

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungs-
maßnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei
Tunnelbränden – Teil 1

131

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

Arbeitskreis V

Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 131 AGF

Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden – Teil 1

von

Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl (Projektleiter),

Dipl.-Ing. Monika Kutz, Dipl.-Chem. Ursula Seliger,

Dr. rer. nat. Horst Starke, Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

Mai 2003

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: 131	Titel des Berichtes Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden	ISSN: 1170-0060	
Autoren: Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl, Dipl.-Ing. Monika Kutz, Dipl.-Chem. Ursula Seliger, Dr. rer. nat. Horst Starke, Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke		durchführende Institution: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski	
Nummer des Auftrages: 35 (2/2001)H		auftraggebende Institution: Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Datum des Berichtes: Mai 2003			
Seitenzahl: 137	Bilder: 81 ^{*)}	Tabellen: 45	Literaturverweise: 84
<p>Kurzfassung:</p> <p>Im Brandkanal des IdF LSA wurden Brandversuche mit Heptan und Siedegrenzenbenzin durchgeführt. In den Versuchen wurden Masseverlusten des Brandstoffes gemessen sowie die Verteilungen von Geschwindigkeit und Temperatur in verschiedenen Messebenen erfasst. Gaskonzentrationen und Gesamtwärmestromdichten wurden an definierten Messpunkten im Brandkanal aufgezeichnet. Die Dokumentation und Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte mit Hilfe von Grafiken, in denen die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen über der Brandkanalhöhe und über der Brandwanne dargestellt wurde. Die Messergebnisse wurden zusätzlich in Tabellenform dokumentiert.</p> <p>Es wurde ein kurzer Literaturüberblick über den Einsatz von Feldmodellen bei der Simulation von Tunnelbränden gegeben.</p> <p>Mit dem Programmsystem FLUENT, das auf der Lösung der Feldmodellgleichungen mit dem Finite Volumen Verfahren basiert, wurden Simulationsrechnungen durchgeführt. Die dazu verwendeten Modellgleichungen wurden kurz dargestellt. In vorbereitenden Rechnungen wurde das Lösungsverhalten untersucht. Nachfolgend wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, für die die Randbedingungen aus den Experimenten abgeleitet wurden.</p> <p>Die Simulationsrechnungen wurden mit den Experimenten verglichen und die Ergebnisse der Vergleiche in Grafiken dargestellt. Es wurden Schlussfolgerungen zur Verbesserung des Simulationsmodells gezogen.</p>			
<p>Schlagwörter:</p> <p style="text-align: center;">Tunnelbrand, Berechnung, Feldmodell, Experiment, Messdaten, Verifizierung</p>			

*) Farbseiteninformationen des Forschungsberichtes auf CD-ROM können bei Kostenerstattung von 5 € beim Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Biederitzer Str. 5, 39175 Heyrothsberge, abgefordert werden.

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER ERKENNTNISSE UND LITERATURAUSWERTUNG	3
3	VERSUCHE IM BRANDKANAL	7
3.1	Geometrie	7
3.2	Versuchsaufbau und eingesetzte Sensorik	10
3.2.1	Temperaturmessungen	11
3.2.2	Wärmestromdichtemessungen	14
3.2.3	Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Gase	15
3.2.3.1	Flügelradanemometer	16
3.2.3.2	Staurohre	17
3.2.3.3	Bidirektionale Strömungsmesssonden	19
3.2.4	Messung der Masse des Brandmediums	20
3.2.5	Messung der Konzentration der Gase CO, CO ₂ und O ₂	20
3.2.6	Messwerterfassung, Videoaufzeichnung und Wetterdaten	23
3.2.6.1	Vielstellenmesstechnik	23
3.2.6.2	Videodokumentation	23
3.2.6.3	Wetterdatenerfassung	24
3.3	Versuchsdurchführung	24
3.4	Ergebnisse der Versuche	26
3.4.1.	Versuche mit freier Konvektion	27
3.4.1.1	Temperaturmessungen	27
3.4.1.2	Geschwindigkeitsmessungen	32
3.4.1.3	Massemessung des Brandmediums	37
3.4.1.4	Wärmestromdichtemessungen	38
3.4.1.5.	Konzentrationsmessungen	39

3.4.2.	Versuche mit erzwungener Konvektion	41
3.4.2.1	Temperaturmessungen	41
3.4.2.2	Geschwindigkeitsmessungen	44
3.4.2.3	Massemessung des Brandmediums	46
3.4.2.4	Konzentrationsmessungen	47
4	MODELLIERUNG DER BRANDAUSBREITUNG IN TUNNELN	49
4.1	Problembeschreibung	49
4.2	Modellgleichungen	50
4.3	Vorbereitende Simulationsrechnungen	55
4.3.1	Freie Strömung	57
4.3.1.1	Randbedingungen	58
4.3.1.2	Anfangsbedingungen	59
4.3.1.3	Gitterrechnungen für die freie Strömung	60
4.3.1.4	Zeitrechnungen für die freie Strömung	63
4.3.2	Erzwungene Strömung	64
4.3.2.1	Rand- und Anfangsbedingungen	65
4.3.2.2	Gitterrechnungen für die erzwungene Strömung	66
4.3.2.3	Zeitrechnungen für die erzwungene Strömung	68
5	VERGLEICH DER RECHNUNGEN MIT DEN GEMESSENEN DATEN	70
5.1	Begleitende Simulationsrechnungen	70
5.1.1	Freie Strömung	71
5.1.1.1	Rand- und Anfangsbedingungen	71
5.1.1.2	Berechnungsergebnisse	73
5.1.2	Erzwungene Strömung	76
5.1.2.1	Rand- und Anfangsbedingungen	77
5.1.2.2	Berechnungsergebnisse	77
5.2	Ausgewählte Vergleiche der Experimente und der Simulationsergebnisse	81
5.2.1	Vergleiche bei freier Konvektion	81
5.2.2	Vergleiche bei erzwungener Konvektion	89
5.2.3	Vergleich berechneter Konzentrationen mit den Messwerten	96

6	ZUSAMMENFASSUNG	100
	LITERATUR	104

ANHANG

A	Messwerttabellen der Geschwindigkeit und der Temperatur für die Brandversuche BV07 bis BV12	112
---	---	-----

VERZEICHNIS DER BILDER

3.1	Vorderansicht des Brandkanals des IdF LSA
3.2	Seitenansicht des Brandkanals des IdF LSA
3.3	Seitenansicht und Schnittdarstellung des Brandkanals des IdF LSA
3.4	Blick in den leeren Versuchsraum im Brandkanal des IdF LSA
3.5	Prinzipskizze des Versuchsaufbaus im Längsschnitt
3.6	Prinzipskizze der Messanordnung der Thermoelemente in der Mittelebene des Brandkanals direkt über der Brandwanne und am Messständer D
3.7	Prinzipskizze der Messanordnung der Thermoelemente in der Messebene C
3.8	Messstellenanordnung in den Messebenen A und B
3.9	Eingesetzte Mantelthermoelemente
3.10	Wärmestromdichtesensor
3.11	Prinzipskizze der Messanordnung der Geschwindigkeitssensoren in der Messebene C
3.12	Flügelradanemometermesskopf
3.13	Strömungsrichtungsüberwachung in Messebene B
3.14	Staurohr nach Prandtl
3.15	Messprinzip zur Staurohrmessung

- 3.16 Bidirektionale Strömungssonden
- 3.17 Kraftaufnehmer von Typ KA 2000
- 3.18 Gasanalyzesystem
- 3.19 Prinzipskizze des Aufbaus des Gasanalyzesystems
- 3.20 Endoskopkamera
- 3.21 Momentaufnahme aus einem Brandversuch (BV09) bei freier Konvektion (links) und einem Brandversuch (BV11) mit Seitenwind (links)
- 3.22 Gegenüberstellung der Temperaturprofile am Ständer D für die Brandversuche BV07 und BV08 (80 l SB) nach 60s und 180s
- 3.23 Gegenüberstellung der Temperaturprofile am Ständer D für die Brandversuche BV09 und BV10 (80 l HP) nach 60 s und 180 s
- 3.24 Temperaturprofile an den Messständen AII, BV und D für die Brandversuche mit Siedegrenzenbenzin (BV07 und BV08)
- 3.25 Temperaturprofile an den Messständen AII, BV und D für die Brandversuche mit Heptan (BV09 und BV10)
- 3.26 Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60 s für Brandversuch BV07 (links) und für Brandversuch BV08 (rechts)
- 3.27 Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60s für Brandversuch BV09 (links) und für Brandversuch BV10 (rechts)
- 3.28 Temperaturprofile an den Messständen AII, BV und D für die Brandversuche BV07 (80 l SB) und BV09 (80 l HP)
- 3.29 Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60 s für Brandversuch BV07 (links) und für Brandversuch BV09 (rechts)
- 3.30 Geschwindigkeiten in Kanalmitte an den Messständen AII (+ 9 m) und BV (- 9 m) für Brandversuch BV07 und BV08
- 3.31 Geschwindigkeiten in Kanalmitte an den Messständen AII (+ 9 m) BV (- 9 m) für Brandversuch BV09 und BV10
- 3.32 Isotachen in der Messebene C für die Brandversuche BV07 und BV08 nach einer Brandzeit von 60 s
- 3.33 Isotachen in der Messebene C für die Brandversuche BV09 und BV10 nach einer Brandzeit von 60 s
- 3.34 Geschwindigkeiten in Kanalmitte an den Messständen AII (+ 9 m) und BV (-9 m) für Brandversuch BV07 und BV09

- 3.35 Massekurve für Brandversuche BV07, BV08 und BV09, BV10
- 3.36 Gesamtwärmestromdichte (Sensor Wsd3) in den Brandversuchen BV07 und BV08
- 3.37 Volumenkonzentration des Sauerstoff in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV07/BV08 (links) und BV09/BV10 (rechts)
- 3.38 Volumenkonzentration von Kohlenmonoxid in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV07/BV08 (links) und BV09/BV10 (rechts)
- 3.39 Volumenkonzentration des Kohlendioxid in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV07/BV08 (links) und BV09/BV10 (rechts)
- 3.40 Temperaturprofile an den Messständen AII und BV für die Brandversuche BV11 und BV12
- 3.41 Gegenüberstellung der Temperaturprofile am Ständer D für die Brandversuche BV11(40l HP) und BV12 (40l SB) nach 60 s und 90 s
- 3.42 Temperaturprofile in den Messständen AII und BV für die Brandversuche BV09 und BV11
- 3.43 Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60 s für Brandversuch BV09 (links) und für Brandversuch BV11(rechts)
- 3.44 Geschwindigkeiten am Messständer BV (- 9 m) für Brandversuch BV11
- 3.45 Geschwindigkeiten am Messständer BV (- 9 m) für die Brandversuche BV09 (links) und BV11(rechts)
- 3.46 Isotachen in der Messebene C für die Brandversuche BV09 und BV11
- 3.47 Massekurve für Brandversuche BV11 und BV12
- 3.48 Volumenkonzentration an Sauerstoff in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV11 und BV12
- 3.49 Volumenkonzentrationen an Kohlenmonoxid (links) und Kohlendioxid (rechts) in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV11 und BV12
- 4.1 Geometrie des Innenraumes des Brandkanals
- 4.2 Geometrie des Innenraumes des Brandkanalabschnittes
- 4.3 Vernetzung des Brandkanalabschnitts für die vorbereitenden Rechnungen
- 4.4 Ränder und Vergleichsmessorte im Modellgebiet

- 4.5 Berechnete maximale Temperaturen der Gitterrechnungen für die freie Strömung
- 4.6 Berechnete maximale Geschwindigkeit der Gitterrechnungen für die freie Strömung
- 4.7 Berechnete maximale Temperaturen der Zeitschrittrechnungen für die freie Strömung
- 4.8 Berechnete maximale Temperaturen der Gitterrechnungen für die erzwungene Strömung
- 4.9 Berechnete maximale Geschwindigkeiten der Gitterrechnungen für die erzwungene Strömung
- 4.10 Berechnete maximale Temperaturen der Zeitschrittrechnungen für die erzwungene Strömung
- 5.1 Vernetzung des Modellgebietes für den Brandkanal
- 5.2 Ränder und Messebenen innerhalb des Modellgebietes für den Brandkanal
- 5.3 Temperaturverteilung in einem Längsschnitt zu verschiedenen Zeiten für die freie Strömung –Temperaturbereich von 300 K bis 1450 K
- 5.4 Isoflächen der Temperatur $T = 800$ K für die freie Strömung
- 5.5 Temperaturverteilung in einem Längsschnitt durch den Brandkanal zu verschiedenen Zeiten - Temperaturbereich von 300 K bis 1450 K
- 5.6 Isoflächen der Temperatur $T = 800$ K für die erzwungene Strömung
- 5.7 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer D für den Fall der freien Konvektion
- 5.8 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer AII für den Fall der freien Konvektion
- 5.9 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer BV für den Fall der freien Konvektion
- 5.10 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Geschwindigkeit am Ständer BV für den Fall der freien Konvektion
- 5.11 Vergleich von Simulationsrechnung (SI09) und Messwerten (BV09) für die Temperatur in Messebene C nach 60 s für den Fall der freien Konvektion
- 5.12 Gemessene (links) und berechnete Geschwindigkeit in der Messebene C nach 60 s für die Simulation des Brandes bei freier Konvektion

- 5.13 Vergleich von Simulationsrechnung (SI09) und Messwerten (BV09) für die Geschwindigkeit in Messebene C nach 60 s für den Fall der freien Konvektion
- 5.14 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer D für den Fall der erzwungenen Konvektion
- 5.15 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer AII für den Fall der erzwungenen Konvektion
- 5.16 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer BV für den Fall der erzwungenen Konvektion
- 5.17 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Geschwindigkeit am Ständer BV für den Fall der erzwungenen Konvektion
- 5.18 Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur in Messebene C nach 60 s für den Fall der erzwungenen Konvektion
- 5.19 Gemessene (links) und berechnete (rechts) Geschwindigkeit in Messebene C nach 60 s für den Fall der erzwungenen Konvektion
- 5.20 Vergleich von Simulationsrechnung (SI11) und Messwerten (BV11) für die Geschwindigkeit in Messebene C nach 60 s für den Fall der erzwungenen Konvektion
- 5.21 Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Volumenkonzentrationen an CO₂ für den Fall der freien (rot) und der erzwungenen (grün) Konvektion
- 5.22 Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Volumenkonzentrationen an O₂ für den Fall der freien (rot) und der erzwungenen (grün) Konvektion

VERZEICHNIS DER TABELLEN

- 1.1 Vorschläge für das Brandschutzforschungsprogramm 2001
- 3.1 Technische Daten des Gasanalysesystems
- 3.2 Aufstellung der Versuche mit Siedegrenzenbenzin (SB) und Heptan (HP)
- 3.3 Gemessene brandcharakterisierende Größen für die Brandversuche bei freier Konvektion
- 3.4 Gemessene brandcharakterisierende Größen für die Brandversuche bei erzwungener Konvektion
- 4.1 Verschiedene Gittervernetzungen für den Kanalabschnitt
- 4.2 Berechnete Geschwindigkeiten der Zeitschrittrechnungen für die freie Strömung
- 5.1 Gemessene und berechnete Geschwindigkeiten nach 60 s an ausgewählten Messtellen für den Fall der freien Konvektion
- 5.2 Gemessene O₂- und CO₂-Volumenkonzentrationen für die Brandversuche BV09 (links) und BV11(rechts)

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

Abkürzung	Bedeutung
CFD	Computational Fluid Dynamic
CFL	Courant Friedrich Levy
IdF LSA	Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
SIMPLE	Semi-Implicit Pressure Linked Equations

Die Dimensionen der physikalischen Größe werden als Potenzprodukt der Länge (L), Zeit (T), Masse (M), Temperatur (Θ), Stoffmenge (N) angegeben.

Symbol	Bedeutung	Dimension
D^{ik}	Diffusionskoeffizient der i-ten zur k-ten Komponente	-
F	Funktion	
J_a^i	Massendiffusionsstromdichte	$M L^{-2} T^{-1}$
J_a^s	Strahlungsstromdichte	$M T^{-3}$
J_a^w	Wärmestromdichte	$M T^{-3}$
M_i	Molekulare Masse der i-ten Komponente	$M N^{-1}$
$(P_{\alpha\beta})$	Drucktensor des Gasgemischs	$M L T^{-2}$
$(P_{\alpha\beta})^v$	Viskoser Anteil des Drucktensors	$M L T^{-2}$
R	Universelle Gaskonstante	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
Re	Reynoldszahl	-
T	Absolute Temperatur	Θ
c_p^i	spezifische Wärme bei konstantem Druck der i-ten Komponente	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$

f	Funktion	
f_α^i	Kraft je Masse, die auf die i-te Komponente wirkt	$L T^{-2}$
h	spezifische Enthalpie	$L^2 T^{-2}$
h^i	spezifische Enthalpie der i-ten Komponente	$L^2 T^{-2}$
$\Delta h_{j,0}^i$	Bildungsenthalpie der i-ten Komponente	$L^2 T^{-2}$
k	mittlere turbulente kinetische Energie	$L^2 T^{-2} M$
p	hydrostatischer Druck	$L^{-1} T^{-2} M$
v_α	Massenschwerpunktsgeschwindigkeit	$L T^{-1}$
v_α^i	Geschwindigkeit der i-ten Komponente	$L T^{-1}$
w_α^i	Diffusionsgeschwindigkeit der i-ten Komponente	$L T^{-1}$
y_i	Massenbruch der i-ten Komponente	-
∂_α	Gradient des Tensors	-
$\delta_{\alpha\beta}$	Einheitstensor	-
ε	Dissipationsrate	$L^2 T^{-3}$
η	dynamische (Scher-) Viskosität	$L^{-1} T^{-1} M$
η_v	Volumenviskosität	$L^{-1} T^{-1} M$
ρ	Gesamtdichte des Gasgemischs	$L^{-3} M$
ρ^i	Dichte der Einzelkomponente	$L^{-3} M$
σ_h	Quellglied der spezifischen Enthalpie	$L^2 T^{-2}$
σ_{m^i}	Quellglied der Masse	$L^{-3} M T^{-1}$
Δ	Differenz	
Γ	Verallgemeinerter Transportkoeffizient	

Indizes

Index	Bedeutung
S	Strahlung
V	Volumen
W	Wärmestrom
i, j, k	Komponente
h	Spezifische Enthalpie
m	Masse
x, y, z	Koordinatenrichtung
α, β, γ	Ortskoordinaten

1 EINLEITUNG

Tunnel sind wichtige Verkehrsanlagen der Infrastruktur in Europa. Es ist zu erwarten, dass sie in Zukunft an Bedeutung für eine leistungsfähige Industriegesellschaft gewinnen werden. Augenblicklich beträgt die Gesamtlänge der Verkehrstunnelanlagen in Europa mehr als 10 000 km. Ständig kommen neue Tunnelanlagen hinzu. Ein aktuelles Beispiel in Deutschland ist die Kammquerung des Thüringer Waldes durch die Bundesautobahn A71, bei der auf einem 19,6 km langen Autobahnabschnitt 4 Tunnelanlagen mit einer Gesamtlänge von 12,7 km errichtet wurden [Wahl and Ebhart 02]. Hohe Anforderungen werden an die Sicherheit und Verfügbarkeit gestellt. Dies gilt vor allem, wenn Brände in Tunnelanlagen auftreten. Trotz aller Fortschritte im Brandschutz muss festgestellt werden, dass Brände nicht absolut zu vermeiden sind. So traten z. B. nach [Wolschendorf 02] von 1975 bis 2002 im Hamburger Elbtunnel, einem der meist genutzten Tunnel in Europa, 243 Fahrzeugbrände auf. Weiterhin ist mit einer steigenden Anzahl von Bränden in Verkehrstunneln zu rechnen, wobei besonders LKW-Transporte ein bedeutendes Gefährdungspotenzial darstellen.

Die Gründe dafür sind:

- steigende Verkehrsdichte mit zunehmendem Anteil an Gefahrguttransporten,
- zunehmende Geschwindigkeiten,
- die große und weiter steigende Anzahl von Tunneln,
- die zunehmende Bereitschaft zu Brandstiftungen mit kriminellen oder terroristischem Hintergrund [Haack 00].

Tunnel als unterirdische Verkehrsanlagen stellen sowohl im Bereich des vorbeugenden als auch des abwehrenden Brandschutzes eine Herausforderung dar. In der Regel wird der Großteil der Brände von den Feuerwehren beherrscht, sofern sie in der Entstehungsphase bekämpft werden können und so die Entwicklung zu einem Vollbrand verhindert werden kann [Wolschendorf 02]. Eine realistische Chance zur Selbstrettung der Tunnelnutzer besteht

infolge der geometrischen und physikalischen Gegebenheiten in Tunneln aber nur in der Preflashover-Phase des Brandes [Kumar 92].

Die immer wieder in den letzten Jahren auftretenden schweren Brände in Tunneln, bei denen Menschenopfer zu beklagen waren und die hohe Kosten verursachten, zeigen aber auch die Hilflosigkeit der Feuerwehren bei der Brandbekämpfung und Menschenrettung, wenn diese Entstehungsphase nicht beherrscht wird. Sie mahnen dringend die Notwendigkeit der Verbesserung der Sicherheitsniveaus in Tunneln an. Neben den vor allem in den letzten Jahren eingeleiteten Maßnahmen zur Verbesserung des baulichen Brandschutzes betrifft dies den anlagentechnischen Brandschutz und den abwehrenden Brandschutz, d.h. letztlich die Verbesserung der Möglichkeiten der Feuerwehr. Dies führte zu den in Tabelle 1.1 aufgeführten Vorschlägen für die Brandschutzforschung.

Tabelle 1.1: Vorschläge für das Brandschutzforschungsprogramm 2001

Vorschläge für das Brandschutzforschungsprogramm 2001		
Abschottungssysteme in Tunneln	Vergleichsrechnungen zur Ausbreitung von Luft und Luft-Wasser-Aerosolen bei Elbtunnelversuchen in Hamburg	Brandbekämpfung in Verkehrstunneln durch mobile Abschottung
Eingereicht durch: AGBF-Bund	Eingereicht durch: IdF LSA	Eingereicht durch: Behörde für Inneres Hamburg

Davon ausgehend wurde ein Vorschlag für das Forschungsvorhaben „Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und Bekämpfung bei Tunnelbränden“ erarbeitet, der durch den Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung des Arbeitskreises V der Arbeitsgemeinschaft der Innenminister der Bundesländer bestätigt wurde.

Untersuchungen von Bränden in Tunneln sind auf Grund der komplexen physikalisch-chemischen Vorgänge äußerst schwierig. Deshalb wird das ganze Spektrum der

ingenieurmäßigen Verfahren des Brandschutzes genutzt, um Aussagen über diese Vorgänge zu erhalten. Solche Verfahren sind im Wesentlichen bei Tunnelbränden nach [Lacroix 95]:

- Großversuche in Verkehrstunneln oder besonderen Anlagen,
- Modellversuche im mittleren oder kleinem Maßstab und
- numerische Simulationen,

wobei sich diese Untersuchungsmethoden ergänzen. Die beiden letztgenannten Methoden sollen in diesem Forschungsvorhaben genutzt werden.

Das Forschungsvorhaben hat das Ziel, die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und bei der Brandbekämpfung von Tunnelbränden zu überprüfen. Es gliedert sich in zwei Teilvorhaben, die aufeinander aufbauen. Im ersten Teil des Forschungsvorhabens wurden ausgewählte Brände im Brandkanal des IdF LSA durchgeführt. Begleitend dazu wurde ein Simulationsmodell unter Nutzung des General Purpose Code Fluent zur Ausbreitung von heißen Brandgasen in Tunneln erstellt und mit den experimentellen Werten verglichen.

Dieser Abschlussbericht über den ersten Teil des Forschungsvorhabens stellt die erreichten Ergebnisse dar.

2 STAND DER ERKENNTNISSE UND LITERATURAUSWERTUNG

Forschungen zu Tunnelbränden sind in den letzten Jahrzehnten immer wieder auch vor allem auf internationaler Ebene durchgeführt worden und werden noch weitergeführt. In Deutschland wurden, beginnend mit den Arbeiten unter der Leitung der STUVA [Haack 90] und den Arbeiten im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, vorwiegend experimentelle Methoden und Zonenmodelle zur Beschreibung der Branddynamik eingesetzt. Sie bilden eine wertvolle Grundlage, da sie aber nicht direkt die Entwicklung von Computational Fluid Dynamic-Modellen (CFD-Modellen) zum Inhalt haben, sollen sie in diesen Überblick nicht weiter einbezogen werden. Der interessierte Leser sei auf die Arbeiten von [Heins und Kordina 90] und [Steinert 95] und [FIRETUN 95] verwiesen.

Der vorliegende Überblick bezieht sich vor allem auf die Arbeiten, die zur Entwicklung von CFD-Simulationsmodellen durchgeführt wurden, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Modellierung von Tunnelbränden. Eine ausführliche Behandlung der Modellierung von Raumbränden mittels CFD-Methoden ist bei [Novozhilov 01] zu finden.

Anfang der 80er Jahre ergab sich mit der einsetzenden rasanten Entwicklung der Rechentechnik die Möglichkeit, an die numerische Lösung von strömungsmechanischen Problemen zu denken, die keine analytische Lösungen besitzen oder deren Lösungen unbekannt sind. Zu derartigen Problemen gehört z. B. die Klasse, die zur Simulation von Raumbränden im feldtheoretischen Rahmen benötigt werden. Diese Problemklasse wird durch die Navier-Stokes Gleichungen, die Fourier-Kirchoff'sche Differentialgleichung, die Fick'sche Diffusionsgleichung für jede chemische Komponente sowie durch die Strahlungstransportgleichung, die zur Beschreibung von chemisch reagierenden Strömungen einschließlich des Temperaturfeldes und des Strahlungsfeldes benötigt werden, charakterisiert.

Aufbauend auf ein Finite Volumen Verfahren nach Spalding und Patankar entstand ein kommerzielles CFD-Werkzeug, PHOENICS. Auf dieser Grundlage wurde das Feldmodell JASMINE von Cox an der Fire Research Station in Borehamwood entwickelt. Auch mit anderen kommerziellen Programmen wie z. B. Flow3D wurden Raumbrandberechnungen durchgeführt. Folgerichtig, beginnend im Jahre 1985, wurde von [Kumar and Cox 85], [Kumar and Cox 87] und [Kumar and Cox 88] die Problematik der Computersimulation von Tunnelbränden systematisch entwickelt. Tunnelbrände stellen in diesem Rahmen spezielle Raumbrände dar. Interessanterweise erlangte die Methode der Feldmodellierung auf dem Gebiet der Raumbrände durch die erfolgreiche Anwendung des Programmsystems Flow3D auf den Brand in der Londoner U-Bahnstation "King's Cross Station" [Simcox et al. 88a, 88b, 92], [Cox et al. 89] ihre fachliche Anerkennung.

[Kumar and Cox 85] verglichen ihre Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen, die in Versuchen im Zwengberg- bzw. Offenegg-Tunnel ermittelt wurden. Sie lösten die Bilanzgleichungen für den Impuls, die Enthalpie, die Masse, den Brennstoffmassenbruch und den Brennstoffmischungsbruch. Dabei wurde eine einfache Einschrittreaktionsgleichung für Hexan zugrunde gelegt. Zur Behandlung der Turbulenz wurde das k-ε Modell genutzt. Der Vergleich ergab eine befriedigende Übereinstimmung der

Daten in einer gewissen Entfernung vom Brand und für hohe Ventilationsbedingungen auch in der direkten Nähe des Brandes, ausgenommen direkt über dem Brand. In [Kumar and Cox 87] und [Kumar and Cox 88] wurde über die Weiterentwicklung des Modells unter Einbeziehung der Strahlung und der Oberflächenrauigkeit berichtet. Es wurde das Programm TUNFIRE entwickelt. In [Kumar 92] wurde ein Überblick zu Modellierungsproblemen bei Tunnelbränden gegeben und eine zusätzliche Verbesserung der Strahlungsberechnung erwähnt.

In Australien wurden von [Fletscher et al. 94] Rauchausbreitungsberechnungen infolge eines Poolbrandes in einem belüfteten Tunnel vorgenommen. Es wurden die stationären Bilanzgleichungen für den Impuls, die Enthalpie, die Masse, den Brennstoffmassenbruch und den Brennstoffmischungsbruch gelöst. Zur Behandlung der Turbulenz wurde das k- ϵ Modell genutzt.

Eine längere Entwicklung wurde in Japan von Xue [Xue et al. 93, 94, 95, 01] 1993 begonnen, die bis heute in Singapur fortgesetzt wird. [Xue et al. 93] entwickelten ein 3-dimensionales, instationäres Berechnungsprogramm, das in der Lage ist, in einem allgemeinen krummlinigen Koordinatensystem die Strömungsgeschwindigkeiten und die Enthalpieverteilung in Tunnelgeometrien bei turbulenten Strömungsverhältnissen zu berechnen. Er erweiterte dabei das k- ϵ Modell, um den Einfluss der Stromlinienkrümmung zu erfassen. Es wurde ein für krummlinige Koordinaten modifizierter SIMPLER-Algorithmus eingesetzt. Das Modell wurde mit experimentellen Werten im Labormaßstab verglichen. Die Übereinstimmung war außer im Bereich des Brandes, der durch einen Brenner simuliert wurde, zufriedenstellend. Die Temperaturschichtung der erhitzten Luft wurde von [Xue et al. 94] experimentell und numerisch untersucht. Das Modell wurde dann auf Großexperimente angewandt, die in Japan 1987 durchgeführt worden waren. Es wurde das Quick-Diskretisierungsschema genutzt. Neben dem Einfluss der Stromlinienkrümmung wurde der Einfluss des Auftriebs in dem k- ϵ Modell beachtet. Zusätzlich zur Temperaturverteilung wurde die Konzentrationsverteilung berechnet. Die Dichte wurde als Funktion der Temperatur betrachtet. Der Vergleich mit den Experimenten ergab ebenfalls zufriedenstellende Übereinstimmungen [Xue et al. 95]. In [Xue et al. 01] wurden drei unterschiedliche Verbrennungsmodelle numerisch getestet und mit Tunnelversuchen aus verglichen. Dabei wurde ein stationäres Modell benutzt, das ein Strahlungsmodell beinhaltet, welches auf der Diskreten Strahlungstransport Methode (Discret Radiant Transfer Model, DRTM) beruht. Es kam darüber hinaus ein so genanntes „High

Reynolds Number-Turbulenzmodell“ zum Einsatz, das die Wirkung des Auftriebs berücksichtigte. Es wurde festgestellt, dass die Verbrennungsmodelle befriedigende Ergebnisse lieferten, obwohl nicht alle Merkmale der Raumbrände zufriedenstellend widerspiegelt wurden. Der Forschungsbedarf für entsprechende turbulente Verbrennungsmodelle wurde diskutiert.

In Großbritannien wurden Mitte der 90er Jahre von [Woodburn and Britter 96a, b] Berechnungen mit dem General Purpose Code Flow3D vorgenommen und mit Experimenten verglichen. Die Berechnungen wurden direkt im Bereich des Brandes und strömungsabwärts vorgenommen. Es wurden verschiedene Parametereinflüsse getestet.

In Frankreich testeten [Biollay and Chasse 94] und [Chasse 95] den Flow3D Code an Versuchen im Ofenegg-Tunnel. Die Ergebnisse wurden als befriedigend eingeschätzt .In Schweden wurde der JASMINE-Code getestet [Tuovinnen et al. 96]. Auch hier wurden befriedigende Ergebnisse festgestellt.

3 VERSUCHE IM BRANDKANAL

Anhand von Versuchen im Brandkanal des IdF LSA wurden experimentelle Daten zum Vergleich mit Simulationsergebnissen von Fluent ermittelt. Das erforderte, Temperatur, Gaskonzentrationen, Druck- und Geschwindigkeitsfelder aus den Brandversuchen möglichst genau zu erfassen, um die für die Simulationsrechnungen notwendigen Rand- und Anfangsbedingungen bereitzustellen und die Ergebnisse der Berechnungen mit den Versuchsergebnissen zu vergleichen. Es wurden die Eingangs- und Ausgangsquerschnitte und der Brandwannenquerschnitt vermessen. Zusätzlich wurde durch Kontrollmessungen die Temperaturverteilung über die Höhe in einem Längsschnitt in der Mitte des Brandkanals bestimmt.

