils eine von 4 in der Versuchshalle vorhandenen Anschlussstellen geschaltet und über mehrfach abgeschirmte Leitungen zur Messwarte übertragen, wo diese Daten abgespeichert und teilweise online ausgewertet werden. Messwerte und deren zeitliche Verläufe können direkt auf Bildschirmgeräten angezeigt werden.

## **4.2 Installierte Messsysteme**

Bei den hier zur Bewertung der Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken durchgeführten Versuchen wurden die im folgenden beschriebenen Messsysteme eingesetzt.

### **4.2.1 Massenverlust des Brandgutes**

Bei den meisten der durchgeführten Brandversuche war der Boden des jeweiligen Brandversuchsstandes einschließlich des 25 m<sup>2</sup> großen Brandraumes (Lage siehe Bild 3) als Waageplattform ausgebildet. Damit war es möglich, den Massenverlust während des Brandversuches zu ermitteln. Bei kleineren Versuchen außerhalb dieses Brandraumes wurden teilweise zusätzliche Waagen eingesetzt.

### **4.2.2 Temperatur im Brandraum bzw. über der Brandlast**

Die Temperatur in dem 25 m<sup>2</sup> großen Brandraum wurde mit 5 Thermoelementen ca. 5 cm unterhalb der Decke gemessen. In den Diagrammen des Kapitels 5 ist für Versuche in diesem Brandraum jeweils der Mittelwert dieser Temperaturen aufgetragen. Im vorliegenden Bericht bezeichnet „Mittelwert“ stets den arithmetischen Mittelwert. Bei Versuchen außerhalb dieses Brandraumes ist eine Temperatur über der Brandlast angegeben.

### **4.2.3 Abgasvolumenstrom und dessen Zusammensetzung**

Der aus der Halle abgesaugte Volumenstrom wurde aus dem an der Stelle 1 in Bild 4 mittels einer Prallkopfstauronde gemessenen Staudruck und der Temperatur an dieser Stelle berechnet. An den im Bild 4 eingezeichneten Stellen 0.1 und 0.2 wurde die Temperatur des über die beiden Absaugrohre abgesaugten Abgasstromes gemessen sowie dessen Anteil an O<sub>2</sub>, CO und CO<sub>2</sub> bestimmt.

### **4.2.4 Temperaturverteilung in der Brandversuchshalle**

Innerhalb der Brandversuchshalle wurden an bis zu 52 Stellen die Temperatur der Luft bzw. des Brandrauch-Luftgemisches gemessen. Die Thermoelemente befanden sich an Messketten, die von der Decke der Halle zum Boden gespannt waren. Ihre Anordnung über der Grundfläche der

Versuchshalle ist ebenfalls im Bild 4 eingetragen.

Die Messketten 1 bis 5 sind mit Ausnahme der Messkette 2 in der Mittelachse der Brandversuchshalle angeordnet. Die Messkette 2 ist auf die Mittelachse der Fensteröffnung des 25 m<sup>2</sup> großen Brandraumes BR 1 versetzt worden, um an diesen Stellen die Temperatur der aus der Brandraumöffnung austretenden Brandgase sowie die Achsentemperatur des Plumes zu messen.

Die Messketten 6 bis 15 sind in einem Abstand von 5 m von der Mittelachse (ca. 2,5 m von den Seitenwänden) angeordnet, wie im Bild 4 angegeben. Die Temperaturmessstellen, Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 1,6 mm, sind an allen Messketten in den Höhen 5 m, 7 m und 9 m über dem Boden der Brandversuchshalle angeordnet. Messstellen in einer Höhe von 3 m sind bei einigen Versuchen an den Messketten 1, 5, 6, 10, 11 und 15 angeordnet. Eine weitere Messstelle ist an der Messkette 2 in 10,5 m Höhe vorhanden. Die Temperatur der Zuluft wurde an jeweils einer Stelle in den beiden Zuluftkanälen gemessen.

#### **4.2.5 CO<sub>2</sub>-Konzentration innerhalb der Brandversuchshalle**

Innerhalb der Brandversuchshalle wurde bei einigen Versuchen an 10 Stellen die CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen. Dazu wurde die Luft bzw. das Brandrauch-Luftgemisch der Versuchshalle in den Höhen 7 m und 9 m der Messketten 1 bis 5 über Kupferrohre kontinuierlich abgesaugt und mittels einer Umschalteinheit für jeweils 6 Eingänge mit einer Taktzeit von 15 s auf zwei Infrarot-Gasanalysegeräte geschaltet. Zusätzlich zu diesen 10 Messstellen wurden mit diesem Verfahren auch die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Abgasrohren an den Messstellen 0.1 und 0.2 ermittelt. Damit ergaben sich je Messgerät 6 Messstellen, so dass nach jeweils 90 s wieder die gleiche Messstelle analysiert wurde.

#### **4.2.6 Höhenlage der Unterseite des unterhalb des Daches angesammelten Brandrauch-Luftgemisches**

Die Höhenlage der Unterseite des unterhalb des Daches der Brandversuchshalle angesammelten Brandrauch-Luftgemisches („Rauchschicht“) wurde bei den meisten Versuchen aufgrund von Videoaufzeichnungen durch Abgleich mit der Sichtbarkeit von Höhenmarkierungen ermittelt. Bei einigen Versuchen wurde zusätzlich eine spezielle Höhenmesseinrichtung eingesetzt. Diese Höhenmesseinrichtung besteht aus der Videokamera und einem Laser, die auf einer während eines Brandversuches in der Höhe verfahrbaren Plattform montiert sind. Zusätzlich ist auf der Unterseite der Plattform noch ein Suchscheinwerfer montiert, mit dem die Unterseite des Brandrauch-

Luftgemisches bedarfsweise angestrahlt werden kann.

Der Laser einschließlich der Führung der Plattform sind so ausgerichtet, dass der Laserstrahl in jeder Höhenstellung immer genau waagrecht in Längsrichtung der Versuchshalle verläuft. Auf der dem Laser gegenüberliegenden Seite ist über die ganze Höhe der Versuchshalle eine weiß beschichtete Platte angebracht worden, auf der der Laserstrahl gut sichtbar reflektiert wird. Die auf der Plattform befestigte Videokamera erfasst den Bereich, in dem der Laserstrahl verläuft.

Die Plattform mit den darauf montierten Geräten kann über einen motorbetriebenen Seilzug an einer Führungsschiene an der hinteren Stirnseite der Halle in der Höhe manuell verfahren werden. Die Höhe des Laserstrahls über dem Boden wird über ein mit der Plattform mitlaufendes Maßband ermittelt. Die Höhenangabe wird über eine zweite Videokamera aufgenommen. Beide Bilder werden gemischt, auf einem Monitor in der Messwarte dargestellt und mit einem Videobandgerät zur weiteren Auswertung aufgezeichnet. Während der Versuche wurde die Höhe des Laserstrahls so verändert, dass er sich immer an der untersten optisch detektierbaren Grenze der Rauchschrift befand.

#### **4.2.7 Durch die Rauchschrift hervorgerufene Druckdifferenz**

An der Stirnseite der Versuchshalle wurde mittels temperierter Kupferrohre bei einigen Versuchen die Druckdifferenz zwischen dem Boden und der Decke der Versuchshalle in 3 m und 5 m Entfernung von der Stirnwand gemessen. Die entsprechenden Messstellen  $dp_2$  und  $dp_3$  sind im Bild 4 eingetragen.

### **5. DURCHGEFÜHRTE BRANDVERSUCHE**

In Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Bewertung des im Brandfall aus hohen und weitläufigen Bauwerken abzuführenden Brandrauch-Luftgemisches wurden die in der Tabelle 1 aufgeführten Versuche durchgeführt. Im folgenden wird der Ablauf der einzelnen Versuche beschrieben.

**Tabelle 1: Durchgeführte Brandversuche**

Versuch-Nr.	Brandgut: Art, Masse	Anordnung innerhalb der Versuchshalle
V01	Möbel, 780 kg	Brandraum „BR1“
V02	Möbel, 807 kg	Brandraum „BR1“
V03	Holzkruppe, 205 kg	Brandraum „BR1“
V04	Holzkruppe, 252 kg	Brandraum „BR1“
V05	Holzkruppe, 18 kg	frei in Halle
V06	Karton, 83 kg	frei in Halle
V07	Kartons, 423 kg, Sprinklereinsatz	frei in Halle

### 5.1 Zimmerbrand, Brandlast 780 kg, Versuch V01

Bei diesem Versuch wurden Möbel innerhalb des Brandraums BR1 (vgl. Bild 4) der Versuchshalle entzündet. Der Brandraum hatte eine Grundfläche von ca. 5 x 5 m sowie eine Höhe von 2,7 m. Die im Brandraum vorhandene Fensteröffnung von 1,5 m x 1,5 m blieb während des ganzen Versuchsablaufes unverschlossen. Die Tür zum Brandraum wurde nach der Zündung geschlossen und erst zum Ablöschen des Brandes wieder geöffnet. Der in den Bildern 3 und 4 eingezeichnete Brandraum wurde bei diesem Versuch entsprechend dem Bild 5 überwiegend mit Altmöbeln eingerichtet. Die Brandlast betrug 780 kg.

Die Möbel wurden mittels 0,5 l Brennspritus in Brand gesetzt. Der Brennspritus war in eine 20 cm x 30 cm große Wanne unterhalb eines Schrankes eingefüllt und gezündet worden. Der Brand konnte sich ohne äußere Beeinflussung ausbreiten. Nach einer Branddauer von 18 min 12 s wurde von der Feuerwehr begonnen, den Brand abzulöschen.

In den Bildern 6 bis 17 sind die bei diesem Versuch erfassten Messwerte aufgetragen. Im einzelnen sind dies die folgenden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragenen Werte:

- Brandlast und mittlere Deckentemperatur im Brandraum (Bild 6).

- Massenverlust des Brandgutes sowie die Deckentemperatur im Brandraum. Die Kurve TE gibt den Verlauf der aus 5 Messstellen unterhalb der Decke gemittelten Brandraumtemperatur wieder.
- Bild 7 zeigt die Abbrandrate in kg/min und den hieraus errechneten theoretischen Wärmestrom.
- 15 Temperaturen in 3 Ebenen (5 m, 7 m, 9 m) innerhalb der Versuchshalle (Bilder 8 bis 10). Die Temperaturlegende in den Diagrammen weist den Messstellen die Temperaturen folgendermaßen zu:

Temp. x.1 ... Messstelle von Messkette x.5 m Höhe  
 Temp. x.2 ... Messstelle von Messkette x.7 m Höhe  
 Temp. x.3 ... Messstelle von Messkette x.9 m Höhe  
 (x: 1...15)

In der Bildunterschrift von Bild 8 entspricht „T2.1“ der Bezeichnung „Temp. 2.1“ aus der Legende. Dies ist in den weiteren Bildunterschriften in analoger Weise fortgeführt.

- Mittelwerte der Temperaturen in den einzelnen Ebenen sowie eine zusätzliche Temperatur in 10,5 m Höhe bei Messkette 3 und die Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 11).
- CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in 5 m und 7 m Höhe an 4 Messstellen sowie deren Mittelwerte und die CO<sub>2</sub>-Konzentration der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bilder 12 bis 14).
- O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 15). Die angegebenen Werte sind bezogen auf trockenes Abgas (wasserfrei).
- Druckdifferenzen zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches (Bild 16) sowie die ermittelte Höhe der rauchfreien Zone (Bild 17).

Aus den in vorstehend genannten Diagrammen aufgetragenen Daten ergibt sich u.a., dass bis zum Einsatz der Feuerwehr bei einer Branddauer von 18 min 12 s ca. 400 kg Möbel verbrannten. Der Mittelwert der Temperaturen unterhalb der Decke des Brandraumes stieg dabei bis auf ca. 900 °C an.

Aus dem zeitlichen Verlauf des Massenverlustes ergibt sich die für den Brandablauf und die Brandintensität wesentliche Größe, die Abbrandrate  $\dot{m}$  (Bild 7). Diese ist aus dem zeitlichen Massenverlust  $m$  des Brandgutes beim Abbrand ermittelt worden. Ihr Maximalwert wird nach ca. 17 min 30 s mit 51,6 kg/min erreicht.

In Bild 17 sind die aus den Videoaufzeichnungen und mit Hilfe der Messeinrichtung nach Abschnitt 4.2.6 ermittelte Höhe der rauchfreien Zone über dem Hallenboden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragen. Auch bei der höchstmöglichen Leistungsstufe der Absaugung von im Mittel 32.700 m<sup>3</sup>/h aus der Versuchshalle senkte sich die Rauchsicht sehr schnell ab.

Nach einer Branddauer von 6 min lag die Höhe der rauchfreien Zone nur noch bei ca. 7 m. Die geringste Höhe der rauchfreien Zone von ca. 3 m ergab sich bei einer Branddauer von ca. 16 min.

## 5.2 Zimmerbrand, Brandlast 807 kg, Versuch V02

Bei diesem Versuch wurden wie beim vorhergehenden Versuch Möbel im Brandraum BR1 mittels 0,5 l Brennspritus, eingefüllt in eine 20 cm x 30 cm großen Wanne, entzündet. Die Abmessungen des Brandraumes und der Versuchsablauf entsprachen dem des Versuches V01 nach Abschnitt 5.1.

Die Brandlast, im wesentlichen wieder Möbel, betrug bei diesem Versuch 807 kg. Nach einer Branddauer von 26 min 32 s wurde von der Feuerwehr begonnen, den Brand abzulöschen. Aus der Brandversuchshalle wurde von Beginn des Brandes an ein Abgasvolumen von im Mittel 30.000 m<sup>3</sup>/h bezogen auf den Normzustand abgesaugt.

In den Bildern 18 bis 27 sind die bei diesem Versuch erfassten Messwerte aufgetragen. Im einzelnen sind dies die folgenden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragenen Werte:

- Brandlast und mittlere Deckentemperatur im Brandraum (Bild 18).
- Abbrandrate und theoretisch maximaler Wärmestrom (Bild 19).
- 6 Temperaturen innerhalb der Versuchshalle in einer Höhe von 3 m (Bild 20) sowie jeweils 15 Temperaturen in den Höhen 5 m, 7 m und 9 m (Bilder 21 bis 23). Analog zu den Zuordnungen der Messstellen zu ihren jeweiligen Bezeichnungen sind in den Legenden nachfolgender Diagramme „Temp. x.0“ die Daten der jeweiligen Messstellen in einer Höhe von 3 m (beginnend mit Bild 20).
- Mittelwerte der Temperaturen in den einzelnen Ebenen sowie eine Temperatur in 10,5 m Höhe und die Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 24).
- Aus der Versuchshalle abgesaugter Volumenstrom (Bild 25).
- O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen der abgesaugten Abgase (Bild 26). Die angegebenen Werte sind bezogen auf trockenes Abgas.
- Druckdifferenzen zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches sowie die ermittelte Höhe der rauchfreien Zone (Bild 27).

Aus dem Massenverlust ergibt sich, dass bis zum Einsatz der Feuerwehr bei einer Branddauer von 26 min 23 s ca. 640 kg Möbel verbrannten. Die Temperatur im Brandraum erreichte nach ca. 20 min den Höchstwert von ca. 1200 °C (Bild 18).

Bei Absaugung von ca. 34.000 m<sup>3</sup>/h ab einer Versuchszeit von ca. 18 min (siehe Bild 25) senkte sich die Rauchschiicht ab einer Versuchszeit von 20 min bis auf eine Höhe von ca. 2 m ab (Bild 27).

### **5.3 Abbrand von 205 kg Holzkrippen, Versuch V03**

Bei diesem Versuch wurden Holzkrippen in dem bei den Versuchen V01 und V02 benutzten Brandraum innerhalb der Versuchshalle (BR1, Bild 4) abgebrannt. Die Brandlast bestand bei diesem Versuch aus insgesamt 6 Holzkrippen, die parallel in 2 Reihen zentral vor dem Brandraumfenster angeordnet waren. Die Holzkrippen bestanden aus Fichteholzstäben mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x 500 mm mit einem Gesamtgewicht von 205 kg. Die Holzfeuchte wurde mit 10% angenommen. Der Stababstand der Holzstäbe betrug 10 cm, der Abstand der Holzkrippen untereinander ebenfalls. Die 2 mittleren Krippen wurden mittels 2 Holzweichfaserstreifen von 1,10 m Länge, die mit je 0,5 l Brennspritus getränkt waren, entzündet. Die aus dem Fenster austretenden Flammen und Rauchgase wurden wie bei Versuch V02 mit der Messkette 2.x erfasst. Der Abbrand der Holzkrippen erfolgte im Gegensatz zu den Versuchen V01 und V02 ohne Löscheinsatz, also vollständig.

In den Bildern 28 bis 35 sind die bei diesem Versuch erfassten Messwerte aufgetragen. Im einzelnen sind dies die folgenden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragenen Werte:

- Brandlast und mittlere Deckentemperatur im Brandraum (Bild 28).
- Abbrandrate und theoretisch maximaler Wärmestrom (Bild 29).
- Jeweils 15 Temperaturen innerhalb der Versuchshalle in den Höhen 5 m, 7 m und 9 m (Bilder 30 bis 32).
- Mittelwerte der Temperaturen in den einzelnen Ebenen sowie eine Temperatur in 10,5 m Höhe und die Temperatur der abgesaugten Abgase (Bild 33).
- Höhe der ermittelten rauchfreien Zone (Bild 34).
- Druckdifferenzen zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches (Bild 35).

Bei diesem Versuch ergab sich eine maximale Brandraumtemperatur von ca. 960 °C.

### **5.4 Abbrand von 252 kg Holzkrippen, Versuch V04**

Bei diesem Versuch wurden die Holzkrippen ebenfalls in dem bei den vorhergehenden Versuchen benutzten Brandraum BR1, siehe Bild 4, abgebrannt.

Die Brandlast bestand bei diesem Versuch aus insgesamt 6 Krippen, die in 2 Reihen von je 3 Krippen im Bereich vor dem Brandraumfenster angeordnet waren. Diese Holzkrippen bestanden aus Holzstäben mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x 500 mm mit einem Gesamtgewicht von 252 kg. Holzart und –feuchte entsprach V03. Die mittlere Krippe einer Reihe wurde mittels 0,5 l Brennspritus, der sich in einer Wanne von 20 cm x 30 cm unter der Krippe befand, entzündet. Die Temperaturen unterhalb der Decke des Brandraumes liegen hier nicht vor.

In den Bildern 36 bis 45 sind die bei diesem Versuch erfassten Messwerte aufgetragen. Im einzelnen sind dies die folgenden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragenen Werte:

- Abbrandrate und theoretisch maximaler Wärmestrom (Bild 36).
- Jeweils 15 Temperaturen innerhalb der Versuchshalle in den Höhen 5 m, 7 m und 9 m (Bilder 37 bis 39).
- Mittelwerte der Temperaturen in den einzelnen Ebenen sowie eine Temperatur in 10,5 m Höhe und die Temperatur der abgesaugten Abgase (Bild 40).
- CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in 5 m und 7 m Höhe an jeweils 4 Messstellen sowie deren Mittelwerte und die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase, trockenes Abgas (Bilder 41 bis 43).
- Aus der Versuchshalle abgesaugter Volumenstrom und Höhe der ermittelten, rauchfreien Zone (Bild 44).
- Druckdifferenzen zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches (Bild 45).

### **5.5 Abbrand von 18,5 kg Holzkrippen, Versuch V05**

Für diesen Brandversuch wurde eine Holzkrippe, bestehend aus 7 Lagen von jeweils 5 Holzstäben, 50 mm x 50 mm x 500 mm, Gewicht 18,5 kg, auf einer Waage aufgebaut, die auf dem Boden der Versuchshalle an der in Bild 4 mit BR2 gekennzeichneten Stelle stand. Holzart und –feuchte entsprach V03. Die Zündung erfolgte durch 2 Weichfaserstreifen, 500 mm lang, getränkt mit je 350 ml Brennspritus.

In den Bildern 46 bis 57 sind die bei diesem Versuch erfassten Messwerte aufgetragen. Im einzelnen sind dies die folgenden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragenen Werte:

- Brandlast und Temperatur in einer Höhe von 3 m oberhalb des Zentrums der Brandlast (Bild 46).
- Abbrandrate und theoretisch maximaler Wärmestrom (Bild 47).

- Jeweils 15 Temperaturen in 3 Ebenen (5 m, 7 m und 9 m) innerhalb der Versuchshalle (Bilder 48 bis 50).
- Mittelwerte der Temperaturen in den einzelnen Ebenen und die Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 51).
- CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in 5 m und 7 m Höhe an 4 Messstellen sowie deren Mittelwerte und die CO<sub>2</sub>-Konzentration, der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bilder 52 und 54).
- O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen, der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 55). Die angegebenen Werte sind bezogen auf die trockenen Abgase.
- Druckdifferenzen zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches (Bild 56) sowie der aus der Versuchshalle abgesaugte Volumenstrom (Bild 57).

### 5.6 Abbrand von 83 kg Kartons, Versuch V06

Bei diesem Versuch wurde in dem mit W in Bild 4 gekennzeichneten Bereich ein Lager aus Kartons, gefüllt mit Holzwolle, aufgebaut und entzündet. Die Gesamtmasse dieses brennbaren Materials betrug 83 kg. In etwa 5 m Höhe oberhalb der Versuchsanordnung befand sich eine Zwischendecke aus nicht wärmegeämmten Stahlprofilblechen. Die Abmessungen der Decke waren 5 m x 5 m. Bei diesem Versuch wurden im Mittel 29.000 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h Abgas aus der Versuchshalle abgesaugt.

In den Bildern 58 bis 66 sind die bei diesem Versuch erfassten Messwerte aufgetragen. Im einzelnen sind dies die folgenden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragenen Werte:

- Brandlast und Temperatur an einem Thermoelement neben dem in ca. 5 m Höhe oberhalb der Zündstelle angebrachten Sprinklerkopf (Bild 58).
- Abbrandrate und theoretisch maximaler Wärmestrom (Bild 59).
- Temperaturverlauf an 15 Stellen innerhalb der Versuchshalle in den Höhen 5 m, 7 m und 9 m (Bilder 60 bis 62).
- Mittelwerte der Temperaturen in den einzelnen Ebenen und die Temperaturen der abgesaugten Abgase (Bild 63).
- O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 64). Die angegebenen Werte sind bezogen auf trockenes Abgas.
- Druckdifferenzen zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches (Bild 65).
- Aus der Versuchshalle abgesaugter Volumenstrom (Bild 66).

## 5.7 Abbrand von 423 kg Kartons, mit Sprinklereinsatz, Versuch V07

Bei diesem Versuch wurde in dem mit W in Bild 4 gekennzeichneten Bereich ein Blocklager aus Kartons, die mit Holzwolle gefüllt waren, unter einer Sprinkleranlage aufgebaut und entzündet. Die Sprinkler waren unterhalb einer in ca. 5 m Höhe über dem Boden der Versuchshalle angebrachten Zwischendecke mit den Abmessungen 5 m x 5 m installiert vgl. Versuch V06. Die Gesamtmasse des brennbaren Materials (Kartons und Holzwolle) betrug 423 kg. Die Sprinkleranlage hat bei diesem Versuch nach 4,8 min ausgelöst. Der Massenverlust bis zum Auslösen der Sprinkler betrug 2,8 kg.

In den Bildern 67 bis 77 sind die bei diesem Versuch erfassten Messwerte aufgetragen. Im einzelnen sind dies die folgenden in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragenen Werte:

- Abbrandrate und theoretisch maximaler Wärmestrom (Bild 67).
- Temperaturverlauf an 15 Stellen innerhalb der Versuchshalle in den Höhen 5 m, 7 m und 9 m (Bilder 68 bis 70).
- Mittelwerte der Temperaturen in den einzelnen Ebenen und die Temperaturen der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 71).
- CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in 5 m und 7 m Höhe an jeweils 4 Messstellen sowie deren Mittelwert und die CO<sub>2</sub>-Konzentration der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bildern 72 bis 74).
- O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen, der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase (Bild 75). Die angegebenen Werte sind bezogen auf die trockenen Abgase.
- Druckdifferenzen zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches (Bild 76).

## 6. MESSERGEBNISSE DER EINZELNEN BRANDVERSUCHE

### 6.1 Abbrandraten, Brandrauchvolumen und theoretische Wärmefreisetzung

Aus dem zeitlichen Verlauf des Massenverlustes wurde die Abbrandrate berechnet und in den Bildern 7, 19, 29, 36, 47, 59 und 67 über der Branddauer aufgetragen.

Aus diesen Werten kann über den Heizwert der Möbel (Holz) der theoretische Wärmestrom berechnet werden, der dann erreicht würde, wenn u.a. kein Ruß und keine unverbrannten Gase bei der Verbrennung entstehen würden.

Die Wärmefreisetzung bei der Verbrennung von einem Kilogramm Holz, bezogen auf die trockene und aschefreie Holzmasse beträgt nach der Verbandsformel

für den Brennwert  $H_O = 18.980 \text{ kJ/kg}$ .

Der Brennwert gibt dabei die gesamte bei der Verbrennung entstehende Wärme an. Liegen jedoch die Abgastemperaturen über der Taupunkt-Temperatur, so liegt das bei der Verbrennung von Holz gebildete Wasser in Form von Wasserdampf vor, wodurch Wärme gebunden wird. In diesem Fall wird die freie Wärme bei der Verbrennung durch den Heizwert  $H_U$  angegeben. Dieser beträgt:

Heizwert  $H_U = 17.640 \text{ kJ/kg}$ .

Hat das Holz einen Wassergehalt von 10 %, der bei allen Versuchen angenommen bzw. gemessen wurde, so ergibt sich bei einer Massenänderung von einem kg während des Brandes eine theoretische maximale Wärmefreisetzung von:

Brennwert  $H_O = 17.080 \text{ kJ/kg}$ ,

Heizwert  $H_U = 15.876 \text{ kJ/kg}$ .

Der Verlauf des mit dem Brennwert von  $17.080 \text{ kJ/kg}$  aus der Abbrandrate berechneten theoretischen maximalen Wärmestromes ist in den Bildern 7, 19, 29, 36, 47, 59 und 67 dargestellt.

In der folgenden Tabelle 2 sind die bei den durchgeführten Versuchen ermittelten maximalen Abbrandraten und die daraus berechneten theoretischen maximalen Wärmeströme zusammengestellt.

Liegen die Temperaturen der Abgase (Brandrauch-Luftgemisch) über dem Taupunkt, so ergibt sich der effektive Wärmestrom durch Verbrennung, indem vom Wert  $\dot{Q}_{\text{theo}}$  die Verdampfungswärme subtrahiert wird. Für den Versuch V01 mit der maximalen Abbrandrate von  $51,9 \text{ kg/min}$  ergibt sich ein theoretischer, maximal freigesetzter Wärmestrom von  $14,77 \text{ MW}$  und bei Abgastemperaturen über dem Taupunkt ein effektiver Wärmestrom von  $13,53 \text{ MW}$ .

**Tabelle 2: Maximal freigesetzter theoretischer Wärmestrom**

Versuch	Maximale Abbrandrate [kg/min]	Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{theo}}$ [MW]	Verdampfungswärme für H <sub>2</sub> O aus Verbrennung und Holzfeuchtigkeit $\dot{Q}_{\text{verd}}$ [MW]
V01	51,9	14,77	1,26
V02	38,3	10,90	0,93
V03	15,1	4,30	0,37
V04	10,4	2,96	0,25
V05	1,2	0,34	0,03
V06	5,2	1,48	0,13
V07	ca. 3,5	1,00	0,08

Bei der vollständigen Verbrennung von 1 kg Holz, trocken und aschefrei, ergibt sich ein Brandrauchvolumen bezogen auf 0 °C von 5,28 m<sup>3</sup>. In diesem Abgas sind 0,68 m<sup>3</sup> Wasserdampf enthalten. Kondensiert dieser Wasserdampf, so beträgt das Brandrauchvolumen nur noch 4,60 m<sup>3</sup>. Die Zusammensetzung des Brandrauchvolumens bei vollständiger Verbrennung ist in Tabelle 3 angegeben.

**Tabelle 3: Zusammensetzung des Brandrauchs und Brandrauchvolumen bei vollständiger Verbrennung von 1 kg trockenem und aschefreiem Holz**

	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Vol m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Vol.-% feucht	69,4	17,8	12,8	5,28
Vol.-% trocken	79,6	20,4	---	4,60

Aufgrund der bei den Versuchen mit Holz beobachteten Rußbildung ist unter Einbeziehung der Ergebnisse aus früheren Brandversuchen jedoch davon auszugehen, dass ca. 20 % bis 30 % des im Holz vorhandenen Kohlenstoffes nicht verbrennen. Die effektive Wärmefreisetzung pro kg Holz mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 10 %, wie hier angenommen, liegt dadurch nur noch zwischen 13,7 kJ/kg und 11,9 kJ/kg.

Im folgenden wird aufgrund der beobachteten Rußbildung und im Vergleich zu durchgeführten früheren Untersuchungen mit Holz als Brandgut angenommen, dass im Mittel bei diesen Versuchen 25 % des im Holz enthaltenen Kohlenstoffes nicht verbrennen sondern als Ruß im

Brandrauch vorliegen. Weiter wird angenommen, dass der im Holz vorhandene Wasserstoff vollständig verbrennt. Mit diesen Annahmen ergeben sich die folgenden Werte:

**Tabelle 4: Daten für die unvollständige Verbrennung von Holz**

Brandgut	Holz	Dimension
Rußfaktor	<b>0,25</b>	[-]
Heizwert, Holz, trocken, aschefrei $H_U / H_O$	<b>13.360/14.680</b>	[kJ/kg]
Erf. Verbrennungsluft	<b>3,5</b>	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg]
Erf. Sauerstoffbedarf	<b>0,74</b>	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg]
Brandrauchvolumen trocken ( $t_{Br} < t_{Tp}$ )	<b>3,5</b>	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg]
feucht ( $t_{Br} > t_{Tp}$ )	<b>4,1</b>	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg]
CO <sub>2</sub> Anteil trocken ca	<b>18,5</b>	[%]
CO Anteil trocken bis ca.	<b>18.000</b>	[ppm]
Rußanteil in 1m <sup>3</sup> Brandrauch trocken ( $t_{Br} < t_{Tp}$ )	<b>35</b>	[g/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]
feucht ( $t_{Br} > t_{Tp}$ )	<b>30</b>	[g/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]
Wärmefreisetzung pro m <sup>3</sup> Luft bez. auf $H_U / H_O$	<b>3.820 / 4.190</b>	[kJ / m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]
Brandrauchvolumenstrom pro 1 MW Wärmefreisetzung Rauchgas feucht ( $> t_{Tp}$ ), bezogen auf $H_U$	<b>0,31</b>	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /(s * MW)]
Rauchgas trocken ( $< t_{Tp}$ ), bezogen auf $H_O$	<b>0,26</b>	

Damit ergibt sich die in Tabelle 5 aufgeführte Zusammensetzung der Brandgase bei unvollständiger Verbrennung.