3.1 Geometrie

Der Brandkanal besteht aus zwei Teilen. Ein Teil wird durch den eigentlichen Versuchstunnel gebildet, an den sich ein Vorbau anschließt. Der Vorbau wird mit einer eisernen Tür geschlossen. Die Brandgase werden über einen Rauchgasabzug nach oben in die Umgebung abgeleitet. Im Bild 3.1 ist die fotografische Vorderansicht und im Bild 3.2 die dazugehörige Seitenansicht des Brandkanals dargestellt.

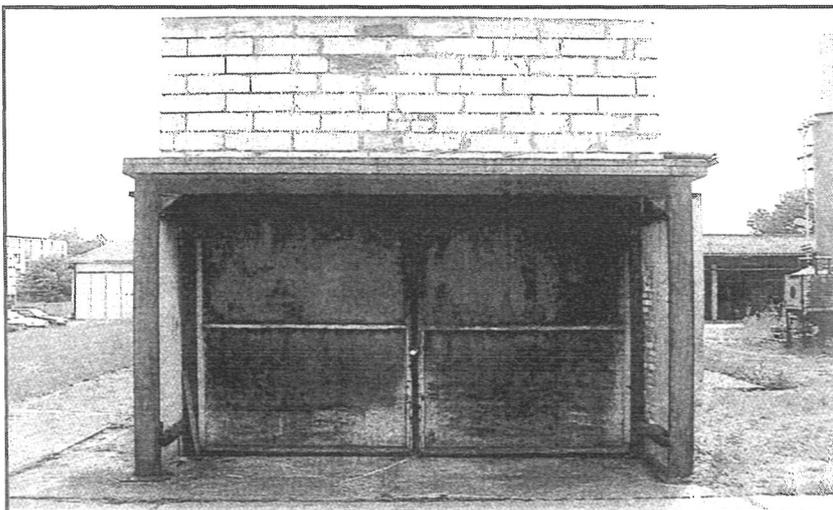


Bild 3.1: Vorderansicht des Brandkanals des IdF LSA

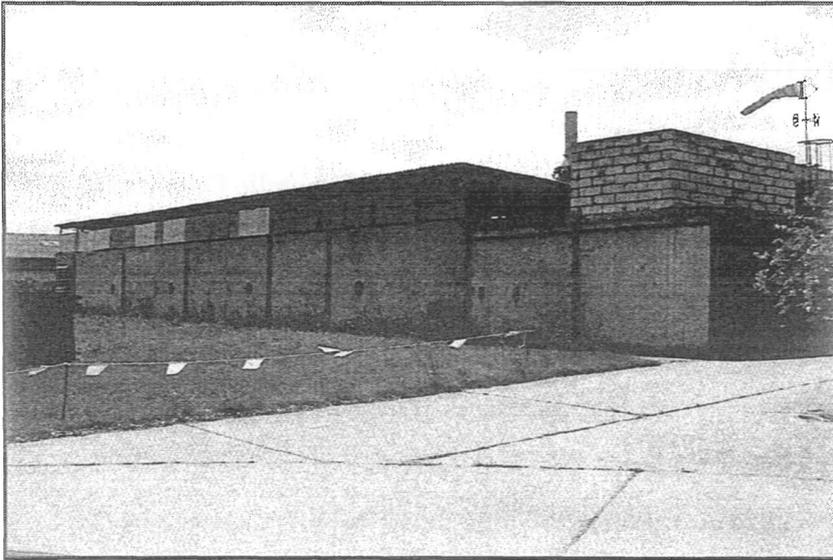


Bild 3.2: Seitenansicht des Brandkanals des IdF LSA

Im anderen Ende des Kanals, gegenüber dem Vorbau, befindet sich eine Lüfterkammer, in der zwei Lüfter installiert sind, deren Druckseiten direkt an den Brandkanal angeschlossen sind. Die Lüftungskammer besitzt seitlich angeordnete Lüftungsschlitze, die die notwendige Zuströmung der Luft ermöglichen. In ca. 6 m Entfernung von den Luftausgängen der Lüfter ist ein Strömungsgleichrichtergitter angebracht. Daran schließt sich der eigentliche Versuchsraum an. Zur besseren Übersicht sind im Bild 3.3 eine zeichnerische Vorderansicht und eine Schnittdarstellung des Brandkanals zu sehen.

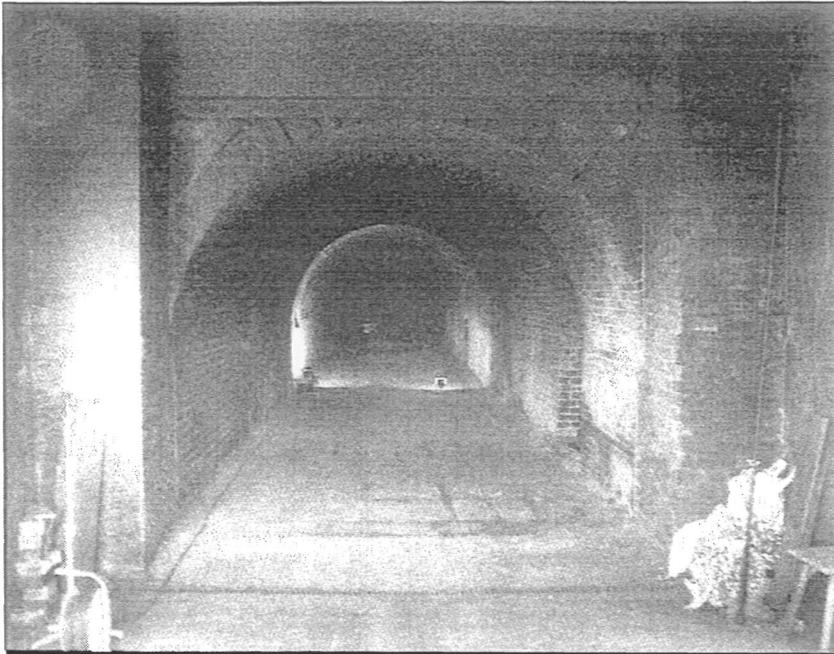


Bild 3.4: Blick in den leeren Versuchsraum im Brandkanal des IdF LSA

Eine Fotografie des leeren Versuchsraums im Brandkanal des IdF LSA ist im Bild 3.4 zu sehen. Die Querschnittfläche des Versuchsraums im Brandkanal kann durch die Summe einer Rechteckfläche mit den Abmaßen 3 m x 1 m und einer Halbkreisfläche mit dem Durchmesser von 3 m beschrieben werden. Die nutzbare Länge vom Strömungsgleichrichter bis zum Beginn des Vorbaus beträgt ca. 20 m.

3.2 Versuchsaufbau und eingesetzte Sensorik

Die eigentliche Versuchsanlage wurde für den Versuchsraum konzipiert und aufgebaut. Dazu wurde der Versuchsraum in mehrere Messebenen eingeteilt. Im Bild 3.5 ist eine Prinzipskizze des Messaufbaus im Längsschnitt dargestellt. Die Maße in den Skizzen sind in Millimeter angegeben.

der Brandwanne angeordnet, um direkt die Temperaturen über der Brandwanne zu messen. Weiterhin wurde in der Mittelebene des Kanals am Messständer D die Temperatur über die Höhe bestimmt. In den Bildern Bild 3.6, 3.7 und 3.8 sind diese Messanordnungen dargestellt. Die Temperaturmessstellen tragen die Bezeichnung „T“. Durch die gewählte Messanordnung ergab sich die Möglichkeit, die Temperaturverteilungen in der Mittelebene des Versuchsraums und in einzelnen Querschnitten zu bestimmen.

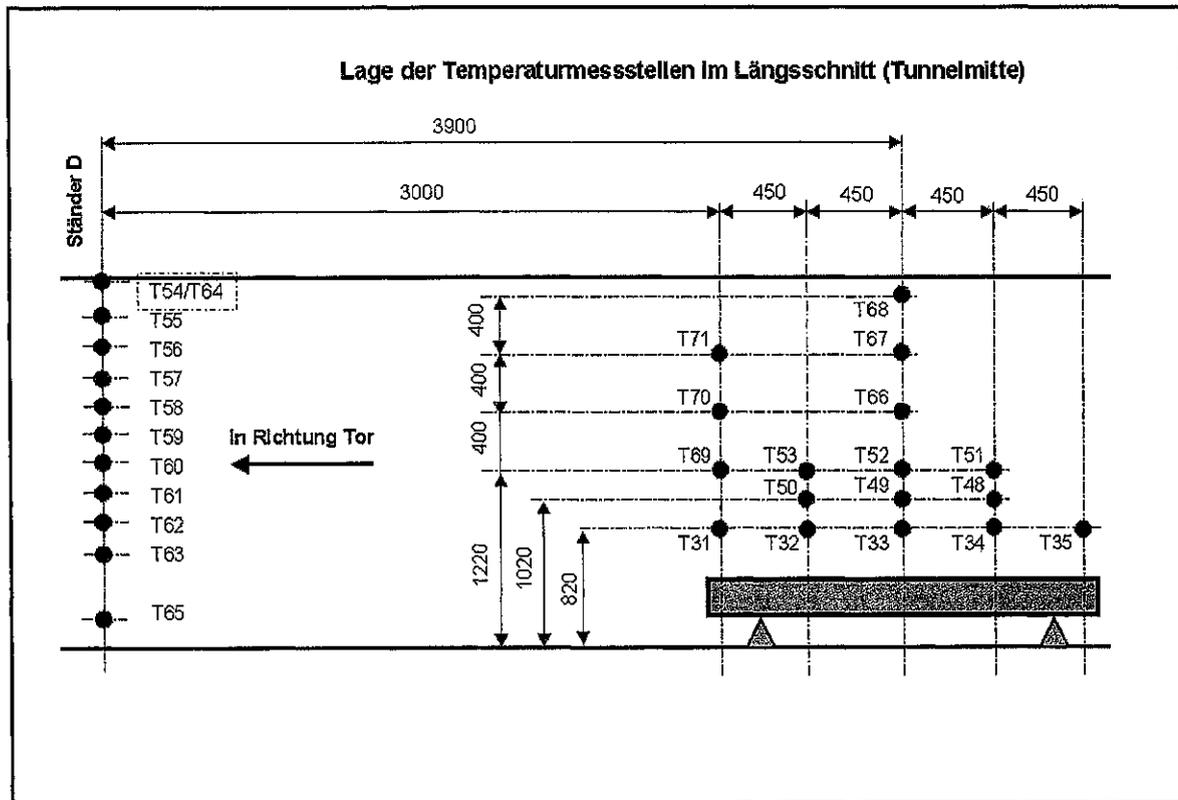


Bild 3.6: Prinzipskizze der Messanordnung der Thermoelemente in der Mittelebene des Brandkanals direkt über der Brandwanne und am Messständer D

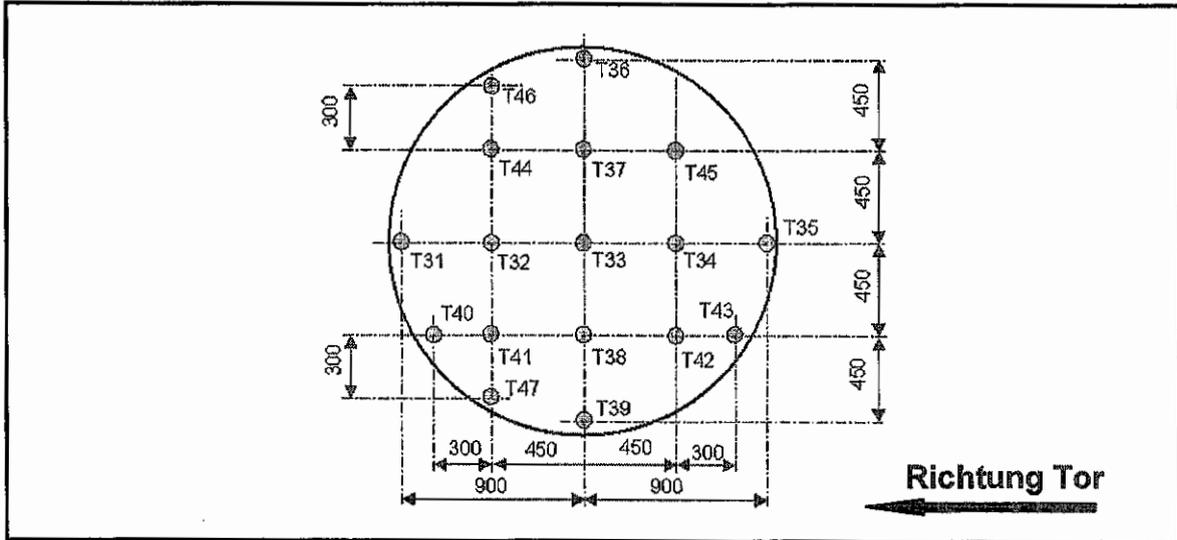


Bild 3.7: Prinzipskizze der Messanordnung der Thermoelemente in der Messebene C

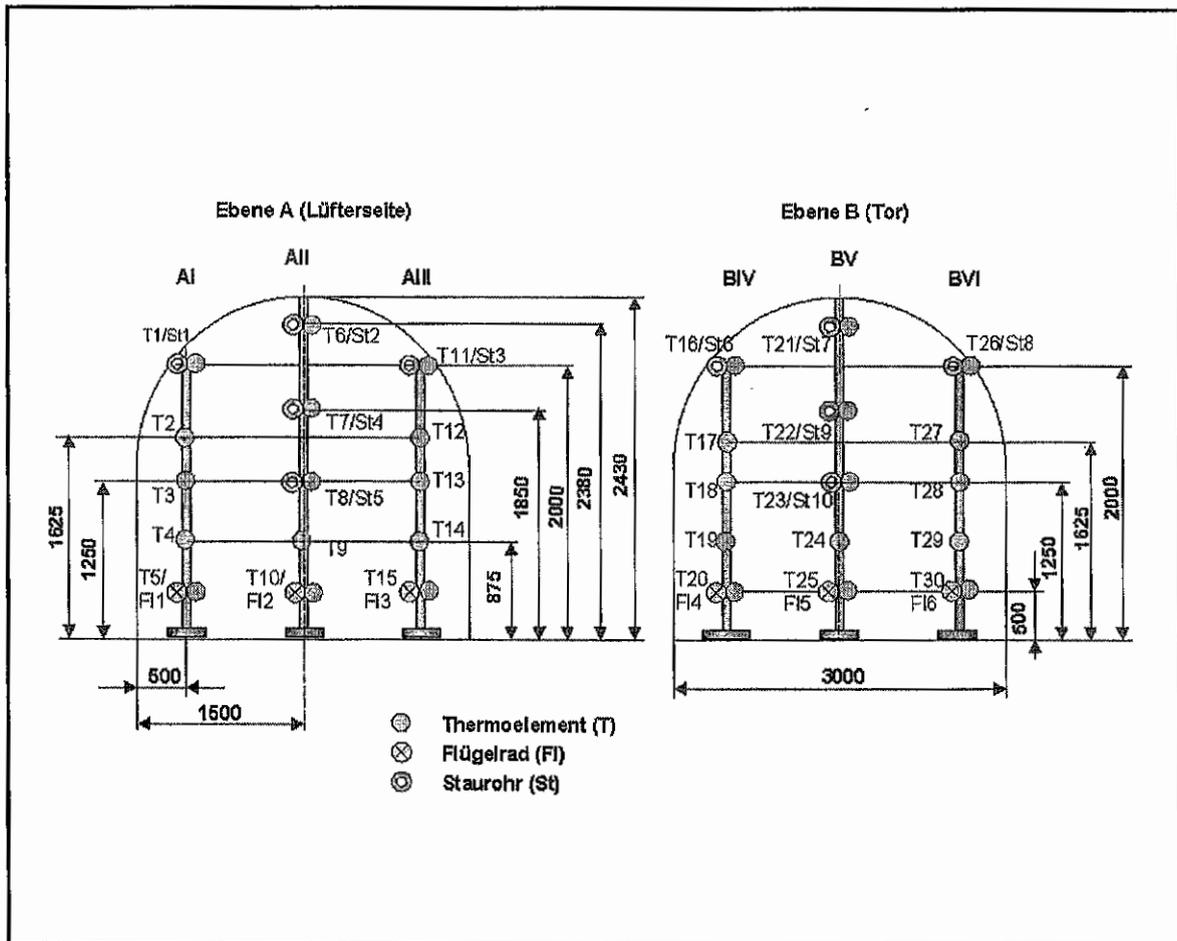


Bild 3.8: Messstellenanordnung in den Messebenen A und B

Die Temperaturmessungen erfolgen mittels Mantelthermoelementen des Typs K (NiCr/Ni) mit indirekter Messstelle. Im Bild 3.9 sind die verwendeten Thermoelemente abgebildet. In den Versuchen wurden Mantelthermoelemente verschiedener Hersteller mit einem Manteldurchmesser von 1 mm und einer Mantellänge von 5 oder 10 m, je nach Einbauort, eingesetzt.

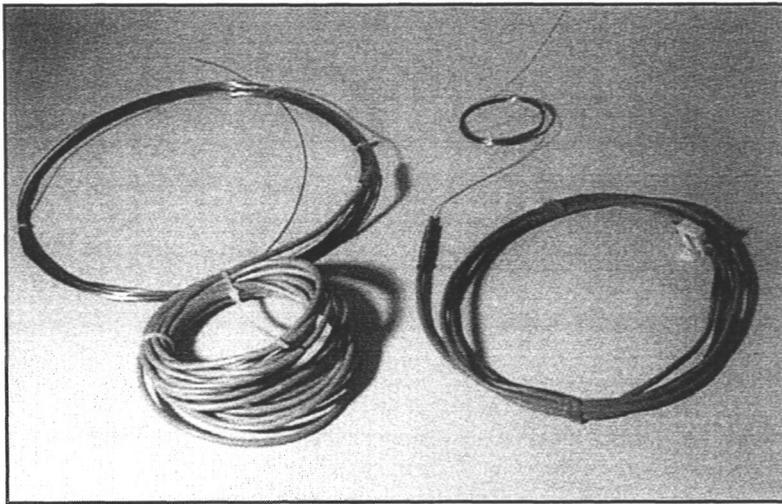


Bild 3.9: Eingesetzte Mantelthermoelemente

Die Thermoelemente genügen der Genauigkeitsklasse II nach DIN /ICE 584. Der Messbereich der Mantelthermoelemente erstreckt sich von 233 K bis 1573 K. Die Abweichung beträgt für diese Thermoelemente $\pm \max(0,0075 |T|; 2,5 \text{ K})$, wobei T die gemessene Temperatur in K darstellt. Die die Ansprechempfindlichkeit charakterisierende t_{90} -Zeit beträgt ca. 0,2 s.

3.2.2 Wärmestromdichtemessungen

Es wurden im Längsschnitt des Brandkanals Wärmestromdichtesensoren Modell 64-10-20 der amerikanischen Firma MEDTHERM Corporation an verschiedenen Messpunkten installiert (Messstellenbezeichnung Wsd1 bis Wsd3 im Bild 3.5). Das Messprinzip, das den Wärmestromdichtesensoren zugrunde liegt, folgt Gardon und ist im Bild 3.10 skizziert.

Die linke Abbildung zeigt den fertig installierten Wärmestromdichtesensor in Stativmontage mit Kühleinrichtung. Die eingesetzten Wärmeflussensoren können Wärmestromdichten bis zu 100 kW m^{-2} (10 W cm^{-2}) unter nahezu beliebigen Umgebungsbedingungen erfassen [MED]. Die Genauigkeit beträgt $\pm 3,0 \%$.

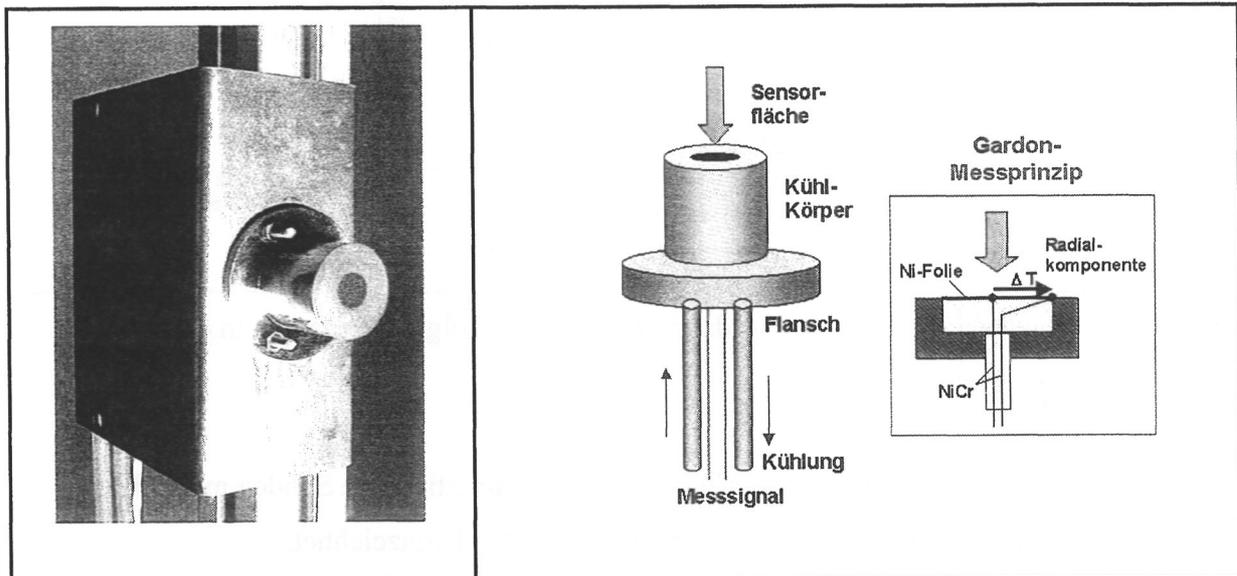


Bild 3.10: Wärmestromdichtesensor

3.2.3 Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Gase

In den Messebenen A und B wurden ebenfalls die Strömungsgeschwindigkeiten in Richtung der Längsausdehnung über den Querschnitt mittels Flügelradanemometer und Prandtl'scher Staurohre gemessen (Bild 3.8). In der Messebene C wurden die Geschwindigkeiten senkrecht zur Brandwanne (Bild 3.7) mit bidirektionalen Strömungsmesssonden bestimmt, wie sie von [McCaffrey and Heskestad 76] entwickelt wurden.. In Bild 3.11 ist die Anordnung der bidirektionalen Sonden in der Messebene C dargestellt.

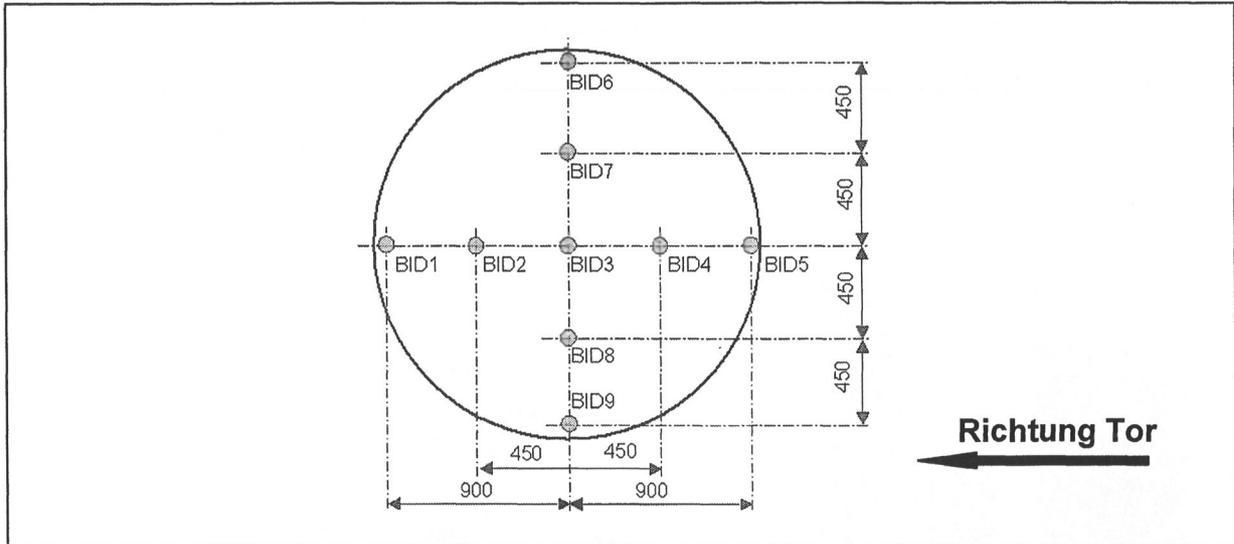


Bild 3.11: Prinzipskizze der Messanordnung der Geschwindigkeitssensoren in der Messebene C

In den Bildern für die Messstellenanordnung sind die bidirektionalen Sonden mit „BID“, Flügelradanemometer mit „Fl“ sowie Staurohre mit „St“ gekennzeichnet.

3.2.3.1 Flügelradanemometer

Flügelradanemometer sind zur Messung der Gasgeschwindigkeiten im Temperaturbereich von 243 bis 413 K geeignet. Sie wurden im erwarteten Niedrigtemperaturbereich eingesetzt, um die Zuluftgeschwindigkeiten (untere Bereiche in den Messebenen A und B) zu bestimmen. Zur Anwendung kamen abgesetzte Flügelräder des Typs 9915 S1 der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH mit einem Messkopfdurchmesser von 22 mm. Die Messgenauigkeit des Flügelradanemometers beträgt nach Herstellerangaben $\pm 1,5\%$ des Messbereichsendwertes, der mit 40 m s^{-1} angegeben wurde [AHLBORN1]. Ein Flügelradanemometer ist im Bild 3.12 dargestellt. Die Messwertgenerierung erfolgt durch Erfassung der



Bild 3.12: Flügelradanemometermesskopf

Flügelraddrehzahl, die magnetisch-induktiv abgetastet wird. Über einen Frequenz-Spannungswandler wird ein drehzahlproportionales lineares und analoges Ausgangssignal erzeugt. Von Nachteil ist der für Brandversuche begrenzte Temperaturbereich.

Aus diesem Grund wurde zur qualitativen Bestimmung der Strömungsrichtung eine vertikal ausgerichtete Wollfaden-Leiste im Bereich der Messebene B installiert und während der Versuchsabläufe mittels Videokamera aufgezeichnet (Bild 3.13).

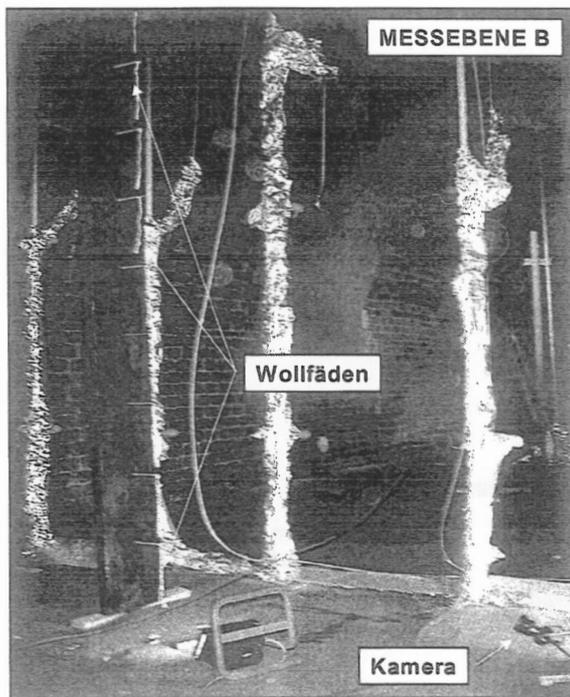


Bild 3.13: Strömungsrichtungüberwachung in Messebene B

3.2.3.2 Staurohre

Die Staurohre wurden in den oberen Bereichen der Messebenen A und B eingesetzt, um die Gasgeschwindigkeiten zu messen (Bild 3.14). Dabei wurden Staurohre nach Prandtl Typ FD 9912-97 T der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH verwendet

[AHLBORN2]. Die eingesetzten Staurohre sind bedingt, je nach Material und Auslegung, bis zu Temperaturen von 873 K einsetzbar.

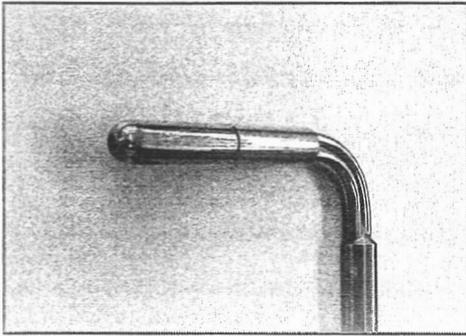


Bild 3.14 Staurohr nach Prandtl

Durch Schlauchanschlüsse, die aus Silikonmaterial bestehen (Einsatzgrenze 503 K), senkt sich diese Grenze weiter ab. Durch Verwendung genügend langer Staurohre, die es gestatteten, das Schlauchmaterial in unteren Bereichen zum Einsatz zu bringen, sollten die Heißgasgeschwindigkeiten bestimmt werden.

Staurohre messen nur unidirektional, so dass bei den Brandversuchen nur eine Komponente des Strömungsvektors erfasst wurde. Das Messprinzip der Staurohre ist im Bild 3.15 dargestellt.

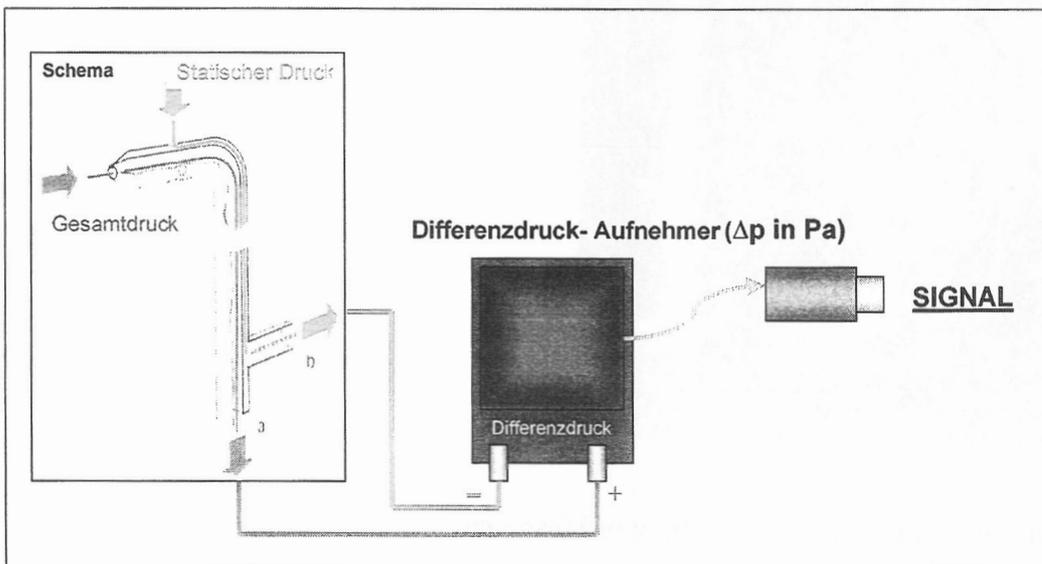


Bild 3.15: Messprinzip zur Staurohrmessung

Der Differenzdruck, der sich aus dem statischen Druck und dem Gesamtdruck ergibt, wird mittels eines entsprechenden Differenzdruckaufnehmers [Synotec] gemessen und als lineares analoges Ausgangssignal der Messwerterfassung zur Verfügung gestellt. Die Ermittlung der Gasgeschwindigkeit aus dem gemessenen Differenzdruck wird nach der Beziehung

$$v = 1.288 \cdot \sqrt{\frac{T}{293} \cdot \frac{100000}{10000 + p_s} \cdot \frac{1013}{B} \cdot \frac{\Delta p}{M}} \quad 3.1$$

vorgenommen. Dabei sind T die Gastemperatur in Kelvin, p_s der statische Druck in Pa, B der atmosphärische Druck in mbar, Δp der gemessene Differenzdruck in Pa und M ein Formfaktor des Staurohres.

3.2.3.3 Bidirektionale Strömungssonden

Zur Messung in Heißgasströmungen, insbesondere zur Bestimmung von Flammgeschwindigkeiten, wurden bidirektionale Sonden eingesetzt (Bild 3.16).

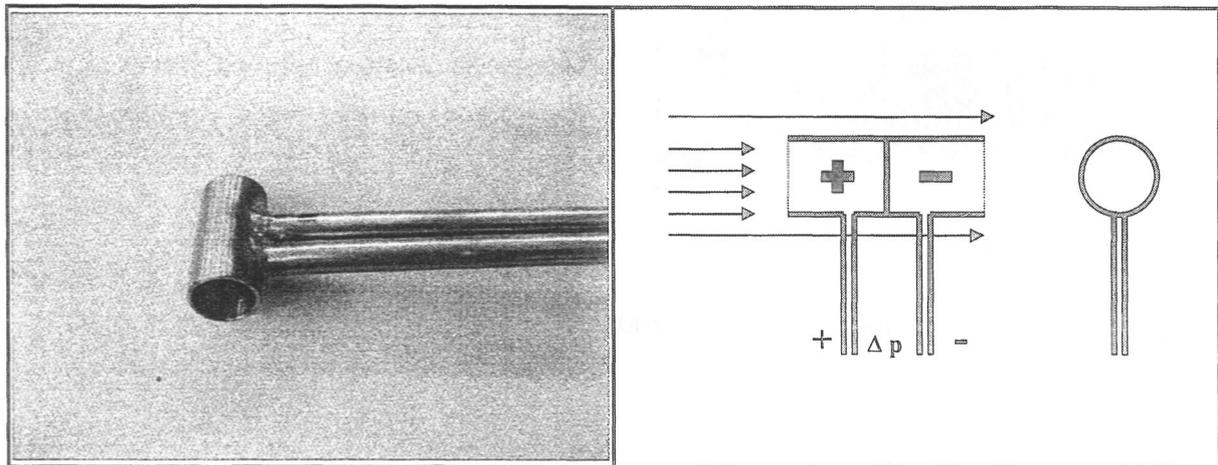


Bild 3.16: Bidirektionale Strömungssonden

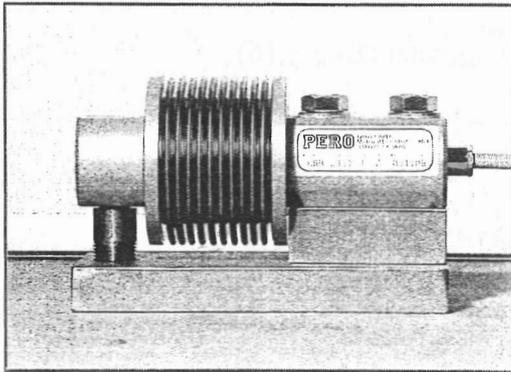
Die Sonden wurden komplett aus Edelstahl gefertigt. Sie arbeiten wie die Staurohre nach dem Differenzdruckprinzip, sind aber in der geometrischen Form modifiziert und vereinfacht worden. Im Bild ist das Wirkprinzip der Sonden dargestellt. Sie zeigen eine wesentlich geringere Neigung zu Verstopfungen der Einlassöffnungen durch Ruß und Abbrandprodukte als Staurohre. Die Messwerterfassung erfolgt analog der bei den Staurohren durch eine Differenzdruckerfassung und Korrektur der Messergebnisse aufgrund der starken Abhängigkeit von der Gastemperatur nach der Formel

$$v_g = \frac{1}{f(\text{Re})} \sqrt{\frac{2\Delta p T}{\rho_0 T_0}}, \quad 3.2$$

in der $f(\text{Re})$ ein von der Reynoldszahl abhängiger Korrekturfaktor (1,08 – 1,3, Δp der Differenzdruck, T die Gastemperatur, T_0 die Umgebungstemperatur und p_0 der Umgebungsdruck [Ingason et al. 94] ist.

3.2.4 Messung der Masse des Brandmediums

Die Bestimmung des Masseverlustes des Brandmediums während des Brandversuchs erfolgte mit einer Abbrandwaage. Dazu wurde die Brandwanne auf drei Kraftaufnehmer vom Typ KA 2000 gesetzt. Die Messgenauigkeit des einzelnen Kraftaufnehmers betrug $\pm 1 \%$.



Die Messergebnisse der Kraftaufnehmer wurden einzeln erfasst und im Messwerverfassungsprogramm zu einer Messgröße zusammengesetzt. Ein Kraftaufnehmer vom Typ KA 2000 ist im Bild 3.17 dargestellt.

Bild 3.17: Kraftaufnehmer von Typ KA 2000

3.2.5 Messung der Konzentration der Gase CO, CO₂ und O₂

Die Konzentration der Gase CO, CO₂ und O₂ wurde in einem Abstand von 0,2 m unter der Decke in einer Entfernung von 5,75 m ab Brandwannenmittelpunkt in Richtung des

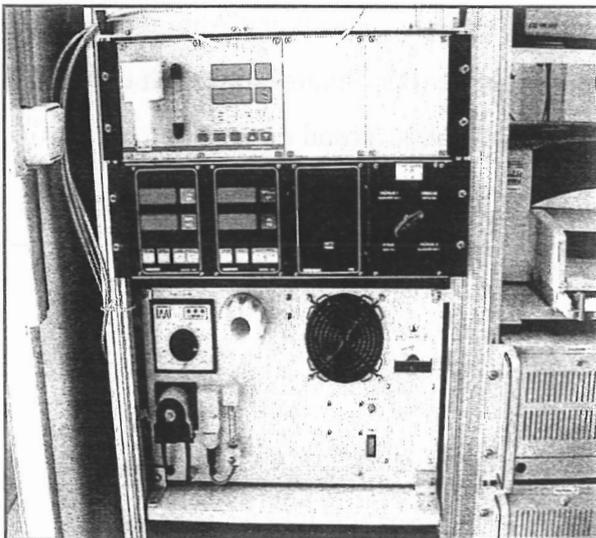


Bild 3.18: Gasanalyzesystem

Rauchabzuges gemessen. Die Messung der Konzentrationen an Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO) und Sauerstoff (O₂) im Rauchgas erfolgte mit einem Gasanalyzesystem der Fisher-Rosemount GmbH & Co (Bild 3.18), welches eine kontinuierliche Messung der Gaskonzentrationen ermöglicht. Aus der Skizze in Bild 3.19 ist der prinzipielle Aufbau des Gasanalyzesystems ersichtlich. Die einzelnen Bauteile werden nachfolgend beschrieben. Mit Pfeilen ist der Weg des Rauchgases im System

angedeutet.

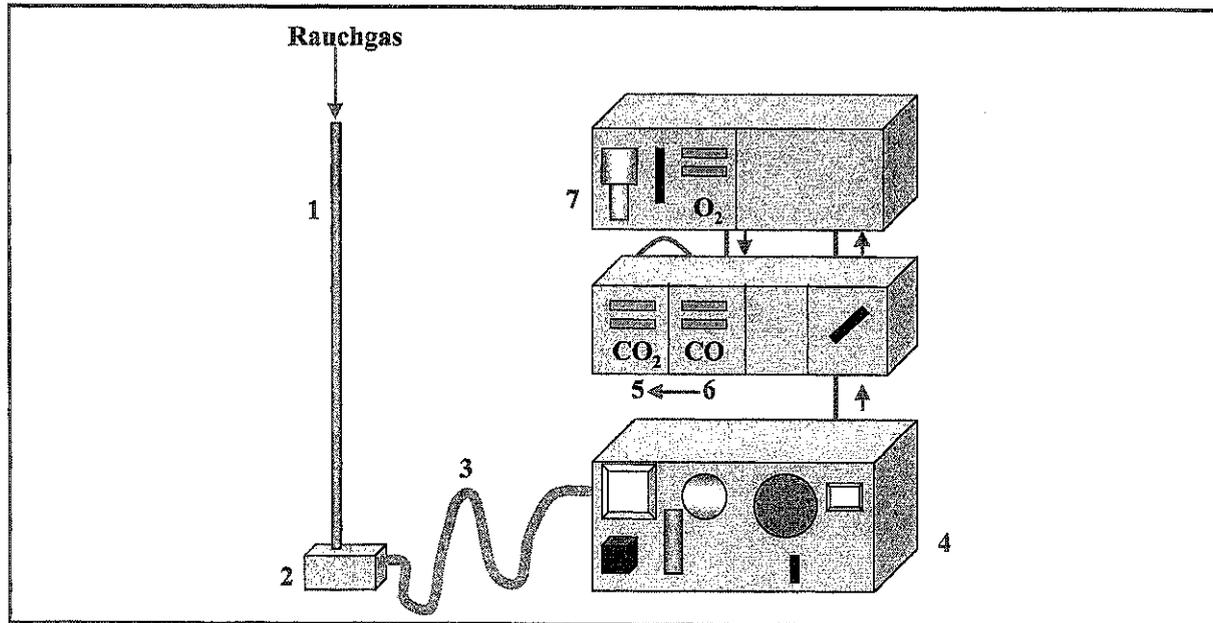


Bild 3.19: Prinzipskizze des Aufbaus des Gasanalysebaus

Die Probesonde (1), deren Länge 2000 mm beträgt, besteht aus einem Entnahmerohr aus Titan 1.4571. Es ist eine maximale Temperatur von 1573 K zulässig. Über den Flansch ist die Probesonde mit einem Vorfilter (2) verbunden. Das Vorfilter mit einer Porengröße von 2-5 μm dient der Abscheidung von Ruß und anderen Partikeln. Es ist beheizbar und wird bei diesen Messungen mit einer Temperatur von 453 K betrieben. Das Filter ist mit Anschlüssen für Kalibriergas und Rückspülung ausgestattet. Die Gasauslassöffnung wird mit dem Gasschlauch (3) verbunden. Der beheizbare Gasschlauch ist 10 m lang und enthält eine austauschbare PTFE-Seele. Zum Schutz vor äußeren Einwirkungen ist der Schlauch mit einem Außengeflecht aus verzinktem Stahl umgeben. Der Schlauch wird direkt an den Messgaskühler angeschlossen. Über diesen erfolgt die Regelung der Betriebstemperatur des Schlauches, die ebenfalls 453 K beträgt. Im Messgaskühler wird das zu untersuchende Gas aufbereitet. Eine integrierte Pumpe mit einer Förderleistung $< 5 \text{ Nl min}^{-1}$ sorgt für den kontinuierlichen Probegasstrom, der am Durchflussmesser mittels eines Nadelventils eingestellt wird. Das Gasanalysebaus wurde auf Empfehlung des Herstellers mit einem Probegasstrom von 1 l min^{-1} betrieben. Ein Feinstaubfilter mit PTFE-Filterelement der Feinheit 2 μm reinigt das Probegas. Aggressive Bestandteile des Probegases werden in einem Absorberrohr, gefüllt mit Glaswolle und Spezialabsorber, abgeschieden. Durch den Kontakt mit Wärmetauschern wird das Gas auf eine Temperatur von 5 °C gekühlt und gelangt in die

einzelnen Gasanalysatoren. Eine Peristaltikpumpe sorgt für die kontinuierliche Ausscheidung des anfallenden Kondensates. Der CO₂-Gasanalysator (5) ist ein mikroprozessorgesteuerter nicht-dispersives Infrarot-Fotometer (NDIR) der Baureihe BINOS[®] 100. Er erfasst die durch das Messgas verursachte Absorption von Infrarotstrahlung. Die Ausführung des Gerätes als 2-Kanal-Analysator ermöglichte die Auslegung für zwei Messbereiche von 0-15 Volumenprozent und 0-100 Volumenprozent. Die aus den Küvetten austretende Strahlung wird durch Filterküvetten auf die Detektoren konzentriert. Das Messsignal wird normiert, linearisiert und hinsichtlich des Temperaturfehlers kompensiert. Die Messergebnisse werden direkt angezeigt und über eine analoge Schnittstelle für die Messwerterfassung zur Verfügung gestellt.

Ein mikroprozessorgesteuerter NDIR-Fotometer der Baureihe BINOS[®] 100 mit zwei Kanälen bildet den CO-Gasanalysator (6). Ein Kanal wurde für den Messbereich von 0-1000 ppm ausgelegt. Dieser arbeitet mit einem Fotometer mit Gasdetektor nach optopneumatischem Messprinzip. Der andere Kanal, ausgerüstet mit einem Fotometer mit pyroelektrischem Detektor und Interferenz-Filterkorrelation, wurde auf Messungen im Bereich von 0-8 Volumenprozent eingestellt. Ein weiterer mikroprozessorgesteuerter NDIR-Gasanalysator der Baureihe BINOS[®] 100-2M wurde zur Messung der O₂-Konzentration eingesetzt. Die Messungen sind im Bereich von 0-21 Volumenprozent O₂ durchgeführt worden [Fisher-Rosemount 91, 93a, 93b, 93c].

Tabelle 3.1: Technische Daten des Gasanalysesystems

	NDIR-Fotometer	paramagnetischer Sauerstoffsensoren
Nachweisgrenze	≤ 1 % ¹⁾²⁾	≤ 1 % ¹⁾²⁾
Linearitätsabweichung	≤ 1 % ¹⁾²⁾	≤ 1 % ¹⁾²⁾
Auflösung	≤ 1 % ¹⁾²⁾	≤ 1 % ¹⁾²⁾
Genauigkeit	≤ 2 % ¹⁾²⁾	≤ 2 % ¹⁾²⁾
Ansprechzeit (t ₉₀), physikalisch	2 – 15 s ³⁾	< 5 s ³⁾
Ansprechzeit (t ₉₀), elektrisch	2 – 60 s ³⁾	2 – 60 s ³⁾

¹⁾ bezogen auf Messbereichsendwert

²⁾ bei konstanter Temperatur und konstantem Druck

³⁾ ab Gaseingang Analysator

3.2.6 Messwerterfassung, Videoaufzeichnung und Wetterdaten

3.2.6.1 Vielstellenmesstechnik

Die Messwerterfassung erfolgte mit dem Messwerterfassungssystem Autolog 2100 [Peckel], das im mobilen brandtechnischen Labor (MOBLAB) des IdF LSA integriert ist. Mit dieser Anlage können bis zu 150 Messgrößen gleichzeitig erfasst werden. Das können beliebige physikalische Messgrößen oder auch Daten chemischer Analysen sein, wenn sie standardisierte Strom- und Spannungs-Einheitssignale zur Verfügung stellen. Die Summenabtastrate wurde zu 5 s gewählt. Geringere Summenabtastraten konnten aus technischen Gründen nicht realisiert werden. Die Messwerterfassung erfolgte unter Einsatz eines integrierenden Digitalvoltmeters, da Störspannungen (Elektrosmog) auftraten. So konnten wesentliche Spannungsspitzen eliminiert werden. Die Messdaten wurden in Online-Grafiken zur Anzeige gebracht und in ASCII-Files auf Festplatte zeitgleich gesichert.

3.2.6.2 Videodokumentation

Die Brandversuche wurden zusätzlich durch Videoaufnahmen dokumentiert. Aufgrund der

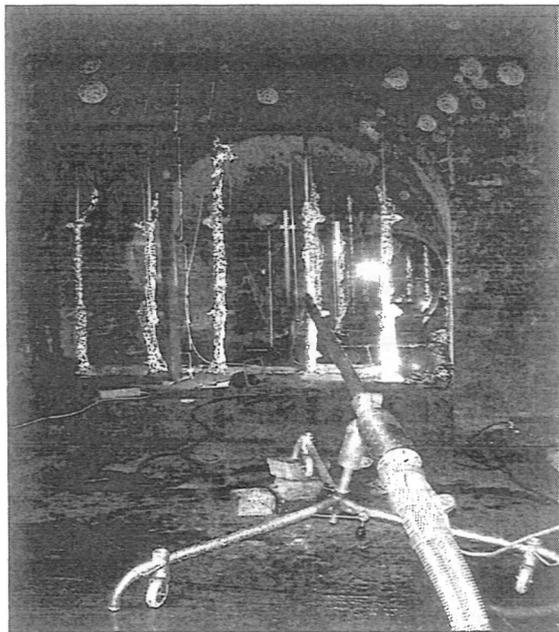


Bild 3.20: Endoskopkamera

zur erwartenden Temperaturen und Umgebungsbedingungen konnte nur die Endoskop-Spezialkamera [Digital] des IdF LSA eingesetzt werden (Bild 3.20). Sie kann auch in Flammen und bei Umgebungstemperaturen weit über 1000 °C eingesetzt werden. Sie besteht aus einer Miniatur-Farb-CCD-Kamera, die von einem wassergekühlten Schutzrohr umgeben ist. Die frontliegende Optik wird durch eine Pressluft-Freiblaseeinrichtung von Brandablagerungen freigehalten. Durch eine Stativmontage mit einem Drehgelenk ist diese Kamera in nahezu beliebigen

Positionen betreibbar. Über BNC-Kabel erfolgt die Signalübertragung zum Recorder und zum Monitor zwecks Aufzeichnung und Bildwiedergabe an zentraler Stelle im MOBLAB. Eine zweite s/w-CCD-Kamera mit abgesetztem Kamerakopf wurde zur Überwachung der Baumwollfäden an der Vertikalen eingesetzt (vgl. Bild 3.13). Sie wurde isoliert in Bodennähe installiert, in einem Bereich, in dem keine wesentliche Temperaturbelastung zu erwarten war. Die Aufzeichnung erfolgte analog der Aufnahmen der Endoskopkamera.

3.2.6.3 Wetterdatenerfassung

Mit der Wetterstation des MOBLAB wurden die Umweltbedingungen während des Versuchsablaufes aufgezeichnet, um deren möglichen Einfluss auf den Brandverlauf abschätzen zu können. Die Wetterdaten wurden am ausfahrbaren Messmast in ca. 10 Meter über dem Boden erfasst. Als Messgrößen wurden die Lufttemperatur, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchte und der Luftdruck aufgenommen. Die mit der Wetterstation [Thies] erfassten Messdaten werden mit der Software Anacomp und Anavis [Breisfuss] zur Anzeige gebracht und im ASCII-Format gespeichert.

3.3 Versuchsdurchführung

In Tabelle 3.2 ist eine Aufstellung der durchgeführten Versuche angegeben. Die Versuche 1-6 sind Vorversuche. Sie dienen zur Optimierung des Messaufbaus. Die Versuche 7-12 sind die eigentlichen Hauptversuche. Die unter Punkt 3.2 beschriebene Messstellenanordnung bezieht sich auf die Hauptversuche. Die Hauptversuche bestanden aus zwei Messreihen, wobei die zweite Messreihe die Wiederholung der ersten darstellt. Dies diente vor allem zur Gewinnung eines Überblicks über die Reproduzierbarkeit der Versuche im Brandkanal des IdF Sachsen-Anhalt, ohne den Anspruch einer statistischen Absicherung zu erheben. Ausgenommen davon sind die Versuche mit seitlicher Belüftung, die aus Kostengründen noch nicht wiederholt werden konnten. Dies wird dem zweiten Teil des Forschungsvorhabens vorbehalten sein.

Insgesamt wurden 12 Versuche durchgeführt.

Tabelle 3.2: Aufstellung der Versuche mit Siedegrenzenbenzin (SB) und Heptan (HP)

Versuchsnummer	Brandlast	Seitenlüftung
BV01	10 l SB	ohne
BV02	20 l SB	ohne
BV03	60 l SB	mit
BV04	20 l SB	ohne
BV05	40 l SB	ohne
BV06	40 l SB	ohne
BV07	80 l SB	ohne
BV08	80 l SB	ohne
BV09	80 l HP	ohne
BV10	80 l HP	ohne
BV11	40 l HP	mit
BV12	40 l SB	mit

Als Brandstoffe kamen Siedegrenzenbenzin 80/110 (SB) und Heptan (HP) zum Einsatz. Siedegrenzenbenzin besteht aus einem Spezialbenzinverschnitt von Benzinen mit Siedepunkten zwischen 353 und 383 K (80 und 110 °C), das als Leichtbenzin bezeichnet werden kann und kostengünstiger als Heptan ist. Heptan besitzt einen Siedepunkt von 371 K (98 °C), der im Intervall zwischen den Siedepunkten des Siedegrenzenbenzin einzuordnen ist. Heptan wurde als Brandstoff gewählt, weil in der Literatur oft Versuche mit diesem Brandstoff beschrieben wurden. Auch die Versuche im letzten großen EUREKA Projekt FIRETUN wurden mit Heptan als Brandstoff durchgeführt [FIRETUN 95]. Die Erkenntnisse dieses Projektes prägen den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse in Deutschland und bildeten die Grundlage für viele weitere Arbeiten und Regelwerke. Die Verwendung von Heptan, als reiner Stoff, gestattet es, die Modellierung der chemischen Reaktion mit einer Einschrittgesamtreaktion einfach zu gestalten.

3.4 Ergebnisse der Versuche

Im folgenden Punkt werden die Ergebnisse der Hauptversuche im Vergleich zu Versuchen aus der zweiten Messreihe und im Vergleich zu Versuchen mit unterschiedlichen Brandstoffen dargestellt. Die Brandversuche wurden mit der Endoskopkamera dokumentiert. Im Bild 3.20 sind für das Beispiel eines Brandversuches mit freier Konvektion (BV09) und eines Versuches mit Seitenwind (BV11) die charakteristischen Brandverläufe anhand von Schnappschüssen gegenübergestellt. Das linke Bild zeigt einen Brandverlauf mit freier Konvektion, rechts daneben ist eine Aufnahme aus dem Zuluft-Brandversuch BV11 zu sehen.



Bild 3.21: Momentaufnahme aus einem Brandversuch (BV09) bei freier Konvektion (links) und einem Brandversuch (BV11) mit Seitenwind (rechts)

Die Auswertung erfolgte mit dem SAS-System unter Microsoft Windows - Release 8.02 [SAS 02]. Die Grafiken basieren auf einer Interpolation mit Lagrangepolynomen 3. Ordnung.

Bei den Messungen wurden die Messgrößen als Funktion des Ortes und der Zeit erfasst. Zur Auswertung wurde der Versuchsbeginn mit Erreichen einer Temperatur von 298 K am Thermoelement 33 (Mitte Wanne, Bild 3.6 und 3.7) definiert. Für die Auswertung der Konzentrationen wurde unter Berücksichtigung des Versuchsaufbaus für die Gasanalyse eine zusätzliche Nullpunktverschiebung vorgenommen. In Folge des schon oben beschriebenen Aufzeichnungsverfahrens stellen die gemessenen Größen die arithmetischen Mittelwerte über ein Zeitintervall von 5 s dar. Die Temperaturdaten sind unkorrigierte Messwerte.

3.4.1 Versuche mit freier Konvektion

3.4.1.1 Temperaturmessungen

Im Bild 3.22 sind die Temperaturprofile im Ständer D des Versuchsraums für die beiden Brandversuche mit 80 l Siedegrenzenbenzin (BV07 und BV08) exemplarisch nach 60 s und nach 180 s Branddauer dargestellt.

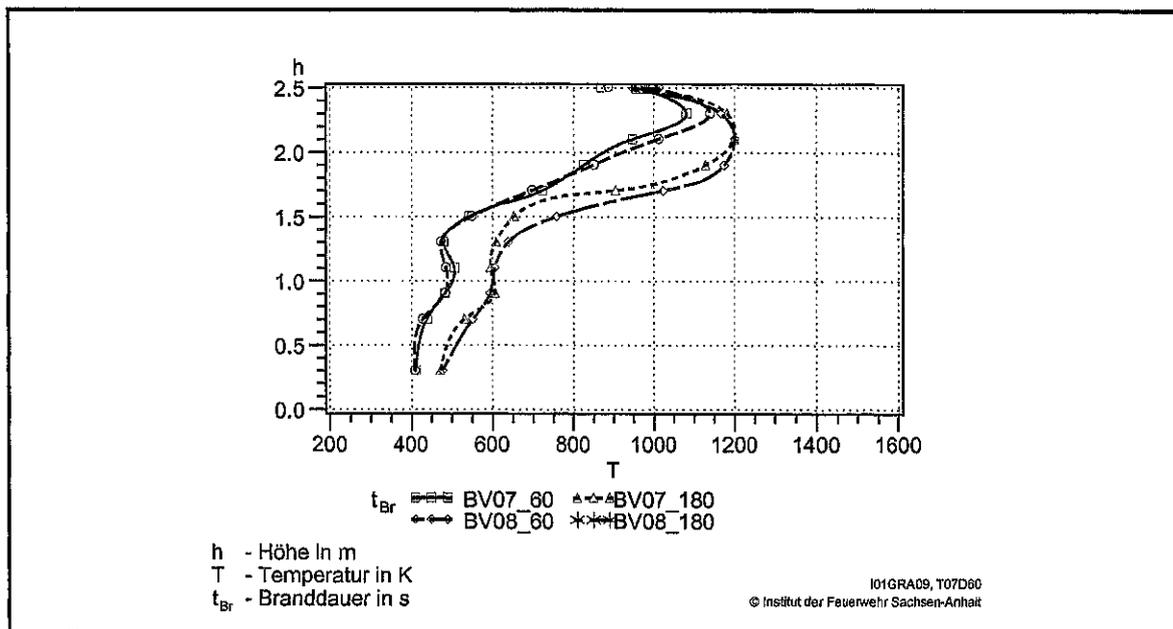


Bild 3.22: Gegenüberstellung der Temperaturprofile am Ständer D für die Brandversuche BV07 und BV08 (80 l SB) nach 60 s und 180 s

Wie aus den Temperaturprofilen zu ersehen ist, lassen sich Bereiche mit stark unterschiedlicher Temperatur unterscheiden, so dass in diesem Fall von einer Temperaturschichtung gesprochen werden kann. Darüber hinaus soll im Bericht beim Auftreten dieses Verhaltens der gemessenen Größen ganz allgemein der Begriff der Schichtung verwendet werden soll.

Die Temperaturverteilungen sind für beide Zeitpunkte bis auf geringe Abweichungen gleich. Die größte Abweichung beträgt ca. 120 K, d. h. 10 % bezogen auf die Maximaltemperatur von 1200 K.

Die Temperaturprofile am Ständer D für die beiden Brandversuche mit Heptan (BV09 und BV10) nach 60 s und 180 s Branddauer sind im Bild 3.23 dargestellt.

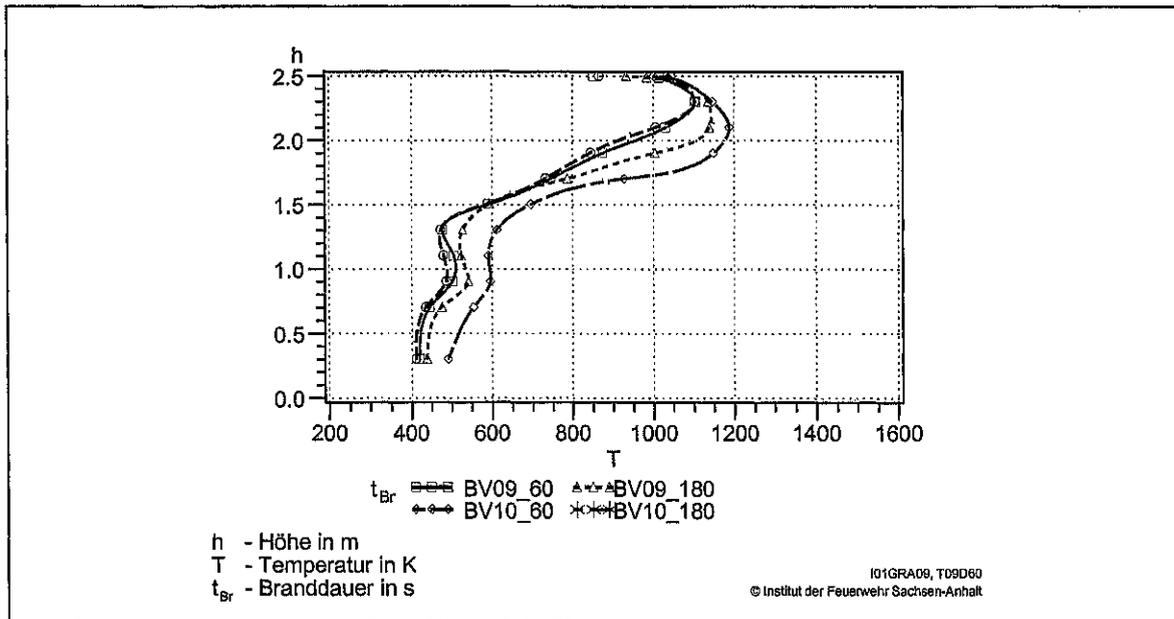


Bild 3.23: Gegenüberstellung der Temperaturprofile am Ständer D für die Brandversuche BV09 und BV10 (80 l HP) nach 60 s und 180 s

Die Temperaturverteilungen sind zum Zeitpunkt 60 s ebenfalls bis auf geringe Abweichungen gleich. Zum Zeitpunkt 180 s werden beim Brandversuch BV10 höhere Temperaturen erzielt, wobei der Verlauf ähnlich bleibt. Die maximalen Abweichungen (T57 und T58, vgl. Anhang) betragen ca. 12 %, bezogen auf die Maximaltemperaturen von rund 1200 K. Es ist eine deutliche Temperaturschichtung über die Höhe erkennbar.

In den Bildern 3.24 bis 3.25 sind die Temperaturprofile an den Messständen AII und BV, d.h. an den Ständern, die in der Mitte der Messebenen A bzw. B angeordnet sind, sowie im Messständer D für die Brandstoffe Siedegrenzenbenzin und Heptan zu sehen.