**Tabelle 5: Zusammensetzung des Brandrauchs und des Brandrauchvolumens bei einem Rußfaktor von 0,25, Holz, trocken und aschefrei.**

	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	Vol m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Vol.-% feucht	66,7	15,5	1,5	16,3	4,15
Vol.-% trocken	79,7	18,5	1,8	----	3,47

Mit diesen Werten kann aus dem gemessenen Sauerstoffverbrauch der tatsächlich beim Brand erzeugte Wärmestrom berechnet werden, siehe Abschnitt 6.4.

Unter den hier getroffenen Annahmen, 10 % Holzfeuchtigkeit, 25 % des im Holz enthaltenen Kohlenstoffes verbrennen nicht (Ruß), ergibt sich ein Wasseranteil von 582 g in dem bei der Verbrennung entstehenden Brandrauch von 4,1 m<sup>3</sup>. Dabei liegt die Taupunkt-Temperatur  $t_{TP}$  bei 57 °C. Diese Temperatur  $t_{TP}$  sinkt bei einfacher Verdünnung der Brandgase mit Luft auf 45 °C und bei 4-facher Verdünnung der Brandgase auf 26 °C ab.

## 6.2 Temperaturverteilung in der Rauchsicht unterhalb der Decke

Bei allen Versuchen wurde eine insbesondere vertikal ausgeprägte Temperaturverteilung in der Rauchsicht unterhalb des Daches der Versuchshalle festgestellt. Mit Ausnahme der Temperaturen des aufsteigenden Brandrauchs bei den Versuchen im Brandraum BR1, Messstellen TE 2.x, Positionen siehe Bild 4, liegen die Werte in den einzelnen Ebenen eng beieinander. Der wesentlich höhere Wert von TE 2.x zeigt, dass die aus dem Fenster des Brandraumes schlagenden Flammen auch unterhalb der Decke der Versuchshalle noch zu deutlich höheren Temperaturen führen, als es dem Mittelwert des Brandrauch-Luftgemisches in dieser Höhe entspricht. Deutliche Temperatur-anstiege ergeben sich mit zunehmender Höhe der Messebene. Dabei gilt generell, je höher die Energiefreisetzung beim Brand, desto höher liegen die Temperaturen.

Für alle hier beschriebenen Versuche sind diese Temperaturverläufe an den einzelnen Messstellen in den jeweiligen Höhen bzw. als Mittelwerte über der Versuchszeit aufgetragen, siehe Abschnitt 5.

## Versuch V01

Die im Bild 11 aufgetragenen Mittelwerte der Temperaturen der Ebenen 5 m, 7 m und 9 m zeigen eine deutliche Staffelung der Temperaturen in den einzelnen Messebenen. Die Temperatur der abgesaugten Abgase  $T_{ab 0.1}$  entspricht bis zu einer Versuchszeit von ca. 23 min etwa der Mitteltemperatur in 9 m. Nach dieser Zeit liegt die Temperatur der abgesaugten Abgase über diesem Wert. Die in 10,5 m Höhe an der Messstelle 3.4 gemessene Temperatur liegt mit einem Wert von ca. 270 °C noch über der Temperatur der abgesaugten Gase.

Die Maximalwerte der Mittelwerte der Temperaturen in den verschiedenen Ebenen bzw. Messstellen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

## Versuch V02

Mit Ausnahme der Temperaturen des aufsteigenden Brandrauches an den Messstellen TE 2.1 bis 2.3 liegen auch bei diesem Versuch die Werte in den einzelnen Ebenen jeweils eng beieinander. Der wesentlich höhere Wert von TE 2.x zeigt ebenfalls wieder, dass die auf der Achse des aufsteigenden Plumes gemessenen Temperaturen auch unterhalb der Decke noch zu deutlich höheren Temperaturen führen, als es dem Mittelwert des Brandrauch-Luftgemisches in dieser Höhe entspricht.

In Bild 24 sind die Mittelwerte der Temperaturen der Ebenen 3 m, 5 m, 7 m und 9 m sowie der Mittelwert innerhalb der Versuchshalle aus diesen Messungen und die Temperatur  $T_{ab 0.1}$  in der Absaugleitung aufgetragen. Die Temperatur der abgesaugten Abgase  $T_{ab 0.1}$  entspricht bis zu einer Versuchszeit von ca. 23 min etwa der Mitteltemperatur in 9 m Höhe. Nach dieser Zeit liegt die Temperatur der abgesaugten Abgase über diesem Wert. Die in 10,5 m Höhe an der Messstelle 3.4 gemessene Temperatur liegt mit einem maximalen Wert von 225 °C nur wenig über der Temperatur der abgesaugten Gase.

Die Mittelwerte zeigen auch bei diesem Versuch eine deutliche Staffelung der Temperaturen in den einzelnen Messebenen. Bei der Versuchszeit von 22 min haben die Mittelwerte der Temperaturen die in Tabelle 6 aufgeführten Werte.

### **Versuch V03**

Wie bei Versuch V01 und V02 ergibt sich auch bei diesem Versuch eine deutliche Schichtung der Temperaturen in den Ebenen 5 m, 7 m und 9 m. Jedoch liegen wegen der geringeren Abbrandrate und der damit verbunden geringeren Wärmefreisetzung die Temperaturen deutlich niedriger. Entsprechendes gilt auch für die an der Messkette 2 ermittelten Temperaturen des aufsteigenden Plumes. Die Messwerte 2.x liegen aber ebenfalls wieder deutlich über der Temperatur der Gase in der jeweiligen Höhe (siehe Bilder 30 bis 32).

Die Mittelwerte zeigen auch bei diesem Versuch eine deutliche Staffelung der Temperaturen in den einzelnen Messebenen. Bei der Versuchszeit von ca. 20 min hatten die Mittelwerte der Temperaturen die in Tabelle 6 aufgeführten Werte. Die in 10,5 m Höhe an der Messstelle 3.4 gemessene Temperatur liegt mit einem maximalen Wert von 105 °C nur geringfügig über der Temperatur der abgesaugten Gase (siehe Bild 33).

### **Versuch V04**

Die Mittelwerte zeigen auch bei diesem Versuch eine deutliche Staffelung der Temperaturen in den einzelnen Messebenen (siehe Bild 40). Bei der Versuchszeit von ca. 28 min hatten die Mittelwerte der Temperaturen die in Tabelle 6 aufgeführten Maximalwerte.

### **Versuch V05**

Bei diesem Brandversuch lag die kleinste Brandlast der hier beschriebenen Versuche vor. Entsprechend ergab sich bei diesem Versuch, siehe Tabelle 2, auch der niedrigste Wärmestrom. Auch bei diesem Versuch ergab sich eine eindeutige Staffelung der Temperaturen in den einzelnen Ebenen (siehe Bild 51). Die Temperaturen lagen hierbei in einem Bereich zwischen 55 °C und 80 °C. Die bei einer Versuchszeit von ca. 13 min erhaltenen Maximalwerte der Mittelwerte der Temperaturen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

### **Versuch V06**

Die bei diesem Versuch unterhalb einer Zwischendecke in ca. 5 m Höhe, Abmessungen 5 m x 5 m, verbrannten Kartons führten innerhalb der Versuchshalle zu den in den Bildern 60 bis 62

aufgetragenen Temperaturen in den Ebenen 5 m, 7 m und 9 m Höhe. Die Mittelwerte dieser Temperaturen sind in Bild 63 einschließlich der Temperatur der abgesaugten Abgase zusammengestellt. Die bei einer Versuchzeit von ca. 10 min erreichten Maximalwerte dieser Mittelwerte sind ebenfalls in Tabelle 6 aufgeführt.

### Versuch V07

Bei diesem Versuch wurde das entzündete Blocklager durch die Sprinkleranlage gelöscht, welche unterhalb der bei Versuch V06 eingebauten Zwischendecke installiert worden war. Die hierbei innerhalb der Versuchshalle gemessenen Temperaturen sind in den Bildern 68 bis 70 dargestellt. Die Mittelwerte dieser Temperaturen sind in Bild 71 einschließlich der Temperatur der abgesaugten Abgase zusammengestellt. Die bei einer Versuchzeit von ca. 5 min erreichten Maximalwerte dieser Mittelwerte sind wiederum in Tabelle 6 angegeben.

**Tabelle 6: Maximalwerte der Mittelwerte der Temperaturen in den verschiedenen Messebenen.**

Versuch	Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{theo}}$ [MW]	Höhe der Messebenen				Mittelwert	Absaugung	Messstelle in 10,5 m	vergl. Bild Nr.
		3 m	5 m	7 m	9 m				
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]				
V01	14,77		168	202	231	200	237	271	11
V02	10,90	62	143	187	217	148	217	225	24
V03	4,30		65	87	100	84	103	105	33
V04	2,96		56	68	70	67	80		40
V05	0,34		27	31	33	31	34		51
V06	1,48		40	44	47	43	44		63
V07	1,00		23	25	26	24	27		71

Diese Aufstellung der maximalen Mittelwerte an den einzelnen Messstellen bzw. Ebenen zeigt die große Staffelung der Temperaturen in den unterhalb der Decke der Versuchshalle angestauten Rauchgasen. Sehr geringe Temperaturerhöhungen treten insbesondere bei den kleinen Wärmefreisetzungsraten bei den Versuchen V05 bis V07 auf. Dabei sind die unterschiedlichen

Werte bei diesen Versuchen auf eine über die Raumhöhe ungleichmäßige Anfangstemperatur in der Versuchshalle zurückzuführen.

Die prozentuale Abweichung der mittleren Temperatur aus 7 m und 9 m Höhe zum arithmetischen Mittelwert beträgt bei den Versuchen V01 und V04 6,73 % bzw. 1,45 %.

### 6.3 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen innerhalb der Versuchshalle

Bei den Versuchen V01 (Bilder 12, 13, 14), V04 (Bilder 41, 42, 43), V05 (Bilder 52, 53, 54) und V07 (Bilder 72, 73, 74) sind an jeweils 5 Messstellen in 7 m und in 9 m Höhe sowie in der Absaugleitung der Abgase aus der Versuchshalle die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen worden. Ihr zeitlicher Verlauf ist in den obengenannten Bildern wiedergegeben. Die Maximalwerte der Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den verschiedenen Ebenen sowie der abgesaugten Abgase sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

**Tabelle 7: Maximalwerte der Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den verschiedenen Messebenen sowie der abgesaugten Abgase**

Versuch	Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{theo}}$ [MW]	Höhe der Messebene		Absaugung CO <sub>2</sub> [%]	vergl. Bild Nr.
		7 m	9 m		
		CO <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]		
V01	14,77	4,3	4,8	5,3	14
V04	2,96	1,2	1,3	1,4	43
V05	0,34	0,18	0,26	0,29	54
V07	1,00	<0,06	<0,08	<0,1	74

Die prozentuale Abweichung des mittleren CO<sub>2</sub>-Gehaltes in 7 m und 9 m Höhe zum arithmetischen Mittelwert beträgt bei den Versuchen V01 und V04 5,49 % bzw. 4,00 %.

### 6.4 Zusammensetzung der aus der Brandversuchshalle abgesaugten Brandgase

Bei den Versuchen V01 (Bild 15), V02 (Bild 26), V05 (Bild 55), V06 (Bild 64) und V07 (Bild 75) wurde die Konzentration von O<sub>2</sub>, CO und CO<sub>2</sub> in den aus der Versuchshalle abgesaugten Gasen gemessen. Die dabei erhaltenen Extremwerte sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

**Tabelle 8: Zusammensetzung der aus der Brandversuchshalle abgesaugten Abgase, bei jeweils dem Maximalwert von CO<sub>2</sub>**

Versuch	Wärme- strom $\dot{Q}_{theo}$ [MW]	Konzentration [Vol.-%]			O <sub>2</sub> -Abnahme [Vol.-%]
		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	
V01	14,77	14,90	5,38	0,53	6,10
V02	10,90	15,39	5,25	0,23	5,61
V05	0,34	20,75	0,24	0,005	0,25
V06	1,48	20,49	0,46	0,01	0,51
V07	1,00	20,88	0,10	0,005	0,12

Aus den gemessenen CO-Werten folgt, dass diese unter den hier gewählten Versuchsbedingungen bis auf ca. 10 % des entsprechenden CO<sub>2</sub>-Wertes ansteigen können.

### 6.5 Druckdifferenz zwischen dem Boden und dem Dach der Brandversuchshalle

Bei allen Versuchen wurde die Druckdifferenz zwischen dem Boden und der Decke des Brandversuchsraumes gemessen. Diese Druckdifferenz entspricht der Druckdifferenz zwischen dem Hallendach und der freien Umgebung unter der Bedingung, dass die Außentemperatur der Temperatur der in die Versuchshalle Zuluft einströmenden entspricht.

In Tabelle 9 sind die bei den einzelnen Versuchen ermittelten maximalen Druckdifferenzen entsprechend den Bildern 16, 27, 35, 45, 56, 65 und 76 zusammengestellt. Im Mittel beziehen sich diese Werte auf eine Außentemperatur (Temperatur der angesaugten Luft) von 15 °C.

**Tabelle 9: Bei den Versuchen gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen dem Hallendach und der freien Umgebung**

Versuch	Bild Nr.:	Wärme- strom $\dot{Q}_{\text{theo}}$ [MW]	Druckdifferenz Mittelwert $dp_{2/3}$ [N/m <sup>2</sup> ]
V01	16	14,77	52
V02	27	10,90	44
V03	35	4,30	19
V04	45	2,96	17
V05	56	0,34	9
V06	65	1,48	12
V07	76	1,00	6

Diese thermisch bedingten Druckdifferenzen stehen unter den in der Brandversuchshalle vorliegenden Bedingungen, wie Dicke der Rauchsicht, Temperatur der Rauchsicht und bei Temperaturgleichheit zwischen Halle und freier Umgebung zur Verfügung, um bei den jeweiligen Brandszenarien die Rauchgase über natürlich wirkende RWA-Anlagen abzuführen und gleichzeitig auch die erforderliche Frischluft anzusaugen.

## 7. BEWERTUNG VON EINZELNEN DATEN

### 7.1 Tatsächlich freigesetzter Wärmestrom

In Kenntnis der Größe des Abgasvolumenstroms kann aus dem bei der Verbrennung verbrauchten Sauerstoffmassenstrom der tatsächlich bei der Verbrennung freigesetzte Wärmestrom  $\dot{Q}_{O_2}$  berechnet werden. Für die Berechnung des tatsächlich freigesetzten Wärmestromes muss der trockene Abgasvolumenstrom zugrunde gelegt werden. Dieser ergibt sich aus dem gemessenen Abgasvolumenstrom abzüglich des bei der Verbrennung entstandenen Wasserdampfvolumenstroms sowie des Wasserdampfanteils der Umgebungsluft.

Unter der Annahme, dass das bei den hier durchgeführten Versuchen verwendete Holz einen Wassergehalt von 10 % hat, ergeben sich die folgenden Wasserdampfvolumina bei einem Massenverlust von 1 kg.

Aus der Verbrennung des Wasserstoffanteiles entstehen 0,482 kg Wasser, die zusammen mit dem

im Holz vorhandenen Wasser von 0,100 kg eine Masse von 0,582 kg pro 1 kg Abbrand ergeben. Daraus kann ein Wasserdampfvolumen bezogen auf 0 °C von 0,724 m<sup>3</sup> entstehen. Ein weiterer Anteil Wasserdampf in den Abgasen ergibt sich aus der Feuchtigkeit der Außenluft. Bei einer angenommenen Luftfeuchtigkeit von 50 % und einer Lufttemperatur von 20 °C beträgt der Wasserdampfanteil ca. 1 %. Um diesen Wasserdampfanteil muss der Abgasvolumenstrom aus der Versuchshalle verringert werden, um über den Sauerstoffverbrauch die Wärmefreisetzung berechnen zu können.

Eine Bewertung des tatsächlich bei der Verbrennung freigesetzten Wärmestromes ist jedoch nur dann möglich, wenn sich die Höhe der Rauchschrift innerhalb der Versuchshalle nicht ändert. Sind diese Voraussetzungen gegeben, also konstante Höhe der rauchfreien Zone und konstante Werte für den Abgasvolumenstrom sowie für die Sauerstoffkonzentration, so kann daraus der tatsächlich bei der Verbrennung freigesetzte Wärmestrom berechnet werden. Damit ist auch ein Vergleich mit dem theoretisch aus der Abbrandrate ermittelten Wärmestrom möglich.

Der um diese Anteile verminderte Abgasvolumenstrom aus der Brandversuchshalle ist als  $\dot{V}_{tr}$  in der Tabelle 10 aufgeführt. Aus diesem Volumenstrom und der O<sub>2</sub>-Abnahme ist der Wärmestrom  $\dot{Q}_{O_2}$  (siehe Tabelle 10) berechnet worden. Dieser Wärmestrom kann jedoch nur ermittelt und zu dem theoretischen Wärmestrom ins Verhältnis gesetzt werden, wenn sich zum Zeitpunkt der maximalen Massenverlustrate die Höhe der rauchfreien Schicht nicht verändert. Dies war nur bei den Versuchen V01 und V02 der Fall. Die zum Zeitpunkt der maximalen Massenverlustrate erhaltenen Daten zur Bewertung der Effizienz der Verbrennung sind ebenfalls in der Tabelle 10 zusammengestellt.

**Tabelle 10: Vergleich der theoretischen mit der tatsächlichen Wärmefreisetzung (Rfz = rauchfreie Zone)**

	Konstante Höhe Rfz von ... bis [min]	Höhe Rfz bei $\tau_{max}$ [m]	$\dot{V}_{abges}$ bei $\tau_{max}$ [m <sup>3</sup> /s]	$\dot{V}_{tr}$ bei $\tau_{max}$ [m <sup>3</sup> /s]	Wärmestrom		O <sub>2</sub> -Abnahme bei $\tau_{max}$ [Vol.-%]	$\dot{Q}_{O_2}$ bei $\tau_{max}$ [MW]	Verhältnis $\dot{Q}_{O_2} / \dot{Q}_{th}$ bei $\tau_{max}$
					$\dot{Q}_{theo}$ [MW]	Versuchszeit $\tau_{max}$ [min]			
V01	15,7/17,0	3,1	9,08	8,46	14,77	18,0	6,10	10,29	0,70
V02	20,0/26,0	2,1	8,89	8,41	10,90	16,7	5,61	9,40	0,86

## 7.2 Verdünnung der Brandgase

Die Verdünnung des Brandrauchs kann über den CO<sub>2</sub>-Anteil ermittelt werden. Dabei ergibt sich das Verdünnungsverhältnis aus dem gemessenen CO<sub>2</sub>-Gehalt zum maximalen CO<sub>2</sub>-Gehalt bei der Verbrennung. Bei der vollständigen Verbrennung von Holz ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Gehalt in den trockenen Verbrennungsgasen von 20,3 %. Bei einer Verbrennung, bei der 25 % des in Holz vorhandenen Kohlenstoffes nicht verbrennt und als Ruß sowie ca. 10 % des CO<sub>2</sub> Anteiles, wie gemessen, als CO anfällt, beträgt der maximale CO<sub>2</sub>-Gehalt im Brandgas 18,5 %. Bezogen auf diesen Wert ergeben sich aus den in Tabelle 8 aufgeführten maximalen CO<sub>2</sub>-Werten folgende (minimalen) Verdünnungsfaktoren für die aus der Brandversuchshalle abgeführten Abgase bei den einzelnen Versuchen (Tabelle 11).

**Tabelle 11: (Minimale) Verdünnungsfaktoren der aus der Brandversuchshalle abgeführten Abgase**

Versuch	Wärme- strom • $\dot{Q}_{theo}$ [MW]	Max. CO <sub>2</sub> [%]	Minimale Verdünnung
V01	14,77	5,38	3,5
V02	10,90	5,25	3,5
V05	0,34	0,24	77
V06	1,48	0,46	40
V07	1,00	0,10	185

Bei einem Maximalwert von an den einzelnen Messstellen ermittelten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zwischen 4,0 Vol.-% und 5,4 Vol.-% beträgt der Verdünnungsfaktor der Brandgase mit Frischluft 2,5 bis 3,4.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Brände in Räumen führen je nach den gegebenen Randbedingungen zu einer unterschiedlich schnellen Verqualmung dieser Räume und damit zu einer Gefährdung der Personen bei der Evakuierung und bei der Rettung von Verletzten sowie zu Behinderungen beim Löscheinsatz der Feuerwehr. Um dieses Problem zu verhindern bzw. zu verringern, muss Brandrauch aus dem

brennenden Raum abgeführt werden. Die Auslegung eines Systems zur Rauchabführung muss dabei so erfolgen, dass es unter allen bei unterschiedlichen Brandereignissen in dem betreffenden Raum auftretenden Möglichkeiten und bei den für die geographische Lage anzusetzenden extremen meteorologischen Bedingungen die geforderte Schutzwirkung erreicht.

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch kühlt sich durch das Einmischen von Raumluft ab und sammelt sich unterhalb der Decke. Da dieses Brandrauch-Luftgemisch eine höhere Temperatur als die Umgebungsluft besitzt, ergibt sich eine Druckdifferenz gegenüber der freien Umgebung. Bei hohen Räumen ist die Decke gleichzeitig das Dach und so sorgen Öffnungen dafür, dass ein Teil des Brandrauch-Luftgemisches abströmen kann und Frischluft in den Raum einströmt. Somit bildet sich eine rauchfreie Zone über dem Boden und der Brandrauch wird abgekühlt. Je nach Wetterlage sammelt sich das Brandrauch-Luftgemisch in einer bestimmten Höhe an und kann nicht ins Freie abströmen. Das Brandrauch-Luftgemisch sinkt bis auf den Boden und somit tritt eine Gefährdung der zu evakuierenden Personen ein. Somit müssen technische Maßnahmen verhindern, dass kein Brandrauch-Luftgemisch in Bereiche einströmt, in denen sich Personen aufhalten. Je großflächiger das Gebäude und je größer die Anzahl der Personen in einem Gebäude ist, um so wichtiger ist die Ausführung solcher Anlagen, um eine sichere Rauchfreihaltung aller Rettungswege unter allen betrieblichen und klimatischen Bedingungen zu gewährleisten.

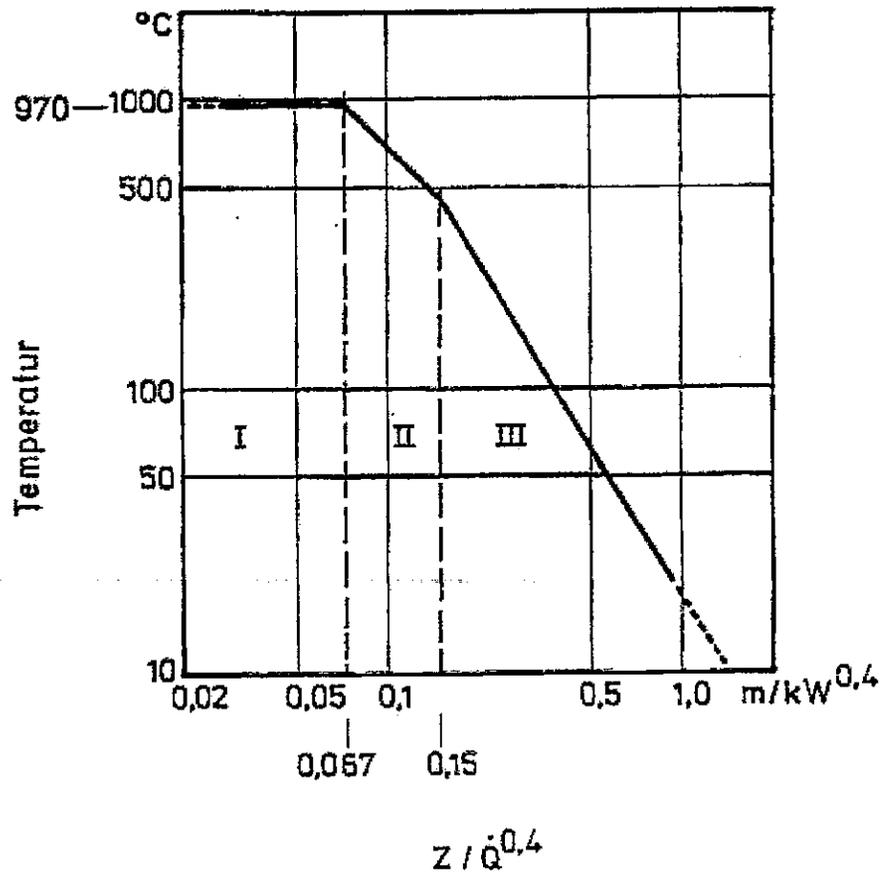
Die Auslegung solcher baulicher Anlagen zur Abführung des Brandrauch-Luftgemisches aus Atrien erfolgt nach Berechnungsmethoden, die aufgrund von durchgeführten Versuchen und theoretischen Überlegungen aufgestellt wurden. Die Höhe der Temperatur des Brandrauch-Luftgemisches unterhalb der Decke, sowie die Höhe der rauchfreien Zone hängen hauptsächlich von dem bei einem Brand freigesetzten Wärmestrom  $\dot{Q}$ , der Gesamthöhe des Raumes und der Öffnungen im Dach ab.

Die Ergebnisse der in diesem Bericht beschriebenen Brandversuche sollen zur weiteren Verbesserung der Auslegungskriterien für Rauchabzugssysteme aus Atrien, sowie zu Aussagen zum Anwendungsbereich unterschiedlicher Modellvorgaben führen.

Zur Bewertung der Rauchabführung wurden verschiedenen Messsysteme eingesetzt. Es wurde bei allen Versuchen eine insbesondere vertikale Temperaturverteilung in der Rauchsicht unterhalb des Daches der Versuchshalle festgestellt. In den einzelnen Ebenen ergab sich eine eindeutige Staffelung der Temperaturen, die bei kleinen Wärmefreisetzungsraten geringer ausfielen. Die Temperaturen sind generell bei Bränden mit größerer Energiefreisetzung höher.

## 9. LITERATUR

- /1/ Basmer u.a. Analyse des Brandaerosols von Verpackungsmaterialien  
vfdB-Zeitschrift 43 (1994) Heft 1, S. 31 - 34
- /2/ John, R. Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken im  
Brandfall für den Personenschutz  
Forschungsbericht Nr.: 79, Dezember 1991
- /3/ Bodamer, M. und Schuh, H. Das Verhalten von Menschen bei Gebäudebränden  
Teil 1: Literaturlauswertung  
Forschungsbericht Nr.: 60, April 19087
- /4/ Bodamer, M. Das Verhalten von Menschen bei Gebäudebränden  
Teil 2: Literaturlauswertung  
Forschungsbericht Nr.: 61, September 1987
- /5/ Dombrowsky, W., Schuh, H.. Das Verhalten von Menschen bei Bränden. Technische  
Determinanten des Verhaltens von Bränden. Einladung zum  
Umdenken  
Forschungsbericht Nr.: 63, März 1988  
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer,  
Arbeitskreis V - Unterausschuss "Feuerwehrrangelegenheiten"
- /6/ Harwood, B and. John R.H. Jr What kills in fires: Smoke inhalation or burns?  
Fire-Journal (1989) H. (Mai/June) S. 29 - 34
- /7/ Tanaka, T. und Yamana, T.: Smoke control in large scale space  
Teil 1: Analytic theories for simpel control problems  
Fire Science and Technology  
Vol.5 ( 1985 ), No 1, S.31 - 40  
Teil 2: Smoke control experiments in a large scale space  
Fire Science and Technology  
Vol.5 ( 1985 ), No 1, S.41 - 53
- /8/ Brein D. Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante  
Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in  
Gebäuden (Plume Formeln). VdS-Fachtagung  
„Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz-Bewertung der  
Rauchausbreitung und Rauchfreihaltung“, Köln 1999
- /9/ Cooke, G. Meeting the fire safety design requirements of modern  
buildings  
Fire Surveyor, Vol. 15 (1986), No. 3, S.16-28

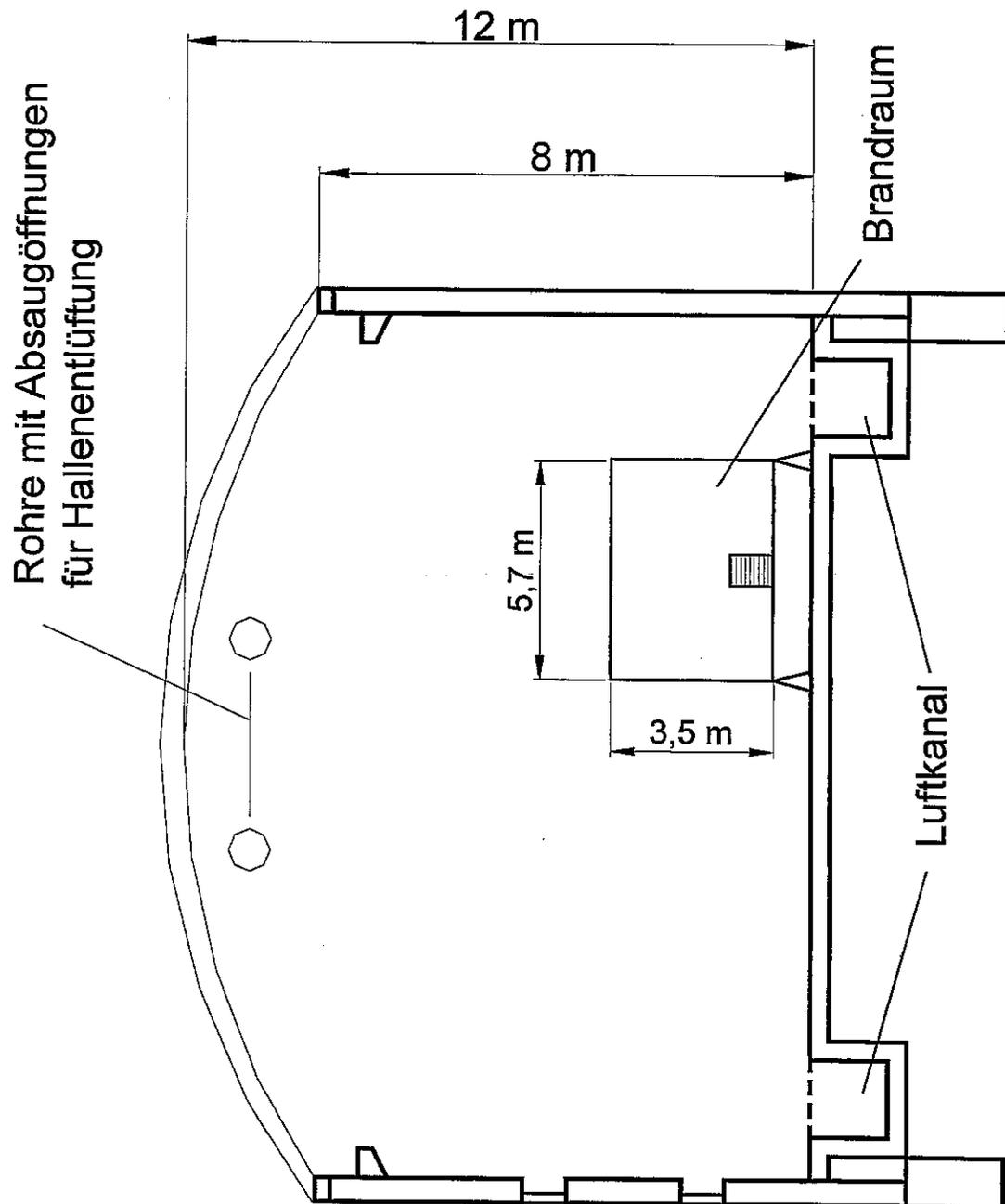


**Bild 1** Temperatur des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches über dem Brandgut in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzung  $\dot{Q}$  und der Höhe  $Z$ , nach [7].

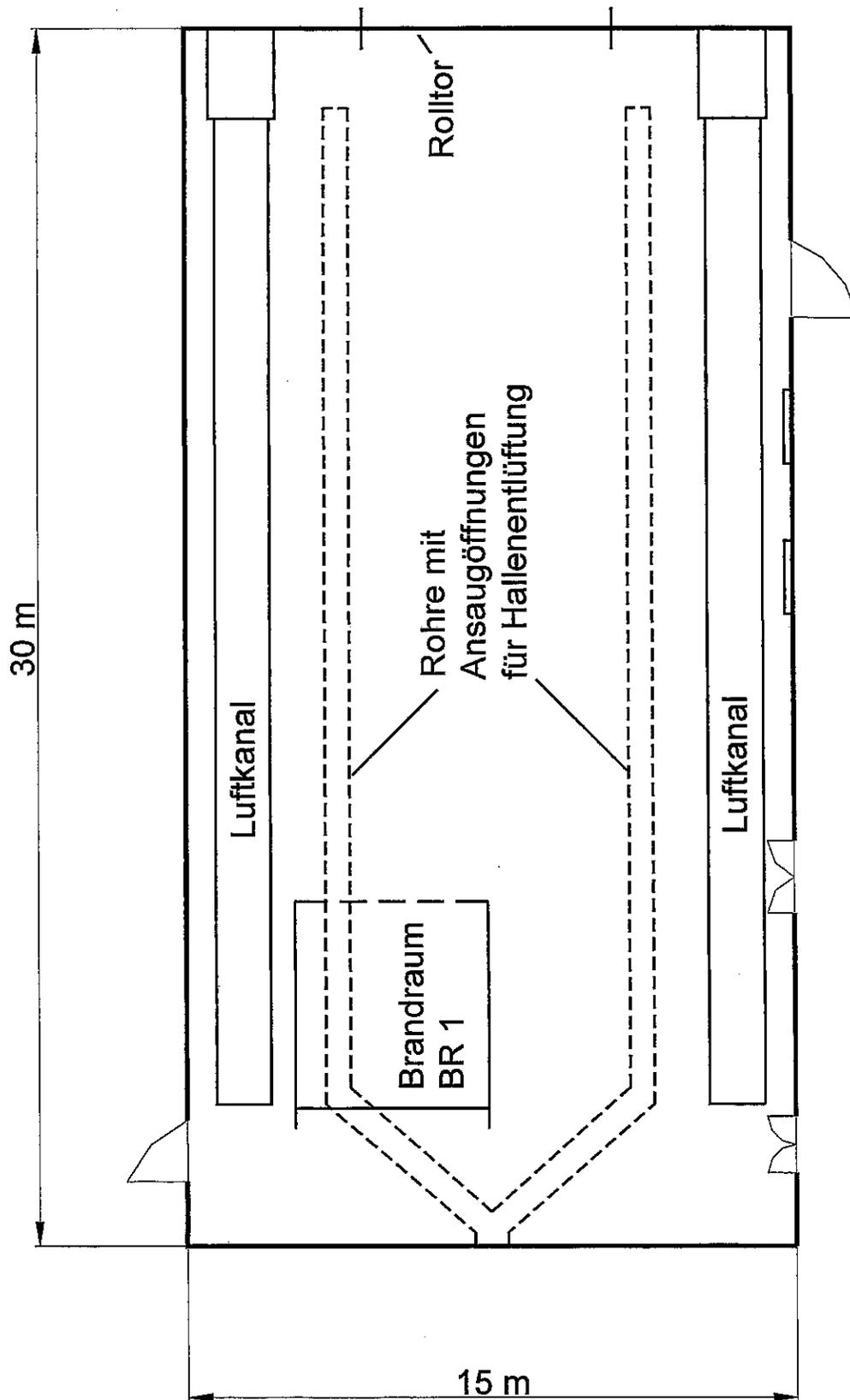
Bereich I : Flammenzone, beständige Verbrennung

Bereich II : Zone der flackernden Flamme

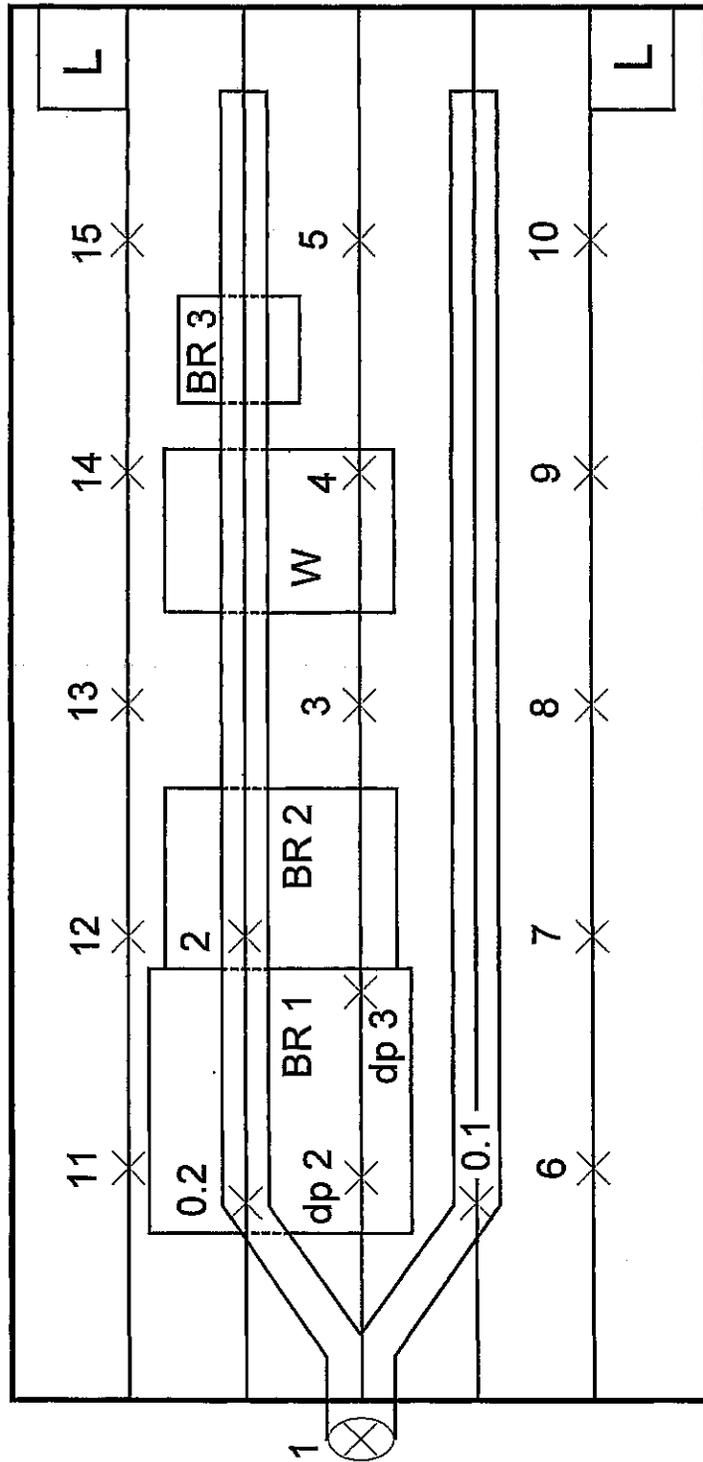
Bereich III : Zone ohne leuchtende Flamme, Ähnlichkeitsbereich der Strömung



**Bild 2** Querschnitt der Brandversuchshalle mit Brandraum.



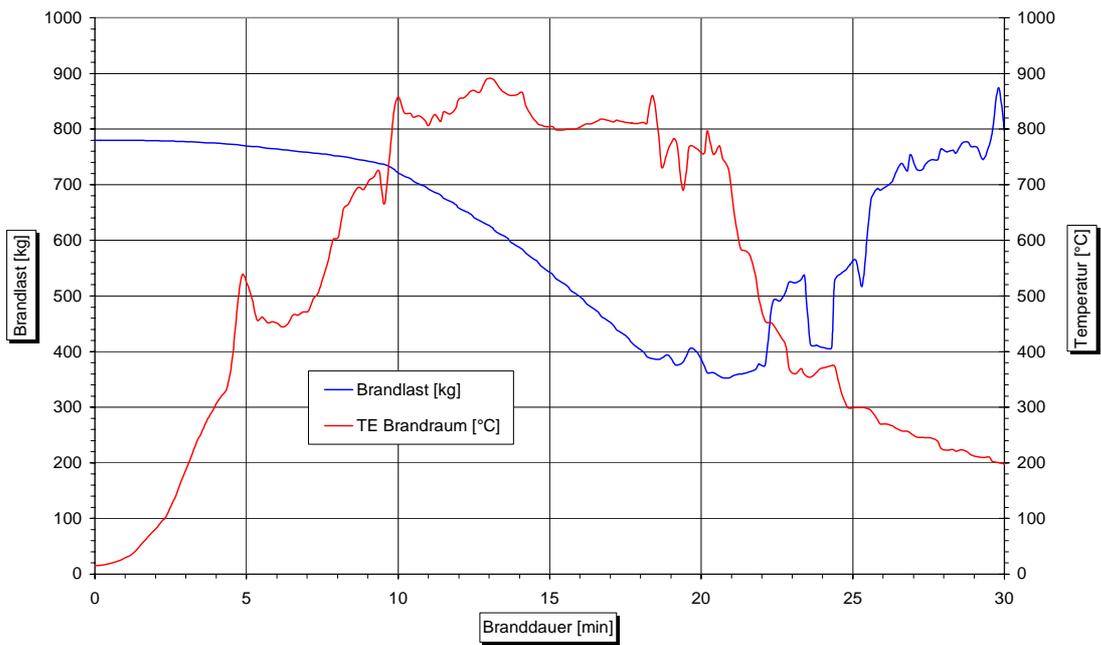
**Bild 3** Grundriss der Brandversuchshalle mit Zuluft- und Abgasleitungen.



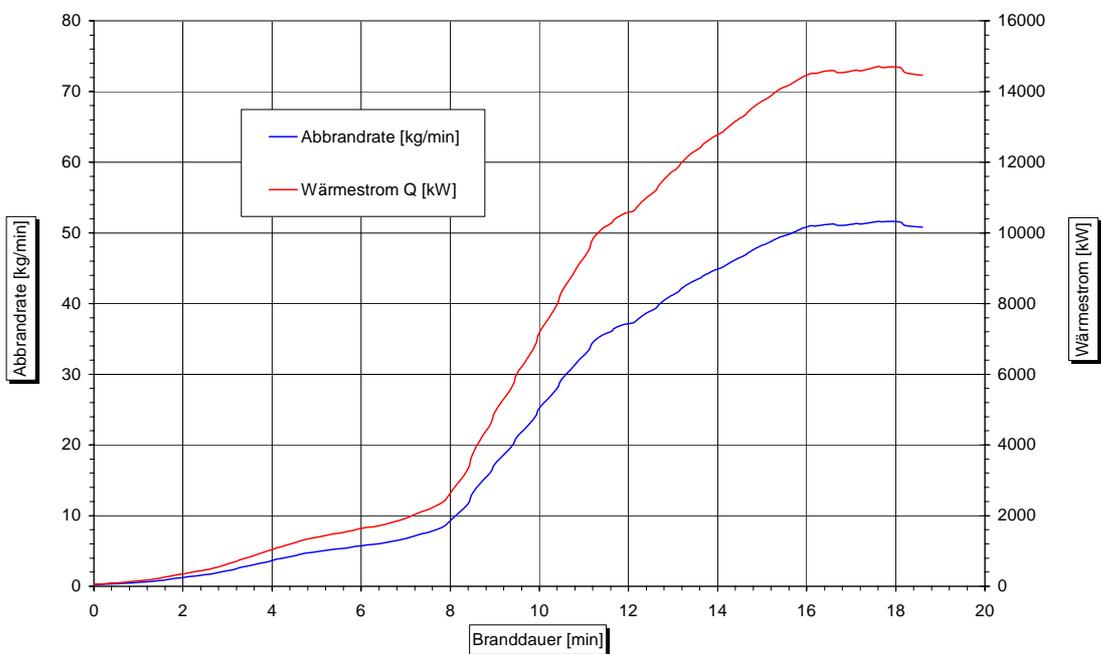
**Bild 4** Anordnung der Messketten im Grundriss und Lage der Versuchsorte.



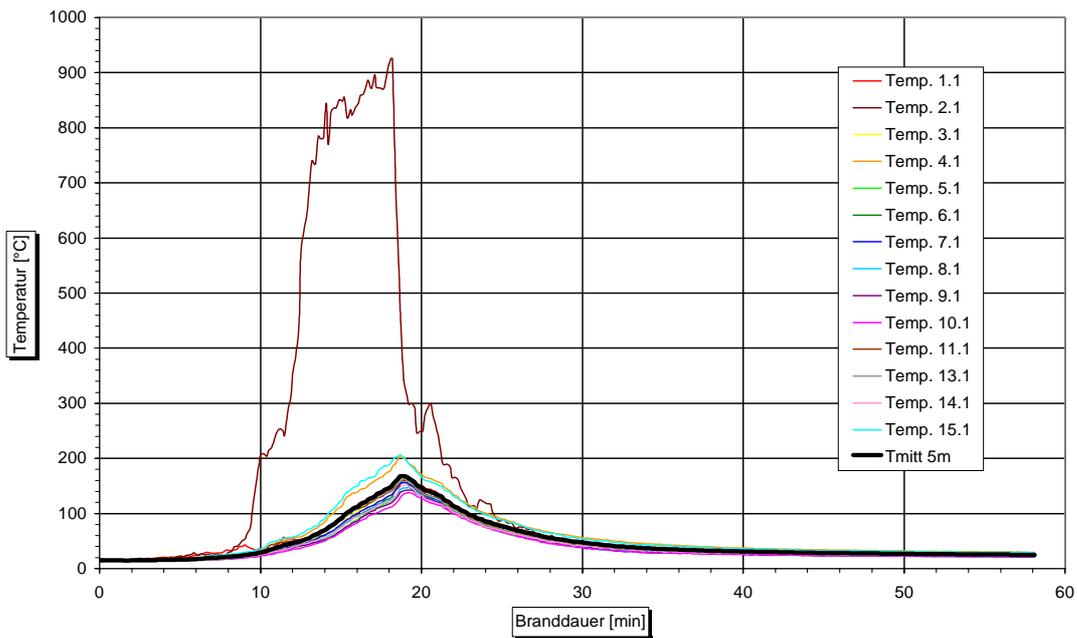
**Bild 5** Versuch 01: Mit Altmöbeln eingerichteter Versuchsraum.



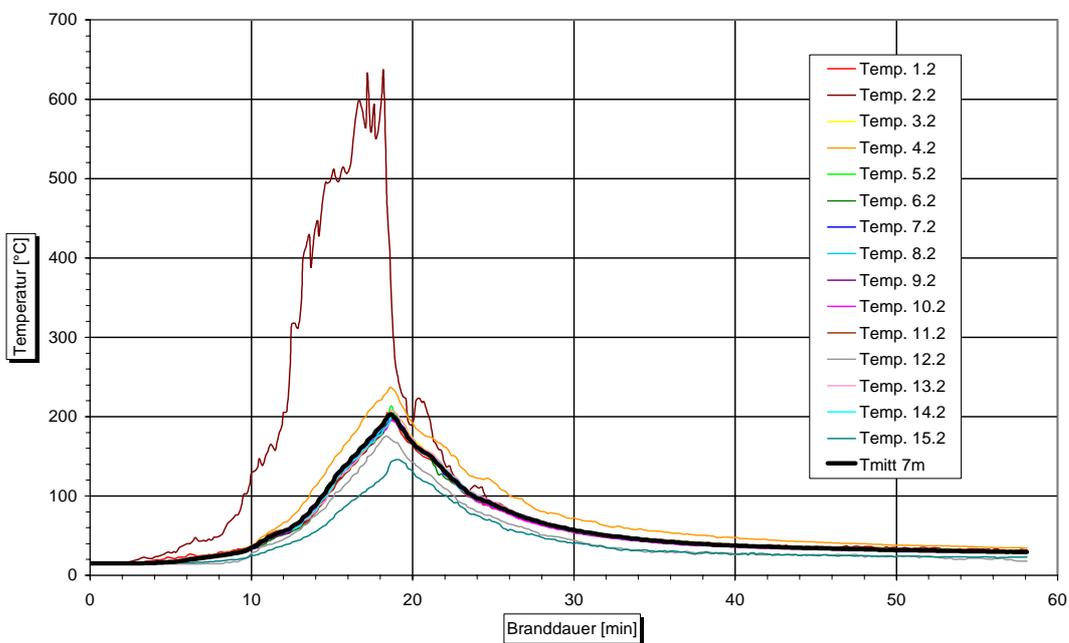
**Bild 6** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Brandlast und der mittleren Deckentemperatur im Brandraum.



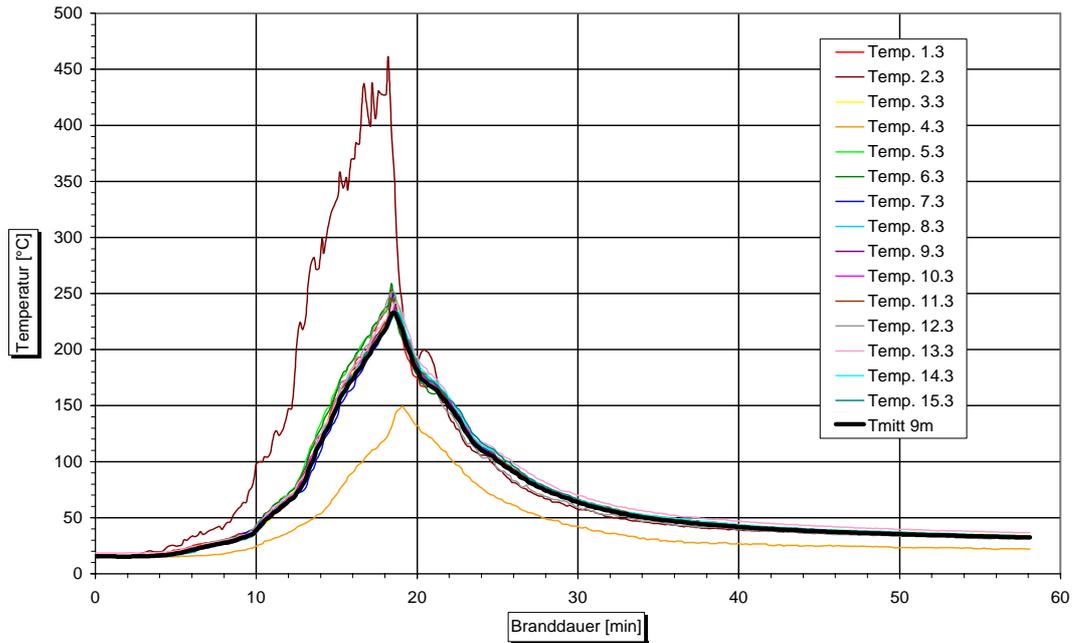
**Bild 7** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate und des theoretisch maximalen Wärmestromes.



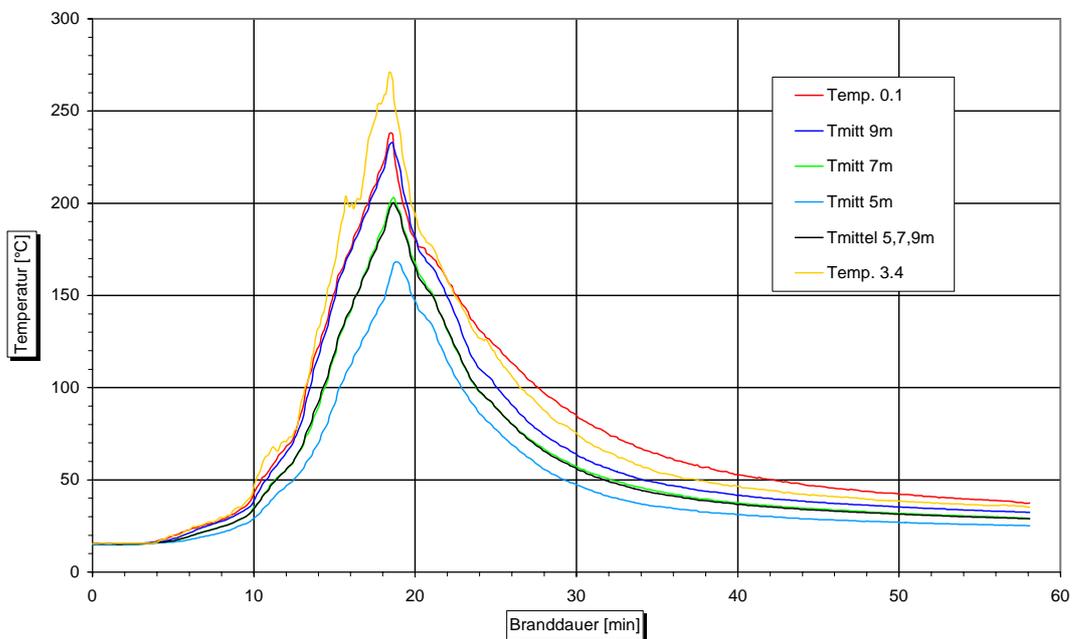
**Bild 8** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.1, in 5 m Höhe.



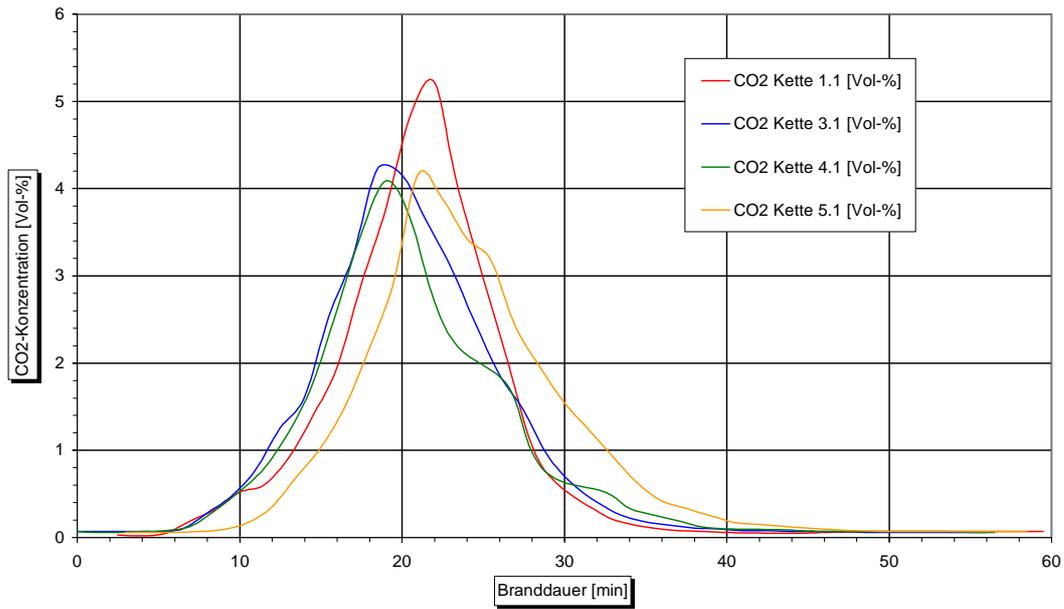
**Bild 9** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.2, in 7 m Höhe.



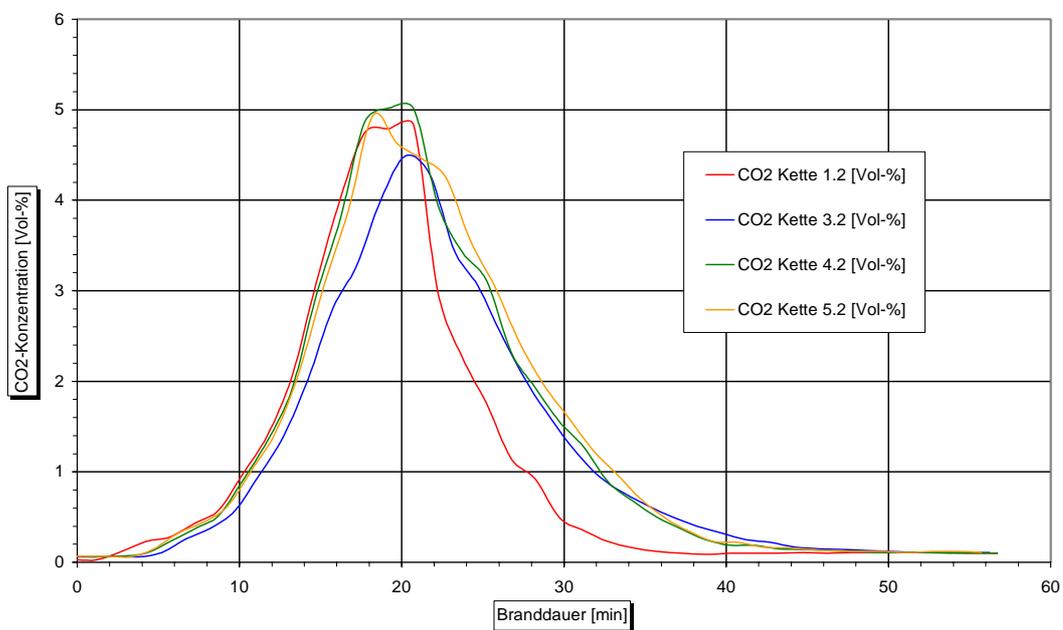
**Bild 10** Versuch 01 : Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.3, in 9 m Höhe.



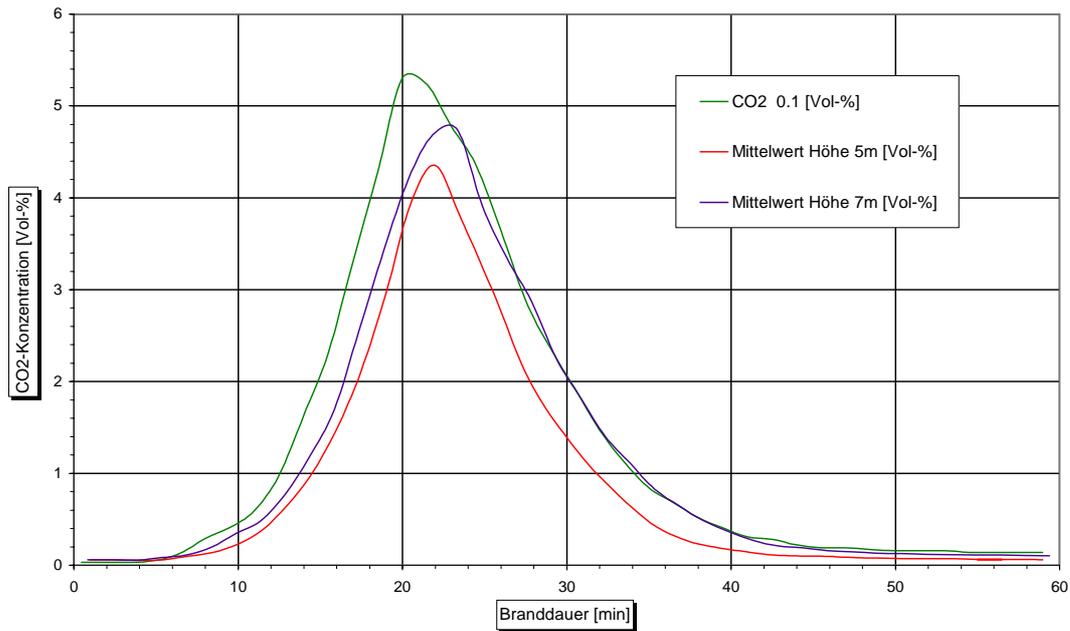
**Bild 11** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte der Temperaturen in den Höhen 5 m, 7 m, und 9 m, sowie des Mittelwertes dieser Kurven und der Temperatur an der Messstelle 3.4 in 10,5 m Höhe und der Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstelle 0.1.