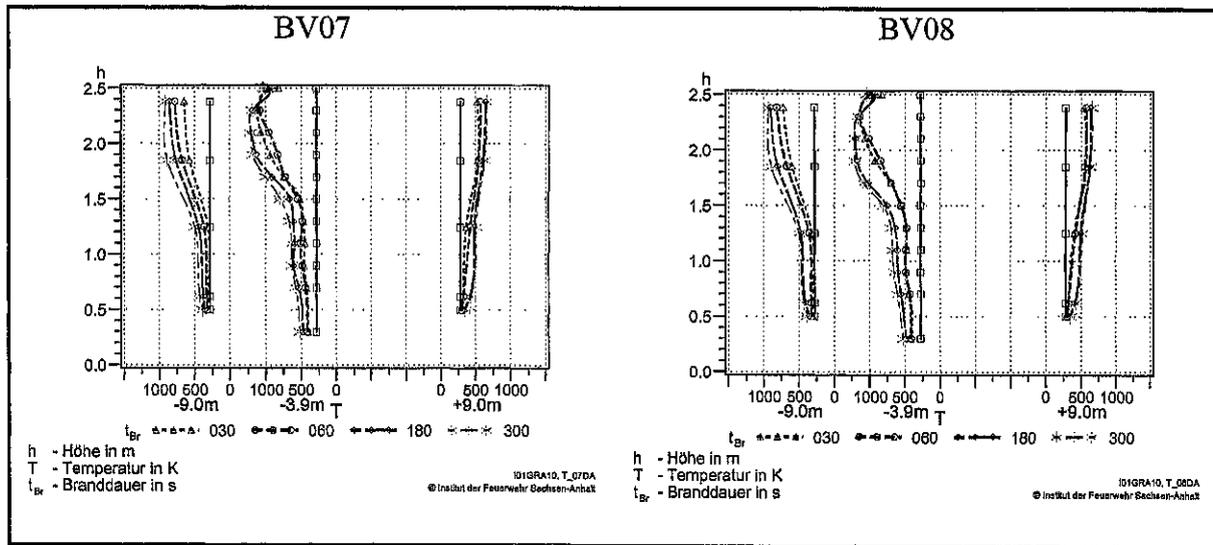


Bild 3.24: Temperaturprofile an den Messständen AII, BV und D für die Brandversuche mit Siedegrenzenbenzin (BV07 und BV08)

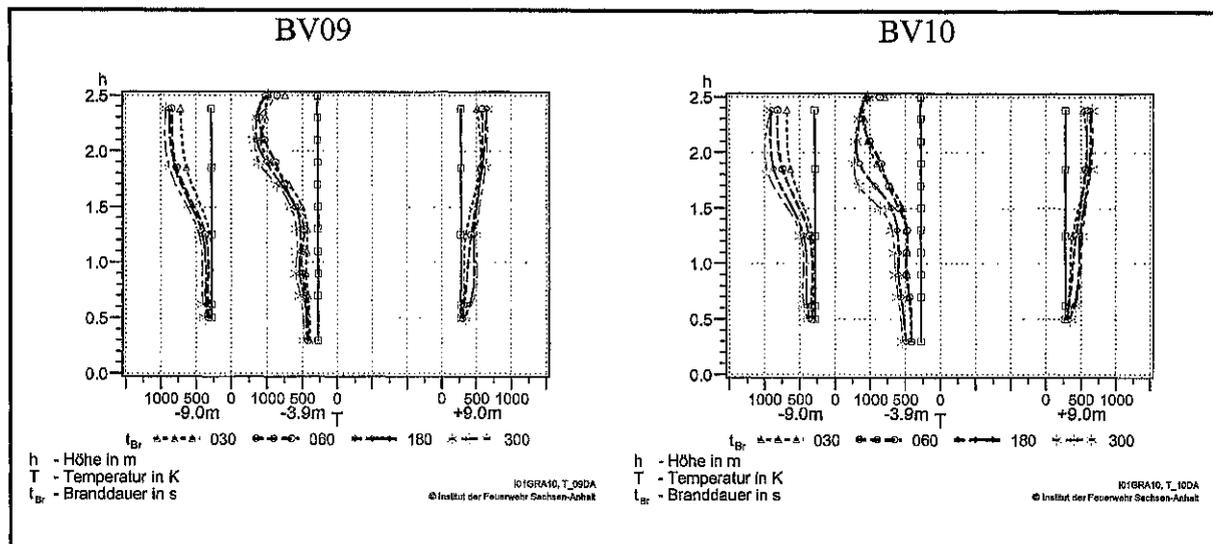


Bild 3.25: Temperaturprofile an den Messständen AII, BV und D für die Brandversuche mit Heptan (BV09 und BV10)

Wie aus den Darstellungen zu entnehmen ist, sind die Profilformen bei allen Versuchen gleich. In Richtung der Messebene B (- 9 m) ist die Schichtungsbildung ausgeprägter als in Richtung der Messebene A (+ 9 m), was auf eine Vorzugsrichtung der Strömung schließen lässt. Dies führt dann zu einem unsymmetrischen Temperaturfeld.

Der exemplarische Vergleich der Temperaturverteilungen in der Messebene C (0,82 m über der Brandwanne) nach 60 s für die Brandversuche mit 80 l Siedegrenzenbenzin (BV07 und BV08) und 80 l Heptan (BV09 und BV10) ist im Bild 3.26 und 3.27 dargestellt.

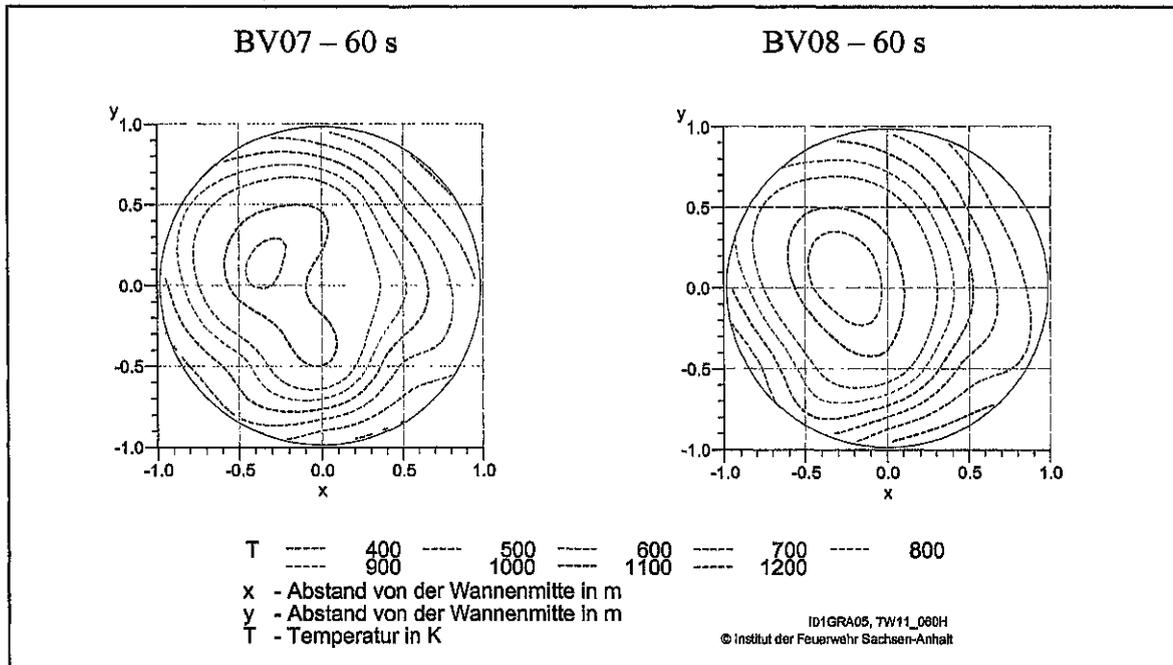


Bild 3.26: Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60s für Brandversuch BV07 (links) und für Brandversuch BV08 (rechts)

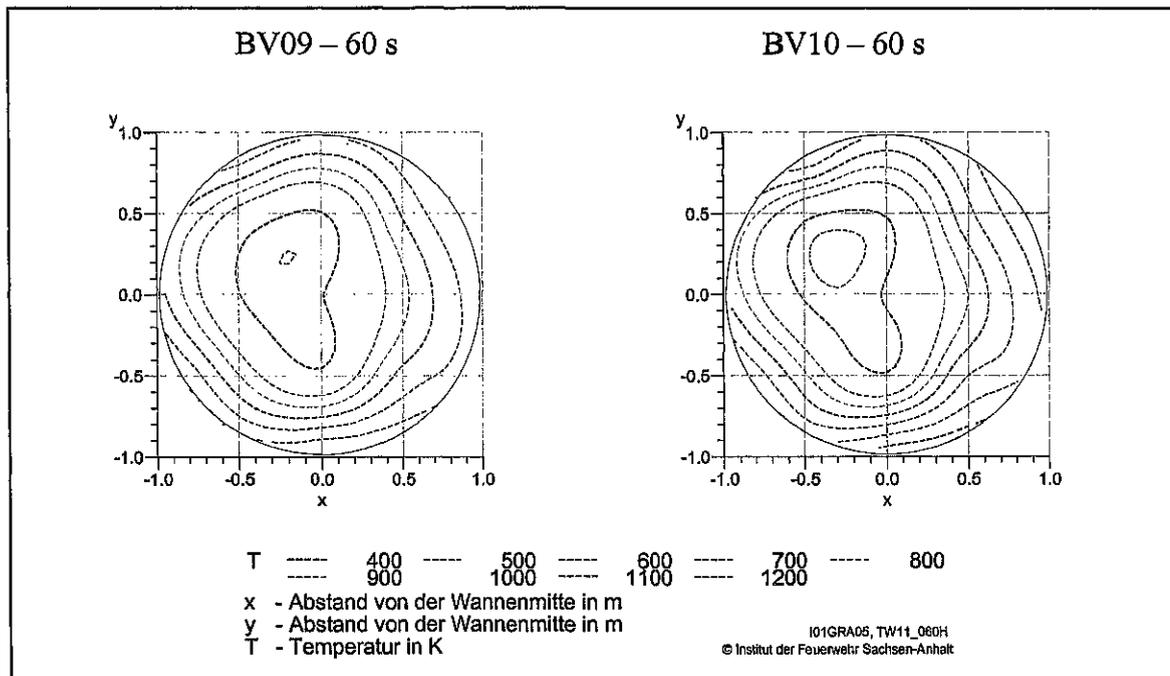


Bild 3.27: Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60 s für Brandversuch BV09 (links) und für Brandversuch BV10 (rechts)

Die Isothermen beider Versuche liefern bis auf geringe Abweichungen die gleichen Temperaturverteilungen zu diesem Zeitpunkt.

Sowohl für die Messreihen mit Siedegrenzenbenzin als auch für die mit Heptan konnten in den dargestellten Temperaturprofilen gleiche Verteilungen beobachtet werden. Die auftretenden Temperaturen erreichten Werte von maximal 1200 K. Die beobachteten Einzelabweichungen betragen ca. 12 %, bezogen auf die jeweiligen Maximalwerte, so dass von einer Reproduzierbarkeit ausgegangen werden kann.

Anschließend werden die gemessenen Temperaturen von Heptan- und Siedegrenzenbenzinversuchen gegenübergestellt. Für die Gegenüberstellung wurden Brandversuch BV07 für SB und Brandversuch BV09 für HP ausgewählt.

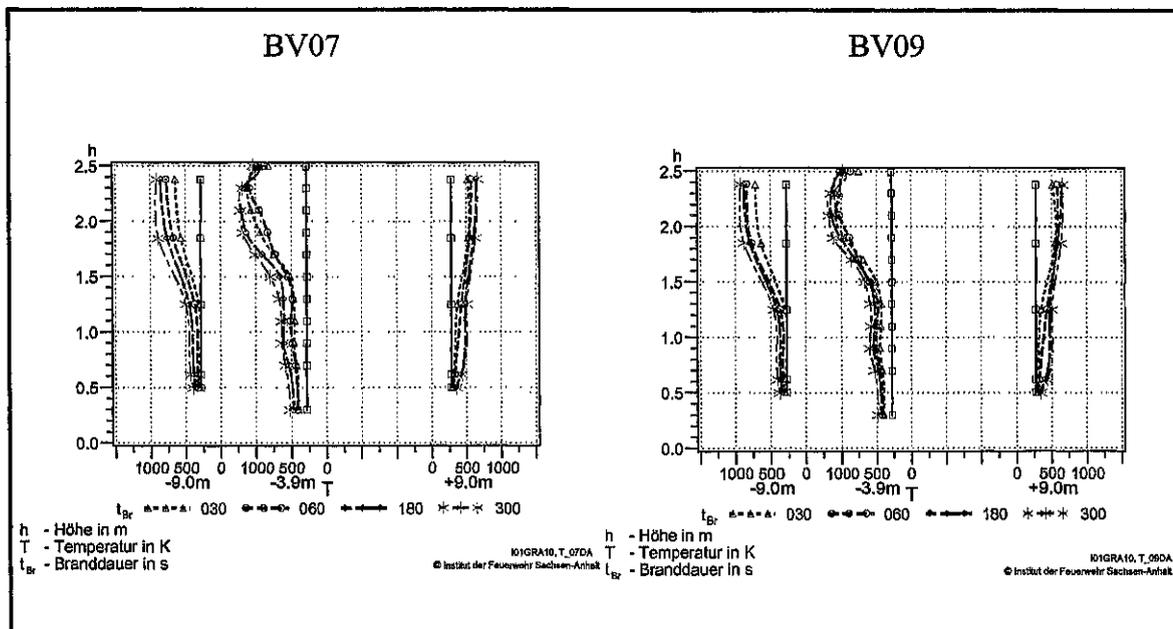


Bild 3.28: Temperaturprofile an den Messständen AII, BV und D für die Brandversuche BV07 (80 l SB) und BV09 (80 l HP)

Im Bild 3.28 sind die gemessenen Temperaturprofile an den Messständen A, B und D für die Brandstoffe Siedegrenzenbenzin und Heptan für verschiedene Brandzeiten dargestellt. Die Temperaturprofile verhalten sich sowohl für Siedegrenzenbenzin als auch Heptan gleich. Die Ausbildung einer Temperaturschichtung über die Höhe ist in allen drei Profilen zu erkennen. Aus der grafischen Darstellung ist zu entnehmen, dass die Schichtung bei ca. 1,25 m beginnt, wobei auch an den darunterliegenden Messpunkten Temperaturen von ca. 400-500 K zu verzeichnen sind. Die niedrigsten Temperaturen sind, wie zu erwarten war, im Bodenbereich zu beobachten, wobei in 0,5 m Höhe Temperaturen von 320-360 K am Ständer BV und

300-340 K am Ständer AII aufraten. Im zeitlichen Verlauf stellen sich für den Brandstoff SB geringfügig höhere Temperaturen (20 K) ein.

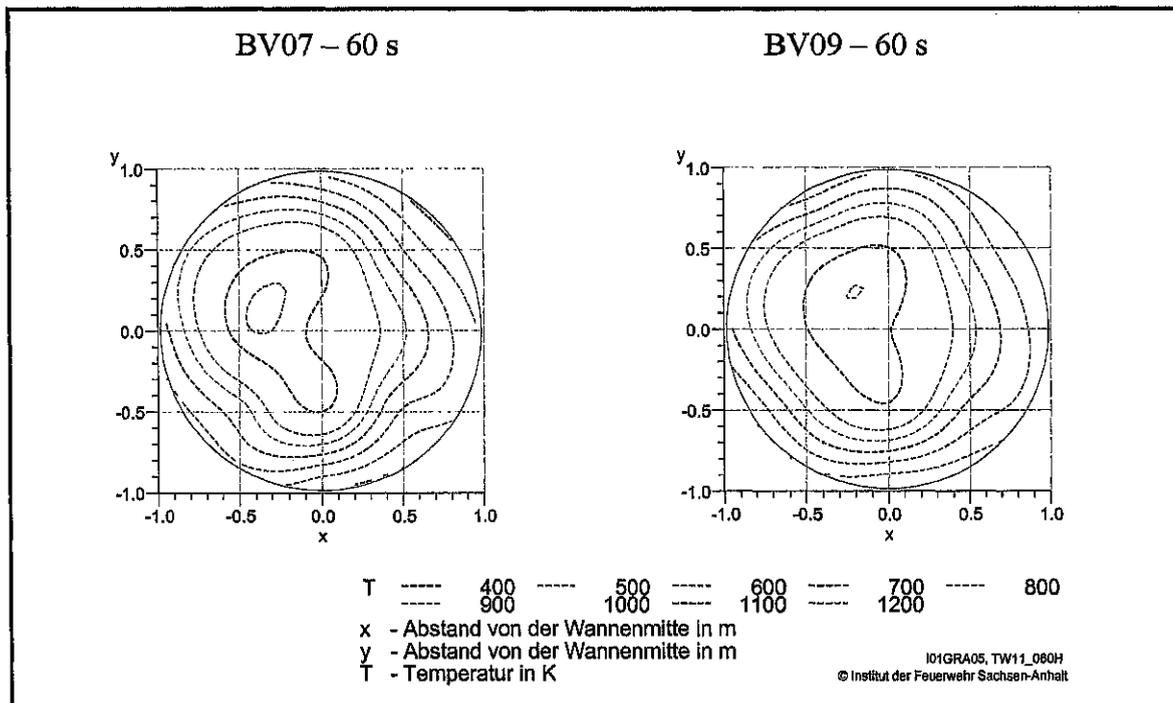


Bild 3.29: Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60 s für Brandversuch BV07 (links) und für Brandversuch BV09 (rechts)

Die Isothermendarstellung in der Messebene C im Bild 3.29 zeigt gleiche Temperaturverteilungen der Brandversuche mit Siedegrenzenbenzin (BV07) und Heptan (BV09).

In den Temperaturprofilen und Isothermen konnte kein wesentlicher Unterschied zwischen unterschiedlichen Brandstoffen beobachtet werden.

3.4.1.2 Geschwindigkeitsmessungen

In den folgenden Bildern sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen in der Mittelebene der Messebenen A und B dargestellt. Dabei wurden die Geschwindigkeiten in Richtung der Abströmung von der Brandwanne zur Tor- bzw. Lüfterseite in der Messebene B bzw. A gemessen. Die Strömungsrichtung wurde in den unteren Messstellen (Flügelradanemometer) in der Messebene B mittels Videoaufzeichnung kontrolliert. Wie allgemein bekannt ist, kommt es bei Bränden in Tunneln zur Ausbildung einer

Deckenströmung heißer Brandgase, die vom Brandherd weg gerichtet ist. Die Messwerte der Staurohre bestätigen das in beiden Querschnitten. Gleichzeitig wird eine zum Brandherd gerichtete Zuluftströmung initiiert. Mit den Flügelradanemometern wurden die Geschwindigkeiten in den Messquerschnitten in der Höhe von 0,5 m gemessen. Aus diesem Grund wird die Annahme getroffen, dass die gemessenen Geschwindigkeiten der Zuluftströmung zuzuordnen sind. Deshalb wurde ihnen ein negatives Vorzeichen zugewiesen. In der Messebene C wurde die Geschwindigkeit senkrecht zur Brandwanne gemessen. Diese Ergebnisse werden als Isotachenfeld in diesem Querschnitt grafisch sichtbar gemacht.

Gegenüber der Anzahl an Thermoelementmessstellen war die Anzahl der Geschwindigkeitsmessstellen geringer, so dass zur Darstellung der entsprechenden Komponenten des Geschwindigkeitsfeldes weniger Stützstellen für die Auswertung zur Verfügung standen. Zusätzlich konnten einige Messstellen infolge Ausfall nicht zur Auswertung genutzt werden. In den Messwerttabellen des Anhanges, in denen eine Auflistung von Messwerten zu den dargestellten Zeitpunkten vorgenommen wird, sind diese Messwerte durch NaN gekennzeichnet.

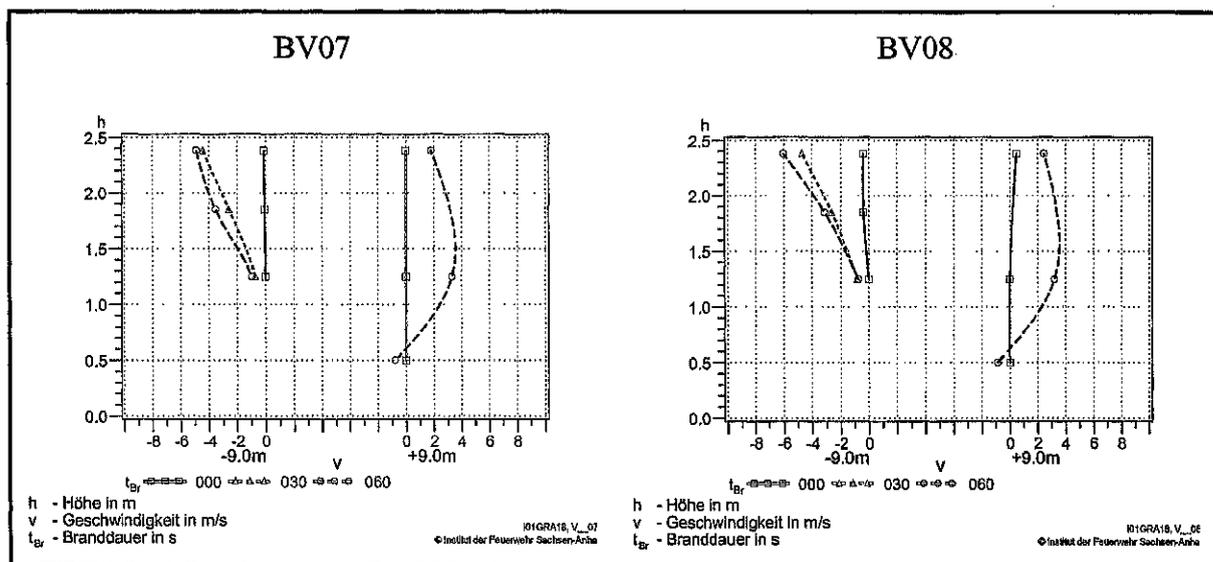


Bild 3.30: Geschwindigkeiten in Kanalmitte an den Messständen AII (+ 9 m) und BV (- 9 m) für Brandversuch BV07 und BV08

In den Bildern 3.30 und 3.31 sind die Geschwindigkeitsprofile der x-Komponente der Geschwindigkeit für die Brandversuche mit 80 l Siedegrenzenbenzin bzw. Heptan in der zeitlichen Entwicklung bis zur Brandzeit von 60 s am Mesständer BV zu sehen. Am Mesständer AII liegen die Messwerte zum Zeitpunkt 30 s nicht vor. Die

Geschwindigkeitsprofile am Messständer AII (+ 9 m) in Richtung der Lüfterseite stimmen für beide Versuche mit Siedegrenzenbenzin im Bild 3.30 gut überein. Die Form der Profile lässt keine eindeutige Schichtungsbildung erkennen, was auf die zur Auswertung zu geringe Stützstellenzahl zurückgeführt werden kann. Die in der Messebene B gemessenen Höchstwerte der Geschwindigkeit in Längsrichtung betragen ca. 5 m s^{-1} für den Brandversuch BV07 bzw. ca. 6 m s^{-1} für den Brandversuch BV08. Auf der Lüfterseite erreichen die Maximalwerte beider Versuche ca. 4 m s^{-1} . Die angegebenen Werte beziehen sich auf die in den Bildern dargestellten Brandzeiten bis zu 60 s.

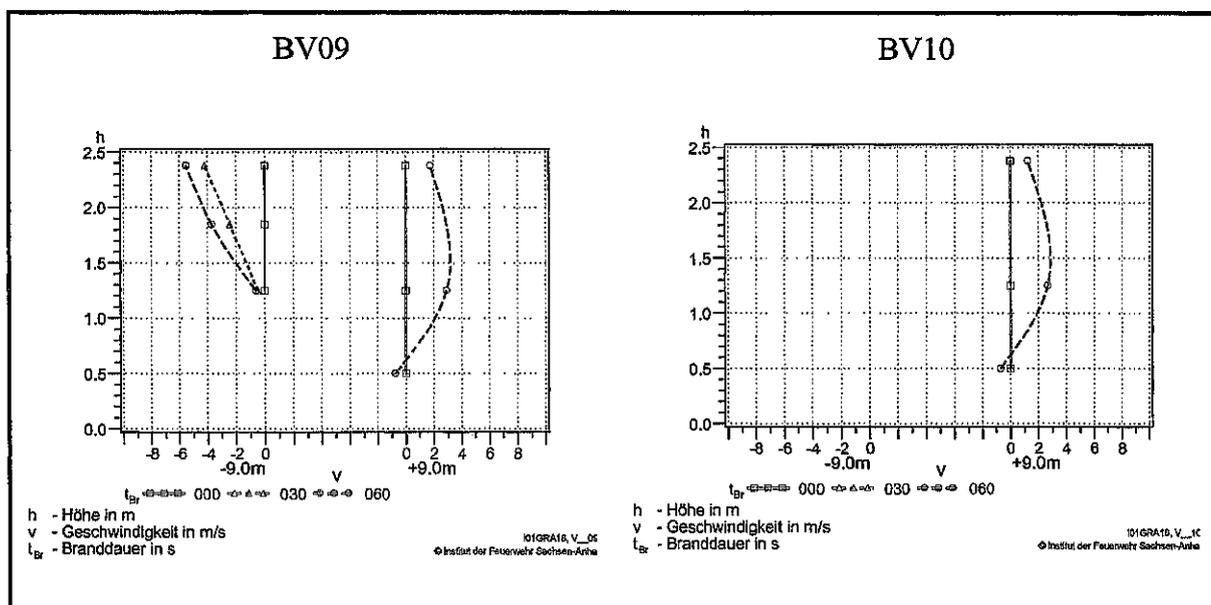


Bild 3.31: Geschwindigkeiten in Kanalmitte an den Messständen AII (+ 9 m) und BV (- 9 m) für Brandversuch BV09 und BV10

Bei den Heptanversuchen wurden auf der Lüfterseite Maximalwerte der Geschwindigkeit von ca. 3 m s^{-1} für beide Versuche bei einer Branddauer von 60 s gemessen. Die maximalen Geschwindigkeiten auf der Torseite betragen im BV09 ca. $5,5 \text{ m s}^{-1}$ nach 60 s. Danach liegen infolge Ausfalls der Messstelle St07 keine Messwerte mehr vor. Benachbarte Messstellen registrieren ein weiteres Anwachsen der Geschwindigkeit (vgl. Messwerttabelle im Anhang). Der Brandversuch BV10 kann auf der Torseite (- 9 m) nicht weiter zur Auswertung herangezogen werden, da die Sensoren ausgefallen waren (NaN).

In den Bildern 3.32 und 3.33 sind die Isotachenfelder in der Messebene C für die Siedegrenzenbenzin- bzw. Heptanbrandversuche nach einer Brandzeit von 60 s dargestellt. Die erreichten Maximalwerte der Geschwindigkeit betragen in den Versuchen nach 60 s für

alle vier Versuche ca. $3,5 \text{ m s}^{-1}$. Vom Rand zur Mitte der Brandwanne sind ansteigende Geschwindigkeiten zu beobachten.

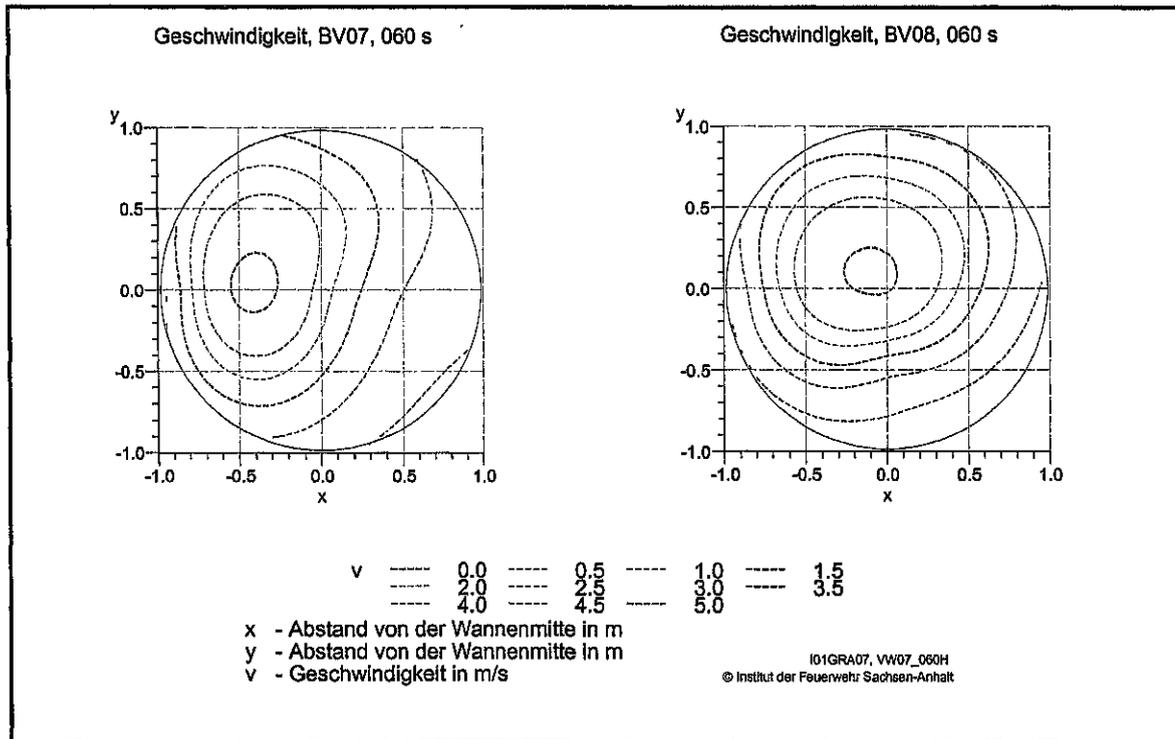


Bild 3.32: Isotachen in der Messebene C für die Brandversuche BV07 und BV08 nach einer Brandzeit von 60 s

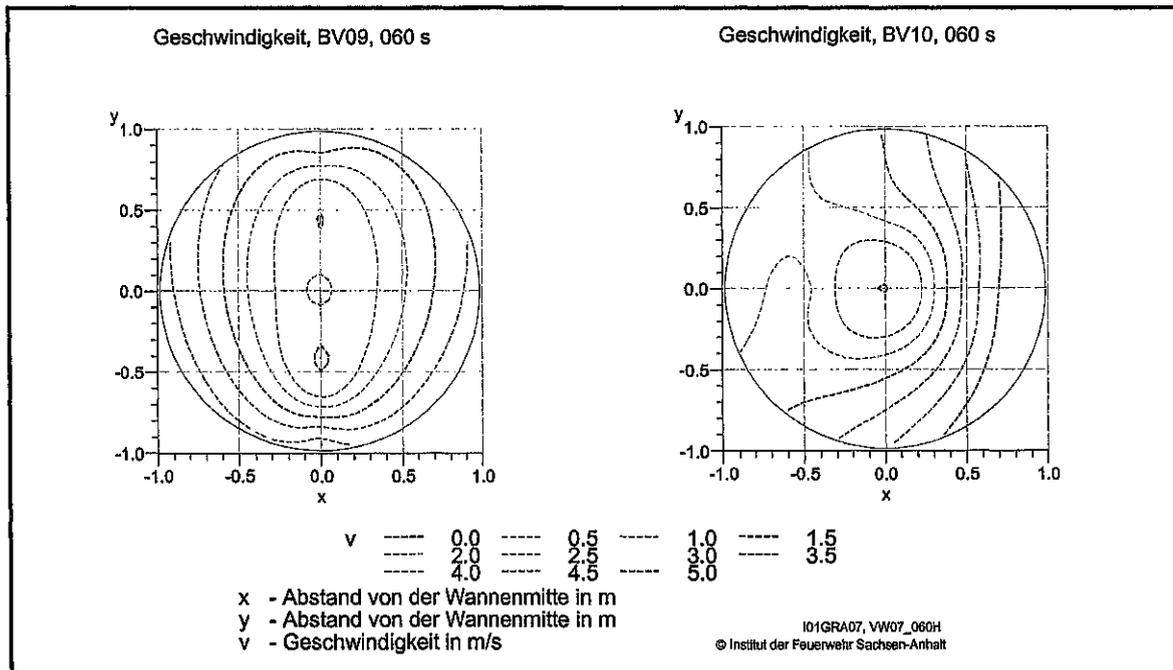


Bild 3.33: Isotachen in der Messebene C für die Brandversuche BV09 und BV10 nach einer Brandzeit von 60 s

Der Vergleich der Siedegrenzenbenzinversuche mit den Heptanversuchen für die Messstände AII und BV ist im Bild 3.34 dargestellt.

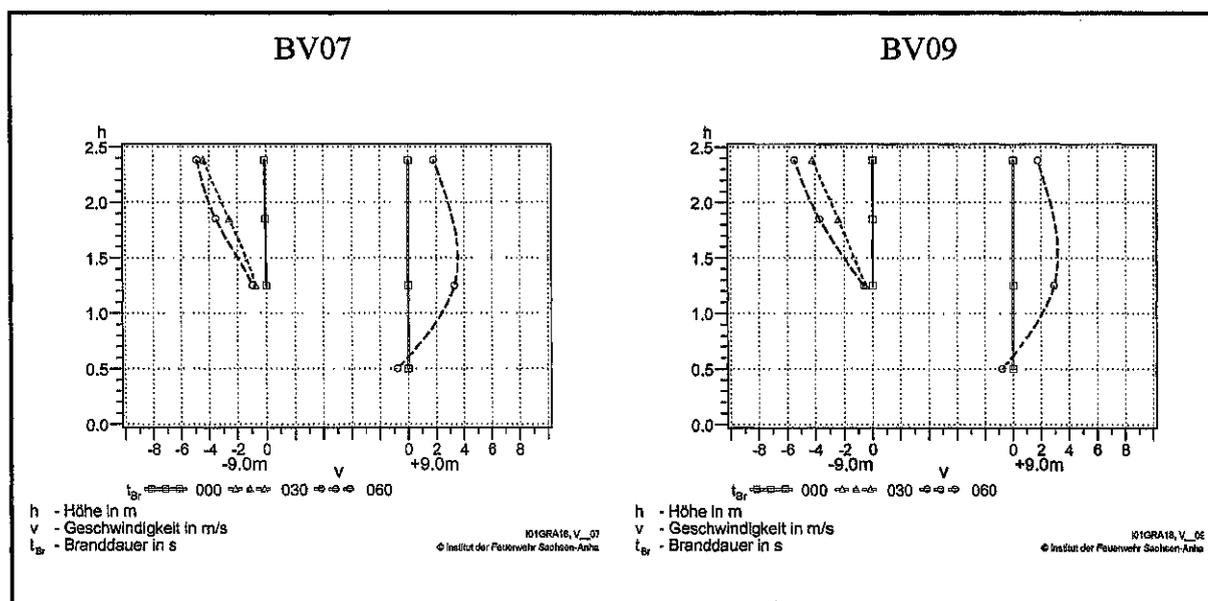


Bild 3.34: Geschwindigkeiten in Kanalmitte an den Messständen AII (+ 9 m) und BV (-9 m) für Brandversuch BV07 und BV09

Auf der Lüfterseite (+ 9 m) sind die gleichen Profilformen vorhanden. Die Geschwindigkeiten unter der Decke sind für beide Versuche nach 60 s annähernd gleich.