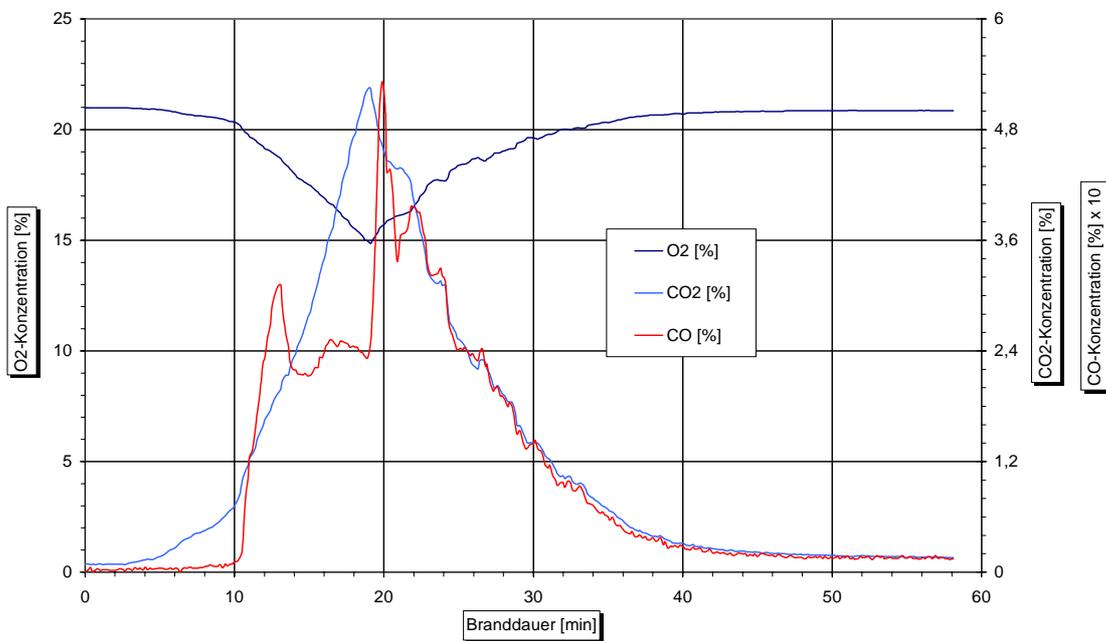
**Bild 12** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 1, 3, 4 und 5 in 5 m Höhe.



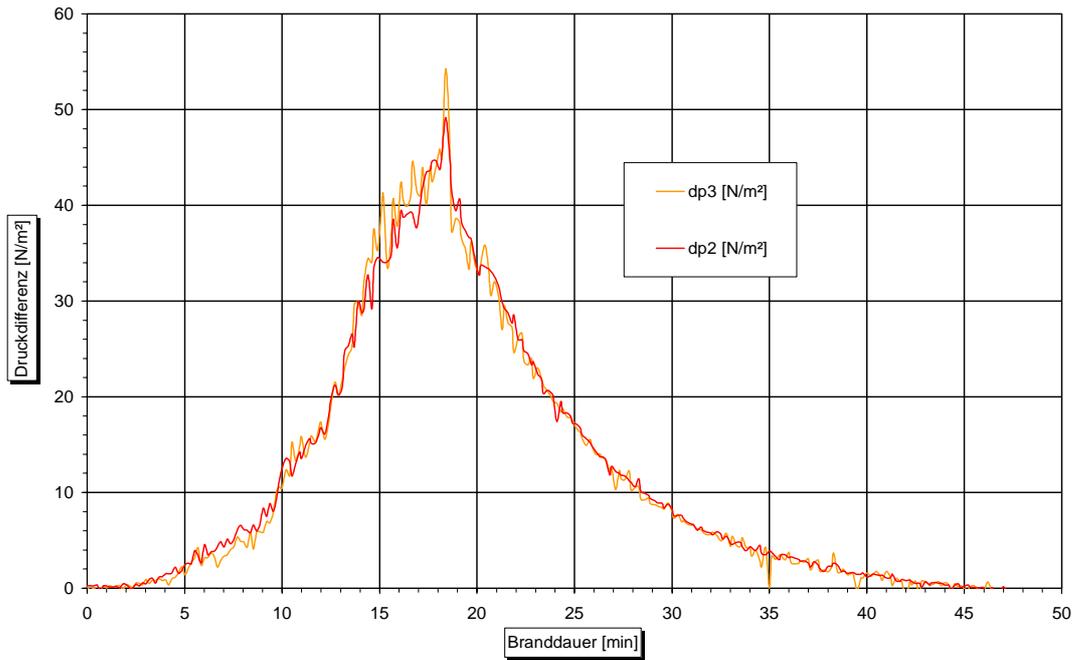
**Bild 13** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 1, 3, 4 und 5 in 7 m Höhe.



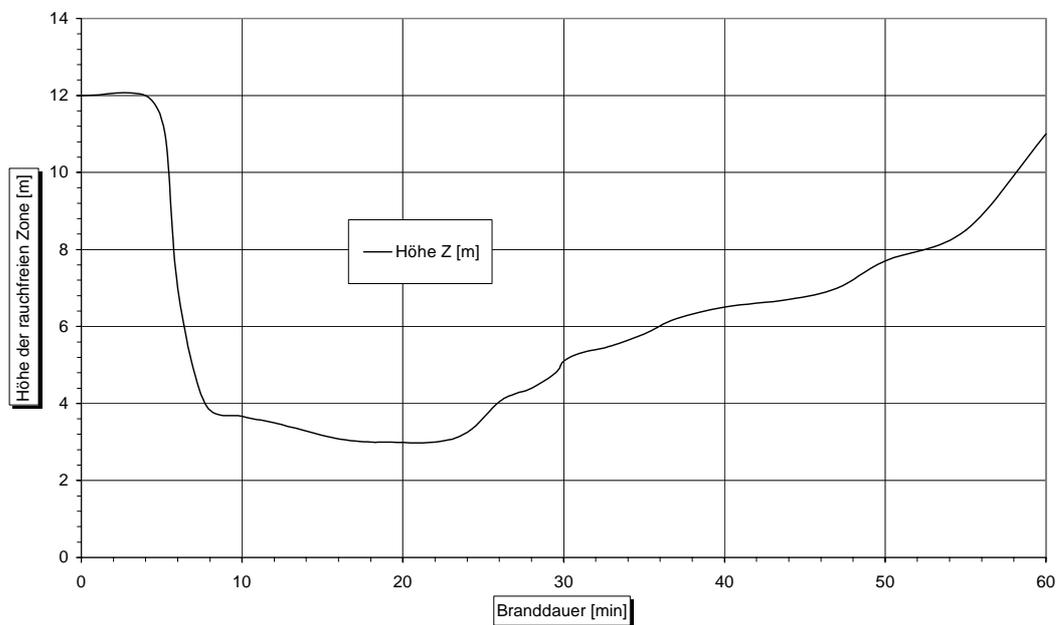
**Bild 14** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Höhen 5 m und 7 m und der CO<sub>2</sub>-Konzentration der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase, Messstelle 0.1.



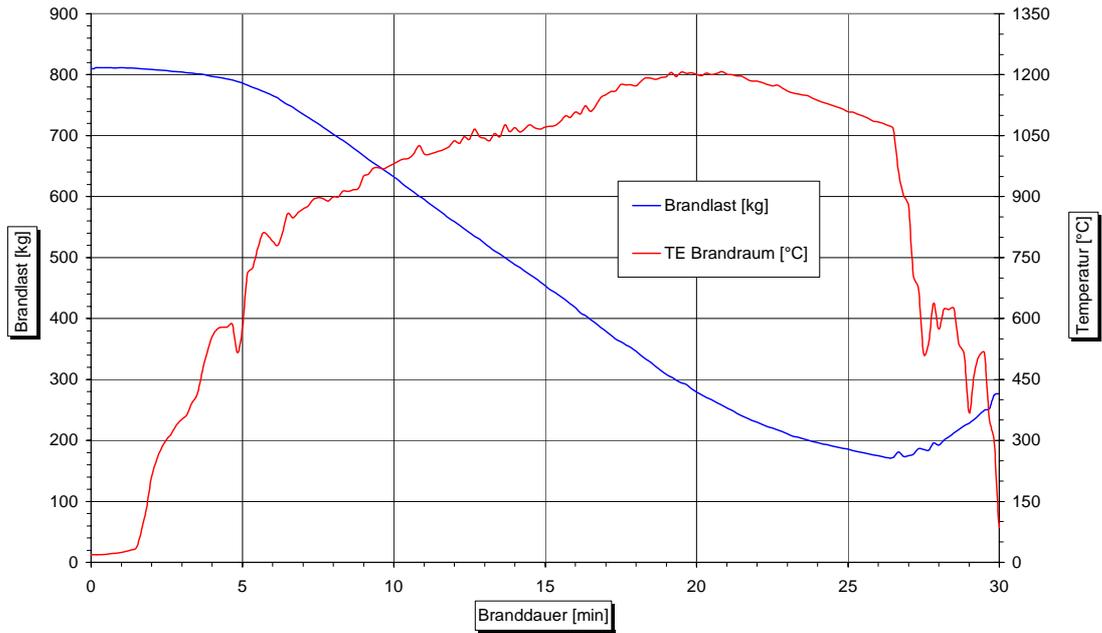
**Bild 15** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und CO in den aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasen, trockenes Abgas.



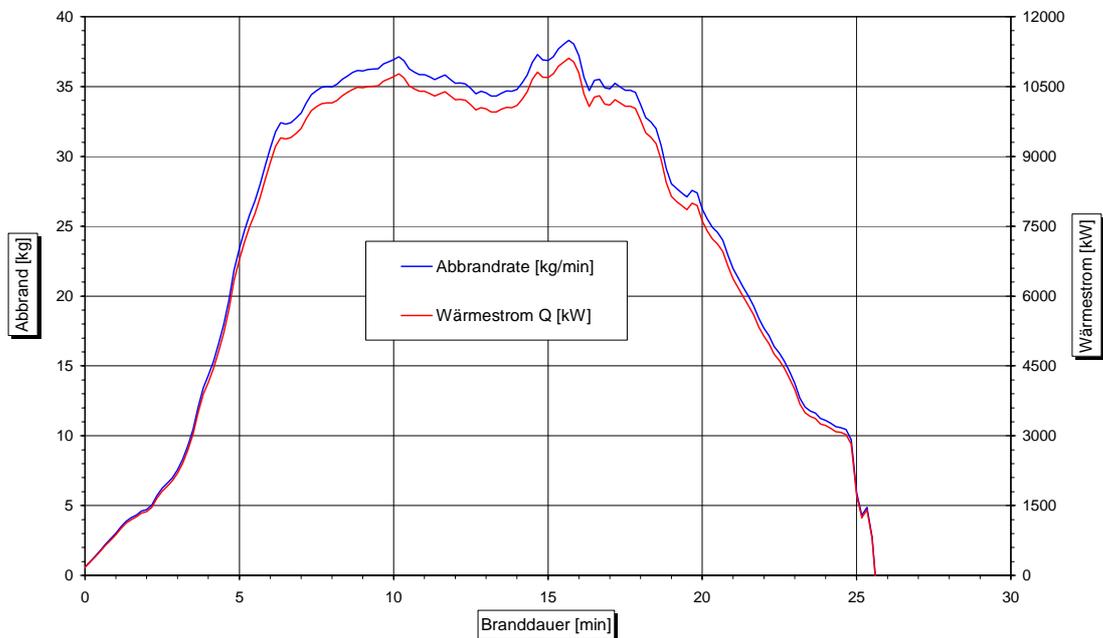
**Bild 16** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen  $dp_2$  und  $dp_3$  zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches.



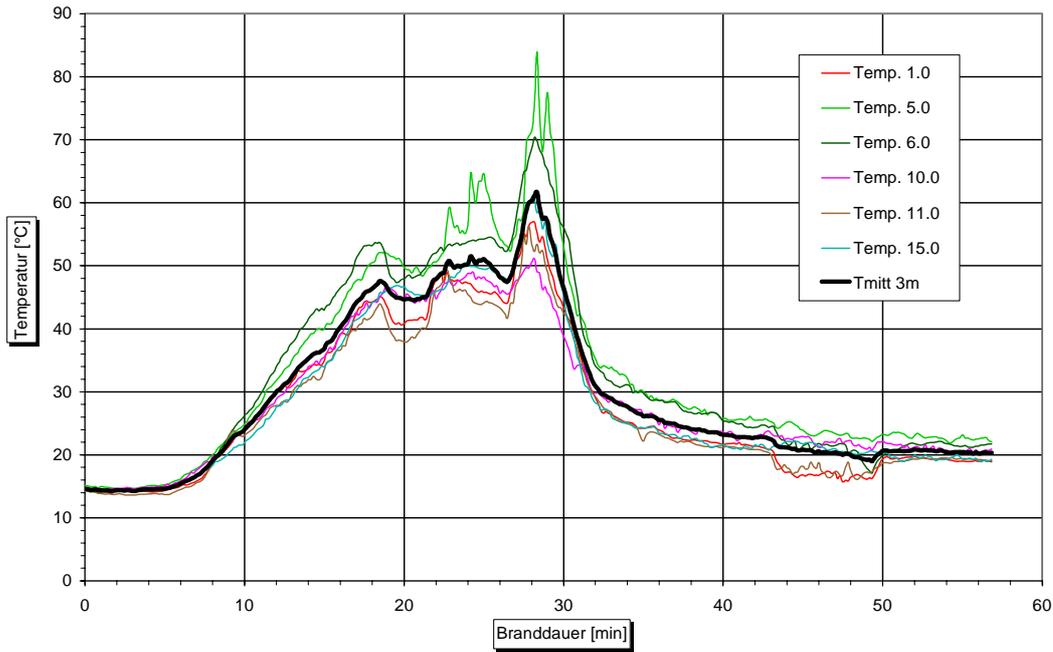
**Bild 17** Versuch 01: Zeitlicher Verlauf der Höhe der rauchfreien Zone in der Versuchshalle.



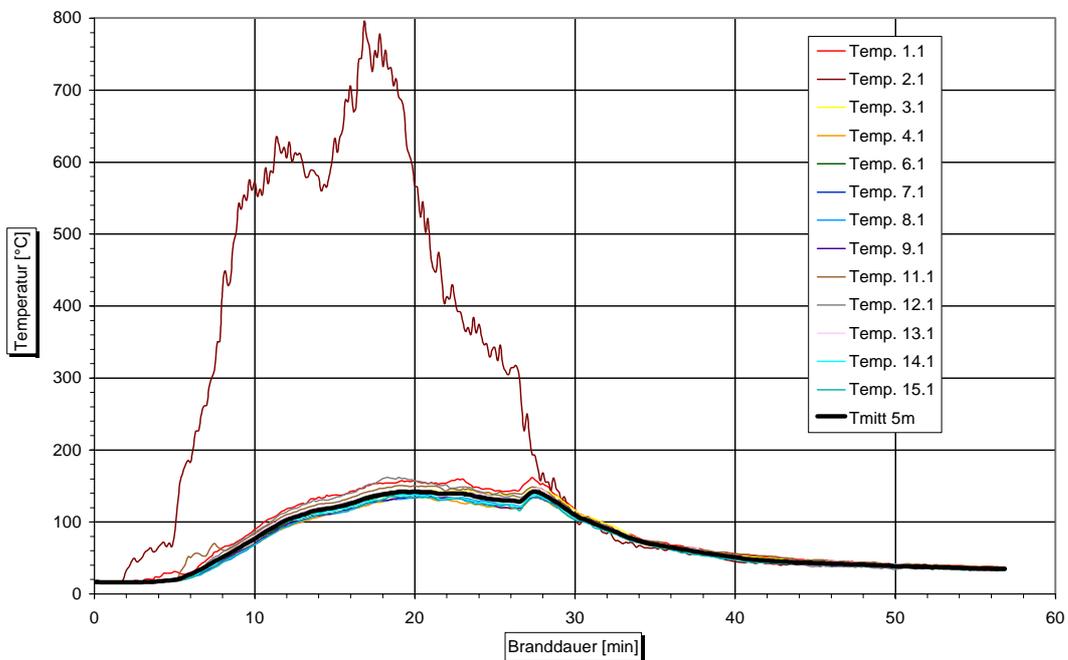
**Bild 18** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Brandlast und mittleren Deckentemperatur im Brandraum.



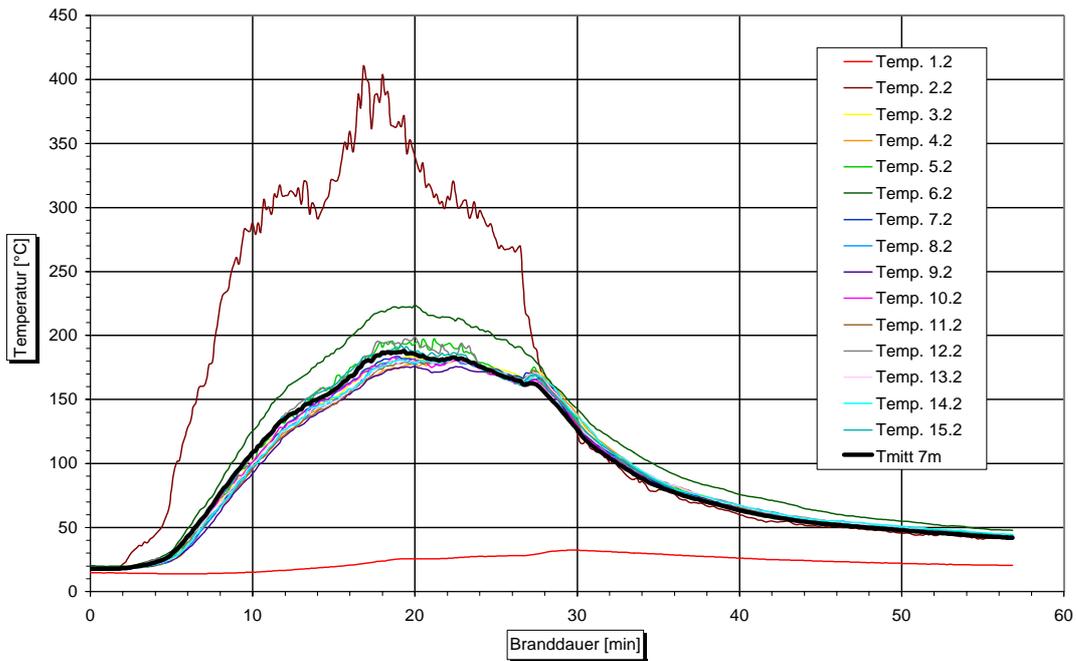
**Bild 19** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate und des theoretisch maximalen Wärmestromes.



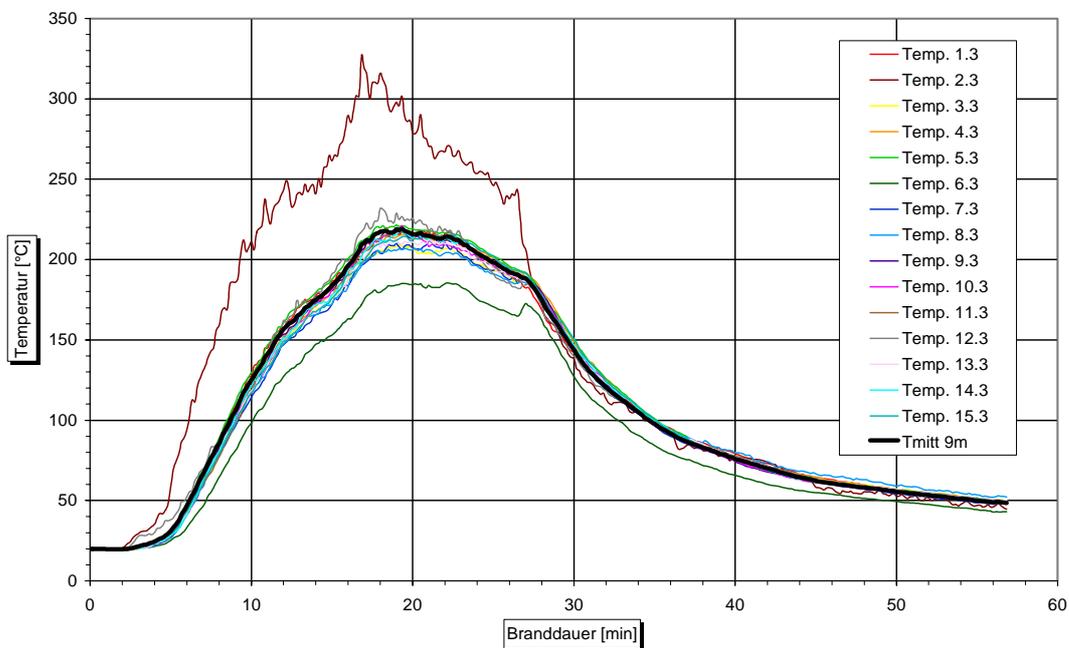
**Bild 20** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1, 5, 6, 10, 11 und 15 sowie deren Mittelwert in 3 m Höhe.



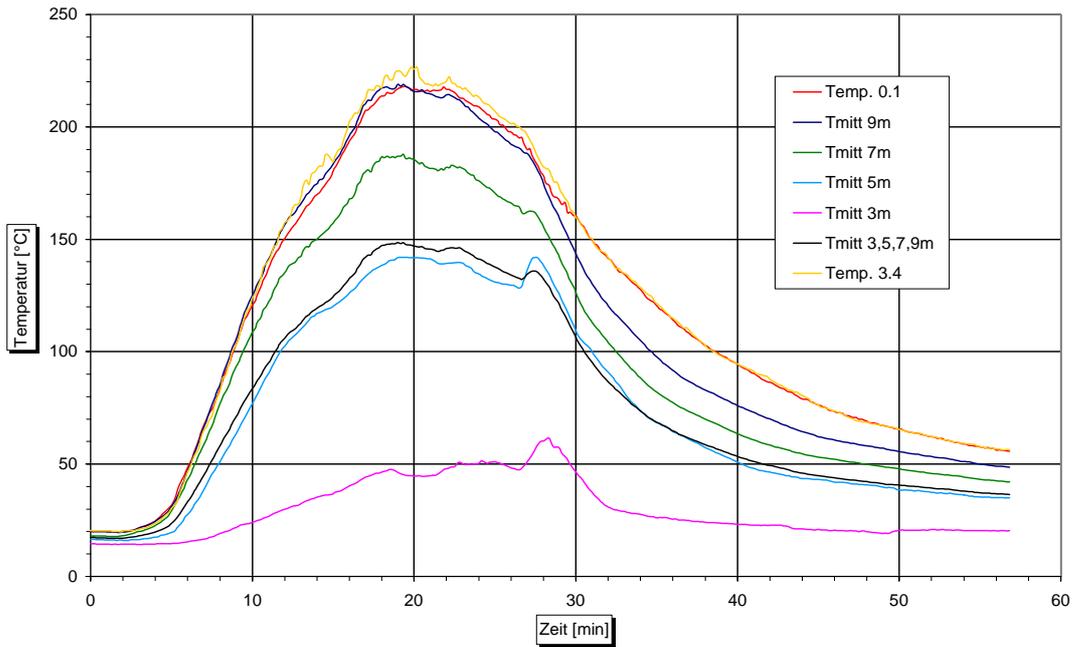
**Bild 21** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung vom T2.1, in 5 m Höhe.



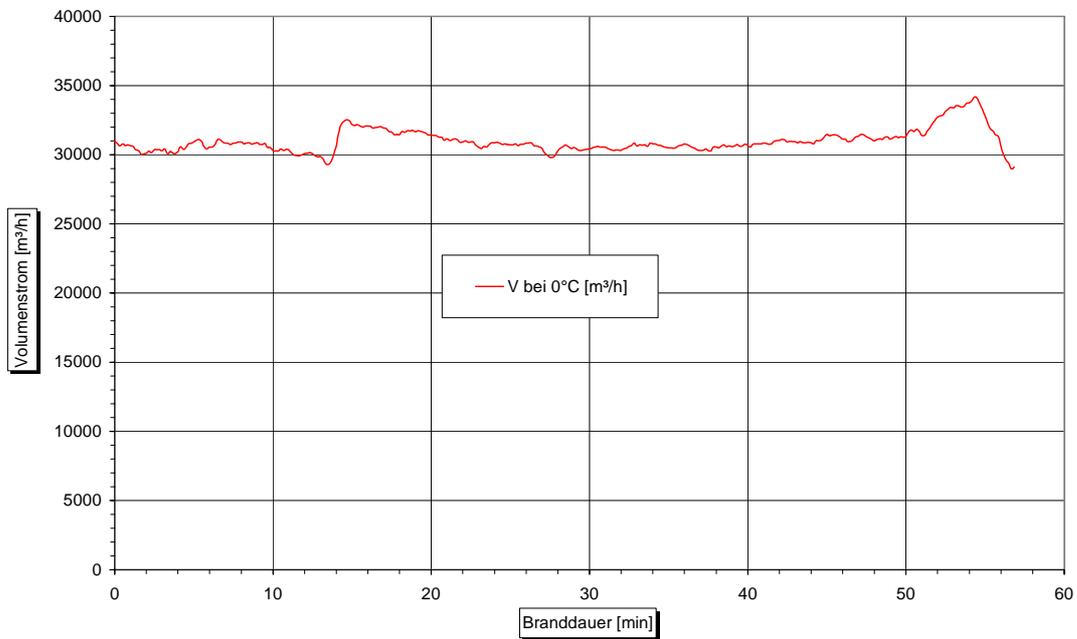
**Bild 22** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.2, in 7 m Höhe.



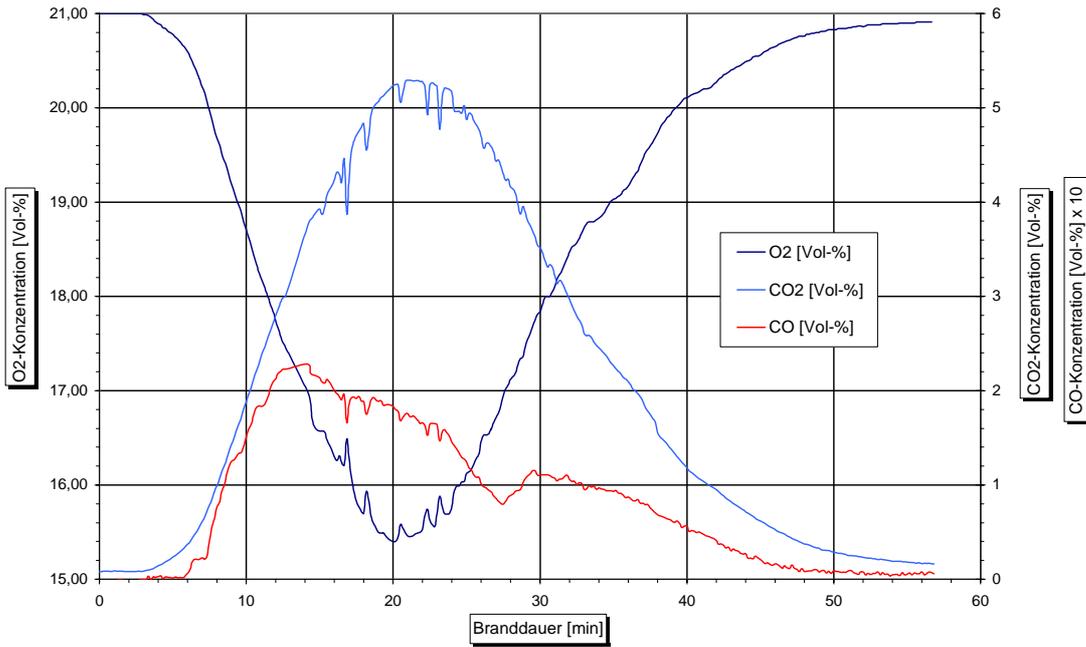
**Bild 23** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.3, in 9 m Höhe.



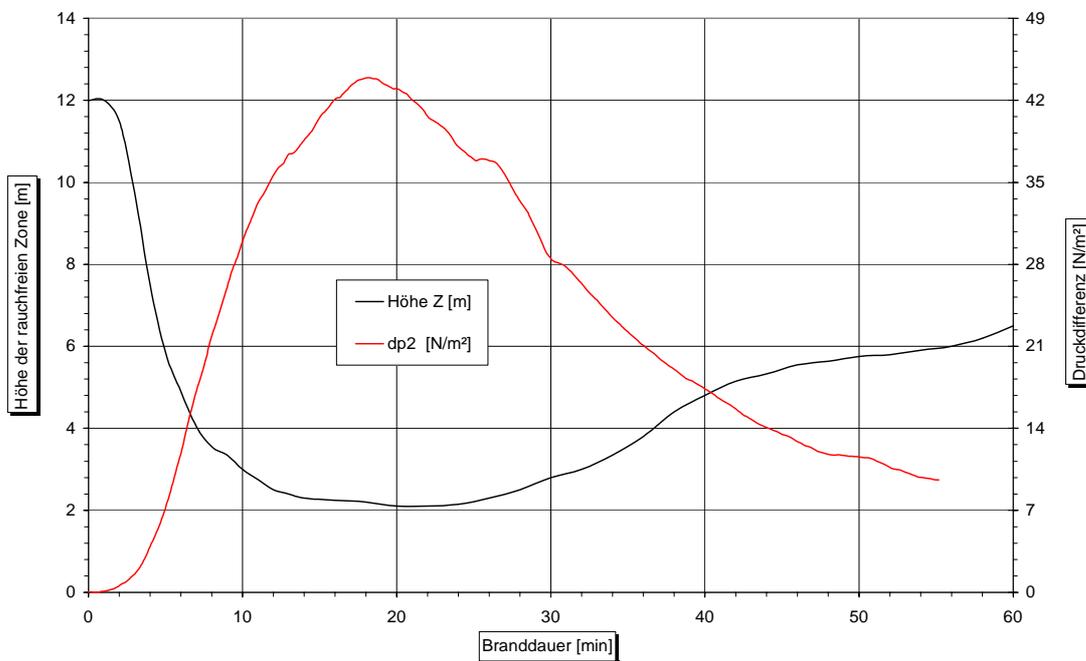
**Bild 24** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf des Mittelwertes der Temperaturen in 3 m, 5 m, 7 m und 9 m Höhe, des Mittelwertes in diesen Höhen, der Temperatur an der Messstelle 3.4 in 10,5 m Höhe sowie der Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstelle 0.1.