Das Profil für die Torseite (- 9 m) ist für den Heptanbrand zur Decke hin fülliger. Es werden an der Messstelle St07 (unter der Decke) beim Heptanbrand Geschwindigkeiten von $5,5 \text{ m s}^{-1}$ gemessen, beim Brand mit SB wird eine etwas niedrigere Geschwindigkeit von $4,9 \text{ m s}^{-1}$ erfasst. Die Unterschiede betragen ca. 10 %, so dass davon ausgegangen werden kann, dass für beide Brandstoffe Geschwindigkeiten in gleicher Größenordnung erzielt werden.

3.4.1.3 Massemessung

Die Ergebnisse der Massewägung sind als Funktion der Zeit für die Siedegrenzenbenzin- und Heptanversuche in Bild 3.35 grafisch dargestellt.

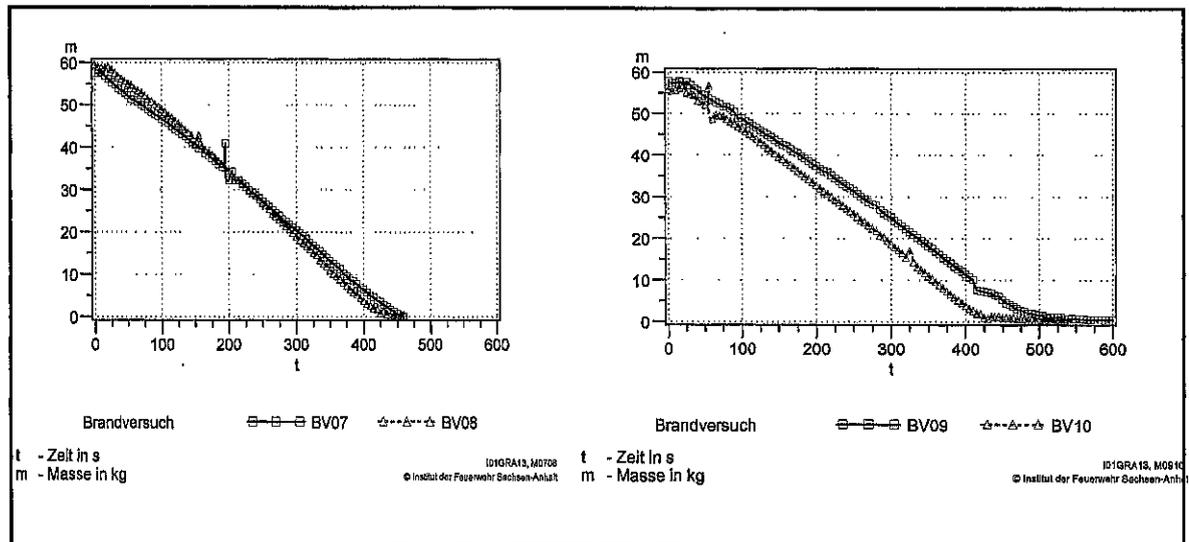


Bild 3.35: Massekurve für Brandversuche BV07, BV08 und BV09, BV10

Die Massekurven für die Siedegrenzenbenzinversuche sind fast deckungsgleich. Der Brandversuch BV07 verläuft geringfügig langsamer. Im Brandversuch BV09 zeichnet sich ein langsamerer Verlauf der Verbrennung gegenüber dem Brandversuch BV10 ab. Berechnet man aus den Anstiegen der Kurven im linearen Bereich und der Brandfläche die mittlere Abbrandgeschwindigkeit, so ergeben sich die in Tabelle 3.3 angegebenen Werte für die Abbrandgeschwindigkeit. Siedegrenzenbenzin in der in den Experimenten verwendeten Fraktion kann als Leichtbenzin betrachtet werden. Für Poolbrände im Freien geben [Karlson and Quintiere 00] eine Abbrandgeschwindigkeit von $0,048 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ an. Die im Experiment erreichten Werte stimmen gut mit diesem Wert überein. Für Heptanbrände geben die gleichen Autoren einen Wert von $0,075 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ an. Andere Quellen weisen $0,07 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ aus [Gefährliche Güter 88]. Diese Werte sind wesentlich größer als die in den Experimenten erreichten. Vergleicht man die in den Experimenten ermittelte mittlere Abbrandgeschwindigkeit mit den Werten, die im EUREKA Projekt FIRETUN für eine Wanne mit einer Fläche von 3 m^2 angegeben wurden, so wird dort für den Brandversuch H31 ein Wert von $0,05 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ angegeben. Bei diesem Versuch wurde eine Belüftungsgeschwindigkeit in Tunnellängsrichtung von $1,5 \text{ m s}^{-1}$ durch die Ventilatoren vorgegeben. Dieser Wert wurde in einem anderen Versuch bestätigt [FIRETUN 95].

Tabelle 3.3: Gemessene brandcharakterisierende Größen für die Brandversuche bei freier Konvektion

Versuchsnummer	Brandstoffvolumen	Versuchsdauer	Geschwindigkeiten	Abbrandgeschwindigkeit
	l	s	m s^{-1}	$\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$
BV07	80 SB	470	7,6	0,044
BV08	80 SB	440	6,5	0,048
BV09	80 HP	500	5,9	0,041
BV10	80 HP	430	ausgefallen	0,045

Für die Geschwindigkeiten in der Tabelle 3.3 wurde das Maximum der ermittelten Messwerte in 2 m Höhe (St06 und St08, vgl. Bild 3.8) zugrundegelegt.

3.4.1.4 Wärmestromdichtemessungen

In Bild 3.36 ist die an der Messstelle Wsd3 (vgl. Bild 3.5) in den Brandversuchen BV07 und BV08 gemessene Gesamtwärmestromdichte dargestellt. Weitere Daten konnten in den Hauptversuchen nicht ermittelt werden, da Sensorendefekte auftraten. Die Maximalwerte in Bild 3.36 erreichen in beiden Versuchen ca. 45 kW m^{-2} ($4,5 \text{ W cm}^{-2}$). [Pierce et al. 01] geben für Heptanpoolbrände mit einem kleinen Brandwannendurchmesser von 0,23 m in Räumen Wärmestromdichten von ca. 20 kW m^{-2} (2 W cm^{-2}) bis 60 kW m^{-2} (6 W cm^{-2}) an. Die Wärmestromdichten wurden dabei in der Brandwanne als auf die Wannenoberfläche einfallende Wärmeströme bestimmt. Die bei den Bränden mit Siedegrenzenbenzin ermittelten Gesamtwärmestromdichten liegen, soweit der Vergleich zulässig ist, in diesem Intervall.

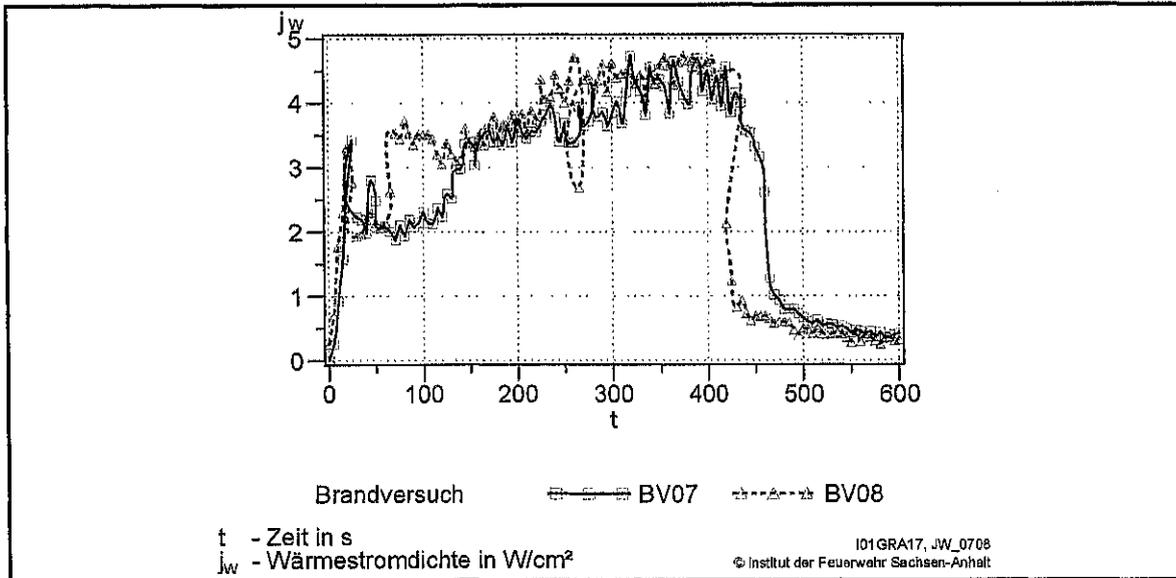


Bild 3.36: Gesamtwärmestromdichte (Sensor Wsd3) in den Brandversuchen BV07 und BV08

3.4.1.5 Konzentrationsmessungen

In den folgenden Bildern (Bild 3.37-3.39) sind die im Rauchgasstrom 0,2 m unter der Decke (Messstelle Ds, vgl. Bild 3.5) gemessenen Sauerstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentrationen als Funktion der Zeit dargestellt.

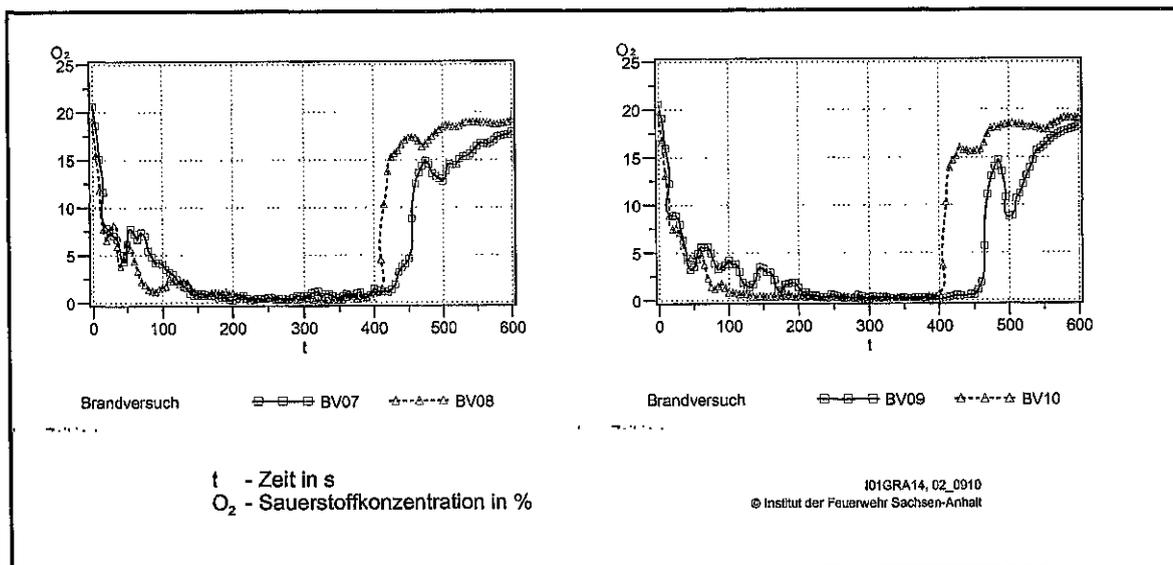


Bild 3.37: Volumenkonzentration des Sauerstoffes in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV07/BV08 (links) und BV09/BV10 (rechts)

Die Volumenkonzentrationen des Sauerstoffes fallen innerhalb der ersten 35 Sekunden sowohl für die Siedegrenzenbenzinversuche als auch für die Heptanversuche sehr schnell ab. Sie erreichen zu diesem Zeitpunkt Werte von 5-6 %. Im Verlauf der Brandversuche sinken sie weiter bis auf Werte von 0,1-0,2 % ab.

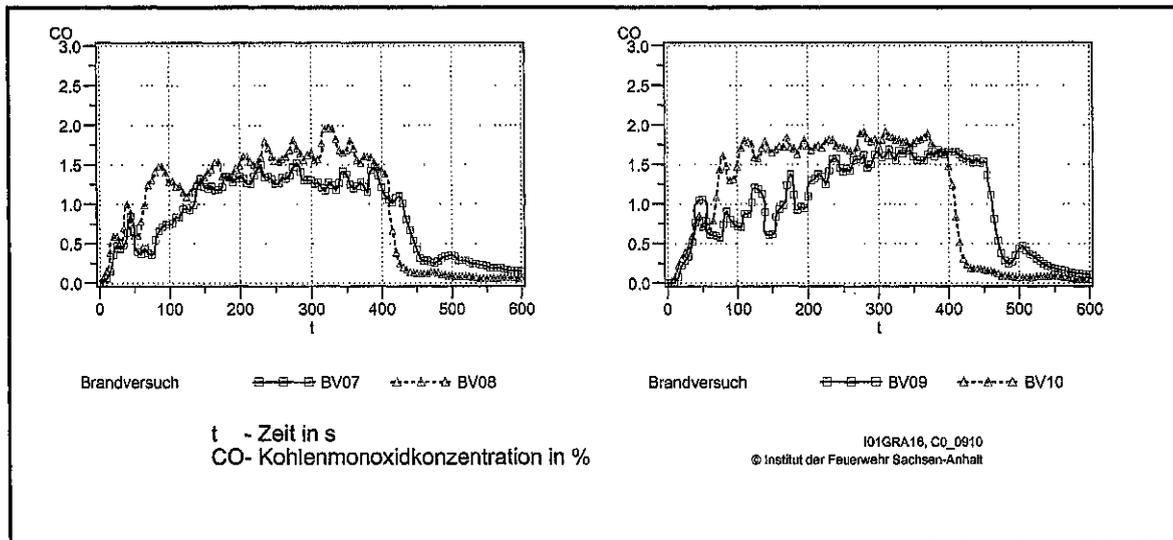


Bild 3.38: Volumenkonzentration von Kohlenmonoxid in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV07/BV08 (links) und BV09/BV10 (rechts)

Die Volumenkonzentrationen von Kohlenmonoxid- und Kohlendioxid steigen in den ersten 35 s auf 0,5 bzw. 9 % an. Es werden Maximalwerte von ca. 12 % CO₂ und 1,9 % CO erreicht.

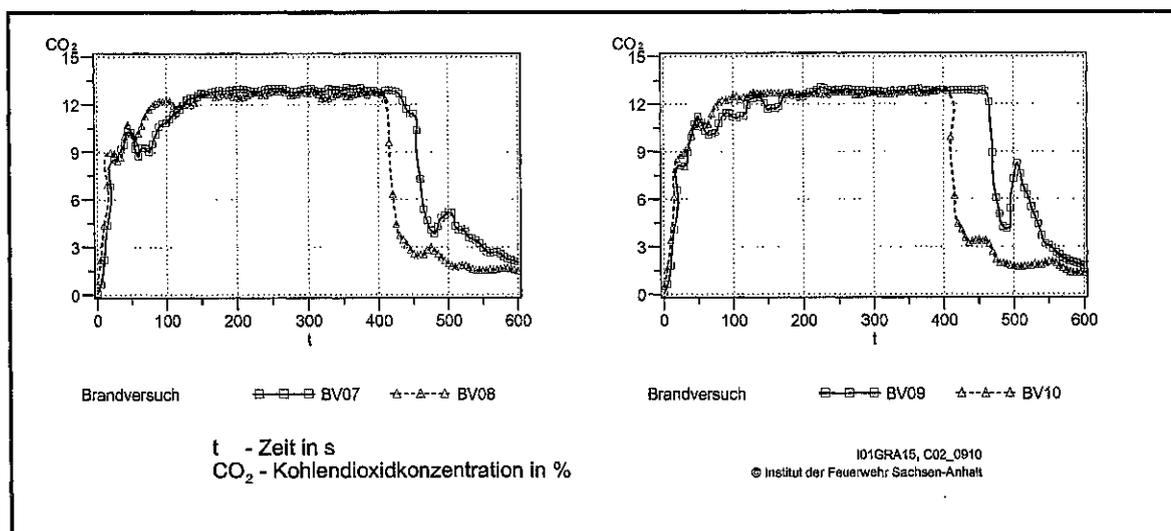


Bild 3.39: Volumenkonzentration des Kohlendioxids in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV07/BV08 (links) und BV09/BV10 (rechts)

3.4.2 Versuche mit erzwungener Konvektion

Infolge der noch ausstehenden Wiederholungsversuche stehen zur Auswertung nur jeweils ein Versuch mit Heptan und Siedegrenzenbenzin zur Verfügung. Diese werden zunächst miteinander und im Anschluss wird der Heptanversuch (BV11) mit dem Heptanversuch ohne Seitenlüftung (BV09) verglichen.

3.4.2.1 Temperaturmessungen

Die Temperaturprofile für die Brandversuche mit den Brandstoffen Heptan und Siedegrenzenbenzin mit seitlicher Belüftung (BV11, BV12) sind im Bild 3.40 dargestellt. Die Zwangsbelüftung erfolgte mittels des im Brandkanal des IdF LSA fest installierten Lüfters. Die Temperaturprofile auf der Lüfterseite (+9.0 m) stellen die über die Höhe konstante Umgebungstemperatur dar. Die seitliche Belüftung hatte ein Abdrängen der Flammen in Richtung der Torseite zur Folge. Dies spiegelt sich in den Temperaturverteilungen wieder, bei denen auch in den unteren Messstellen höhere Temperaturen erreicht werden.

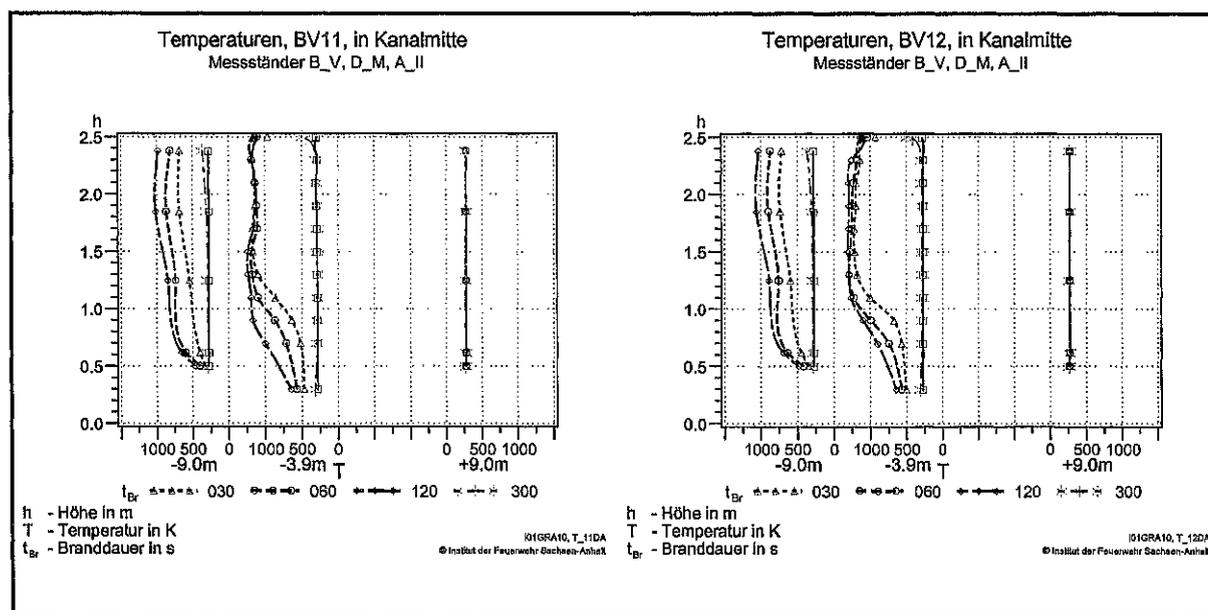


Bild 3.40: Temperaturprofile an den Messständen AII und BV für die Brandversuche BV11 und BV12

Die Maximaltemperaturen betragen am Ständer D ca. 1200-1300 K und bleiben bis ca. 1 m über dem Boden erhalten. Darunter ist ein Absinken der Temperatur auf 400-460 K am Ständer BV und auf 560-640 K am Ständer D festzustellen. Nach 300 s wird die Ausgangstemperaturverteilung wieder erreicht, da der Versuch bereits nach ca. 150 s beendet war.

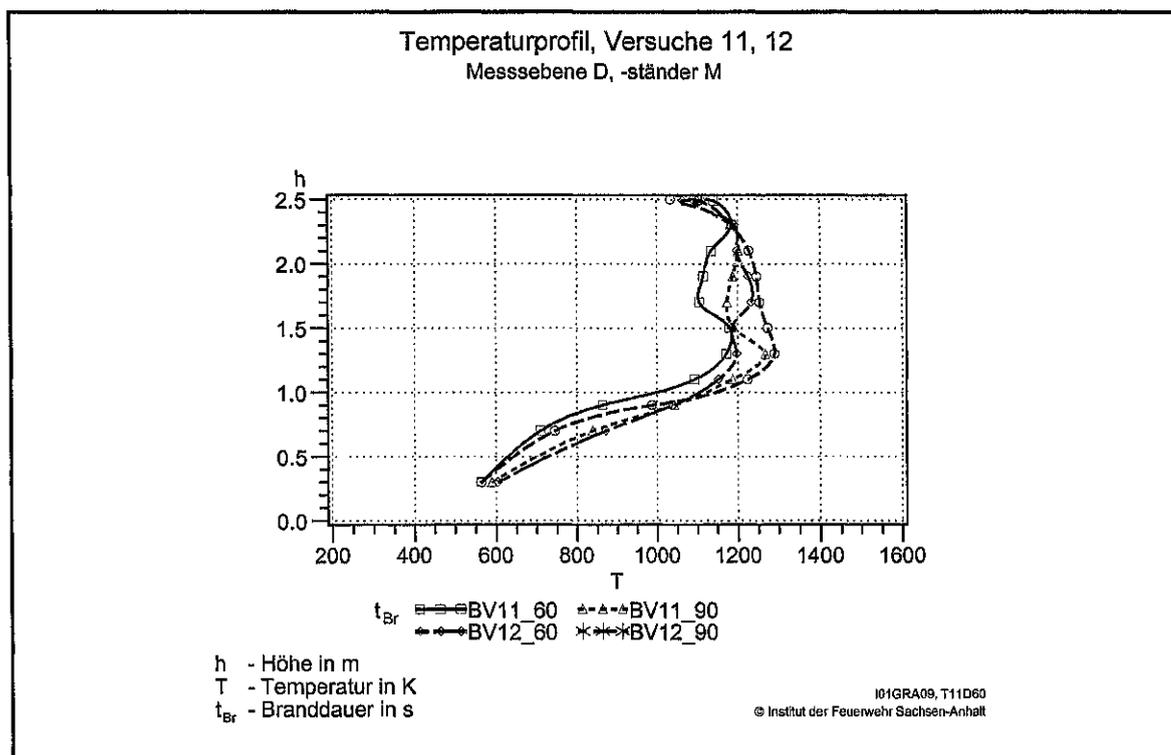


Bild 3.41: Gegenüberstellung der Temperaturprofile am Ständer D für die Brandversuche BV11(40l HP) und BV12 (40l SB) nach 60 s und 90 s

Die in Bild 3.41 dargestellten Temperaturprofile im Ständer D zeigen die zeitliche Entwicklung exemplarisch für die Zeitpunkte 60 und 90 s für beide Versuche. Im Bereich vom Boden bis zur Höhe von 1,25 m sind nur geringfügige Unterschiede in den Temperaturverteilungen für beide Zeitpunkte vorhanden. Für dem Zeitpunkt 60 s gibt es an den darüberliegenden Messpunkten größere Abweichungen zwischen dem Heptanversuch und dem Versuch mit Siedegrenzenbenzin. Die Abweichungen betragen maximal 11 % bezogen auf die maximale im Versuch BV12 gemessene Temperatur von 1305 K.

Der Vergleich der Temperaturprofile für die Heptanbrandversuche mit und ohne Seitenlüftung ist im Bild 3.42 dargestellt. Torseitig (- 9 m) ist eine Temperaturschichtung bei beiden Versuchen zu erkennen. Beim Versuch ohne Seitenlüftung erstreckt sich die Schicht hoher Temperatur beginnend in einer Höhe von 1,25 m bis zur Decke. Die Dicke dieser Temperaturschicht weist bei vorhandenem Seitenwind eine größere Mächtigkeit auf, so dass fast der gesamte Brandkanal mit heißen Brandgasen ausgefüllt ist. Lüfterseitig (+ 9 m) ist die Temperaturschichtung nur beim Versuch ohne Seitenwind erkennbar.

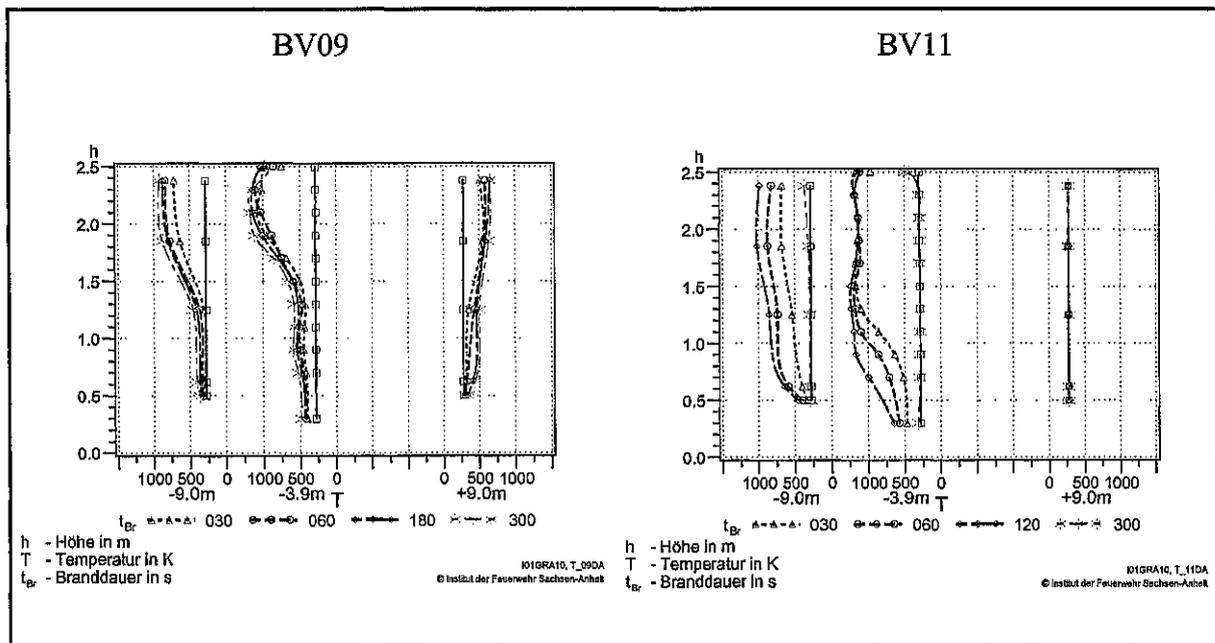


Bild 3.42: Temperaturprofile in den Messständen AII und BV für die Brandversuche BV09 und BV11

Im Bild 3.43 sind die Isothermen in der Messebene C der beiden Heptanversuche (BV09 und BV11) mit und ohne Seitenlüftung für den Zeitpunkt 60 s dargestellt. Die Strömungsrichtung ist im Bild 3.43 aus der positiven x-Achse kommend. Die Isothermen werden durch die Strömung in Richtung negativer x-Achse, d. h. in Richtung des Tores verschoben.

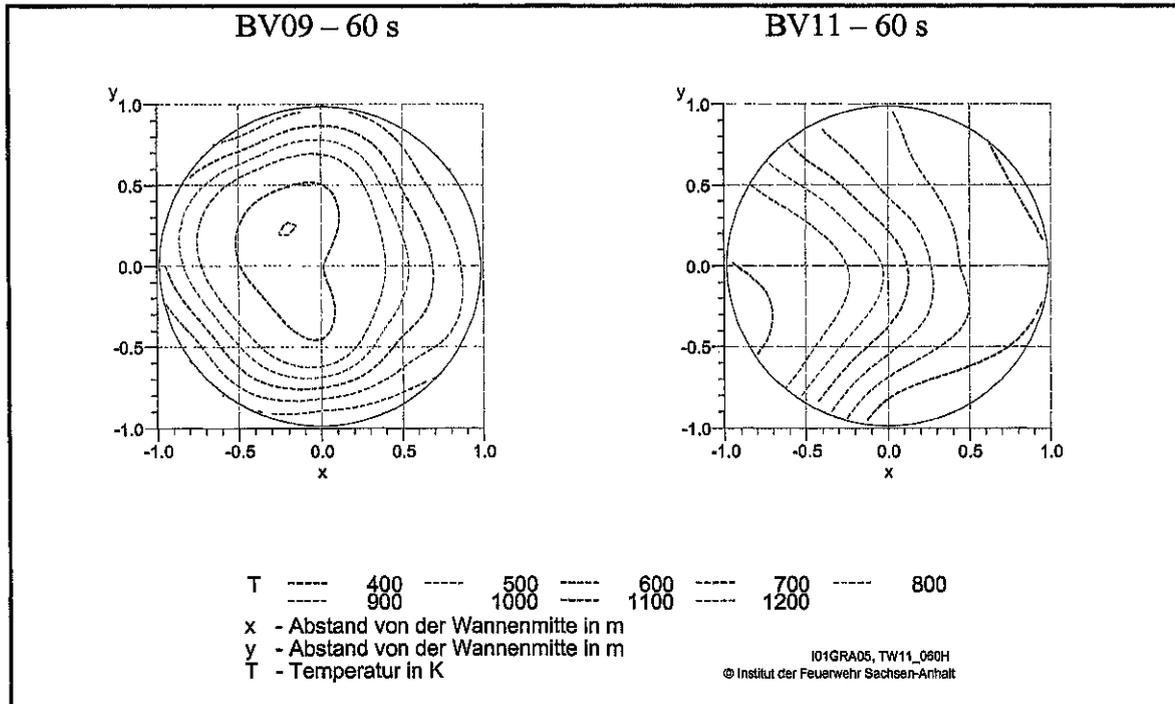


Bild 3.43: Temperaturverteilung in der Messebene C nach 60 s für Brandversuch BV09 (links) und für Brandversuch BV11(rechts)

3.4.2.2 Geschwindigkeitsmessungen

Die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen sind weniger aussagekräftig. Im Bild 3.44 sind die Geschwindigkeitsverteilungen für den Heptanbrandversuch (BV11) am Messständer BV dargestellt, da dort verwertbare Messsignale erfasst wurden.

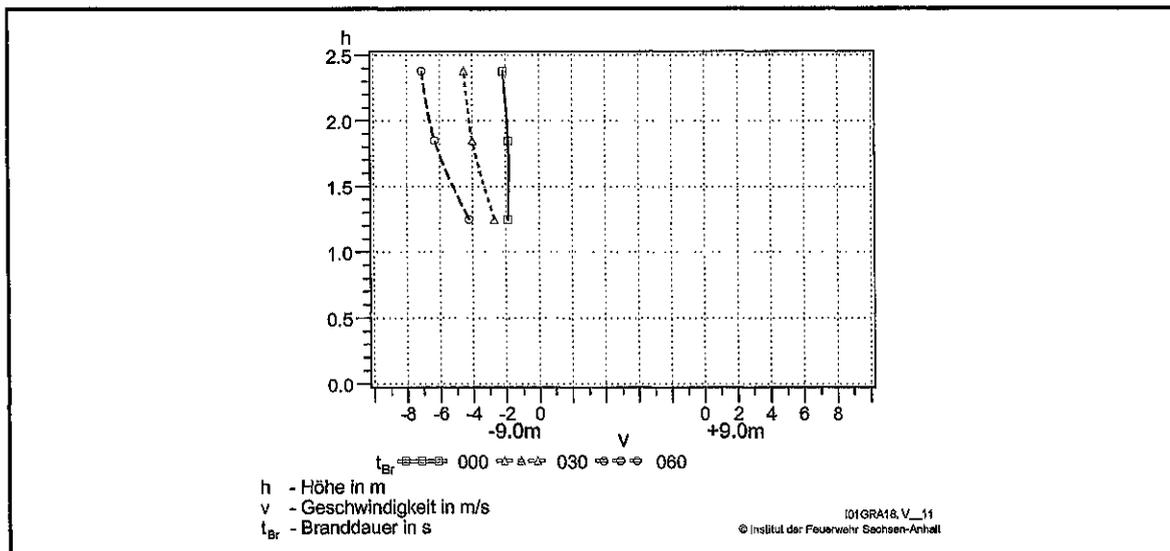


Bild 3.44: Geschwindigkeiten am Messständer BV (- 9 m) für Brandversuch BV11

Im Bild 3.45 sind Geschwindigkeitsprofile der Heptanbrandversuche mit und ohne Seitenwind gegenübergestellt. Beim Versuch mit Seitenwind werden nach 60 s höhere Geschwindigkeiten erreicht.

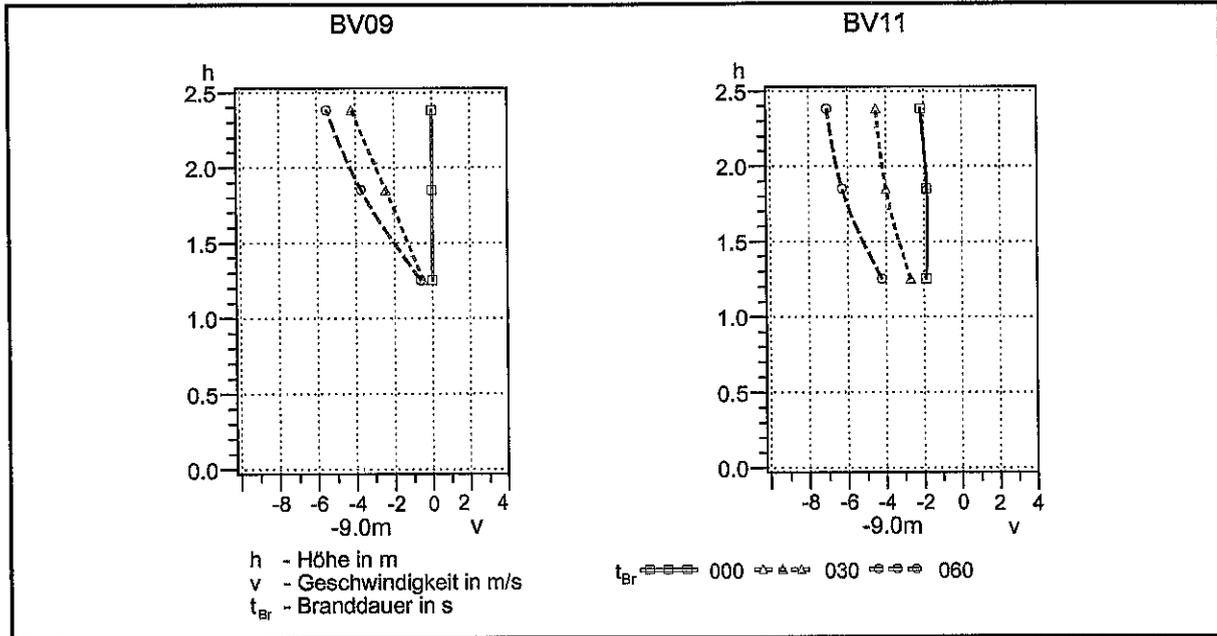


Bild 3.45: Geschwindigkeiten am Messständer BV (- 9 m) für die Brandversuche BV09 (links) und BV11(rechts)

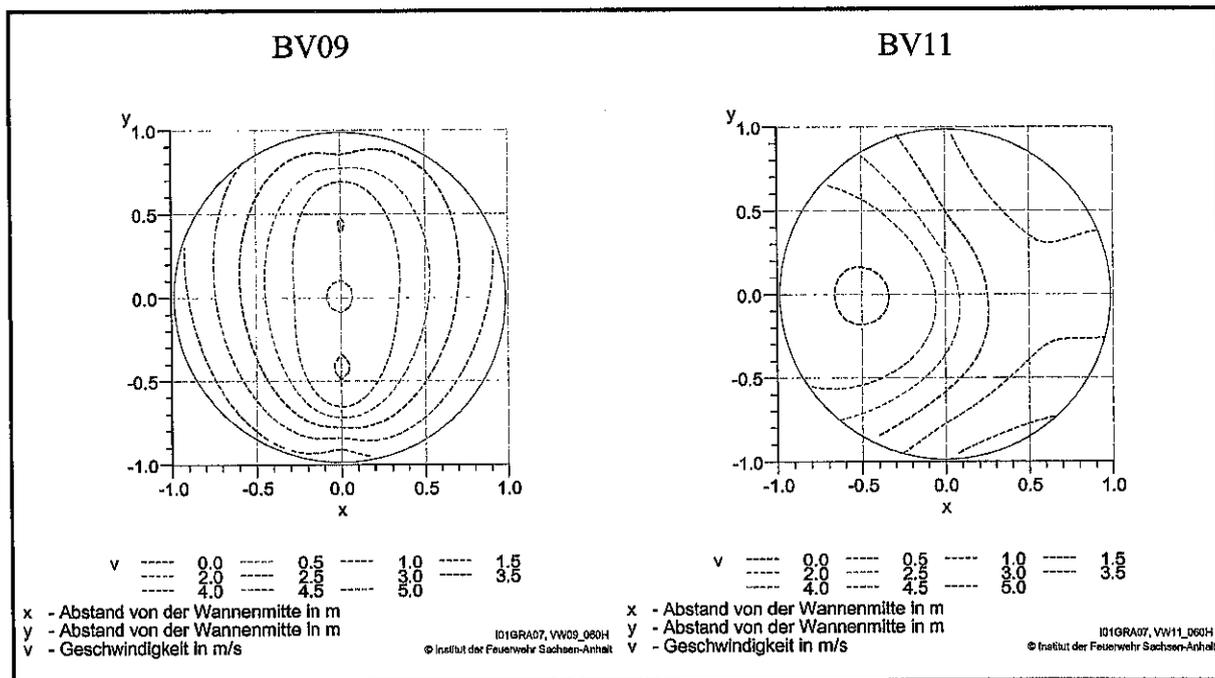


Bild 3.46: Isotachen in der Messebene C für die Brandversuche BV09 und BV11

Die Darstellung im Bild 3.46 zeigt für den Brandversuch mit Seitenlüftung (BV09) eine Verschiebung der Isotachen in Richtung des Tores.

3.4.2.3 Massemessung

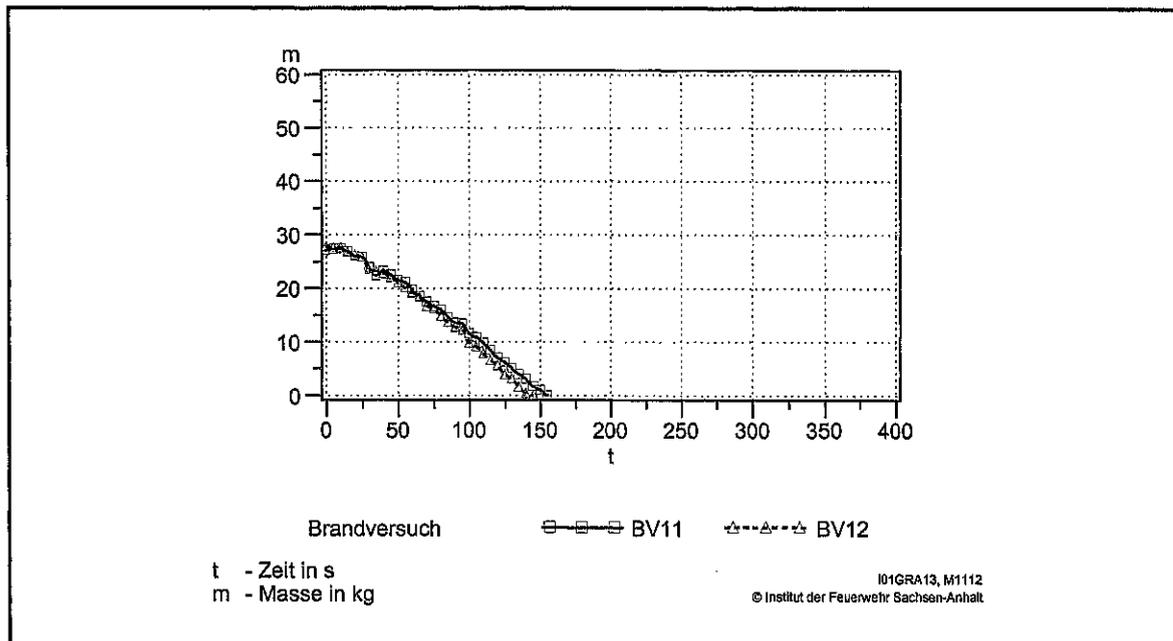


Bild 3.47: Massekurve für Brandversuche BV11 und BV12

Werden die Massekurven in Bild 3.47 sowie die mittleren Abbrandgeschwindigkeiten für die Brandversuche mit Seitenbelüftung verglichen, so ist kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Brandstoffen zu erkennen.

Der Vergleich mit den Versuchen ohne Seitenlüftung zeigt, dass die Abbrandgeschwindigkeit durch die seitliche Belüftung gesteigert wird. Zum Vergleich sei hier wiederum die mittlere Abbrandgeschwindigkeit von $0,075 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ aufgeführt, die bei einem Heptanbrandversuch H32 über eine Branddauer von 1 h 40 min erreicht wurde [FIRETUN 95]. Bei diesem Versuch wurde die Zuluftgeschwindigkeit von $1,5 \text{ m s}^{-1}$ auf $3,0 \text{ m s}^{-1}$ gesteigert. Die im Brandversuch BV11 ermittelten Abbrandgeschwindigkeiten liegen in der Größenordnung des Versuchs H32.

Tabelle 3.4: Gemessene brandcharakterisierende Größen für die Brandversuche bei erzwungener Konvektion

Versuchsnummer	Brandstoffvolumen	Versuchsdauer	Geschwindigkeiten	Abbrandgeschwindigkeit
	in l	in s	in m s^{-1}	in $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$
BV11	40 HP	120	11,7	0,066
BV12	40 SB	120	11,2	0,065

Für die Geschwindigkeiten in der Tabelle 3.4 wurde wie in Tabelle 3.3 das Maximum der ermittelten Messwerte in 2 m Höhe (St06 und St08, vgl. Bild 3.8) zugrundegelegt.

3.4.2.4 Konzentrationsmessungen

Während der kurzen Branddauer, die beträgt für beide Versuche ca. 120 s, zeigen die Verläufe der Volumenkonzentrationen des O_2 im Messpunkt ein schnelles Absinken. Minimale O_2 -Konzentrationen betragen ca. 0,4 % beim Brandversuch BV11 und 1 % beim Brandversuch BV12.

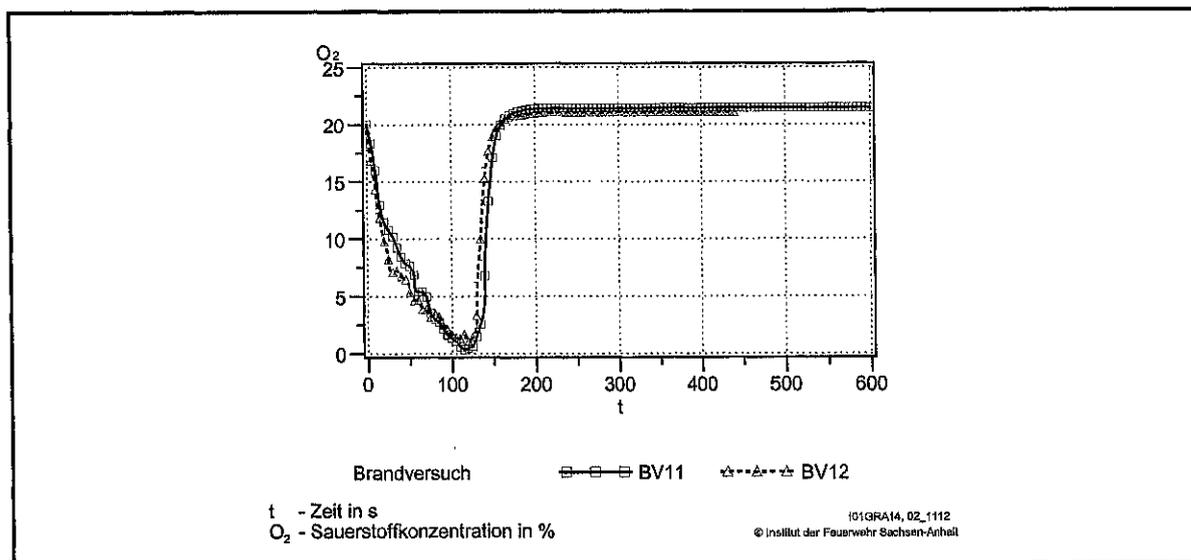


Bild 3.48: Volumenkonzentration an Sauerstoff in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV11 und BV12

Die Volumenkonzentrationen an Kohlenmonoxid erreichen maximale Werte von 1,5-1,7 %.
Die Kohlendioxidwerte steigen auf maximal 12-13 % in beiden Versuchen.

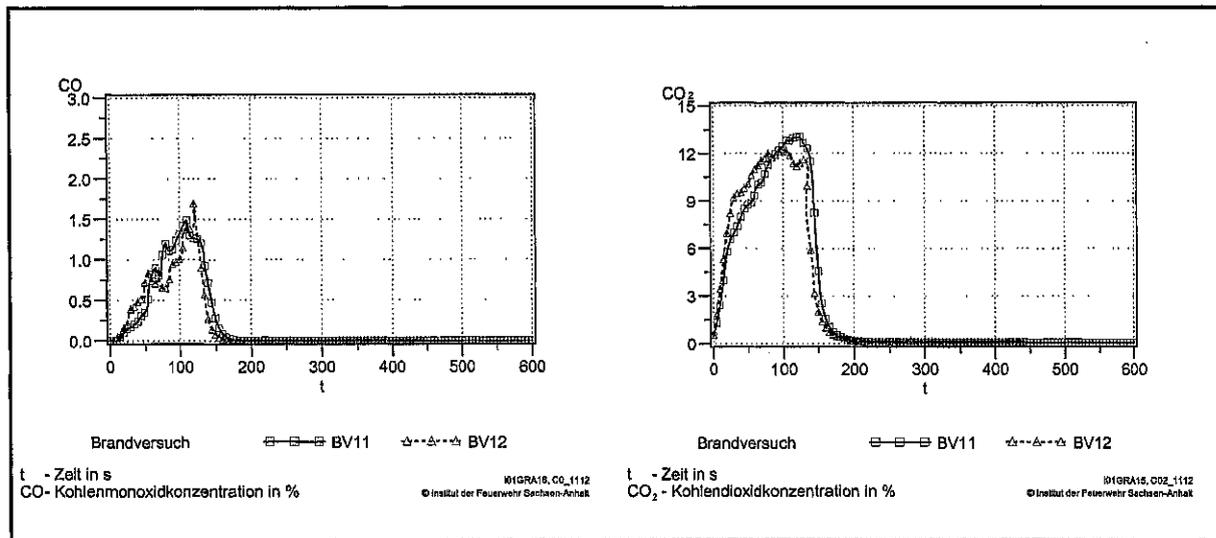


Bild 3.49: Volumenkonzentrationen an Kohlenmonoxid (links) und Kohlendioxid (rechts) in % als Funktion der Zeit für die Brandversuche BV11 und BV12

4 MODELLIERUNG DER GASAUSSBREITUNG IN TUNNELN

Tunnelbrandsimulationen sind in den letzten Jahren wiederholt durchgeführt worden. Dabei wurden neben Zonenmodellen verstärkt auch Feldmodelle eingesetzt. Wie alle Modelle gehen Feldmodelle von bestimmten physikalischen Annahmen aus. Im Rahmen der Feldmodellierung werden die beschreibenden thermodynamischen Zustandsfunktionen und -variablen als Feldfunktionen aufgefasst, d. h. diese Größen sind Funktionen des Ortsvektors und der Zeit. Basierend auf den allgemeinen Bilanzgleichungen für Impuls, Energie, Masse der Einzelkomponenten sowie für die Gesamtmasse wird ein partielles Differentialgleichungssystem abgeleitet. Für dieses System können keine analytischen Lösungen angegeben werden, so dass es numerisch gelöst werden muss. Grundlage der numerischen Simulation in dieser Arbeit soll der General Purpose Code Fluent bilden, der als Diskretisierungsmethode das Finite Volumen Verfahren nutzt. Im Folgenden sollen kurz die Grundlagen der Simulation mit Fluent skizziert werden.

4.1 Problembeschreibung

Zur Problembeschreibung ist es erforderlich, ein System mit den dazugehörigen Systemgrenzen zu definieren sowie die Vereinfachungen und Idealisierungen festzulegen. Die Grundlage der Systemdefinition bildet die Geometrie des Brandkanals des IdF LSA. Die geometrischen Abmaße des Brandkanals wurden unter Punkt 3.1 beschrieben und sind im Bild 3.3 dargestellt. Als betrachtetes System wurde der im Inneren des Brandkanals liegende Gaskörper definiert, dessen Grenzen durch die bauliche Hülle des Brandkanals gegeben ist, wobei die Lüfterkammer selbst nicht einbezogen wurde. Das System ist offen, d. h. es wird sowohl Energie als auch Masse über die Systemgrenzen mit der Umgebung ausgetauscht. Der Gaskörper wird als ideales Gasgemisch, bestehend aus den Einzelkomponenten Luft (N_2 und O_2) und Heptandampf (C_7H_{16}) sowie Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) aufgefasst. Zwischen den Einzelkomponenten findet eine exotherme chemische Reaktion, die eigentliche Verbrennung, statt. Die Verbrennung wird als Einschritt-Gesamtreaktion beschrieben. In Bild 4.1 ist die geometrische Form des Gaskörpers im Innenraum des Brandkanals zu sehen. Das Bild zeigt die Systemgrenzen, wie sie im Netzgenerator GAMBIT des CFD-Simulationsprogramms Fluent benutzt werden, um darauf aufbauend ein Berechnungsgitter

konstruieren zu können. Der Masseaustausch mit der Umgebung erfolgt über zwei Lüftungsöffnungen der Ventilatoren, linke Seitenfläche im Bild 5.1, und über den Abgasschlot, höchste Fläche auf der rechten Seite im Bild 4.1.

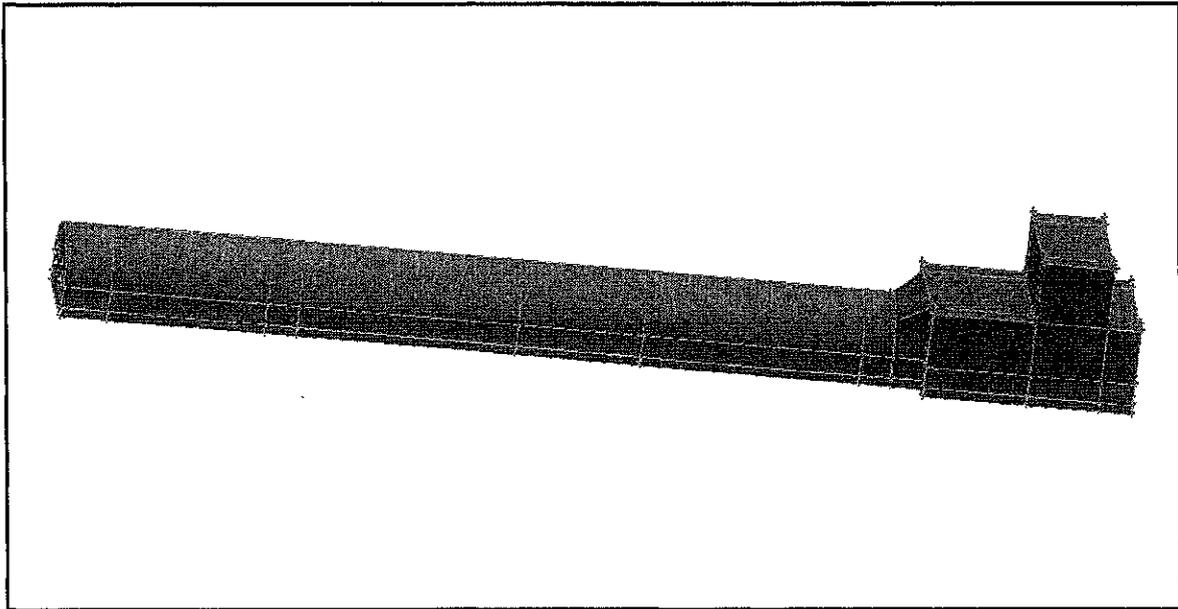


Bild 4.1: Geometrie des Innenraumes des Brandkanals

4.2 Modellgleichungen

Zur Herleitung der Modellgleichungen wird von der Bilanzierung der Energie, des Impulses und der einzelnen chemischen Komponenten in einem gegebenen Volumen V ausgegangen. Voraussetzungsgemäß werden die Größen als Funktionen $f(x_\alpha, t)$ des Ortes und der Zeit und als beliebig oft stetig differenzierbar aufgefasst. Im Allgemeinen genügt die stetige Differenzierbarkeit 2. Ordnung. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass die lokale Gleichgewichtshypothese gilt, so dass die Existenz der thermodynamischen Temperatur gesichert ist [Gyarmati 70]. Die genauere Herleitung findet man z. B. in [Gyarmati 70, Kuo 86, Warnatz et al. 97]. Weitere Anwendungen sind in [Kutz und Kohl 99, Grabski et al. 02] zu finden. Die Bilanzgleichungen liefern mit den üblichen Definitionen der Gesamtdichte für Mehrkomponentensysteme:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho^i,$$

4.1

der Massenschwerpunktsgeschwindigkeit

$$v_\alpha = \frac{\rho^i v_\alpha^i}{\rho}, \quad 4.2$$

der Diffusionsgeschwindigkeit der i-ten Komponente

$$w_\alpha^i = v_\alpha^i - v_\alpha, \quad 4.3$$

der Massendiffusionsstromdichte

$$J_\alpha^i = \rho^i w_\alpha^i = \rho^i (v_\alpha^i - v_\alpha), \quad 4.4$$

des Massenbruchs

$$y^i = \frac{\rho^i}{\rho}, \quad 4.5$$

und den linearen Ansätzen für die entsprechenden Stromdichten in den Bilanzgleichungen

$$P_{\alpha\beta} = p\delta_{\alpha\beta} + \left(\frac{2}{3}\eta - \eta_V\right)\partial_\gamma v_\gamma \delta_{\alpha\beta} - \eta(\partial_\beta v_\alpha + \partial_\alpha v_\beta), \quad 4.6$$

$$J_\alpha^W = -\lambda\partial_\alpha T + \rho h^i y^i w^i + J_\alpha^S, \quad 4.7$$

$$J_\alpha^i = -\rho D^{ik}\partial_\alpha y^k, \quad 4.8$$

der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase

$$p = \rho RT \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{M_i} \quad 4.9$$

und der kalorischen Zustandsgleichung

$$h^i = \int_{T_0}^T c_p^i d\bar{T} + \Delta h_{j,0}^i \quad 4.10$$

folgende Modellgleichungen für die Gasphase

$$\partial_t \rho + \partial_\alpha (\rho v_\alpha) = 0 \quad 4.11$$

$$\partial_t (\rho y^i) + \partial_\alpha (\rho v_\alpha y^i) = \partial_\alpha (\rho D^{ik} \partial_\alpha y^k) + \sigma_{mi} \quad 4.12$$

$$\partial_t (\rho v_\alpha) + \partial_\beta (\rho v_\alpha v_\beta) = -\partial_\beta \left(p \delta_{\alpha\beta} + \left(\frac{2}{3} \eta - \eta_v \right) \partial_\gamma v_\gamma \delta_{\alpha\beta} - \eta (\partial_\alpha v_\beta + \partial_\beta v_\alpha) \right) + \rho y^i f_\alpha^i \quad 4.13$$

$$\begin{aligned} \partial_t (\rho h) + \partial_\alpha (\rho v_\alpha h) = & +\partial_t p + v_\alpha \partial_\alpha p - \partial_\alpha \left(-\lambda \partial_\alpha T + \rho h^i y^i w^i + J_\alpha^s \right) \\ & - \left(\left(\frac{2}{3} \eta - \eta_v \right) \partial_\gamma v_\gamma \right) - \frac{\eta}{2} (\partial_\alpha v_\beta + \partial_\beta v_\alpha) (\partial_\beta v_\alpha + \partial_\alpha v_\beta) + \sigma_h + J_\alpha^i f_\alpha^i \end{aligned} \quad 4.14$$

Die Indices an den partiellen Ableitungen beziehen sich auf die Zeit t und auf die Ortskoordinaten x_α . Die lateinischen Indices beziehen sich auf die chemischen Komponenten i . Die Einsteinsche Summationskonvention wurde sowohl für die lateinischen Indices (Anzahl der chemischen Komponenten) als auch für die griechischen (Anzahl der Ortskoordinaten) benutzt. Die Formelsymbole sind im Formelverzeichnis erläutert.

Brände in Räumen initiieren im Allgemeinen turbulente Strömungen. Zu Beschreibung dieser Strömungsvorgänge werden die physikalischen Größen F in einen zeitlichen Mittelwert $\overline{F(t)}$ und eine Schwankungsgröße F' aufgespalten. Die Gleichungen werden dann zeitlich nach **Reynolds** mit folgender Vorschrift gemittelt:

$$\overline{F(t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} F(t) dt \quad 4.15$$

$$F(t) = \overline{F(t)} + F(t)' \quad 4.16$$

$$\overline{F(t)'} = 0 \quad 4.17$$

Bei Verbrennungsvorgängen als dichteveränderlichen Vorgängen hat sich zur theoretischen Beschreibung eine massengewichtete Mittelung nach **Favre** bewährt. Dazu werden die Größen in einen massegemittelten Anteil und einen Schwankungsanteil zerlegt. Für den massegemittelten Anteil gilt folgende Definition:

$$\tilde{F} = \frac{\overline{\rho F}}{\bar{\rho}}, \quad 4.18$$

so dass die Zerlegung dann lautet:

$$F = \tilde{F} + F'', \text{ mit} \quad 4.19$$

$$\overline{\rho F''} = 0 \quad 4.20$$

Die mit ~ überstrichenen Größen stellen somit die massegemittelten Größen, die mit '' als oberer Index die dazugehörigen Schwankungsgrößen und die überstrichenen die zeitlichgemittelten Größen dar. Für eine weitergehende Begründung der Einführung der Favre-Mittelung sei auf die Spezialliteratur [**Kuo 86, Warnatz et al. 97**] verwiesen.

Werden die Zerlegungen der einzelnen Größen durchgeführt, in die Ausgangsdifferentialgleichungen eingesetzt und dann eine zeitliche Mittelung der Gleichungen vorgenommen, so kann unter Vernachlässigung der Volumenviskosität analog [**Khali 82**] folgendes System partieller Differentialgleichungen angegeben werden:

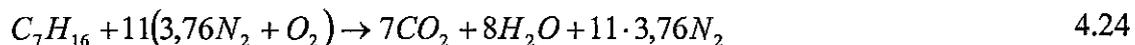
$$\partial_t \bar{\rho} + \partial_\alpha (\bar{\rho} \tilde{v}_\alpha) = 0 \quad 4.21$$

$$\begin{aligned} \partial_i (\overline{\rho v_\alpha}) + \partial_\beta (\overline{\rho v_\alpha v_\beta} + \overline{\rho v_\alpha'' v_\beta''}) = & \quad 4.22 \\ - \partial_\beta \left(\tilde{p} \delta_{\alpha\beta} + \frac{2}{3} \tilde{\eta} \partial_\gamma \tilde{v}_\gamma \delta_{\alpha\beta} - \tilde{\eta} (\partial_\alpha \tilde{v}_\beta + \partial_\beta \tilde{v}_\alpha) \right) + \overline{\rho y^i f_\alpha^i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial_i (\overline{\rho F}) + \partial_\alpha (\overline{\rho v_\alpha F} + \overline{\rho v_\alpha'' h''}) = & \quad 4.23 \\ + \partial_\alpha (\tilde{\Gamma} \partial_\alpha \tilde{F}) + \tilde{\sigma}_F, \\ F = h, y^i \end{aligned}$$

Die in den Gleichungen (4.22) und (4.23) in den Divergenztermen der linken Seite auftretenden zusätzlichen Glieder der Schwankungsgrößen können als turbulente Schubspannungen bzw. Austauschgrößen interpretiert werden. FLUENT bietet mehrere Möglichkeiten, diese Schwankungsgrößen zu ermitteln. Die durchgeführten Simulationen nutzen das Standard k-ε-Modell, das in FLUENT zur Verfügung gestellt wird, und bei dem zwei zusätzliche Gleichungen für die mittlere kinetische Energie der Turbulenz und die Dissipationsrate gelöst werden. Auf nähere Einzelheiten wird hier verzichtet und auf die FLUENT-Unterlagen verwiesen [FLUENT 98].

Zur Durchführung der Berechnungen ist es notwendig, die Quellglieder der chemischen Reaktion in Gleichung (4.23) anzugeben. Es wurde ein einfaches Reaktionsmodell für die Berechnungen mit gasförmigem Heptan gewählt. Es wurde für die Heptanverbrennung die folgende Einschrittreaktion zugrunde gelegt:



Damit sind die Transportgleichungen für die chemischen Komponenten

$C_7H_{16}, O_2, N_2, CO_2, H_2O$ zu lösen. Kohlendioxid wird in den Simulationsberechnungen als Tracer für die Rauchausbreitung aufgefasst [Nam 00, Tewarson 95].

Die chemische Reaktion wird in den Transportgleichungen für die einzelnen Komponenten durch den Reaktionsquellterm berücksichtigt. Dafür wurde das Finite Rate/Eddy-Dissipationsmodell, das in FLUENT bereitgestellt wird, eingesetzt. Bei diesem Modell wird die Reaktionsgeschwindigkeit aus dem Minimum der Reaktionsgeschwindigkeit nach einen Arrheniusansatz und der Reaktionsgeschwindigkeit für die turbulente Verbrennung nach **Magnussen und Hjertager** bestimmt. Für die zugrundegelegte Einschrittreaktion sind die

Konstanten und Stoffwerte für die Reaktionsmodelle in der FLUENT-Datenbank enthalten. Zum Erfassen des Strahlungsanteils in der Enthalpiebilanzgleichung wurde das P1-Strahlungsmodell eingesetzt [FLUENT 01].