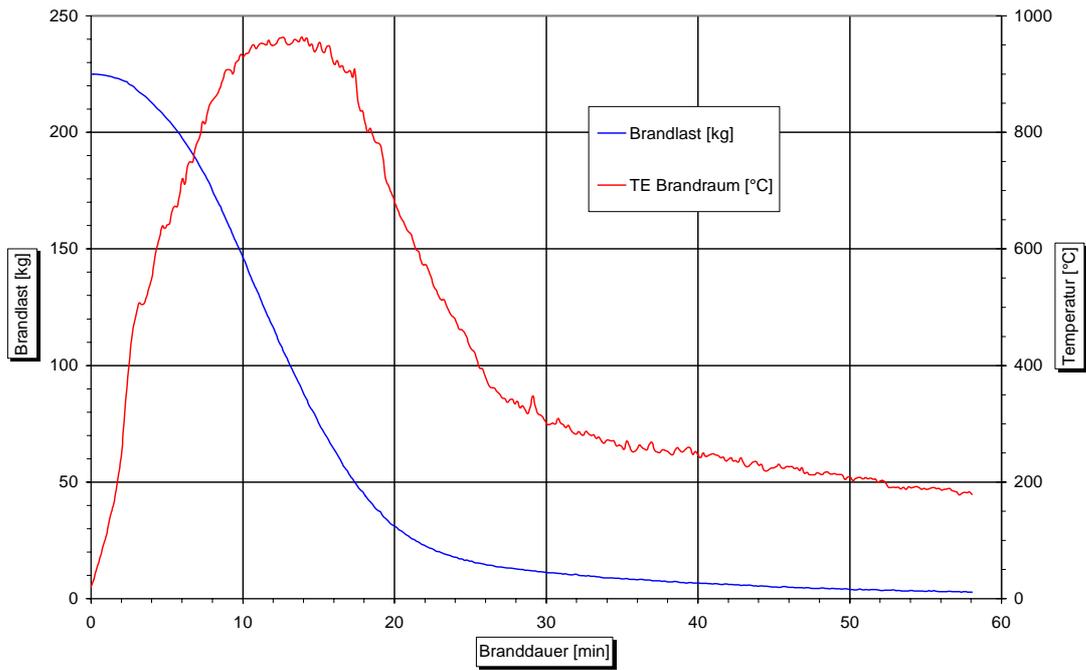
**Bild 25** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf des aus der Versuchshalle abgesaugten Volumenstromes.



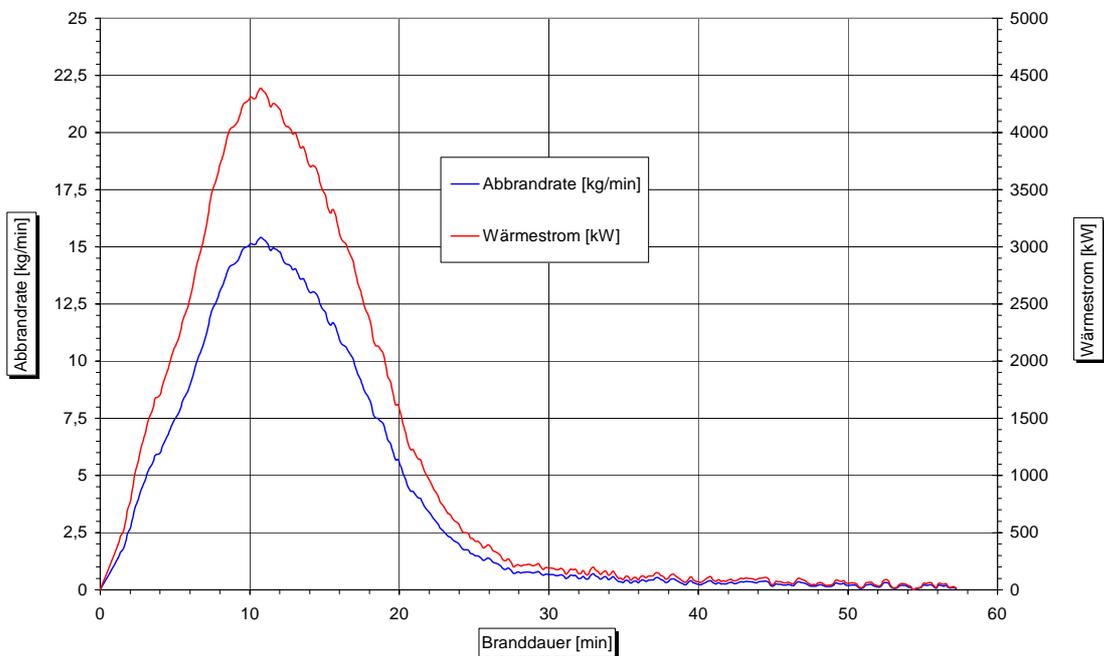
**Bild 26** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und CO in den aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasen, trockenes Abgas.



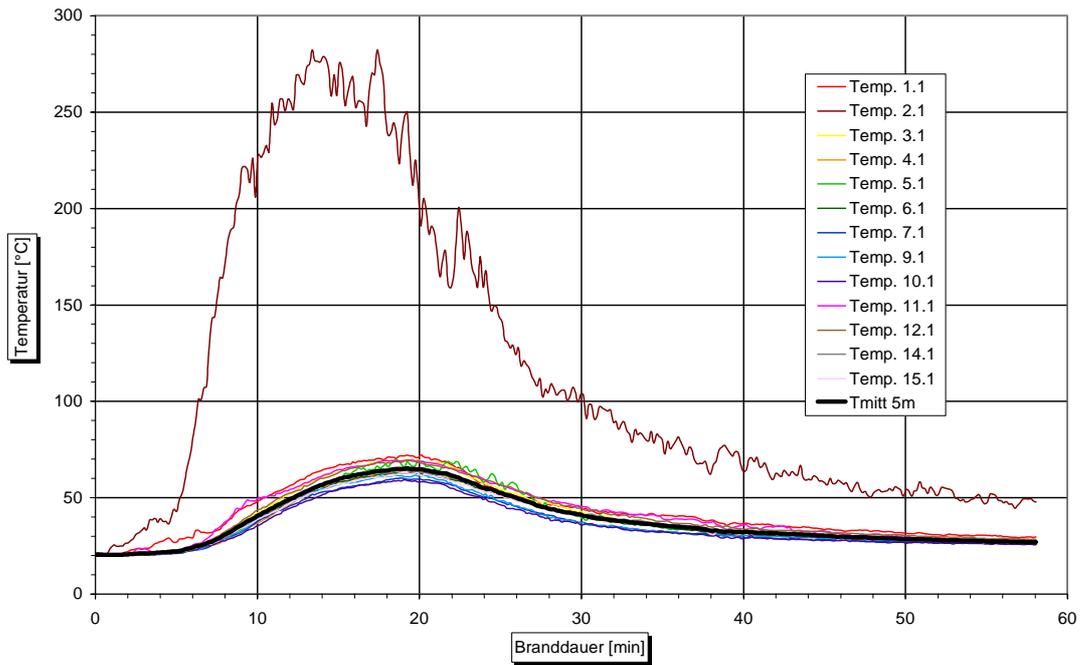
**Bild 27** Versuch 02: Zeitlicher Verlauf der Höhe der rauchfreien Zone in der Versuchshalle und der Verlauf der Druckdifferenz  $dp_2$  zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung, in Höhe des Hallendaches.



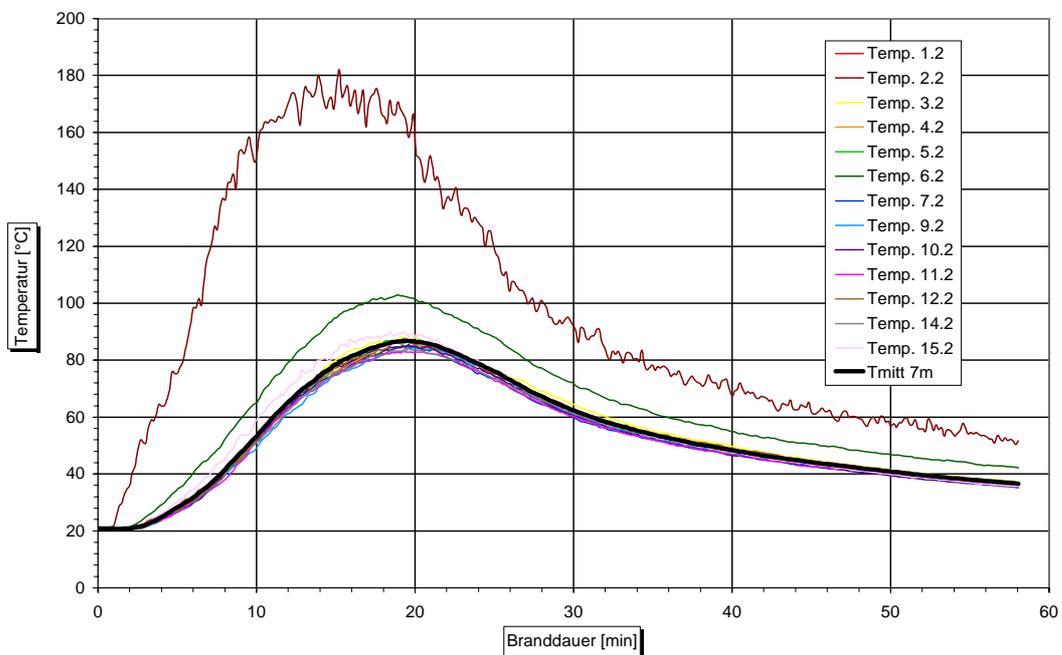
**Bild 28** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf der Brandlast und der mittleren Deckentemperatur im Brandraum.



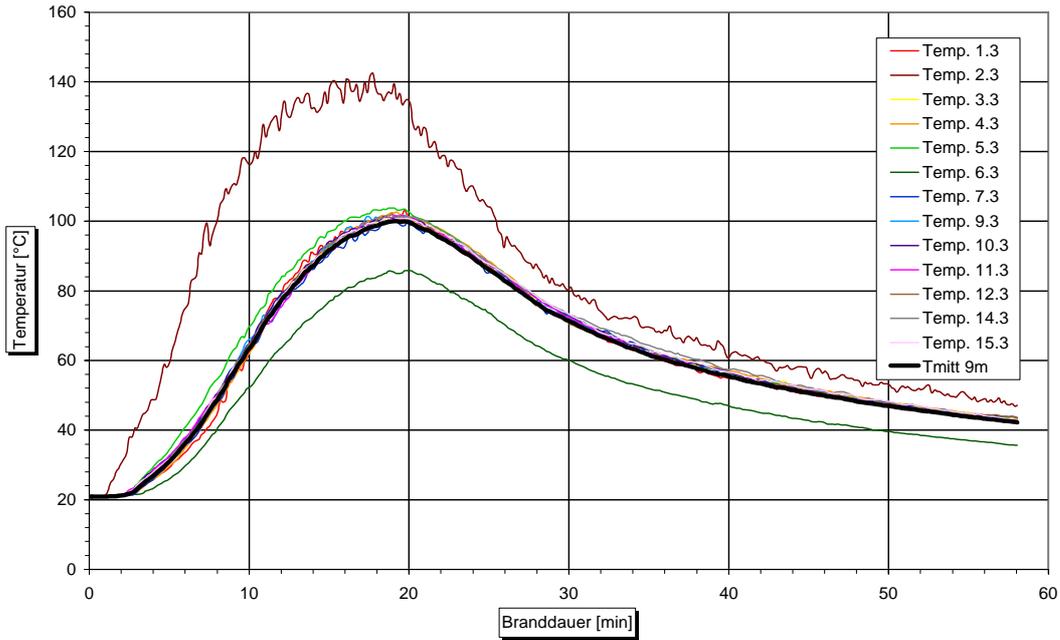
**Bild 29** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate und des theoretisch maximalen Wärmestromes.



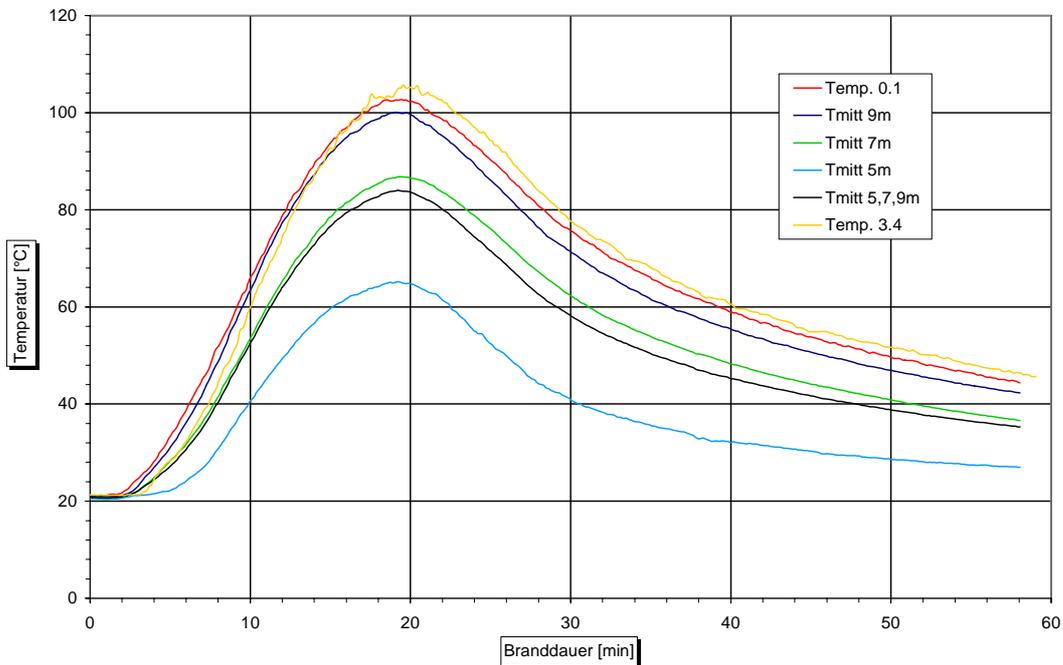
**Bild 30** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.1, in 5 m Höhe.



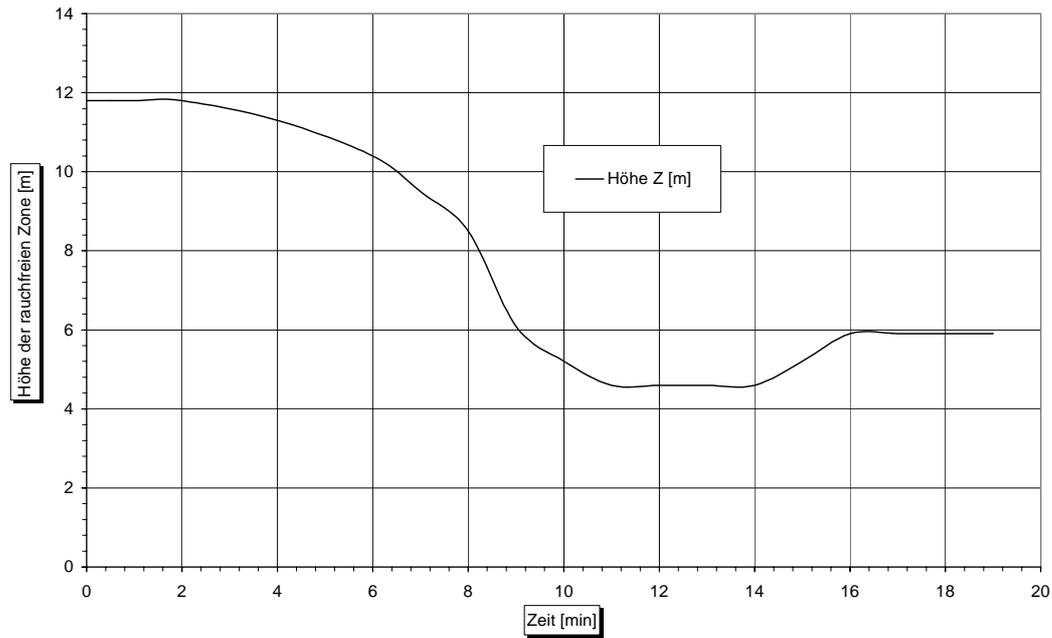
**Bild 31** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.2, in 7 m Höhe.



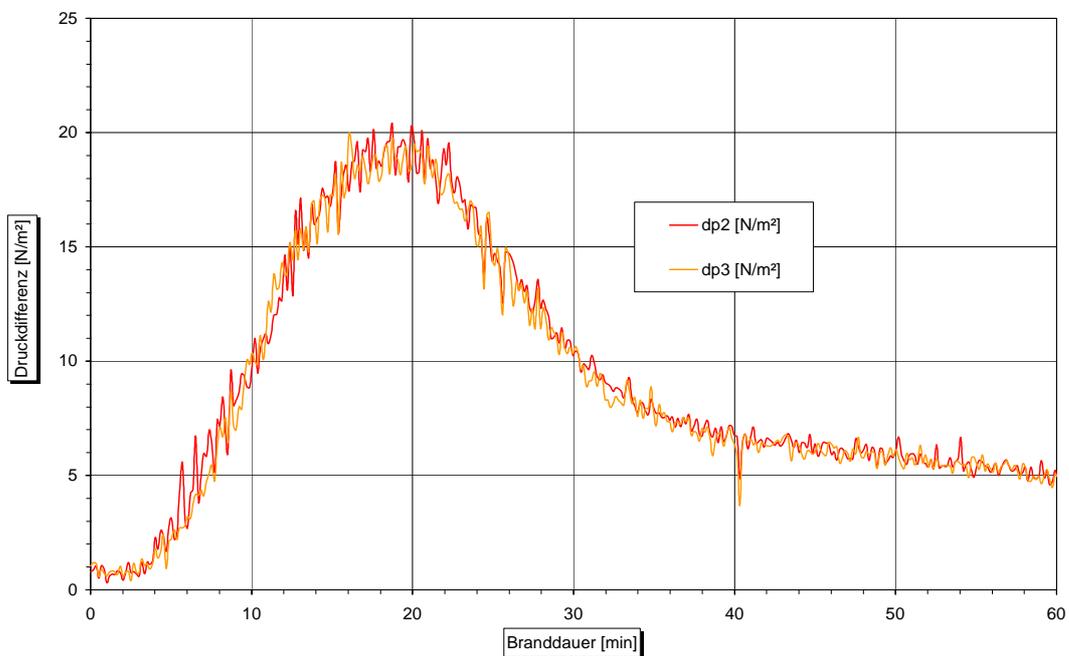
**Bild 32** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.3, in 9 m Höhe.



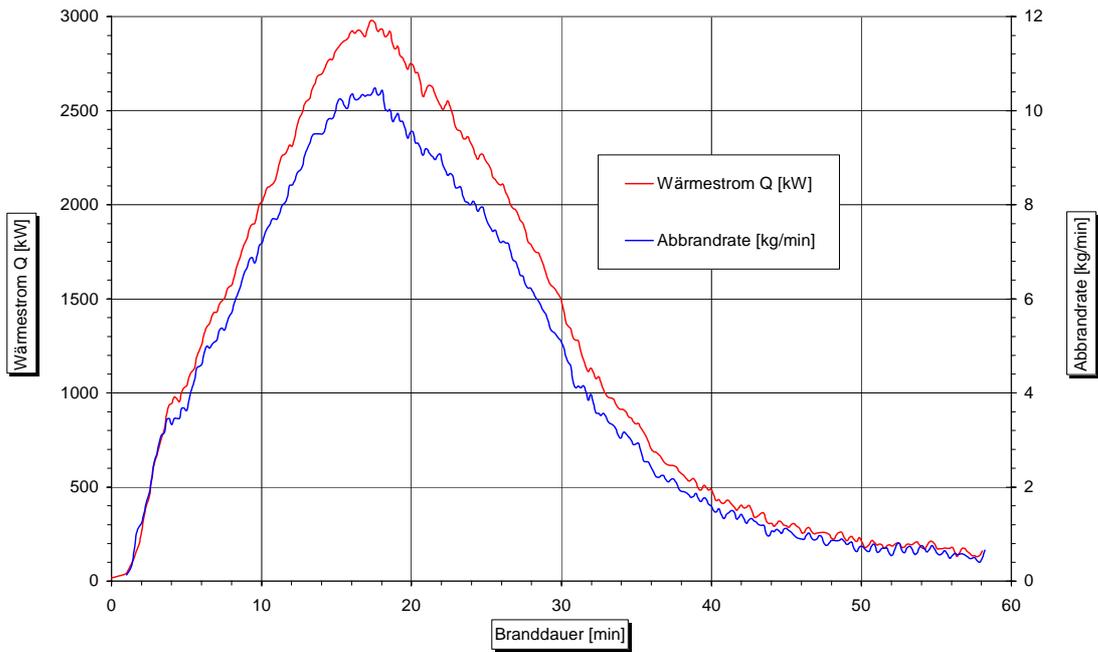
**Bild 33** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf des Mittelwertes der Temperaturen in 3 m, 5 m, 7 m und 9 m Höhe, des Mittelwertes in diesen Höhen, der Temperatur an der Messstelle 3.4 in 10,5 m Höhe sowie der Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstelle 0.1.



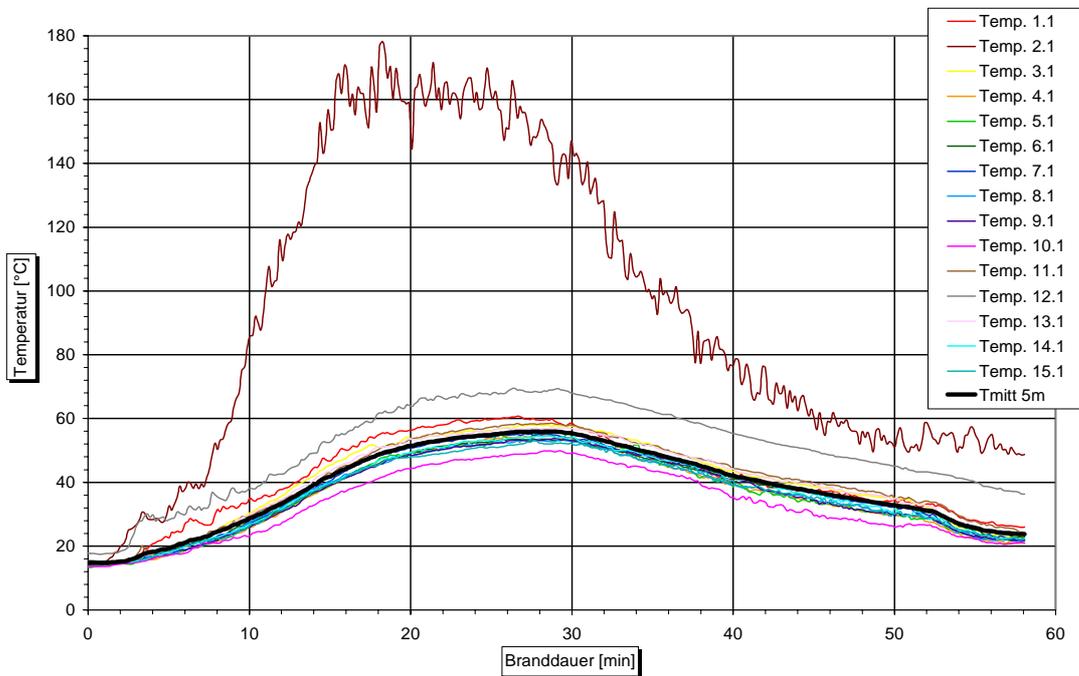
**Bild 34** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf der Höhe der rauchfreien Zone.



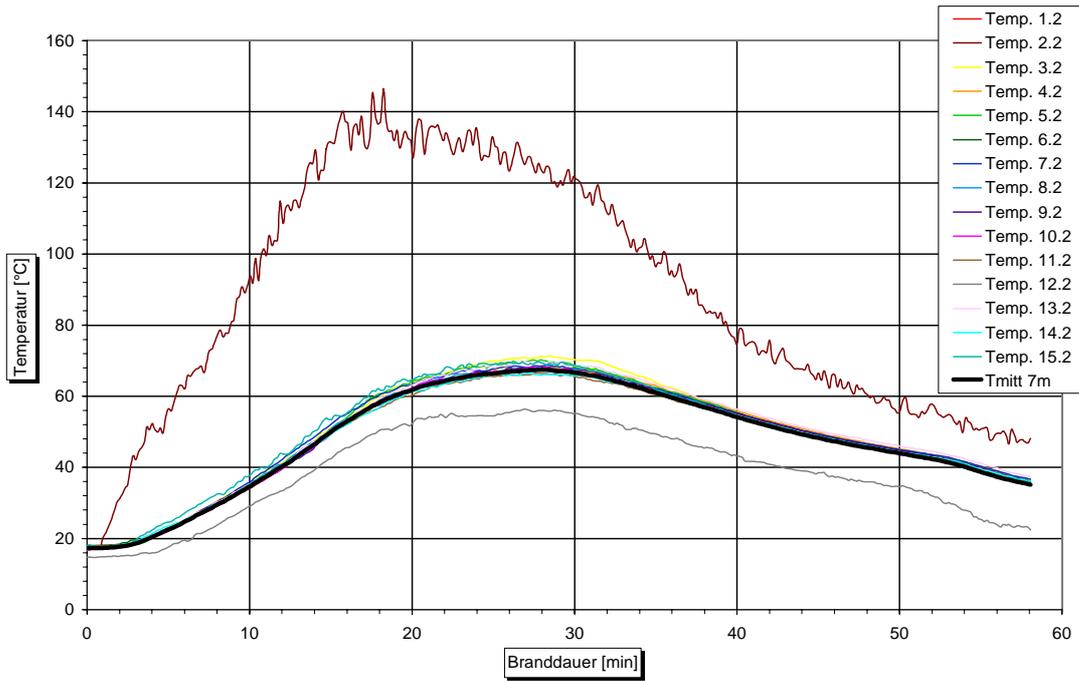
**Bild 35** Versuch 03: Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen  $dp_2$  und  $dp_3$  zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung, in Höhe des Hallendaches.



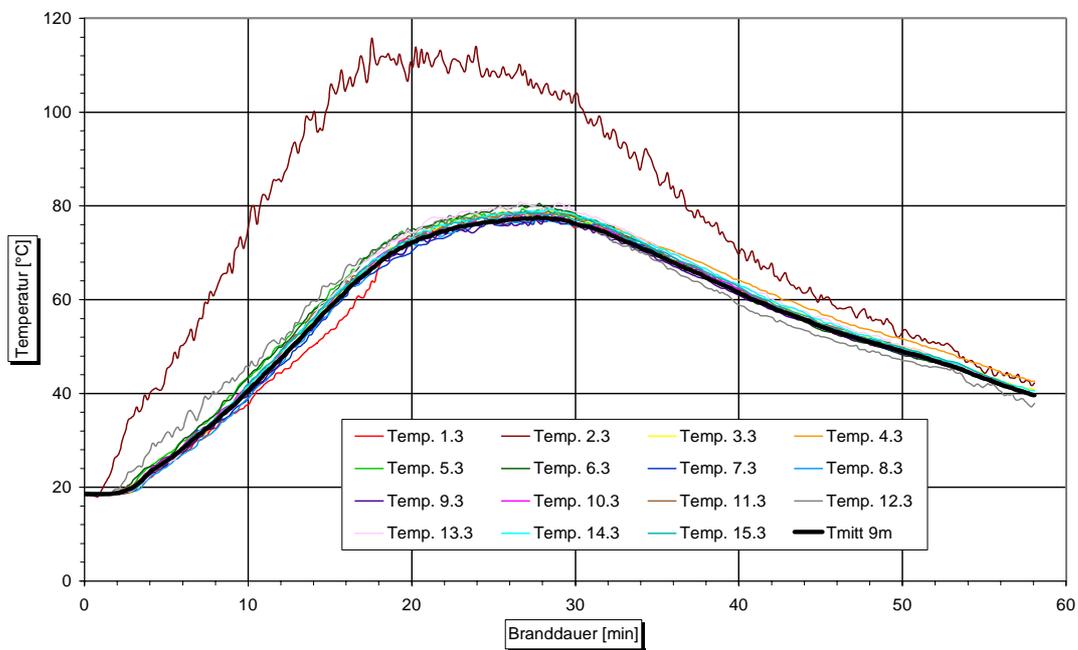
**Bild 36** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate und des theoretisch maximalen Wärmestromes.



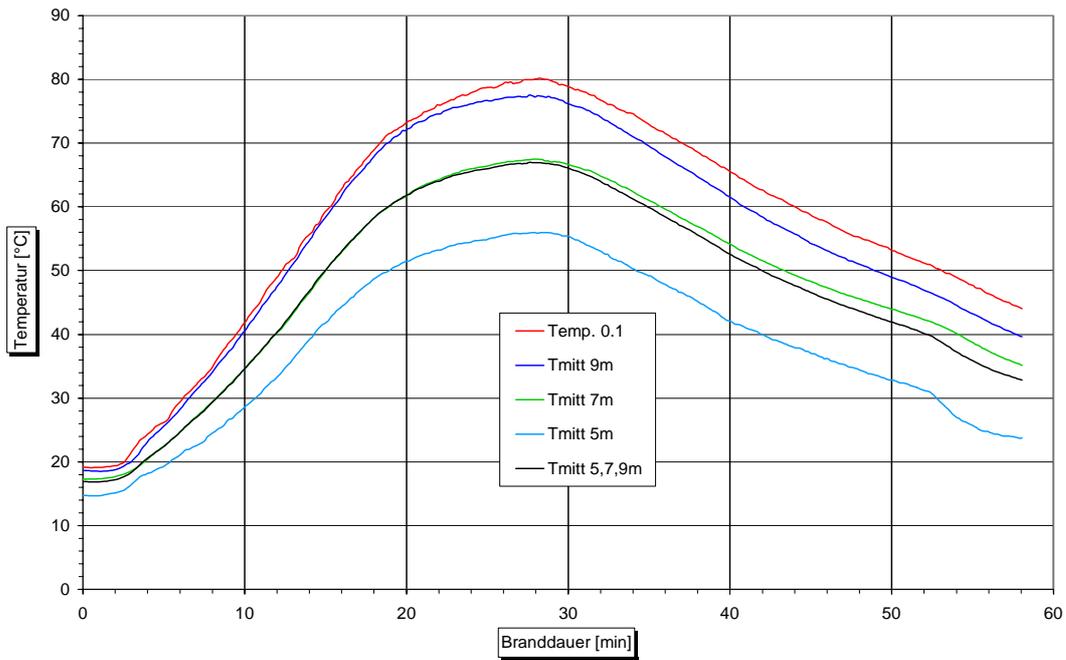
**Bild 37** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.1, in 5 m Höhe.



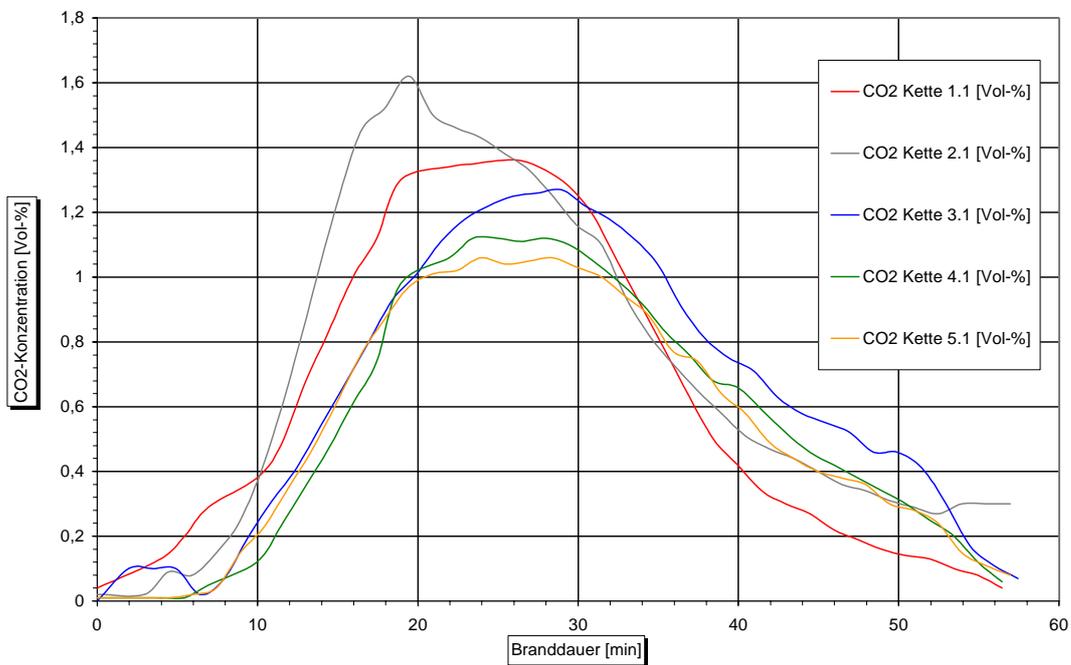
**Bild 38** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.2, in 7 m Höhe.



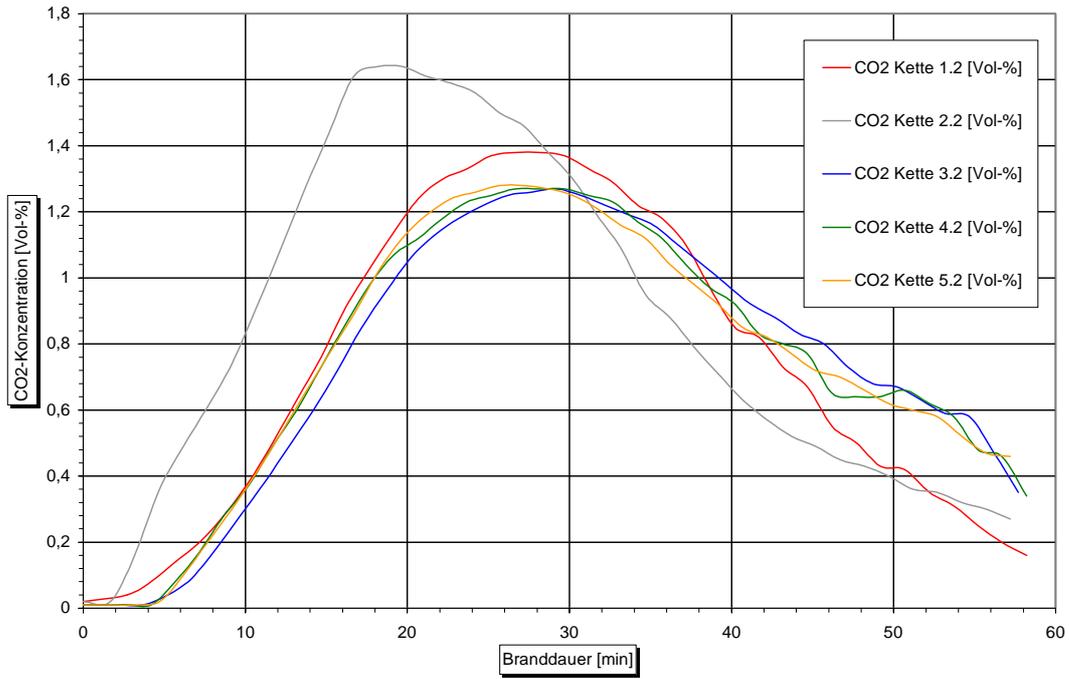
**Bild 39** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie der Mittelwert ohne Berücksichtigung von T2.3, in 9 m Höhe.



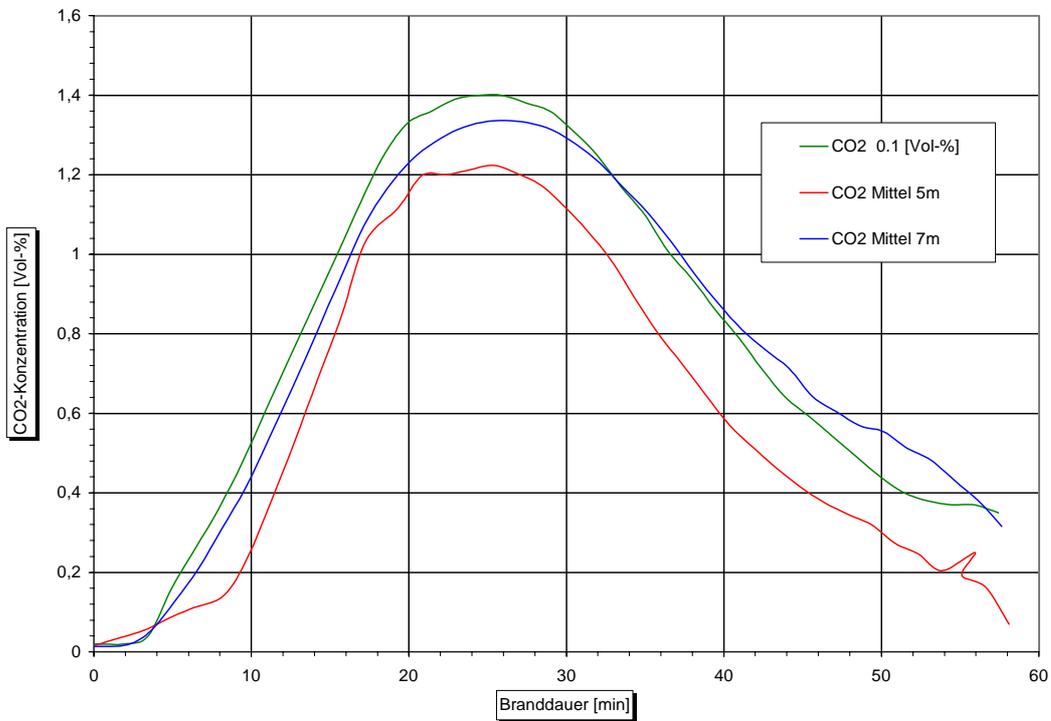
**Bild 40** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf des Mittelwertes der Temperaturen in 5 m, 7 m und 9 m Höhe, des Mittelwertes in diesen Höhen, sowie der Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstelle 0.1.



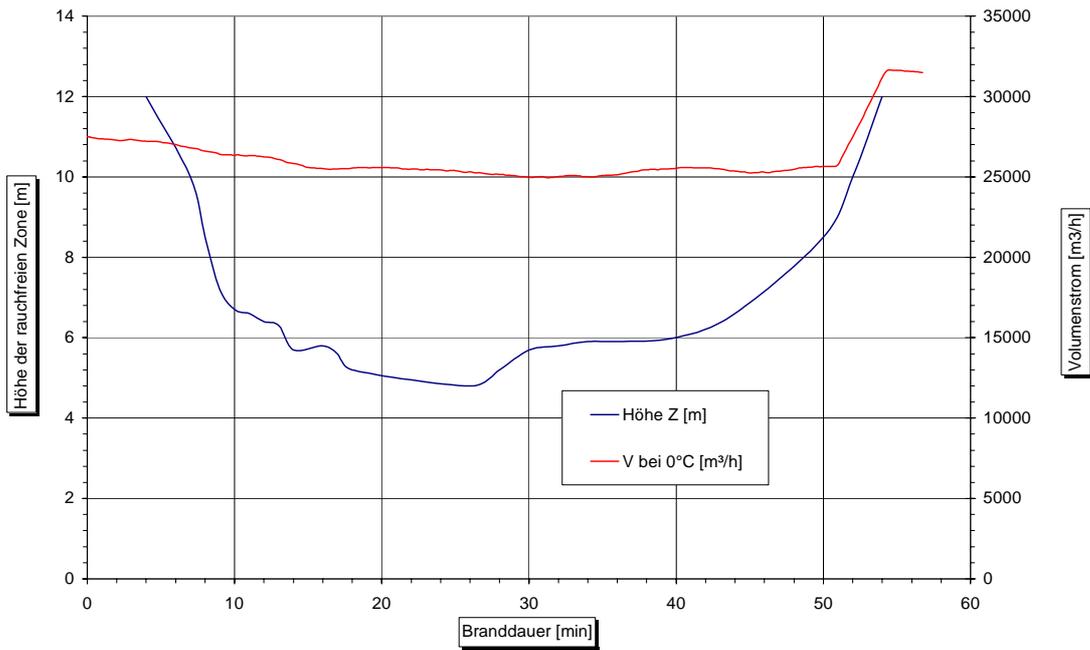
**Bild 41** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 1, 2, 3, 4 und 5, in 5 m Höhe, trockenes Abgas.



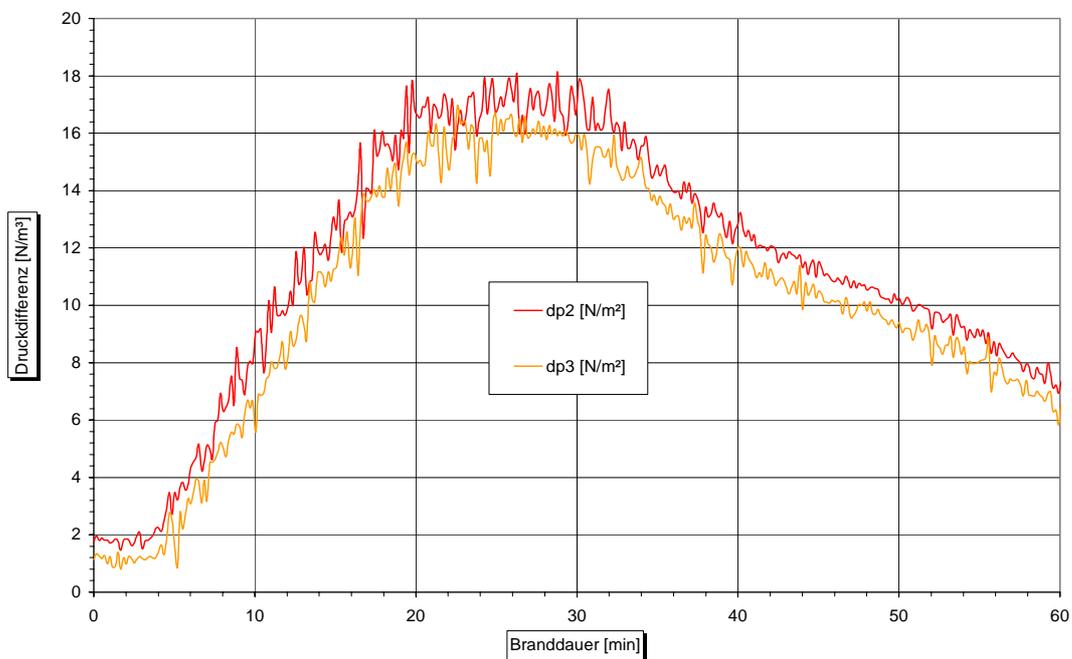
**Bild 42** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 1, 2, 3, 4 und 5, in 7 m Höhe, trockenes Abgas.



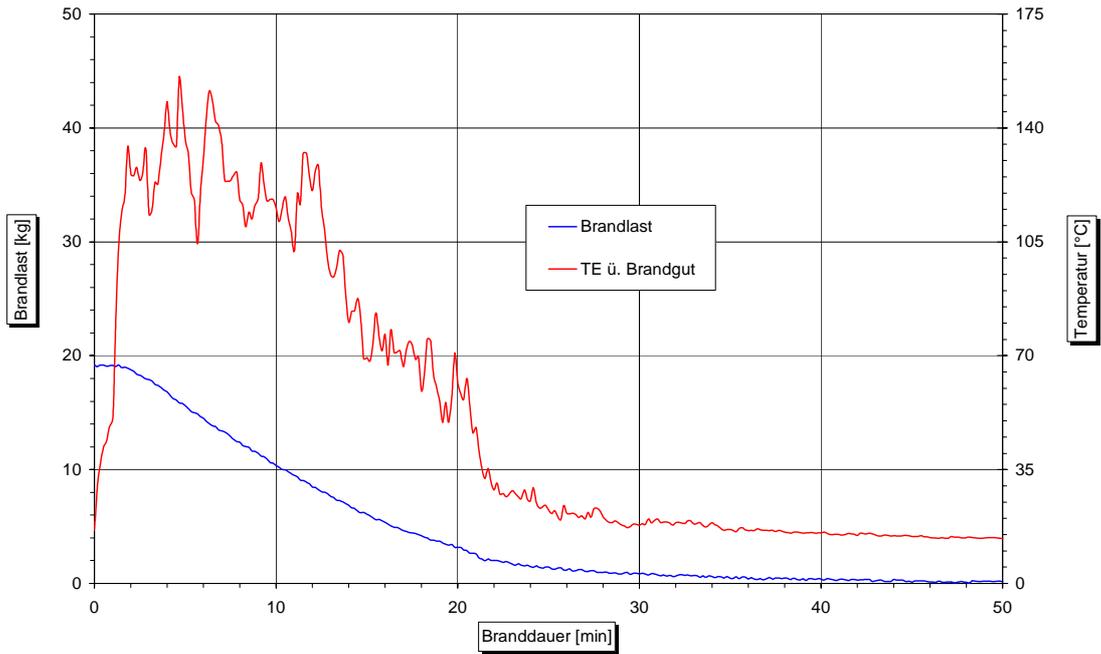
**Bild 43** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Höhen 5 m und 7 m, sowie der CO<sub>2</sub>-Konzentration der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstelle 0.1, trockenes Abgas.



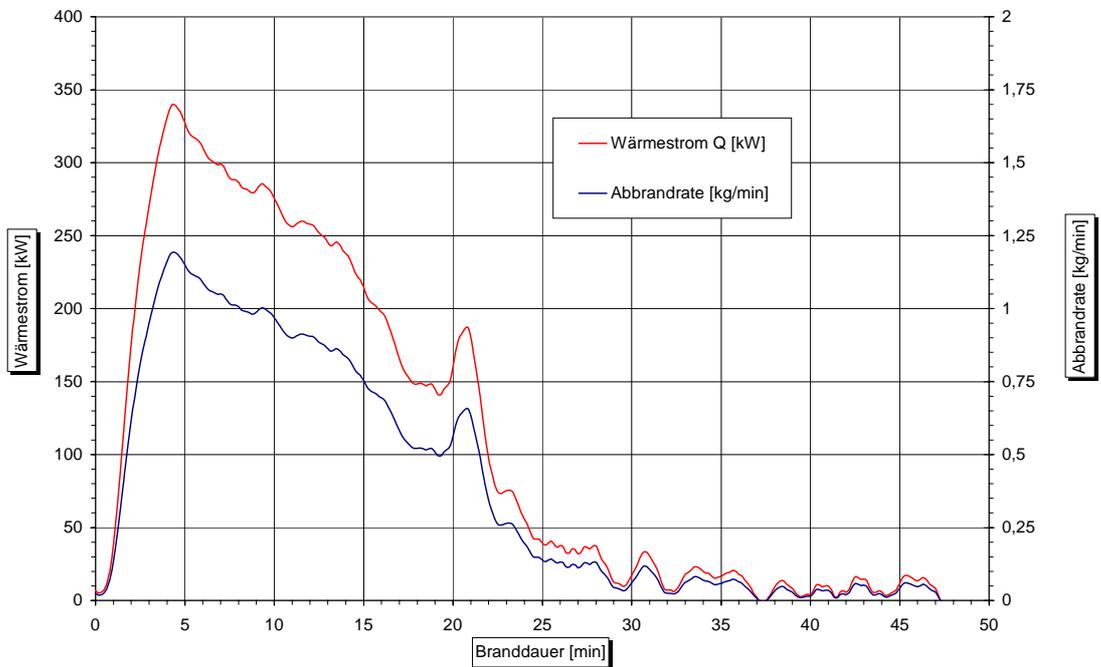
**Bild 44** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der Höhe der rauchfreien Zone in der Versuchshalle und des aus der Versuchshalle abgesaugten Volumenstromes.



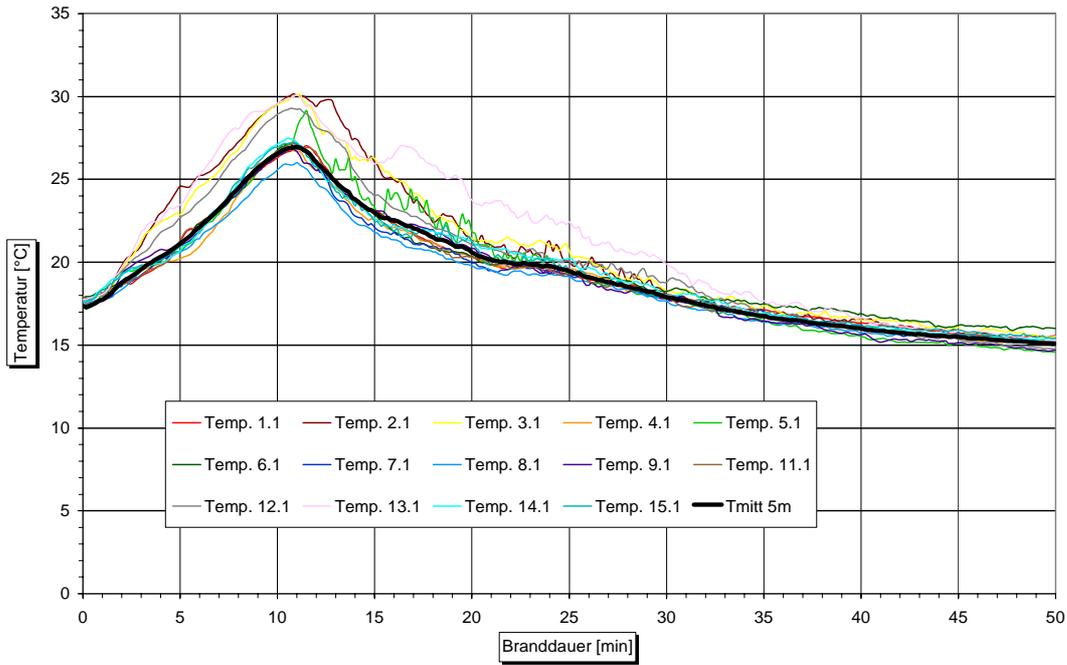
**Bild 45** Versuch 04: Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen  $dp_2$  und  $dp_3$  zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung, in Höhe des Hallendaches.



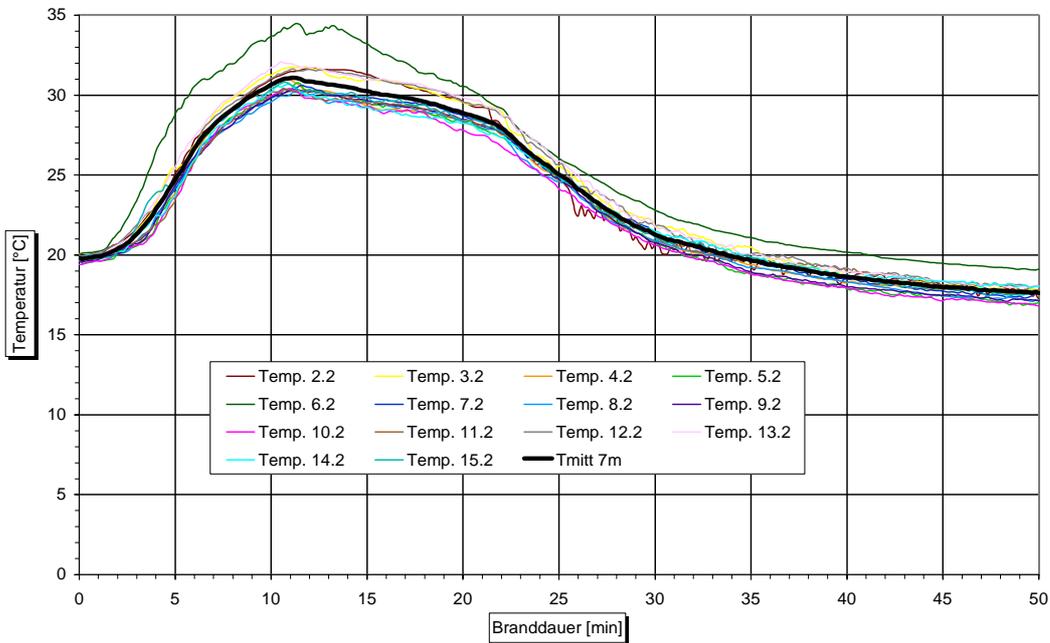
**Bild 46** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Brandlast sowie der Temperatur in einer Höhe von 3 m oberhalb des Zentrums der Holzkippe.



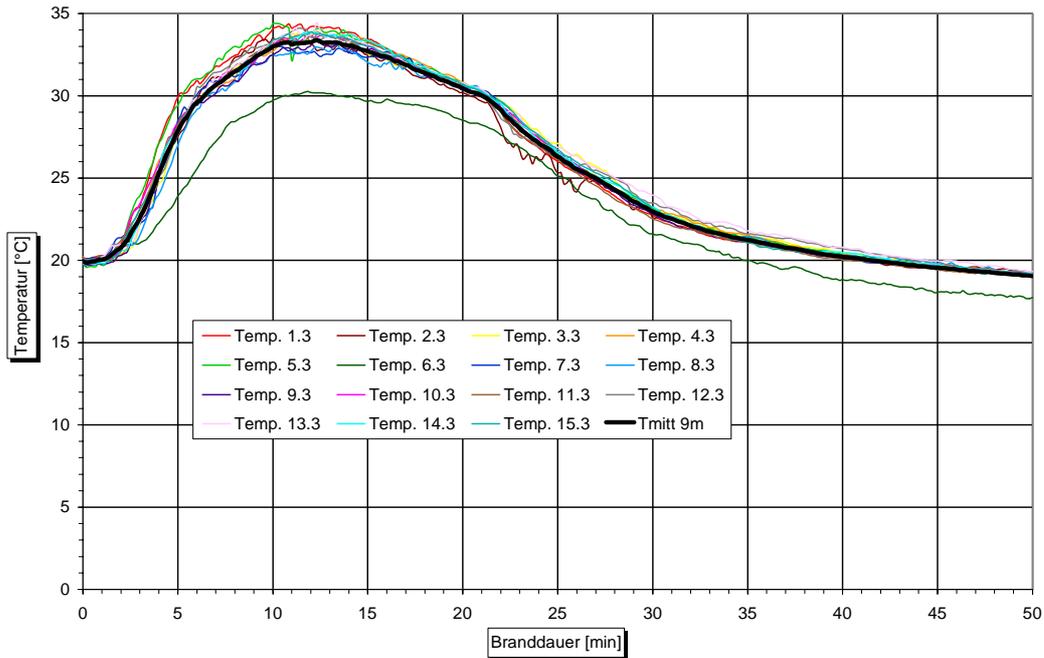
**Bild 47** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate und des theoretisch maximalen Wärmestromes.



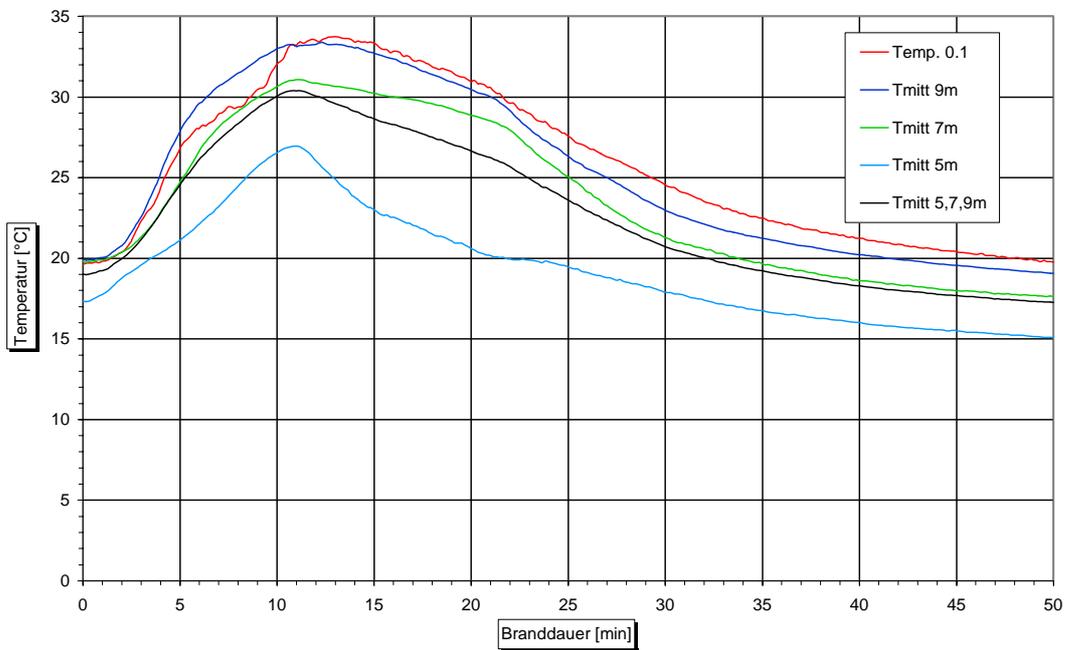
**Bild 48** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 5 m Höhe.



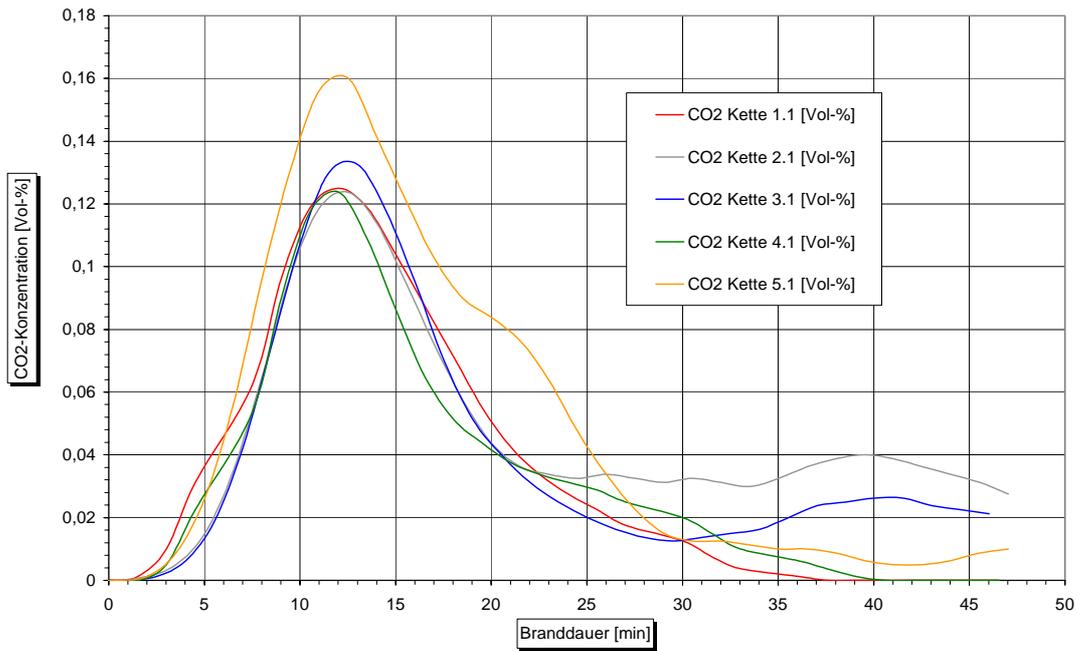
**Bild 49** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 7 m Höhe.