Das Gleichungssystem wurde mit FLUENT diskretisiert gelöst. Die zur Lösung notwendigen Anfangs- und Randbedingungen werden bei den folgenden Anwendungsfällen gesondert beschrieben. Als Lösungsverfahren wurden die Standardverfahren aus FLUENT eingesetzt. Zur Lösung der Gleichungen wurde das Standard-SIMPLE-Verfahren nach **Patankar und Spalding** und ein implizites Verfahren 1. Ordnung zur Zeitintegration genutzt. Die konvektiven Glieder in den Gleichungen wurden mit einem Upwind-Verfahren diskretisiert.

4.3 Vorbereitende Simulationsrechnungen

Um Simulationsrechnungen zum Vergleich mit real gemessenen physikalischen Größen verwenden zu können, müssen auch die Geometrieverhältnisse möglichst realitätsnah wiedergespiegelt werden. Der Brandkanal weist im Bereich der Ventilationsöffnungen, des Strömungsgleichrichters sowie im Übergangsbereich zwischen Tunnelquerschnitt und Abzugsschlot in Richtung der Längsausdehnung sehr unterschiedliche Querschnittsformen auf. Die Erstellung des Modellgebietes und seine Vernetzung führen dann sehr schnell zu großen Gittern, die einen hohen Berechnungsaufwand bezüglich der Rechenzeiten mit sich bringen. Aus diesem Grund haben sich vereinfachte Modellgebiete bewährt, anhand derer grundlegende Untersuchungen mit geringerem Aufwand durchgeführt werden können bzw. Modelltestungen vorab durchführbar sind. Für die Simulationsrechnungen im Brandkanal wurde zunächst als vereinfachte Geometrie der 20 m lange Brandkanalabschnitt betrachtet, in dem die Versuchsanordnung aufgebaut war. Es sind vorbereitende Berechnungen zur Simulation des Brandes ohne Beeinflussung der Zuluftbedingungen (freie Konvektion) sowie Rechnungen zur Simulation des Brandes mit Seitenlüftung (erzwungene Konvektion) durchgeführt worden.

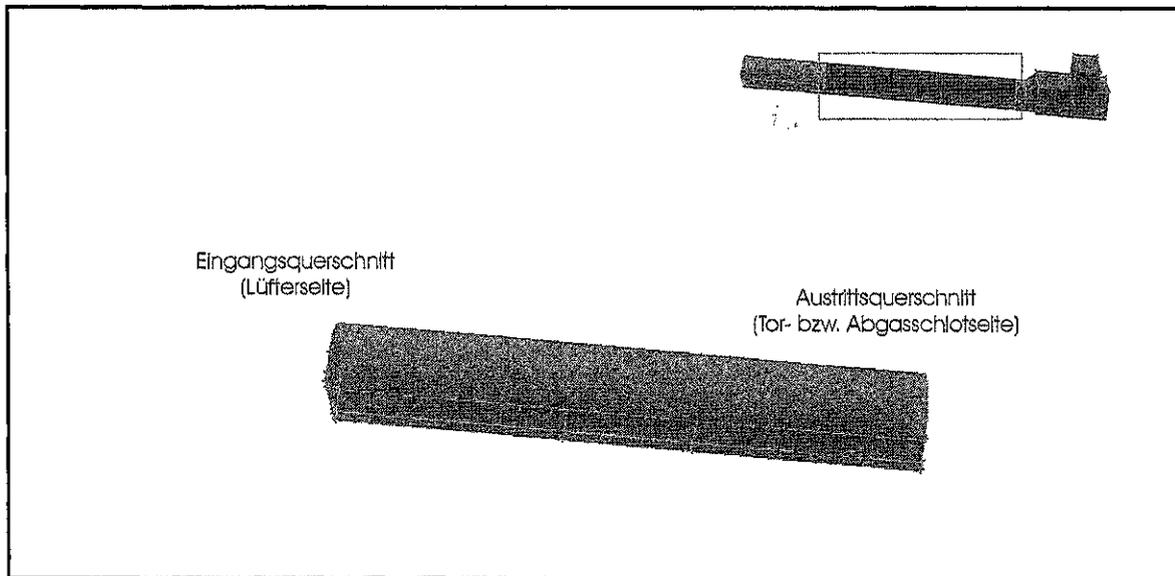


Bild 4.2: Geometrie des Innenraumes des Brandkanalabschnittes

Die Geometrie des vereinfachten Berechnungsgebietes ist in der unteren Ansicht in Bild 4.2 zu sehen. Die Abbildung in der rechten oberen Ecke des Bildes verdeutlicht den Bezug zur gesamten Geometrie. Bild 4.3 zeigt die Vernetzung des betrachteten Brandkanalabschnittes. Die Geometrie wurde unter Verwendung eines kartesischen Koordinatensystems beschrieben. Die für die Berechnungen zugrundegelegte Orientierung der Koordinatenachsen ist im Bild 4.3 verdeutlicht.

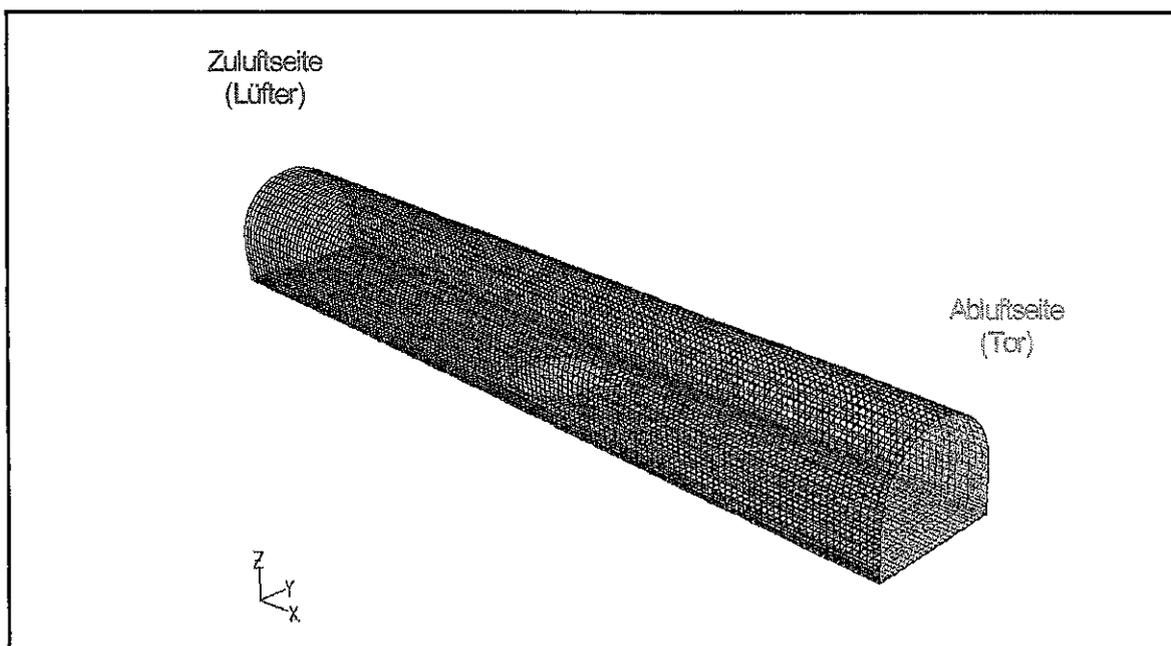


Bild 4.3: Vernetzung des Brandkanalabschnitts für die vorbereitenden Rechnungen

Die Längsausdehnung des Kanales erstreckt sich in Richtung der x-Achse und zählt positiv von der Zuluftseite zur Abluftseite. Die Berücksichtigung der Orientierung der Koordinatenachsen erlangt bei der Definition der Randbedingungen Bedeutung.

Um das Systems der Modellgleichungen für jedes Volumenelement lösen zu können, sind zunächst die Randbedingungen und die Anfangsbedingungen zu definieren. Ränder des Modellgebietes sind der Zuluftquerschnitt, die Brandgasfreisetzungsfäche, der Abluftquerschnitt sowie die Umfassungswände. Eine Prinzipskizze des Modellgebietes ist in Bild 4.4 gezeigt. Die in diesem Bild ebenfalls dargestellten Querschnitte A und B spiegeln die bereits in den Bildern zur Versuchsanordnung aufgeführten Messquerschnitte wider (vgl. Abschnitt 3.2). Der Messständer D wird durch die Linie D dargestellt. Die Messebene C, in der u. a. die bidirektionalen Sonden angeordnet wurden, findet man im Modellgebiet als parallele Fläche zur Brandgasfreisetzungsfäche wieder. Sie ist im Bild 4.4 nicht eingezeichnet.

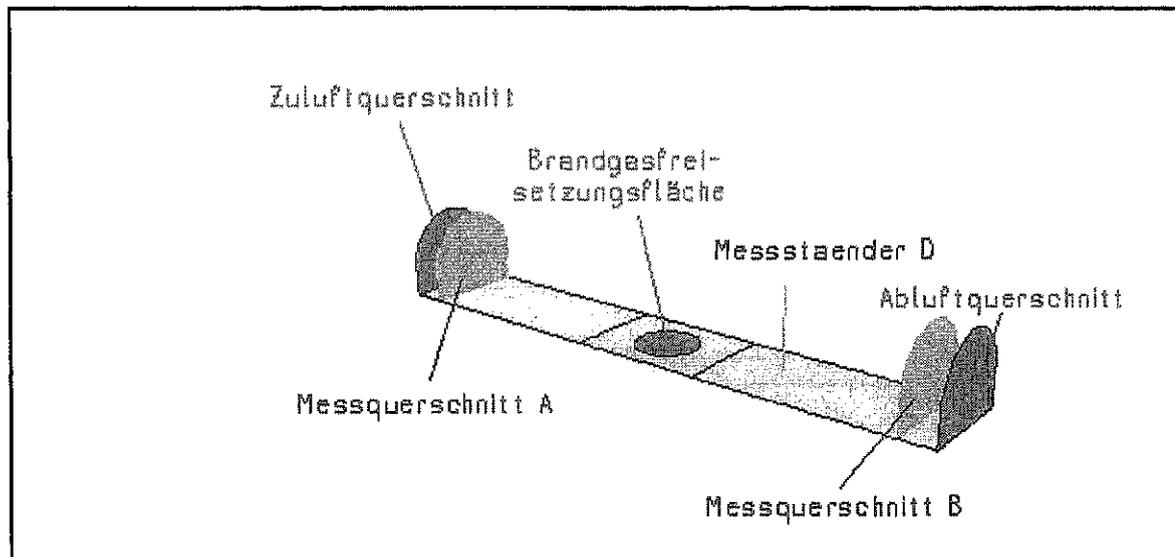


Bild 4.4: Ränder und Vergleichsmessorte im Modellgebiet

4.3.1 Freie Strömung

Zur Simulation der freien Strömung wurde die Ausbreitung des reagierenden Brandgases ohne Einfluss einer vorgegebenen Seitenströmung betrachtet. Über Zuluft- und Abluftquerschnitt kann sich freies Zu- oder Abströmen von Brandgasen oder Luft entsprechend des Brandregimes einstellen.

4.3.1.1 Randbedingungen

Die als Randbedingungen vorzugebenden physikalischen Größen sind die Geschwindigkeit, die Temperatur, die Spezieskonzentrationen, die turbulente kinetische Energie sowie deren Dissipation bzw. Ableitungen dieser Größen. Die Definition der Werte an den verschiedenen Modellgebietsrändern werden für die freie Strömung nachfolgend angegeben.

- *Zuluftquerschnitt*

Der Zuluftquerschnitt wird als sogenanntes Pressure-Inlet definiert, das die Bedingung $p_a - p_i = 0$ (Differenz zwischen Innen- und Außendruck gleich null) realisiert. Diese Druckrandbedingung wird in Fluent zur Modellierung einer freien Ein- bzw. Ausströmung verwendet, wie z. B. in CFD-Berechnungen zur Belüftung von Tunneln [Ingason, Romanov 02]. Im Falle der Einströmung (infolge $p_a > p_i$) wird eine Zusammensetzung aus 0,21 Masseanteilen O_2 und 0,79 Masseanteilen N_2 sowie eine Temperatur $T = 300$ K vorausgesetzt.

- *Abluftquerschnitt*

Analog zum Zuluftquerschnitt wird zur Realisierung des freien Aus- bzw. Einströmens über den Abluftquerschnitt die Druckrandbedingung verwendet. Gesetzt wird ein Pressure-Outlet, bei dem im Falle der Einströmung (infolge $p_a > p_i$) die Zusammensetzung des Gasgemischs aus 0,21 Masseanteilen O_2 und 0,79 Masseanteilen N_2 vorausgesetzt wird sowie eine Temperatur $T = 300$ K für die Rückströmung.

- *Brandgasfreisetzungsfläche*

An der Brandgasfreisetzungsfläche erfolgt die Vorgabe des freigesetzten Gasmassstromes, mit $\dot{m} = 0,5 \text{ kg s}^{-1}$. Dieser Gasmassstrom besteht nur aus Heptan, so dass der Masseanteil des Heptans eins gesetzt wird. Die Freisetzung des Gasstromes erfolgt normal zur Freisetzungsfläche. Damit sind die Komponenten der Geschwindigkeiten in x- und in y-Richtung null. Als Freisetzungstemperatur des Heptans wird $T = 1200$ K definiert.

Für die turbulente kinetische Energie k und deren Dissipation ε an der Brandgasfreisetzungsfläche werden Standardwerte verwendet.

Die Randbedingung für die einfallende Strahlung G wird fluentintern aus der Wärmestrahlungsdichte der Fläche (Brandgasfreisetzungsfläche) nach der Beziehung $q_r = -\Gamma \frac{\partial G}{\partial n}$ ermittelt. Γ ist ein Parameter, der die Strahlungseigenschaften des Mediums, in dem der Strahlungstransport vonstatten geht, beschreibt. Das Emissionsverhältnis der abstrahlenden Fläche wird eins gesetzt. Für Details zur Definition der Strahlungsrandbedingung sei auf die Dokumentation in [FLUENT 01] verwiesen.

4.3.1.2 Anfangsbedingungen

Anfangsbedingungen sind die zum Zeitpunkt $t = 0$ s für jede Zelle zu definierende Werte der zu berechnenden physikalischen Größen. Die für diese Berechnungen gesetzten Anfangswerte gelten für jede Zelle im Modellgebiet. Zur Vereinfachung seien nur die Anfangswerte genannt, die nicht null gesetzt werden. Das sind die Temperatur mit $T = 300$ K und die Konzentration der Komponente O_2 , die angegeben in Masseanteilen, mit 0,208 gewählt wird. Für die Komponenten CO_2 und H_2O werden jeweils Masseanteile von 0,001 gesetzt. Mit diesen Vorgaben für die Konzentrationen ergibt sich für die inerte Komponente N_2 ein Masseanteil von 0,79, der als Anfangswert zum Zeitpunkt $t = 0$ s im Brandkanal vorliegt. Als Anfangswerte für k und ε werden Standardwerte aus Fluent benutzt.

Es wurde zunächst eine nichtreagierende Strömung berechnet und erst nach einer Zeit von 2 s das Reaktionsmodell aktiviert. Die Berechnungsergebnisse für die nichtreagierende Heißgasströmung dienen als Anfangswerte für die Berechnung mit Reaktion.

Zur instationären Berechnung der turbulenten reagierenden Strömung müssen geeignete Zeit- und Ortsdiskretisierungen gewählt werden. Die erforderliche Ortsdiskretisierung ist im groben Rahmen durch die zu modellierenden Vorgänge (Modell+Randbedingungen) und die Abmessungen des Modellraumes vorgegeben. Die Ortsdiskretisierung kann im Anschluss an die Erstellung der Modellraumgeometrie im Preprozessor erfolgen. Eine obere Grenze für die Feinheit des Gitters ist durch die zur Verfügung stehende Rechnerkapazität und die erforderlichen Rechenzeiten gesetzt. Unter diesen Voraussetzungen lassen sich verschieden große Gitter erzeugen, die für Brandausbreitung im Kanal geeignet erscheinen.

Die Wahl der geeigneten Zeitschrittweite ist ebenfalls von Modell, Randbedingungen und numerischen Lösungsverfahren abhängig und mit der Ortsdiskretisierung verbunden. Unter Nutzung des Courant-Friedrich-Levy-Kriteriums (CFL-Kriteriums) lässt sich eine Abschätzung zur Wahl der Zeitschrittweite gewinnen.

Ob für den konkreten Anwendungsfall mit einer Zeitschrittweite und einem Gitter stabile Lösungen erhalten werden können, lässt sich durch Rechnungen mit verschiedenen Gittergrößen und verschiedenen Zeitschrittweiten zeigen. Erst wenn eine solche von Gittergröße und Zeitschrittweite unabhängige Lösung erhalten wird, kann das verwendete numerische Verfahren als geeignet eingeschätzt werden.

4.3.1.3 Gitterrechnungen für die freie Strömung

Ausgehend von dem in Bild 4.3 dargestellten Berechnungsgitter mit 86 766 Volumenelementen für den 20 m langen Brandabschnitt wurden ein feineres und ein gröberes Gitter generiert. In der Tabelle 4.1 sind zur Gesamtanzahl der Gitterzellen auch die Detaillierungen der Ränder angegeben. Damit wird ersichtlich, dass die Gittervariation im gesamten Gebiet vorgenommen wurde, nicht nur lokal.

Tabelle 4.1: Verschiedene Gittervernetzungen für den Kanalabschnitt

Gitter	Gesamtanzahl der Zellen	Anzahl der Wandzellen	Anzahl der Zellen im Kanalquerschnitt	Anzahl der Zellen für das Massflow-Inlet	Mittlere Volumenelementlänge
A	33 383	4 624	306	76	0,158 m
B	86 766	9 624	505	145	0,115 m
C	269 236	18 496	1 224	304	0,079 m
D	156 000	13 160	786	224	0,094 m

In der letzten Tabellenzeile ist zusätzlich ein Berechnungsgitter, das von der Anzahl der Volumenelemente zwischen dem Gitter B und C einzuordnen ist, zum Vergleich der Berechnung der freien Strömung aufgenommen worden, dessen Hauptabmessung in Kanallängsrichtung 2 m kleiner ist. Es handelt sich um das Gitter für die ersten Simulationsrechnungen, in denen nur das Gebiet zwischen den Messebenen berücksichtigt wurde.

Die Gitterunabhängigkeit der Lösung wurde an den Gittern A, B und C für die Randbedingungen der unbeeinflussten Strömung untersucht. Es wurde eine Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,05$ s verwendet. Die Wahl dieser Zeitschrittweite erfolgte unter Berücksichtigung der mittleren Volumenelementlänge des Gitters B und von mittleren Gasgeschwindigkeiten von $2-3 \text{ m s}^{-1}$ über der Wanne, die in den Vorversuchen gemessen wurden. Das Diagramm im Bild 4.5 zeigt die Ergebnisse der Gitterrechnungen für die freie Strömung am Beispiel der berechneten Maximalwerte der Temperatur für die verschiedenen Vernetzungen zu verschiedenen Ausbreitungszeiten. Aus der Darstellung sind Abweichungen in den berechneten Maximaltemperaturen von ca. 200 K im ungünstigsten Fall zu erkennen. Auffällig ist, dass bei der feinsten Vernetzung (Gitter C) die größten Berechnungswerte erzielt werden.



Bild 4.5: Berechnete maximale Temperaturen der Gitterrechnungen für die freie Strömung

Eine deutlich bessere Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse wird für die Gitter A, B und D erreicht, lässt man das Gitter C in der Gegenüberstellung außer acht. Die maximalen Abweichungen liegen dann bei 10 %, betrachtet man die Einströmtemperatur von 1200 K an der Freisetzungsfläche als Bezugswert. Unter diesen Einschränkungen in der Genauigkeit der Temperatur ist für die Gitter A, B und D eine gitterunabhängige Lösung zu erwarten.

Die berechneten Geschwindigkeiten für die Gitterrechnungen sind im Bild 4.6 dargestellt. Die zu den einzelnen Zeitschritten berechneten Geschwindigkeiten weichen in ihrer Größe bis zu $1,3 \text{ m s}^{-1}$ voneinander ab. Bezogen auf die maximale berechnete Geschwindigkeit von $4,25 \text{ m s}^{-1}$ sind das 30 %.

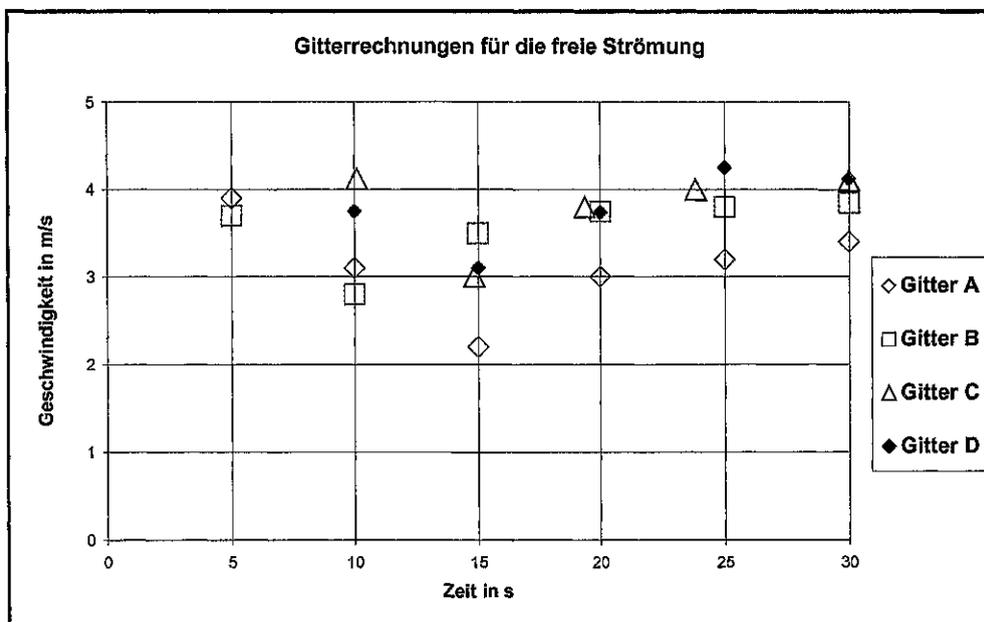


Bild 4.6: Berechnete maximale Geschwindigkeit der Gitterrechnungen für die freie Strömung

Das Diagramm verdeutlicht jedoch, dass die Abweichungen mit zunehmender Zeit geringer werden und dass insbesondere das Gitter A stark abweichende Ergebnisse liefert. Die Gitterrechnungen für die Gitter B bis D zeigen nach 15 s mit Abweichungen von max. 12 %, so dass unter diesen Einschränkungen in der Genauigkeit eine gitterunabhängige Lösung zu erwarten ist.

Für die Weiterarbeit wird im Ergebnis der Gitterrechnungen als Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit das Gitter B gewählt.

4.3.1.4 Zeitschrittrechnungen für die freie Strömung

Der Nachweis der Zeitschritunabhängigkeit wird mit den verschiedenen Zeitschrittweiten $\Delta t = 0,05$ s, $\Delta t = 0,1$ s und $\Delta t = 0,2$ s durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Zeitschrittrechnungen, die für das Gitter B durchgeführt wurden, sind in Bild 4.7 grafisch dargestellt. Im Diagramm sind nur die maximalen Temperaturen aufgeführt, Tabelle 4.2 zeigt die berechneten maximalen Geschwindigkeiten.

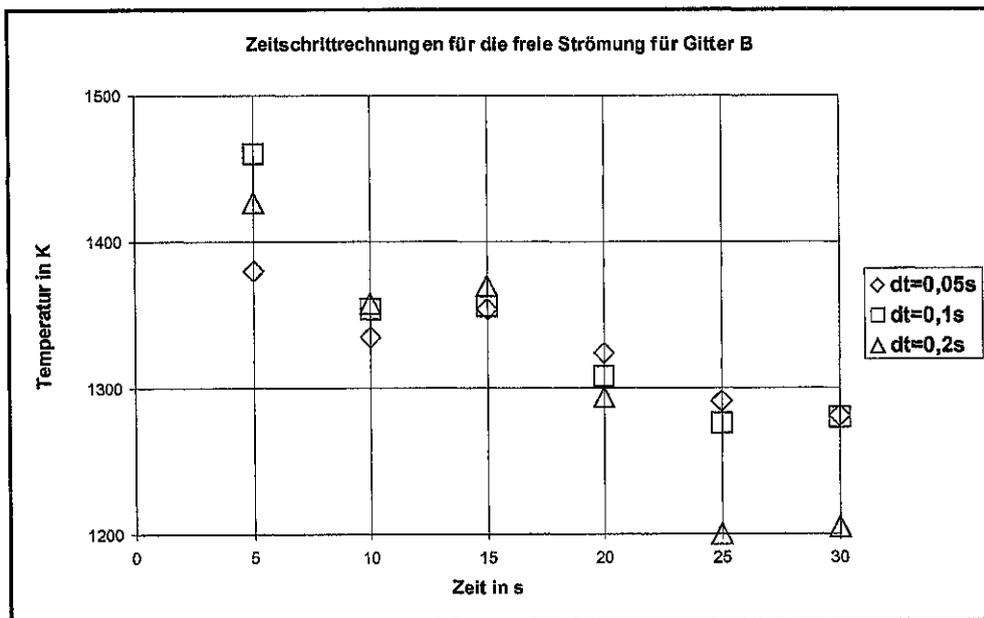


Bild 4.7: Berechnete maximale Temperaturen der Zeitschrittrechnungen für die freie Strömung

Die berechneten maximalen Temperaturen zeigen für die untersuchten Zeitschrittweiten eine gute Übereinstimmung. Maximale Abweichungen liegen bei ca. 100 K, was bei der Bezugstemperatur von 1200 K einem Fehler von weniger als 10 % entspricht.

Auch die berechneten Geschwindigkeiten liegen für alle drei Zeitschrittweiten in der gleichen Größenordnung.

Tabelle 4.2: Berechnete Geschwindigkeiten der Zeitschrittrechnungen für die freie Strömung

Zeit in s	$\Delta t = 0,05$ s	$\Delta t = 0,1$ s	$\Delta t = 0,2$ s
	v_{max} in $m\ s^{-1}$	v_{max} in $m\ s^{-1}$	v_{max} in $m\ s^{-1}$
5	3,7	3,9	3,75
10	2,8	3	3
15	3,5	3,3	2,8
20	3,75	3,65	3,3
25	3,8	4	4
30	3,85	4	4,2

Wird die maximale berechnete Geschwindigkeit ($4,2\ m\ s^{-1}$) als Bezugsgröße gewählt, kann ein Fehler bei der Berechnung der Geschwindigkeiten im Bereich von 5-17 % angegeben werden, mit dem sich die verschiedenen Zeitschrittrechnungen voneinander unterscheiden. Die maximale Abweichung von 17 % ist dabei nur zu einem Zeitpunkt (nach 15 s) zu verzeichnen.

Für die Weiterarbeit wird die Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,1$ s gewählt. Die größere Zeitschrittweite wird aufgrund der dort zu registrierenden Abweichungen der Temperatur und die kleinere Zeitschrittweite aufgrund des erhöhten Zeitaufwandes verworfen. Die Zeitschrittunabhängigkeit der numerischen Lösung ist unter Berücksichtigung dieser Abweichungen zu betrachten. Für den Berechnungsfall der freien Strömung werden damit eine Gittervernetzung in der Größe des Gitters B und eine Zeitschrittweite von 0,1 s als geeignet angesehen und sollen für die Berechnung des Gesamtgebietes verwendet werden.

4.3.2 Erzwungene Strömung

Zur Simulation der erzwungenen Strömung wurde die Ausbreitung des reagierenden Brandgases bei vorgegebener Seitenlüftung betrachtet. Es wurden dieselbe Geometrie und dieselben Gittervernetzungen wie bei der Berechnung der freien Strömung verwendet.

4.3.2.1 Rand- und Anfangsbedingungen

Zur Simulation der Brandausbreitung bei Seitenbelüftung wird im Unterschied zur freien Strömung an der Zuluftseite ein definiertes Geschwindigkeitsfeld vorgegeben.

Damit werden für die erzwungene Strömung die folgenden Randbedingungen gesetzt.

- *Abluftquerschnitt, Brandgasfreisetzungsfäche, Umfassungswände*

Am Abluftquerschnitt, der Brandgasfreisetzungsfäche sowie den Umfassungswänden werden die Randbedingungen wie bei der Simulation der freien Strömung definiert.

- *Zuluftquerschnitt*

Es wird eine Geschwindigkeit u von 1 m s^{-1} an der Zuluftseite vorgegeben. Die Einströmung erfolgt in positiver x -Richtung, d. h. normal zur Freisetzungsfäche. Damit sind die Geschwindigkeitskomponenten mit $v_x = 1 \text{ m s}^{-1}$ und $v_y = v_z = 0$ definiert. Die Zusammensetzung des einströmenden Gasgemischs ist über einen Masseanteil des Sauerstoffs von 0,21 festgelegt. Die Masseanteile der Komponenten H_2O , CO_2 und C_7H_{16} (Heptan) werden null gesetzt. Damit verbleibt für die inerte Komponenten N_2 der Masseanteil von 0,79. Die Temperatur des einströmenden Gases beträgt 300 K. Für turbulente kinetische Energie k und Dissipation ϵ werden Standardwerte gesetzt. Auch die Strahlungsrandbedingung wird analog zur Freisetzungsfäche aus der Wärmestrahlungsdichte ermittelt unter Zugrundelegen des Emissionsverhältnisses von eins.

Die Anfangsbedingungen sind wie bei der Simulation der freien Strömung gewählt worden (vgl. Abschnitt 4.3.1.2).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gitter- und Zeitschrittrechnungen für das Szenario der Brandausbreitung bei erzwungener Konvektion vorgestellt. Eine erneute Untersuchung der Gitter- und Zeitschrittunabhängigkeit ist erforderlich, da veränderte Randbedingung das Lösungsverhalten beeinflussen können.

4.3.2.2 Gitterrechnungen für die erzwungene Strömung

Für die Berechnungen mit unterschiedlichen Gittern wird eine Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,1$ s gewählt. Sie wurde für das mittlere Gitter unter Nutzung der CFL-Bedingung aus der mittleren Volumenelementgröße und der Zuluftgeschwindigkeit am Einströmrand von 1 m s^{-1} ermittelt.

Die Gitterrechnungen für die erzwungene Strömung sind für die Gitter A, B und C bis zu einer Ausbreitungszeit von 30 s mit der Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,1$ s durchgeführt worden. Als Vergleichsgrößen wurden die maximale Temperatur und die maximale Geschwindigkeit im Berechnungsgebiet ausgewählt. Eine Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse als Diagramm ist im Bild 4.8 für die berechnete Temperatur und in Bild 4.9 für die ermittelten Geschwindigkeiten gezeigt.

Die Werte der Temperatur (vgl. Bild 4.8) zeigen für die Berechnungen mit den Gittern B und C eine sehr gute Übereinstimmung. Davon abweichend liegen die Ergebnisse der Rechnungen mit dem groben Gitter A höher. Verfolgt man die zeitliche Entwicklung der Berechnungsgröße für jede einzelne Gitterrechnung, so sind zu Beginn der Ausbreitung, in einem Zeitabschnitt von ca. 10 s nach der Zündung starke Änderungen zu verzeichnen. In den folgenden Zeitschritten klingen diese ab. Ein Vergleich der drei Gitterrechnungen zu den verschiedenen Zeitpunkten ($t > 10$ s) ergibt maximale Temperaturdifferenzen im Bereich von 100-120 K. Bei Verwendung der Einströmtemperatur des Brandgases von $T = 1200$ K als Vergleichsmaßstab entspricht dies einem Fehler von 10 %.

Die Berechnungen zeigten, dass sich bereits nach 30 s ein Temperatur- und Strömungsfeld ausgebildet hat, das in den darauffolgenden Zeitschritten nur noch unwesentliche Veränderungen erfährt, und sich damit dem stationären Ausbreitungszustand nähert. Damit ist nicht zu erwarten, dass die Abweichungen in den maximalen berechneten Temperaturen größer werden. Eine Gitterunabhängigkeit der numerischen Lösung des Problems sei damit unter Berücksichtigung einer Abweichung von 10 % vorausgesetzt.