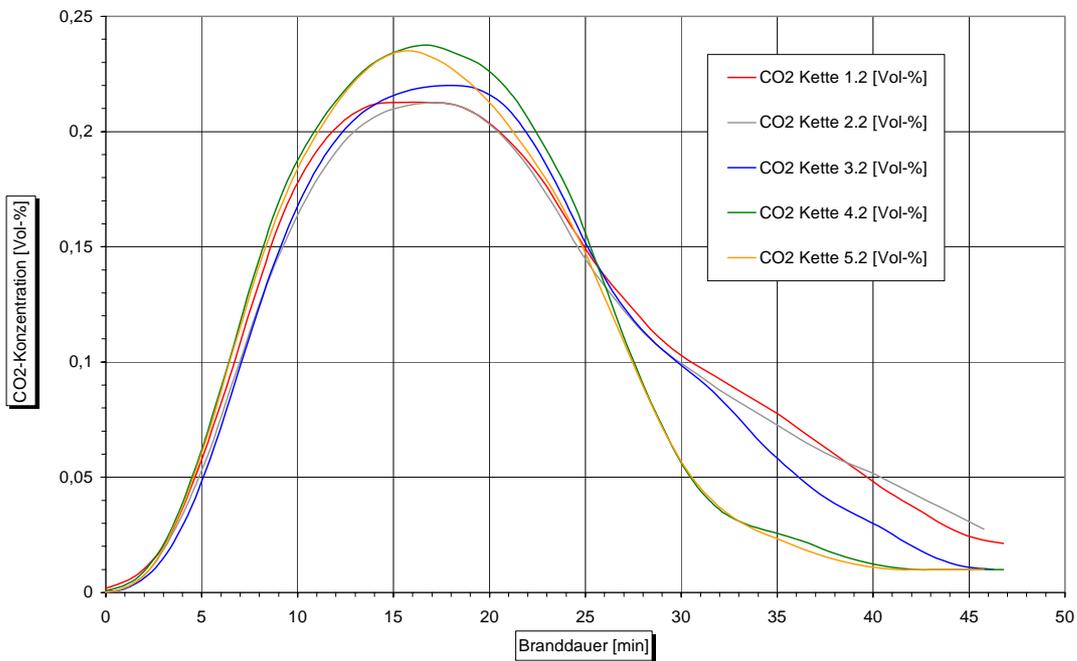
**Bild 50** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 9 m Höhe.



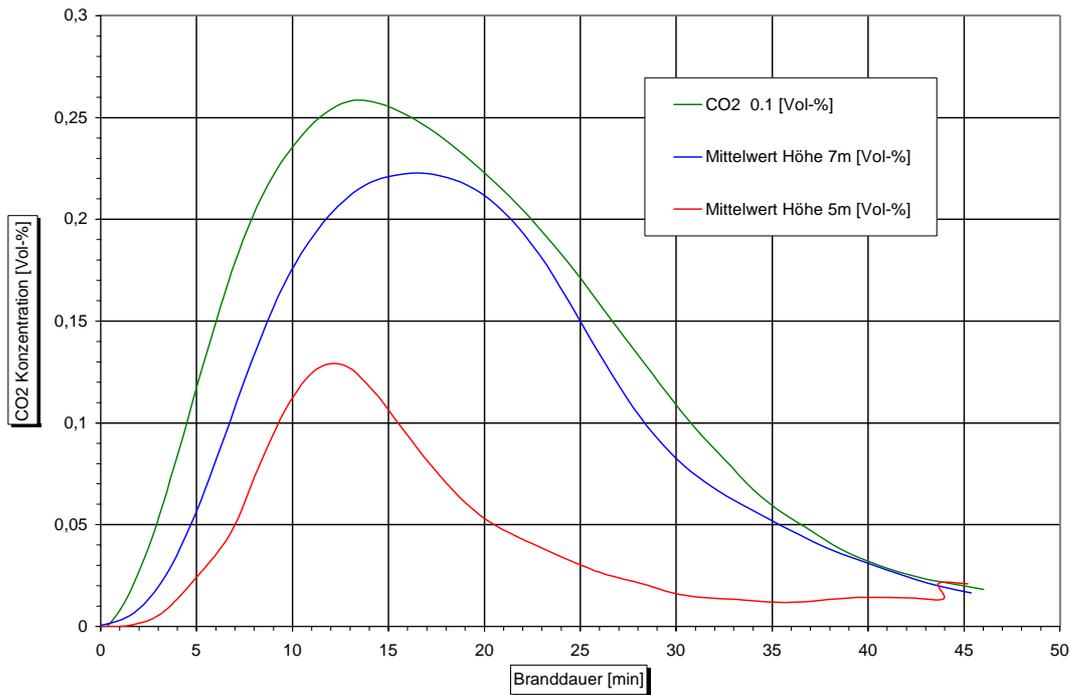
**Bild 51** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf des Mittelwertes der Temperaturen in 5 m, 7 m und 9 m Höhe, des Mittelwertes in diesen Höhen, sowie der Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstelle 0.1.



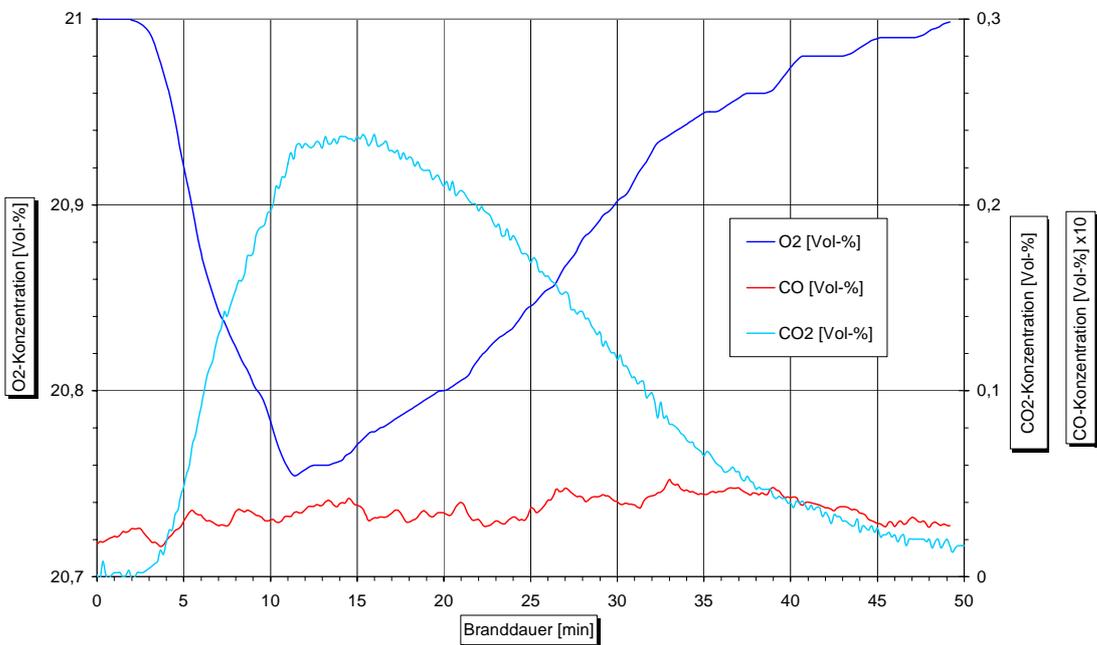
**Bild 52** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 1, 2, 3, 4 und 5, in 5 m Höhe, trockenes Abgas.



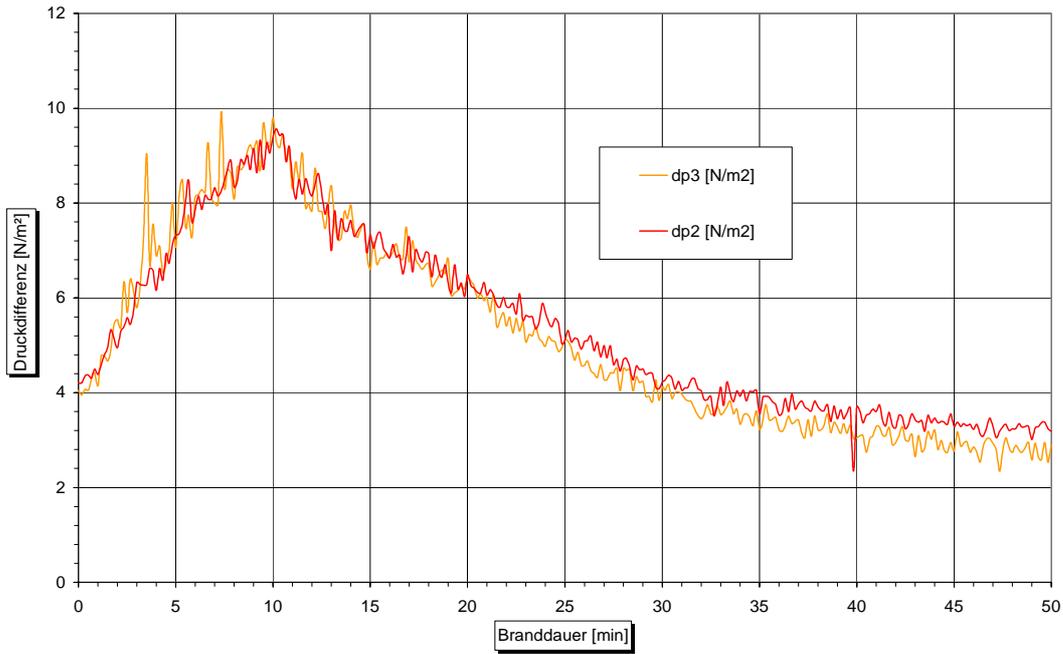
**Bild 53** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 1, 2, 3, 4 und 5, in 7 m Höhe, trockenes Abgas.



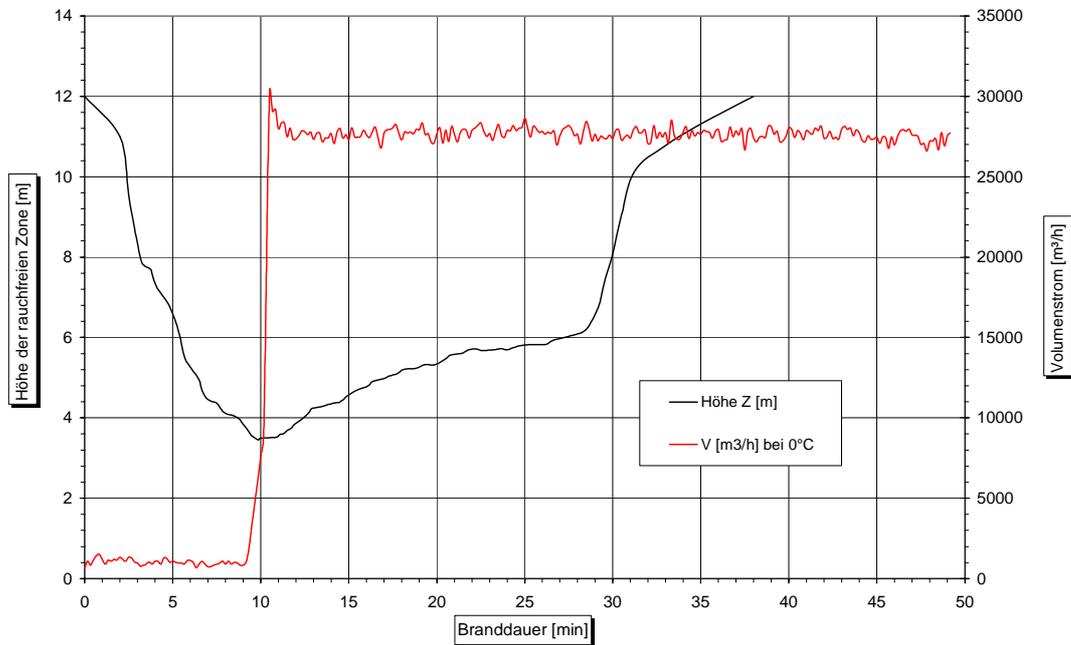
**Bild 54** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Höhen 5 m und 7 m, sowie der CO<sub>2</sub>-Konzentration der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgas, an der Messstelle 0.1, trockenes Abgas.



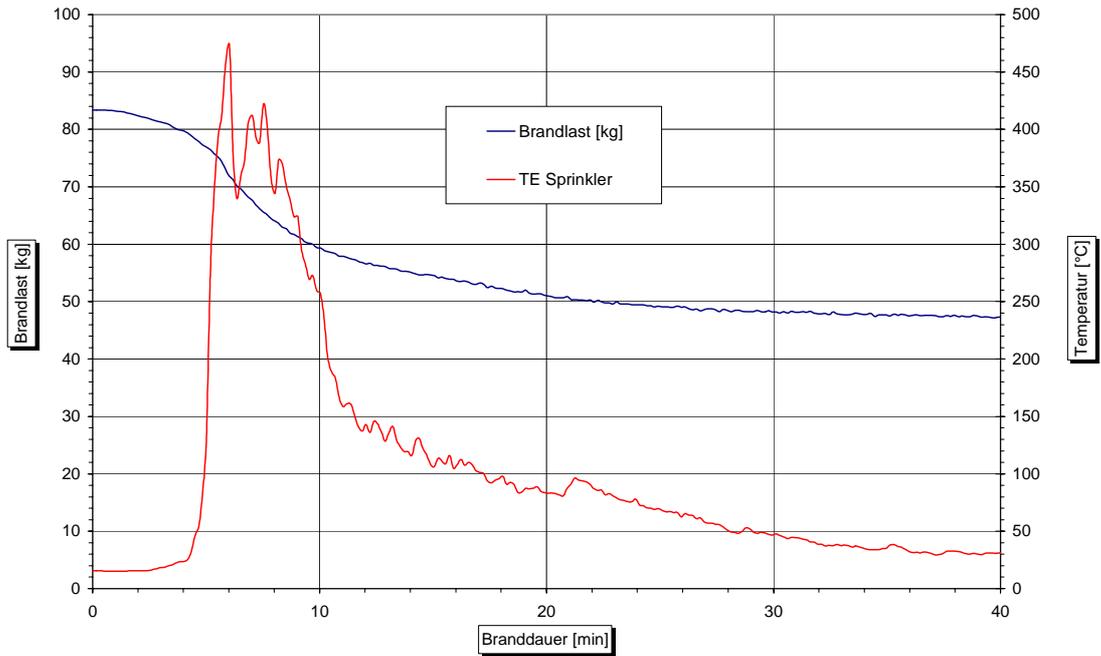
**Bild 55** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und CO in den aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasen, trockenes Abgas.



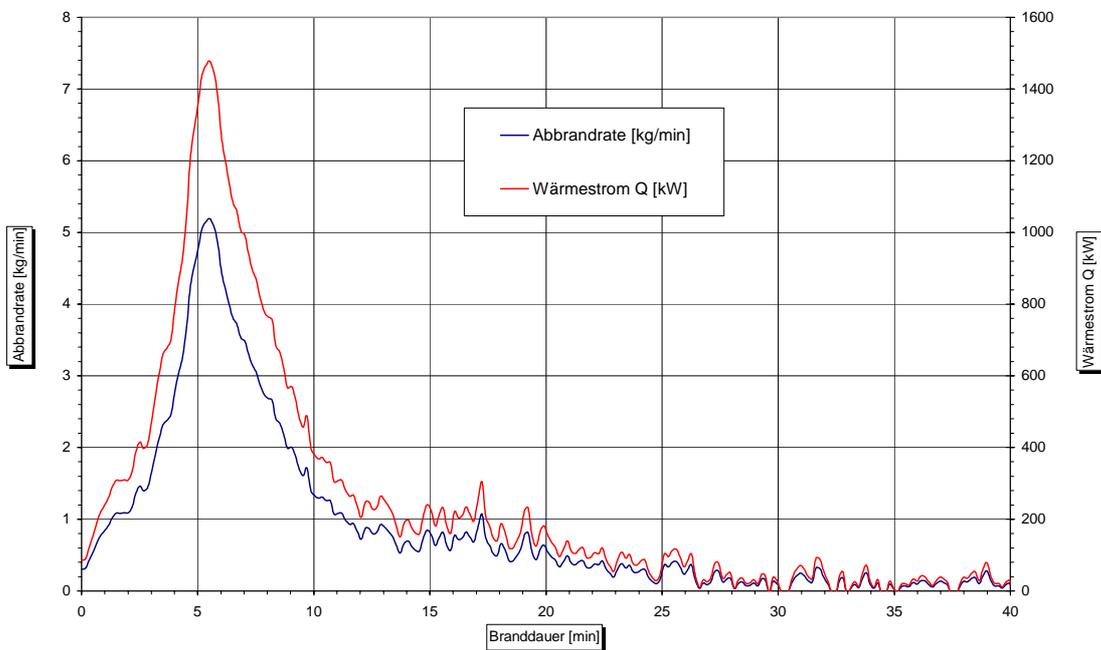
**Bild 56** Versuch 05: Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen  $dp_2$  und  $dp_3$  zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung in Höhe des Hallendaches.



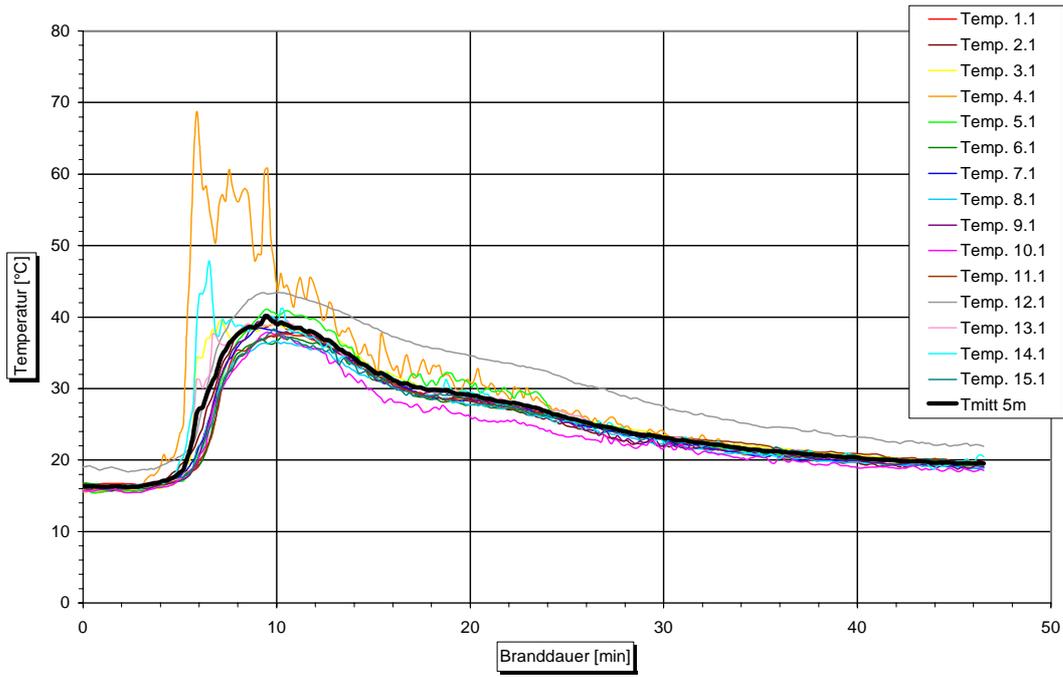
**Bild 57** Versuch 05: Abgasvolumenstrom aus der Versuchshalle und Höhe der rauchfreien Zone in der Versuchshalle.



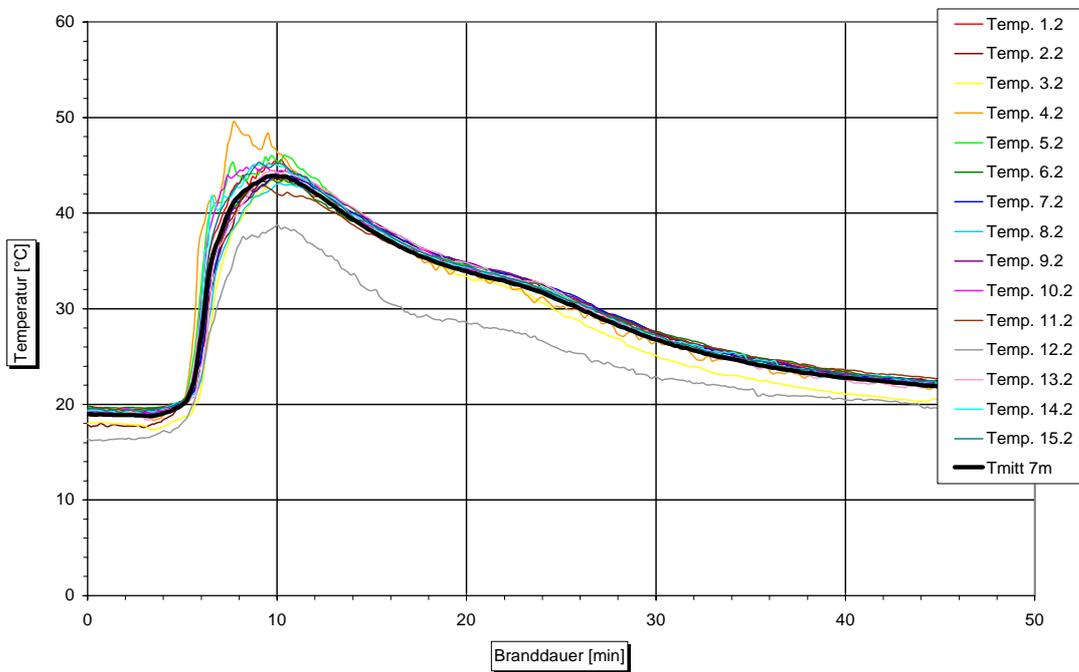
**Bild 58** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf der Brandlast und der Temperatur an einem Thermoelement neben einem Sprinklerkopf ca. 5 m über der Zündstelle.



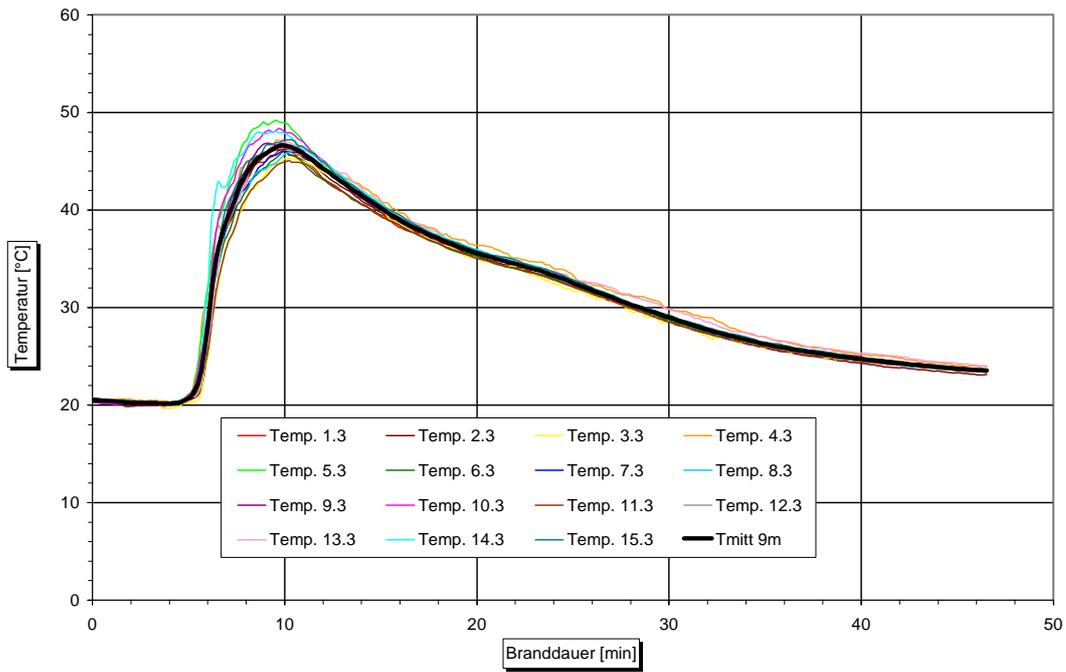
**Bild 59** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf des Massenverlustes, der Abbrandrate und des theoretischen maximalen Wärmestromes.



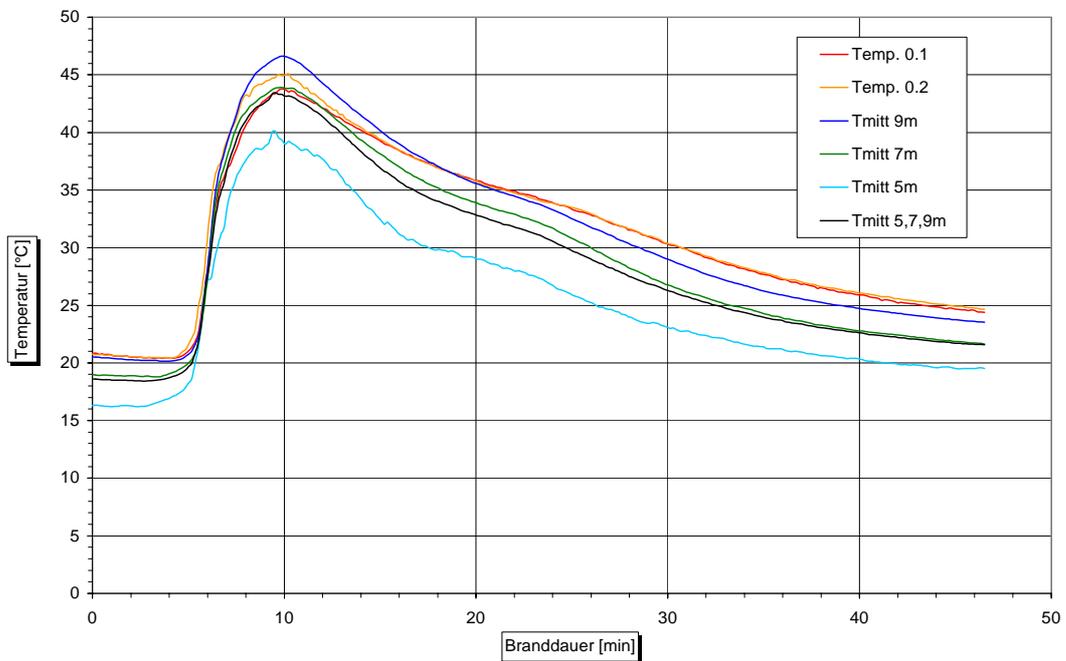
**Bild 60** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 5 m Höhe.



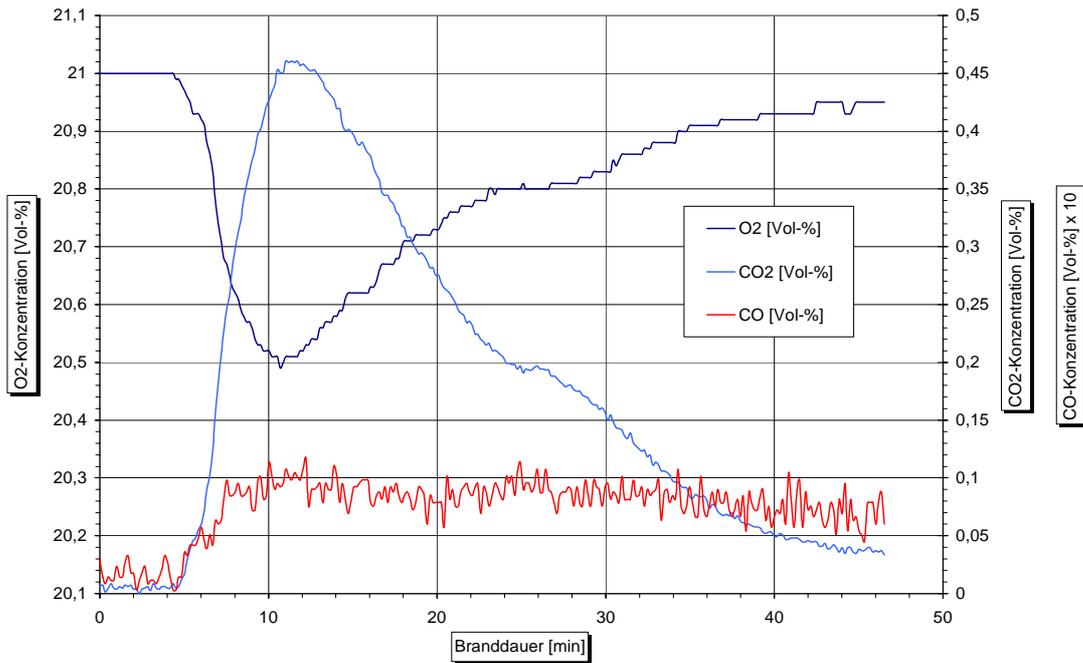
**Bild 61** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 7 m Höhe.



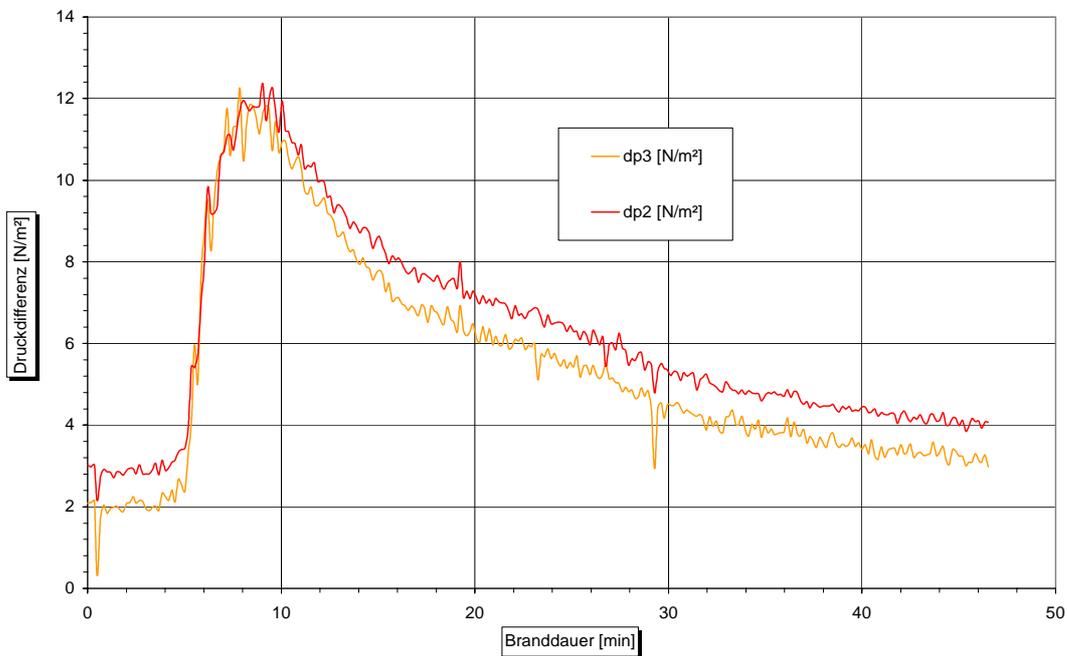
**Bild 62** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 9 m Höhe.



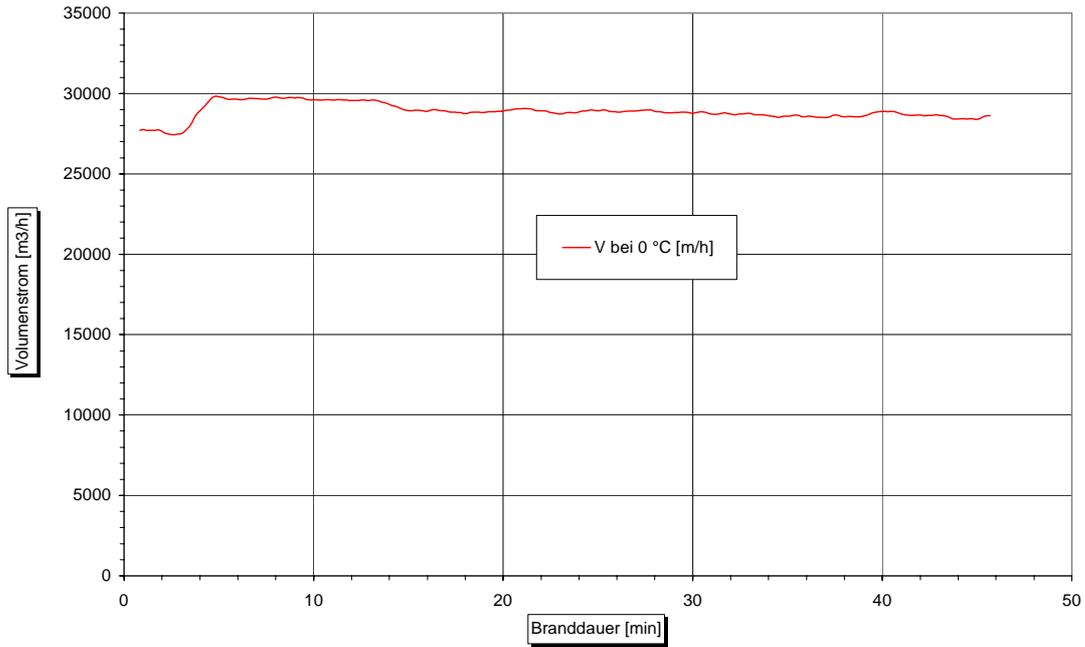
**Bild 63** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf des Mittelwertes der Temperaturen in 5 m, 7 m und 9 m Höhe, des Mittelwertes in diesen Höhen, sowie der Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstellen 0.1 und 0.2.



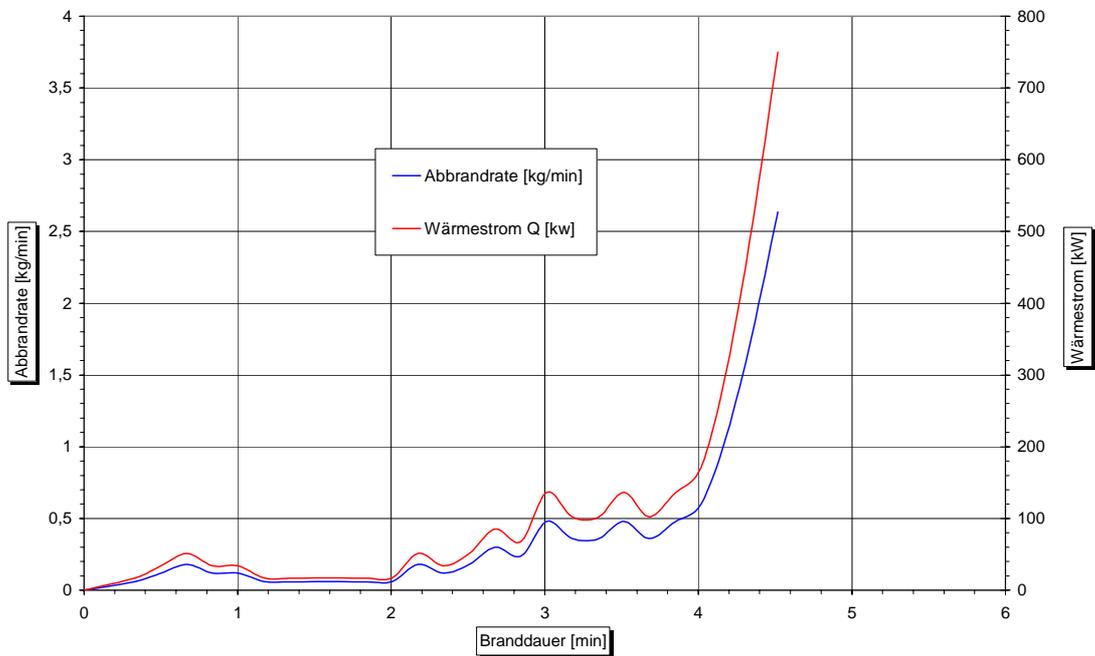
**Bild 64** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und CO in den aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasen.



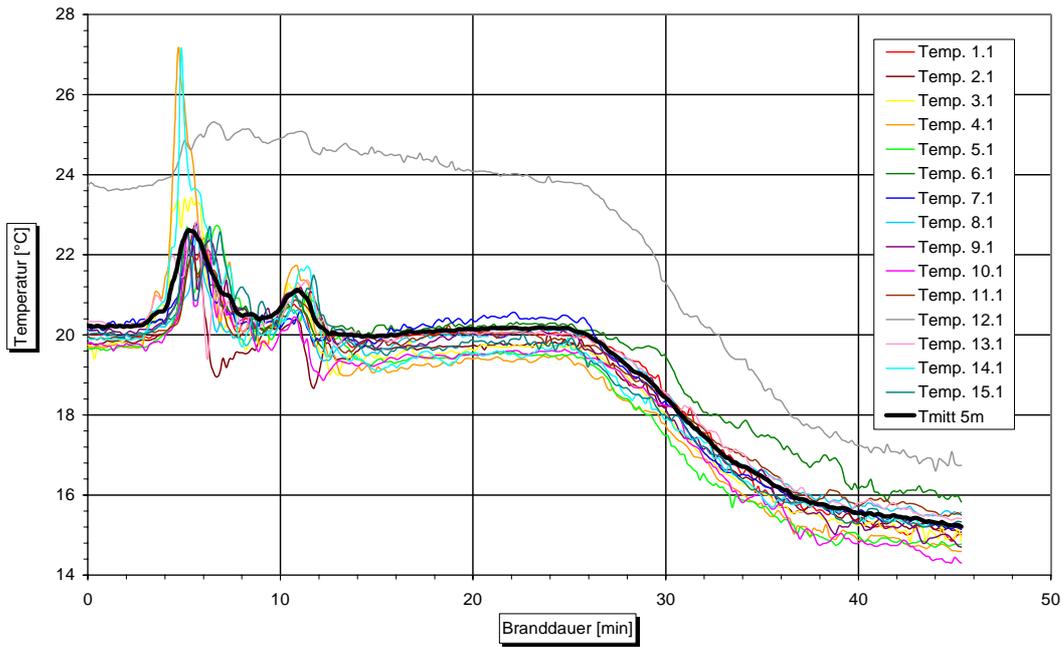
**Bild 65** Versuch 06: Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen  $dp_2$  und  $dp_3$  zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung, in Höhe des Hallendaches.



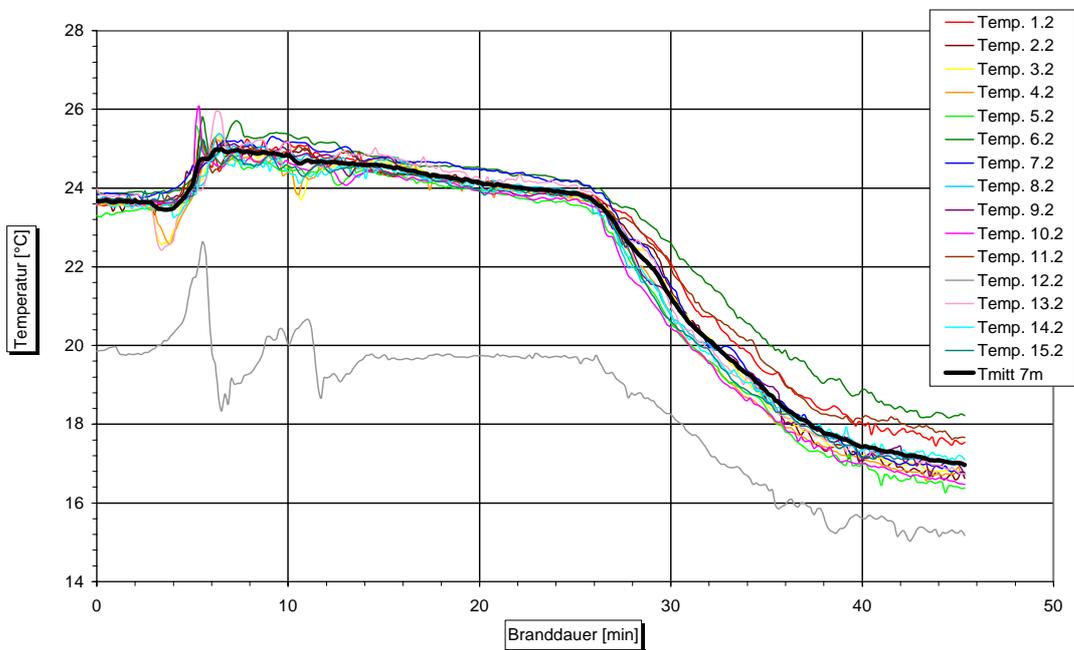
**Bild 66** Versuch 06: Aus der Versuchshalle abgeführter Abgasvolumenstrom.



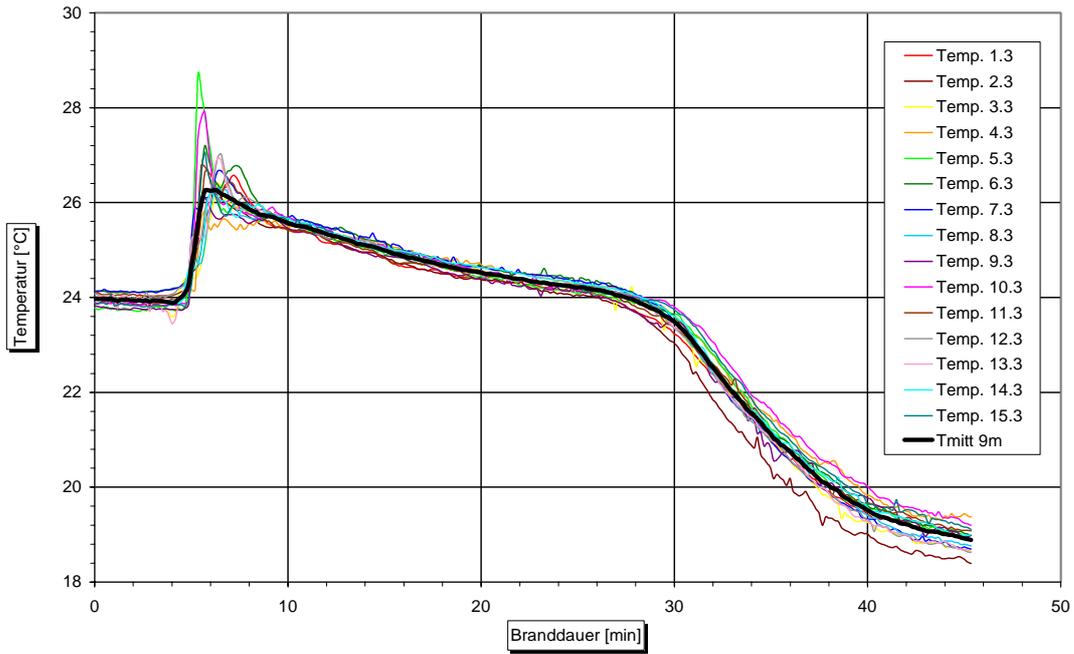
**Bild 67** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der Abbrandrate und des theoretisch maximalen Wärmestroms bis zum Auslösezeitpunkt des ersten Sprinklers.



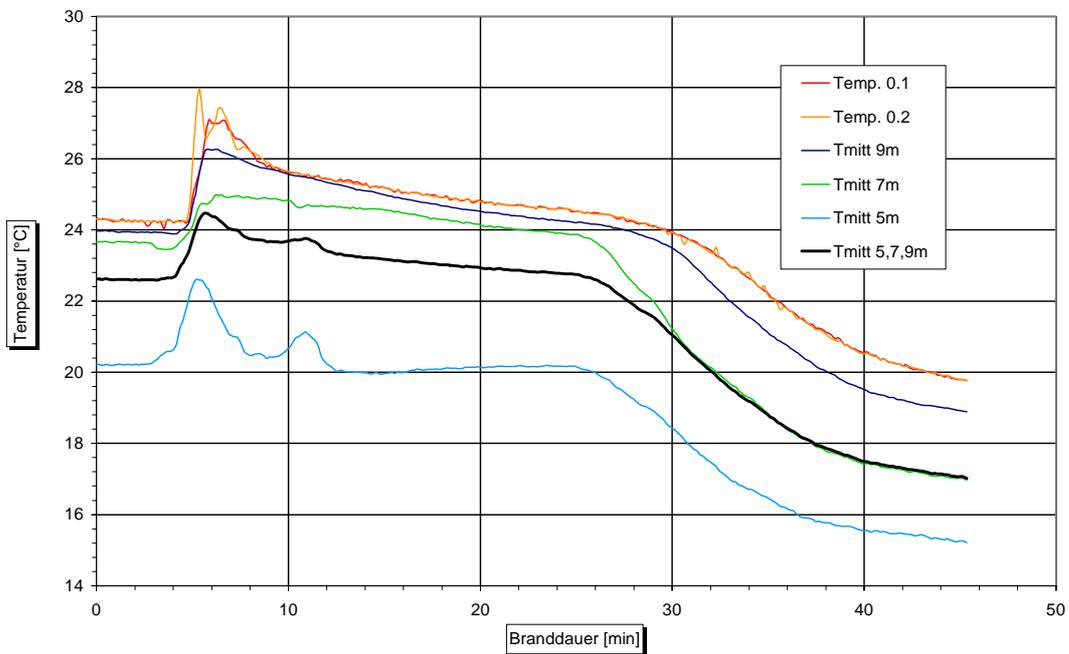
**Bild 68** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 5 m Höhe.



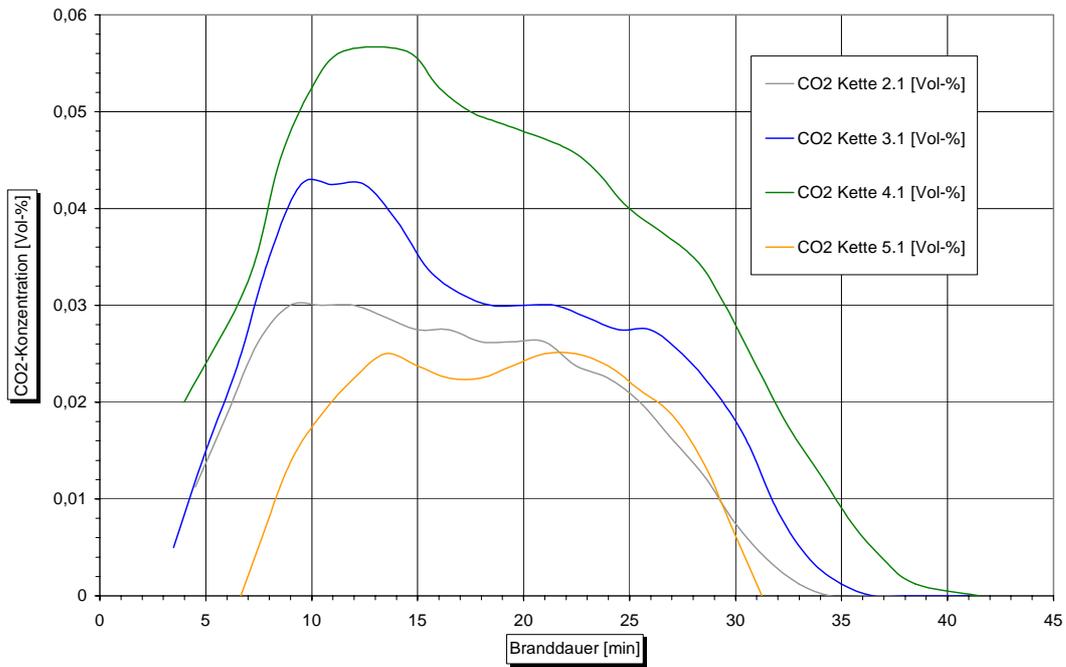
**Bild 69** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 7 m Höhe.



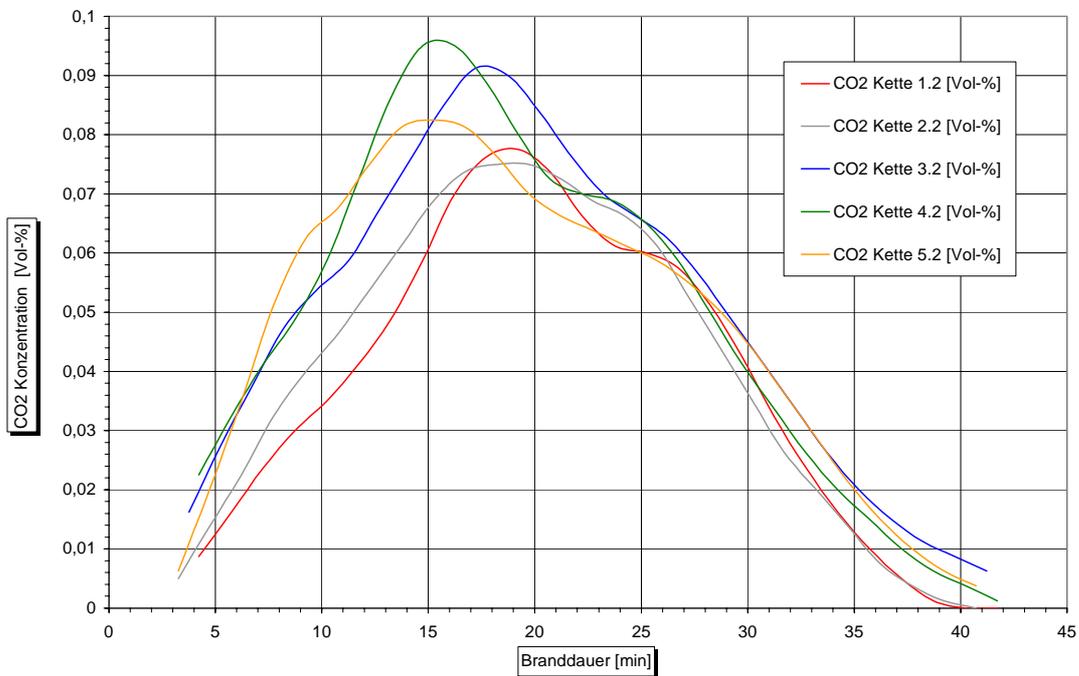
**Bild 70** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Messstellen 1 bis 15 sowie deren Mittelwert, in 9 m Höhe.



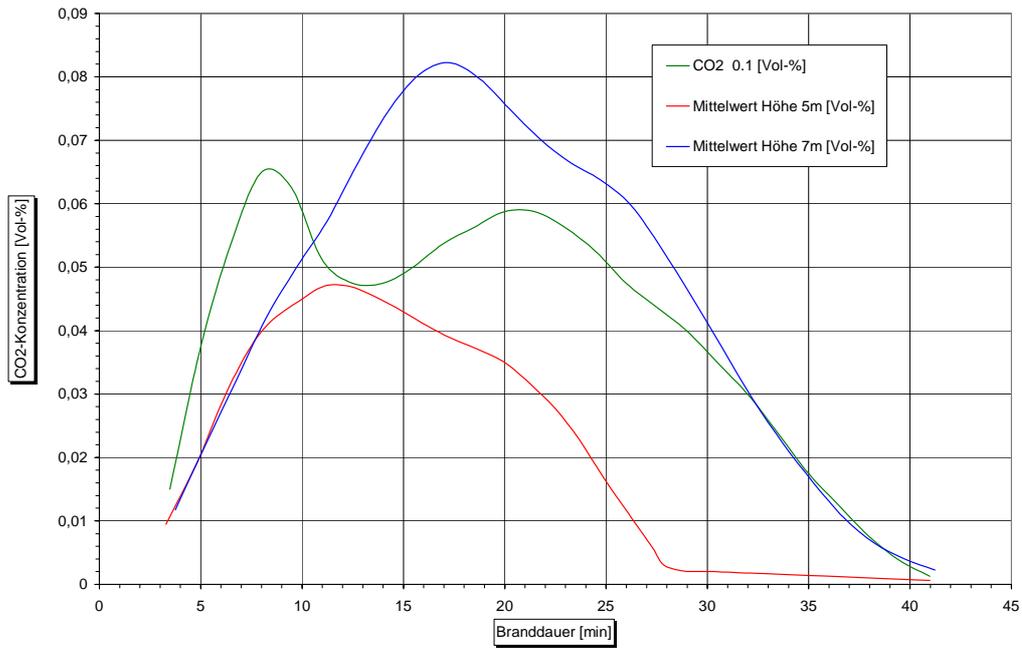
**Bild 71** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf des Mittelwertes der Temperaturen in 5 m, 7 m und 9 m Höhe, des Mittelwertes in diesen Höhen, sowie der Temperatur der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase an der Messstelle 0.1 und 0.2.



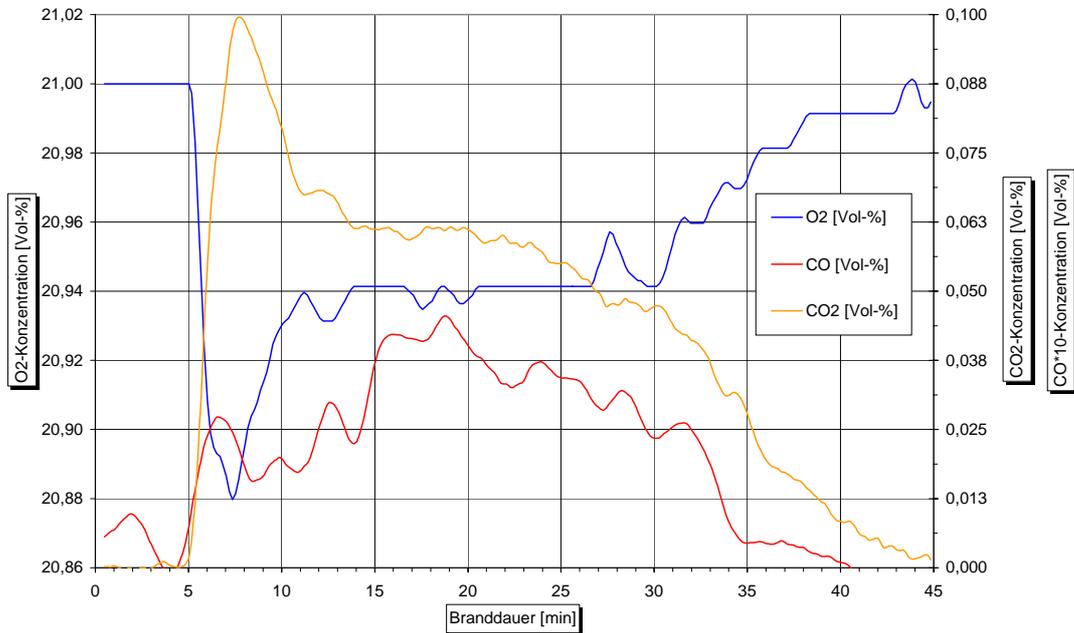
**Bild 72** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 2, 3, 4 und 5, in 5 m Höhe.



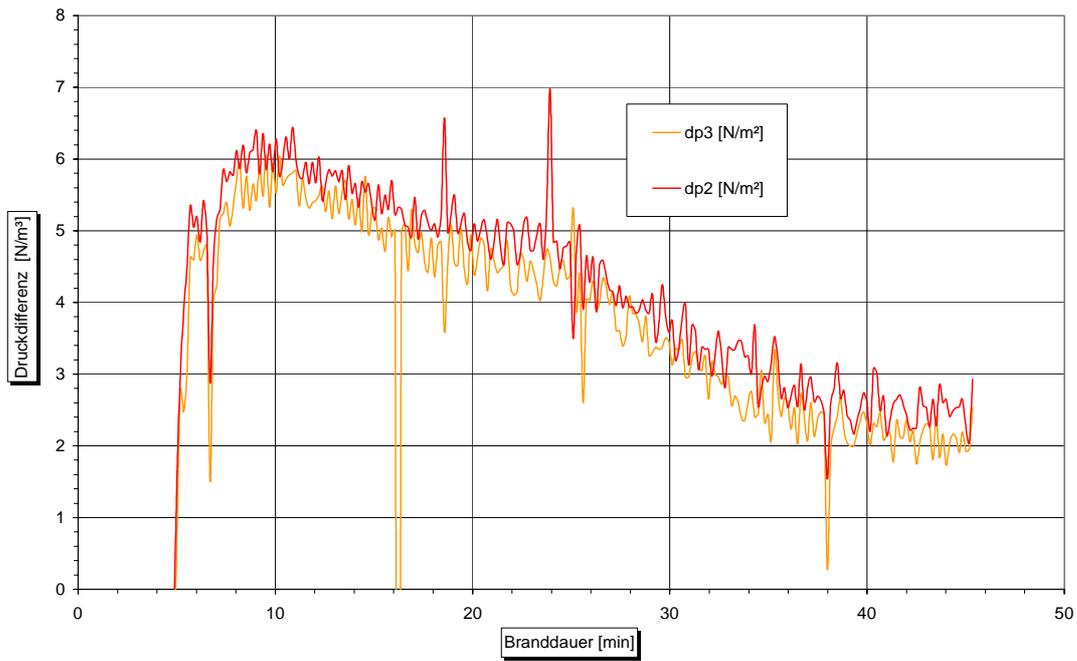
**Bild 73** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Werte an den Messstellen 2, 3, 4 und 5, in 7 m Höhe.



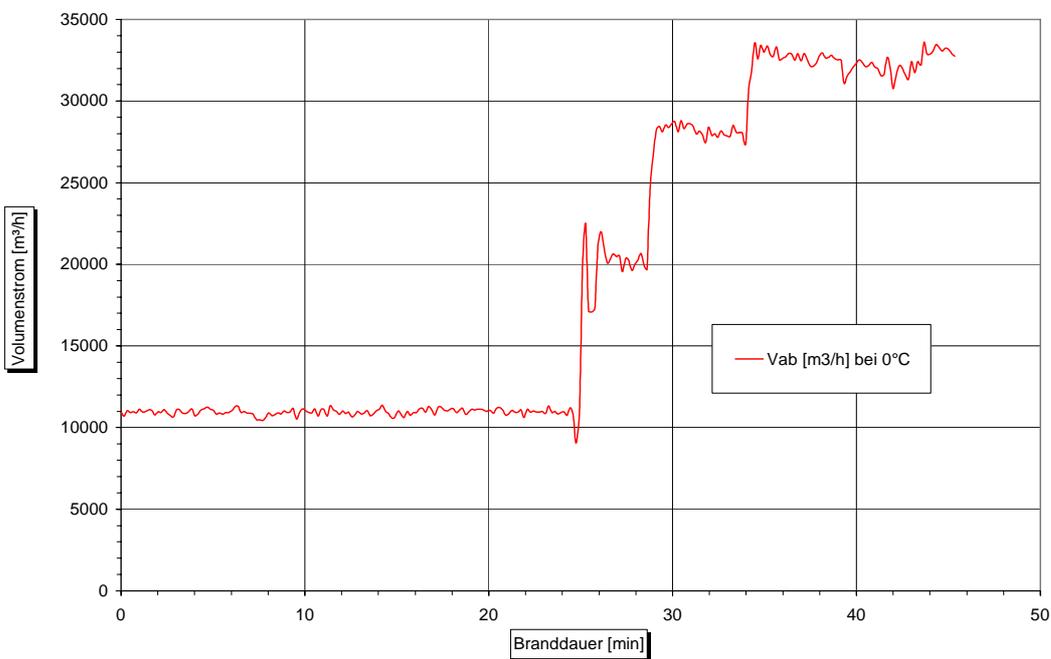
**Bild 74** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Werte in den Höhen 5 m und 7 m, des Mittelwertes aus diesen Werten sowie der  $\text{CO}_2$ -Werte der aus der Versuchshalle abgesaugten Abgase, an der Messstelle 0.1.



**Bild 75** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  und CO in den aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasen.



**Bild 76** Versuch 07: Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen  $dp_2$  und  $dp_3$  zwischen der Versuchshalle und der freien Umgebung, in Höhe des Hallendaches.



**Bild 77** Versuch 07: Aus der Versuchshalle abgesaugter Volumenstrom.