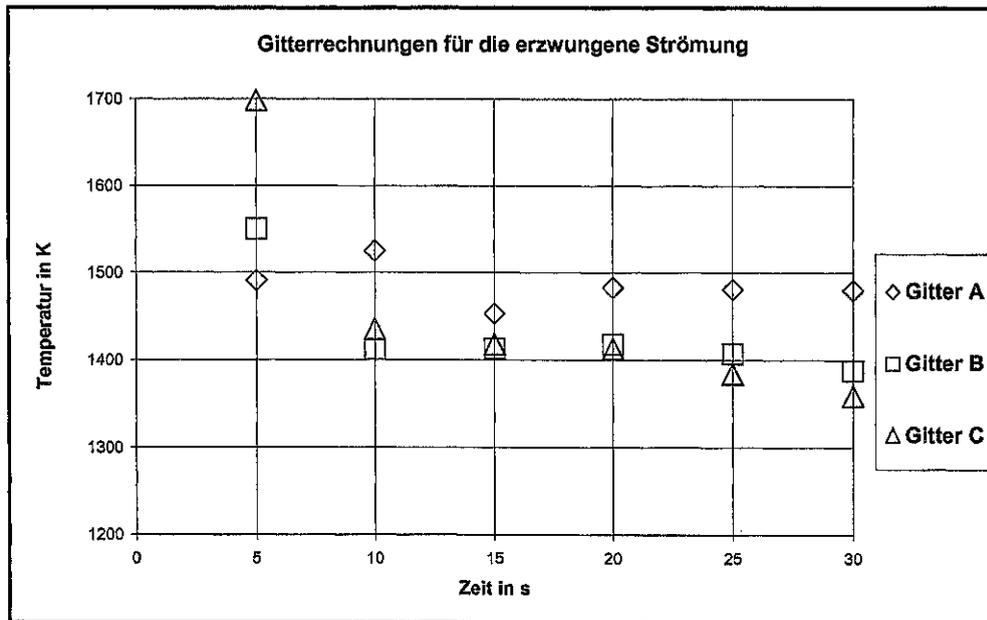


Bild 4.8: Berechnete maximale Temperaturen der Gitterrechnungen für die erzwungene Strömung

Die Analyse anhand der berechneten maximalen Geschwindigkeiten liefert analoge Ergebnisse. Schwankungen zu Beginn der Berechnungen für jedes Gitter folgen nahezu gleichbleibende Geschwindigkeiten in den folgenden Zeitschritten. Der Vergleich der verschiedenen Gitterrechnungen zu diesen Zeitschritten zeigt Differenzen in den Geschwindigkeiten. Gitter B stellt eine mittlere Kurve für die zeitliche Entwicklung der Maximalgeschwindigkeit dar. Bezogen auf das Gitter B sind im Vergleich zu den beiden anderen Gittern Geschwindigkeitsdifferenzen von $0,5$ bis 1 m s^{-1} zu verzeichnen. Die Gitterunabhängigkeit ist damit auch unter dieser Einschränkung in der Genauigkeit für die Geschwindigkeit zu sehen. Im Ergebnis der Gitterrechnungen soll das Gitter B als Kompromiss zwischen Aufwand (Gitter C erfordert einen hohen Rechenaufwand) und Genauigkeit (Gitter A kann lokale Änderungen nur bedingt wiedergeben) als geeignet angesehen werden, unter den genannten Einschränkungen, eine gitterunabhängige Lösung zu liefern. Die Untersuchung der Zeitschrittunabhängigkeit wird anhand des Gitters B vorgenommen.

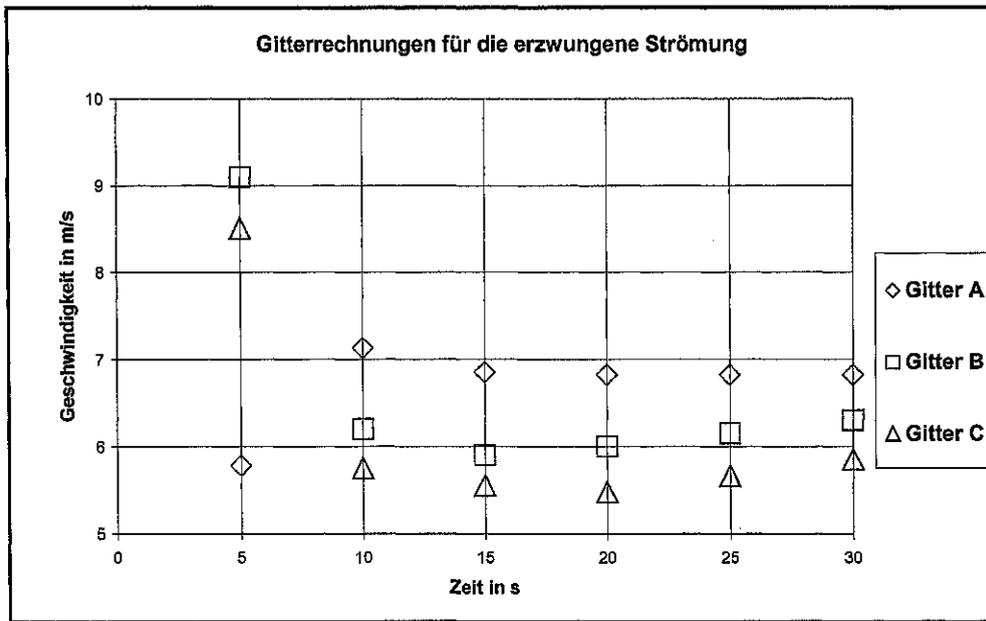


Bild 4.9: Berechnete maximale Geschwindigkeiten der Gitterrechnungen für die erzwungene Strömung

4.3.2.3 Zeitschrittrechnungen für die erzwungene Strömung

Der Nachweis der Zeitschritunabhängigkeit wird auch für die erzwungene Strömung mit den verschiedenen Zeitschrittweiten $\Delta t = 0,05$ s, $\Delta t = 0,1$ s und $\Delta t = 0,2$ s durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Zeitschrittrechnungen mit dem Gitter B sind in Bild 4.9 grafisch dargestellt. Es sind nur die maximalen Temperaturen aufgeführt. Das Diagramm zeigt eine deutliche Übereinstimmung der Berechnungswerte (maximale Temperaturen). Selbst die Temperaturüberhöhung zu Beginn der Ausbreitung wird mit nur geringer Abweichung mit allen drei Zeitschrittweiten berechnet. Die Zeitschritunabhängigkeit der Lösung im Bereich der betrachteten Zeitschrittweiten ist damit gezeigt.

Für den Fall der erzwungenen Strömung ist damit der Parameterbereich abgesteckt, für den eine gitter- und zeitschritunabhängige Lösung erwartet werden kann.

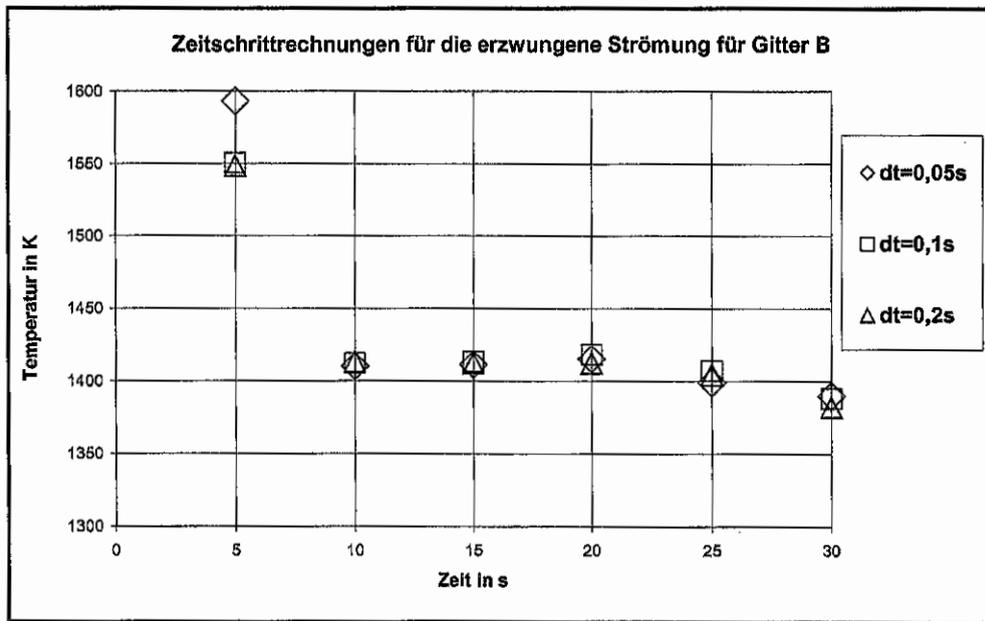


Bild 4.10: Berechnete maximale Temperaturen der Zeitschrittrechnungen für die erzwungene Strömung

5 VERGLEICH DER RECHNUNGEN MIT DEN GEMESSENEN DATEN

Zum Vergleich der im Brandversuch gemessenen Daten mit Simulationsergebnissen wurde für die Gesamtgeometrie die Simulation eines Heptanbrandes unter freier Konvektion und die Simulation eines Heptanbrandes mit Seitenströmung vorgenommen. Die Randbedingungen für die Simulationsrechnungen wurden anhand des jeweils korrespondierenden Brandversuches definiert.

5.1 Begleitende Simulationsrechnungen

Auf Grundlage der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Zeitschritt- und Gitterrechnungen wurde für den insgesamt 34 m langen Brandkanal eine geeignete Vernetzung erstellt. Zur Gittergenerierung wurde das Gitter B des vereinfachten Modellgebietes als Ausgangsgitter verwendet und dann erweitert. Im Bild 5.1 ist die im Preprozessor GAMBIT erzeugte Vernetzung des neuen Berechnungsgebietes abgebildet. Dieses Berechnungsgitter weist ca. 164 000 Volumenelemente auf.

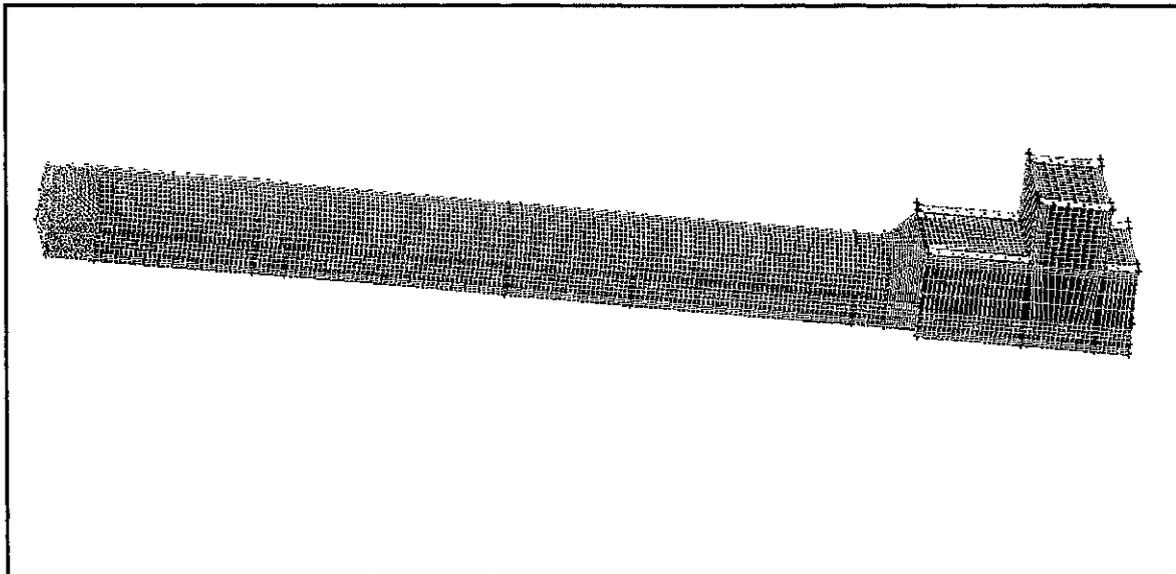


Bild 5.1: Vernetzung des Modellgebietes für den Brandkanal

5.1.1 Freie Strömung

Die Ränder des Berechnungsgebietes für die begleitenden Rechnungen sowie die Anordnung der Messebenen A, B und C sowie des Messständers D (vgl. Versuchsanordnung Bild 3.5), an denen der Vergleich von Messwerten und Berechnungswerten erfolgte, sind im Bild 5.2 zu sehen. Modellgebietsränder sind die Umfassungswände, die Brandfläche sowie die Austauschflächen (Lüfter und Rauchgasabzug), über die die Belüftungsverhältnisse definiert werden.

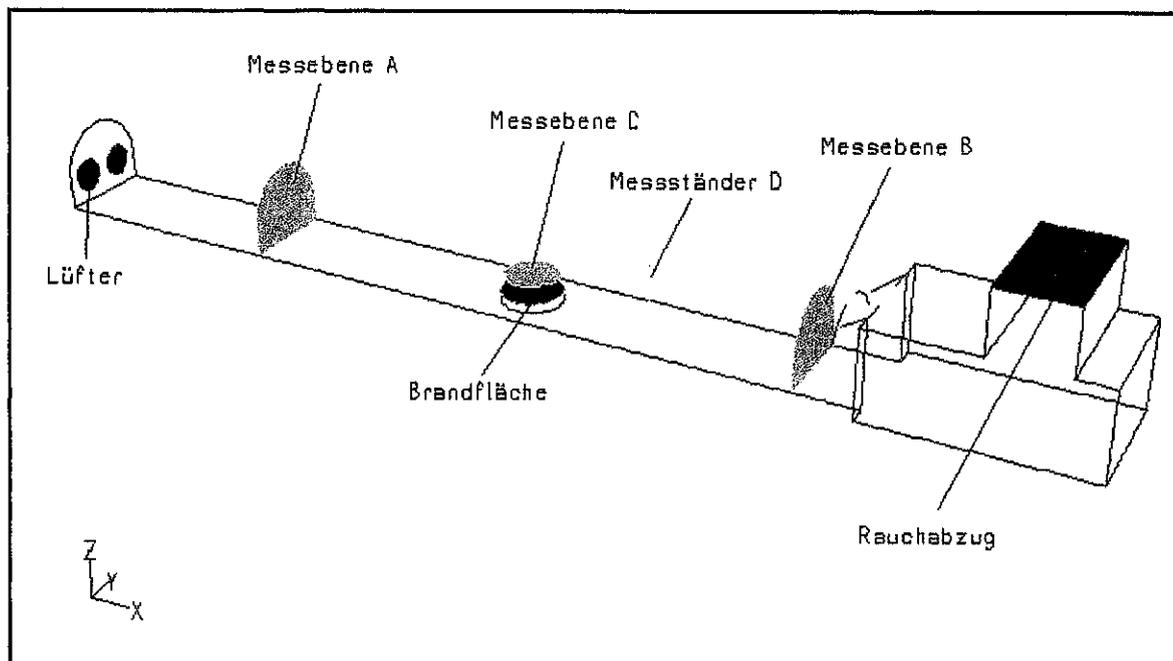


Bild 5.2: Ränder und Messebenen innerhalb des Modellgebietes für den Brandkanal

5.1.1.1 Rand- und Anfangsbedingungen

Zur rechnerischen Simulation eines Brandversuches unter freier Konvektion wurden zur Definition der Randbedingungen die gemessenen Werte aus den Heptanbrandversuchen BV09 und BV10 genutzt.

- *Freie Ränder (Ein- und Ausströmränder)*

Für den Fall der freien Strömung werden die Lüfterquerschnitte sowie die Rauchabzugsfläche als freie Ränder betrachtet. Die Möglichkeit der freien Ein- oder

Ausströmung wird wie bei den vorbereitenden Rechnungen durch ein Pressure-Inlet realisiert. Das Pressure-Inlet umfasst beide Lüfter an der Stirnseite des Kanals. Im Falle der Einströmung (Umgebungsluft) in das Berechnungsgebiet wird eine Fluidzusammensetzung mit 0,21 Masseanteilen O₂ vorgegeben.

Für den zweiten freien Rand, die Rauchabzugsfläche, der wie bisher als Pressure-Outlet definiert ist, wird die Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck vorgegeben. Der am Rauchabzugsquerschnitt herrschende Druck ist von der Außenströmung beeinflusst. Für diese Druckdifferenz wird in Ermangelung von Messwerten die Druckdifferenz gesetzt, die sich infolge Anströmung der Gebäudeöffnungen (Lüfteröffnungen und Abzugsquerschnitt) durch das äußere Windfeld unter Nutzung mittlerer aerodynamischer Beiwerte als Abschätzung nach [Richter 89] ermitteln lässt. Die Winddruckdifferenz Δp_w lässt sich bei Vorhandensein von zwei Belüftungsöffnungen nach der Formel

$$\Delta p_w = (K_1 - K_2) \frac{\rho_L}{2} w_w^2 \quad 5.1$$

bestimmen. K_1 und K_2 sind die aerodynamischen Beiwerte, ρ_L die Dichte der Luft und w_w die Windgeschwindigkeit. Es handelt sich um eine Abschätzung, da für die aerodynamischen Beiwerte z. T. nur Bereiche angegeben werden, innerhalb derer die Werte in Abhängigkeit von Gebäudeform und Anströmrichtung variieren. Zur Simulation des Brandes bei freier Konvektion werden die im Brandversuch BV10 registrierten Windverhältnisse, gemessene Geschwindigkeiten und Richtung, genutzt. Die Hauptwindrichtung weicht nur um max. 10° von der Längsausdehnung des Brandkanals ab. Bei der gemessenen mittleren Windgeschwindigkeit von 3,5 m s⁻¹ führt das zu einer Abschätzung der Druckdifferenz von 10 Pa, die als Randbedingung am Abluftquerschnitt (Ausströmrand) gesetzt wird. Bei der Definition der Druckrandbedingung ist zu berücksichtigen, dass bei der Formulierung des Druckes in Fluent, der hydrostatische Druck bereits enthalten ist, so dass bei den Druckrandbedingungen der hydrostatische Druck nicht angegeben werden darf [FLUENT4 97].

- *Brandfläche*

Aus den gemessenen Masseverlustraten der Heptanbrandversuche BV09 und BV10 wurde ein Massestrom von $\dot{m} = 0,12 \text{ kg s}^{-1}$ für die Berechnungen ermittelt. Die Freisetzungstemperatur wurde mit $T = 1200 \text{ K}$ gewählt. Die Freisetzung erfolgte normal zur Brandfläche.

- *Umfassungswände*

Alle Umfassungswände werden als adiabate Wände betrachtet.

Anfangsbedingungen

Es wurden die Anfangswerte für ein ruhendes Fluid (Luft) mit einem Masseanteil an O_2 von 0,208 und der Temperatur von $T = 300 \text{ K}$ gesetzt. Für die Masseanteile der Produkte H_2O und CO_2 wurde jeweils 0,001 angenommen. Für die anderen physikalischen Größen sind die oben genannten Standardwerte beibehalten worden.

5.1.1.2 Berechnungsergebnisse

Die instationären Berechnungen wurden zunächst über eine Dauer von 2 s für ein nichtreagierendes Gasgemisch durchgeführt. Danach wurde das Reaktionsmodell aktiviert. Über die gesamte Berechnungsdauer wurde eine konstante Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ beibehalten. Es ist die Ausbreitung über die Dauer von 60 s berechnet worden.

Im Bild 5.3 sind die berechneten Temperaturverteilungen für den Längsschnitt durch den Brandkanal dargestellt. Der Temperaturbereich erstreckt sich von 300 K bis 1450 K. Im Bild 5.4 sind die Isoflächen für die Temperatur von 800 K gezeigt.

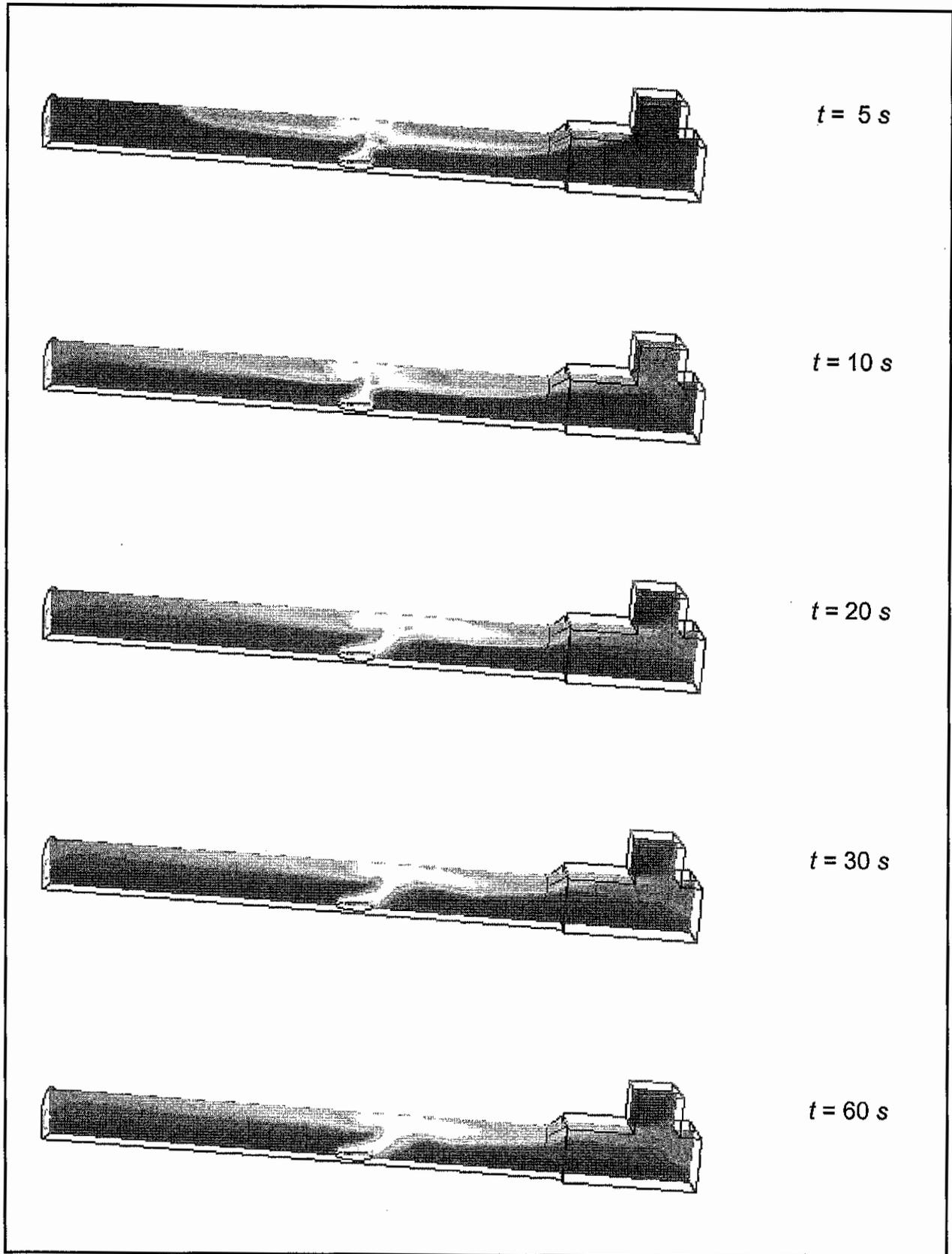


Bild 5.3: Temperaturverteilung in einem Längsschnitt zu verschiedenen Zeiten für die freie Strömung - Temperaturbereich von 300 K bis 1450 K

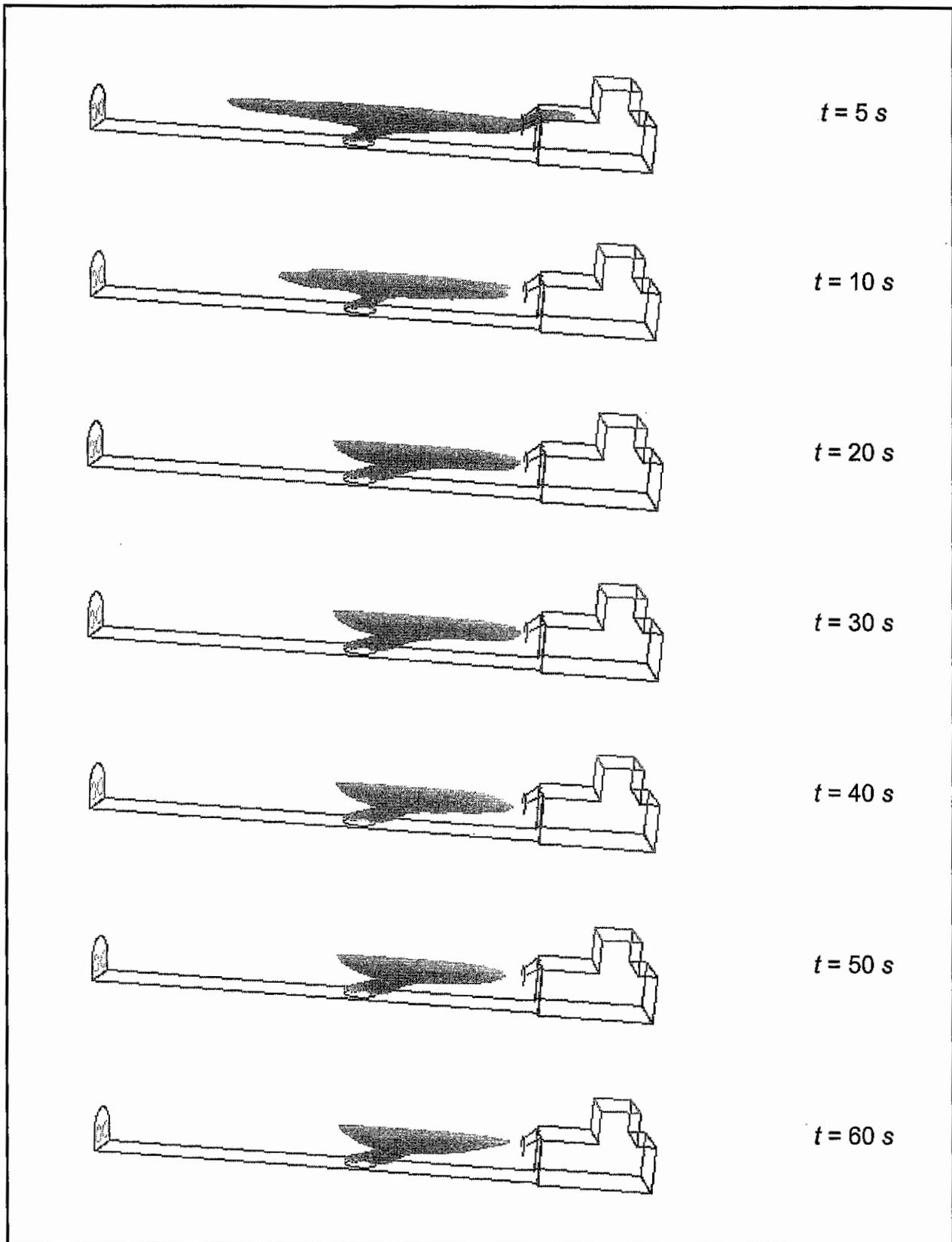


Bild 5.4: Isoflächen der Temperatur $T = 800 \text{ K}$ für die freie Strömung

5.1.2 Erzwungene Strömung

Für den Fall der erzwungenen Strömung sind die Lüfterflächen als Einströmrand definiert. Der Ausströmrand wird durch den Rauchabzug (Abgasschlot) dargestellt. Zur rechnerischen Simulation eines Brandversuches mit Seitenlüftung wurden Messwerte des Brandversuches BV11 genutzt. Zur Festlegung der Randbedingungen für die Geschwindigkeit am Einströmrand wurde auf den Vorversuch BV03 zurückgegriffen, da nur in diesem Versuch das Geschwindigkeitsfeld bei Zuluft in ausreichender Auflösung gemessen wurde. Im Brandversuch BV11 waren infolge Messstellenausfalls nicht genügend auswertbare Messwerte vorhanden. Da der Brandversuch BV11 mit den selben Lüftereinstellungen gefahren wurden wie der Brandversuch BV03, wurden die Randbedingungen für die Geschwindigkeit am Einströmrand anhand der Geschwindigkeitsmesswerte des Brandversuches BV03 definiert.

Die Zuluft wurde dabei nur über einen Lüfter, den in Ausbreitungsrichtung (positive x-Richtung) links angeordneten, eingebracht. Aus den im Kaltversuch gemessenen Geschwindigkeiten in Messebene A wurde die am Einströmquerschnitt vorhandene Geschwindigkeit unter Anwendung der Beziehungen zur Geschwindigkeitsverteilung in einem turbulenten runden Freistrahle rechnerisch ermittelt [Albring 78]. Die berechnete Mittengeschwindigkeit des Freistrahles am Lüfterausgang wurde in den Randbedingungen als konstanter Wert über den Einströmquerschnitt vorgegeben.

Zur Definition des Brandgasmassestromes an der Brandfläche wurden die gemessenen Masseverlustraten des Brandstoffes verwendet. Für alle Versuche mit Seitenlüftung sind gut übereinstimmende Masseverlustraten ermittelt worden.

5.1.2.1 Rand- und Anfangsbedingungen

Damit ergeben sich für den Berechnungsfall des Brandes bei erzwungener Konvektion aus den Versuchen folgende Randbedingungen für den Einströmrand und für die Brandfläche:

- *Einströmrand*

Am Lüfterquerschnitt wird eine Geschwindigkeit in x-Richtung von $u_x = 5 \text{ m s}^{-1}$ angegeben. Das einströmende Fluid ist Luft und durch die Vorgabe eines Masseanteiles von 0,21 an O_2 definiert. Die übrigen Randbedingungen am Lüfterquerschnitt sind identisch mit denen des Einströmrandes aus den vorbereitenden Berechnungen (vgl. Kapitel 4.3.2.1).

- *Brandfläche*

Für das Brandgas Heptan wurde ein konstanter Massestrom von $\dot{m} = 0,2 \text{ kg s}^{-1}$ gesetzt. Dieser Gasmassestrom tritt normal zur Freisetzungsfläche mit einer Temperatur von $T = 1200 \text{ K}$ aus. Alle anderen Größen an diesem Rand entsprechen denen in Kapitel 4.3.2.1 beschriebenen. Die Brandgasfreisetzungsfläche befand sich jedoch nicht mehr ebenerdig, sondern in der Höhe von ca. 0,3 m.

Vollständig aus den vorbereitenden Berechnungen wurden die Randbedingungen für den Ausströmrand (Pressure-Outlet) und für die Umfassungswände (adiabate Wand) übernommen.

Anfangsbedingungen

Die Definition der Anfangsbedingungen erfolgte wie bei der freien Strömung.

5.1.2.2 Berechnungsergebnisse

Die instationären Berechnungen für den Brand bei erzwungener Konvektion wurden mit der konstanten Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ unter Voraussetzung der Anfangsbedingungen wie bei der freien Strömung und einer Aktivierung des Reaktionsmodells nach 2 s durchgeführt. Es ist eine Ausbreitungsdauer von 60 s betrachtet worden. In den Berechnungen stellt sich bereits nach der Ausbreitungszeit von ca. 30 s ein Temperatur- und Strömungsfeld ein, das

sich in den darauffolgenden Zeitschritten nicht mehr wesentlich ändert. Aus diesem Grund wurde auf die Weiterrechnung über die Dauer von 60 s hinaus verzichtet.

Im Bild 5.5 sind für einige ausgewählte Zeitpunkte die Temperaturverteilungen in einem Längsschnitt durch den Brandkanal grafisch dargestellt. Der Temperaturbereich erstreckt sich von der minimalen Anfangstemperatur von 300 K bis zu einer maximalen Temperatur von 1450 K. Anhand dieser grafischen Darstellung sind schon nach 10 s kaum Änderungen in der Temperaturverteilung erkennbar. Einen Eindruck zur räumlichen Verteilung der Heißgase im Berechnungsgebiet vermitteln die in Bild 5.6 gezeigten Isoflächen für die Temperatur. In den dargestellten Bereichen wurden Temperaturen von 800 K erreicht und überschritten.

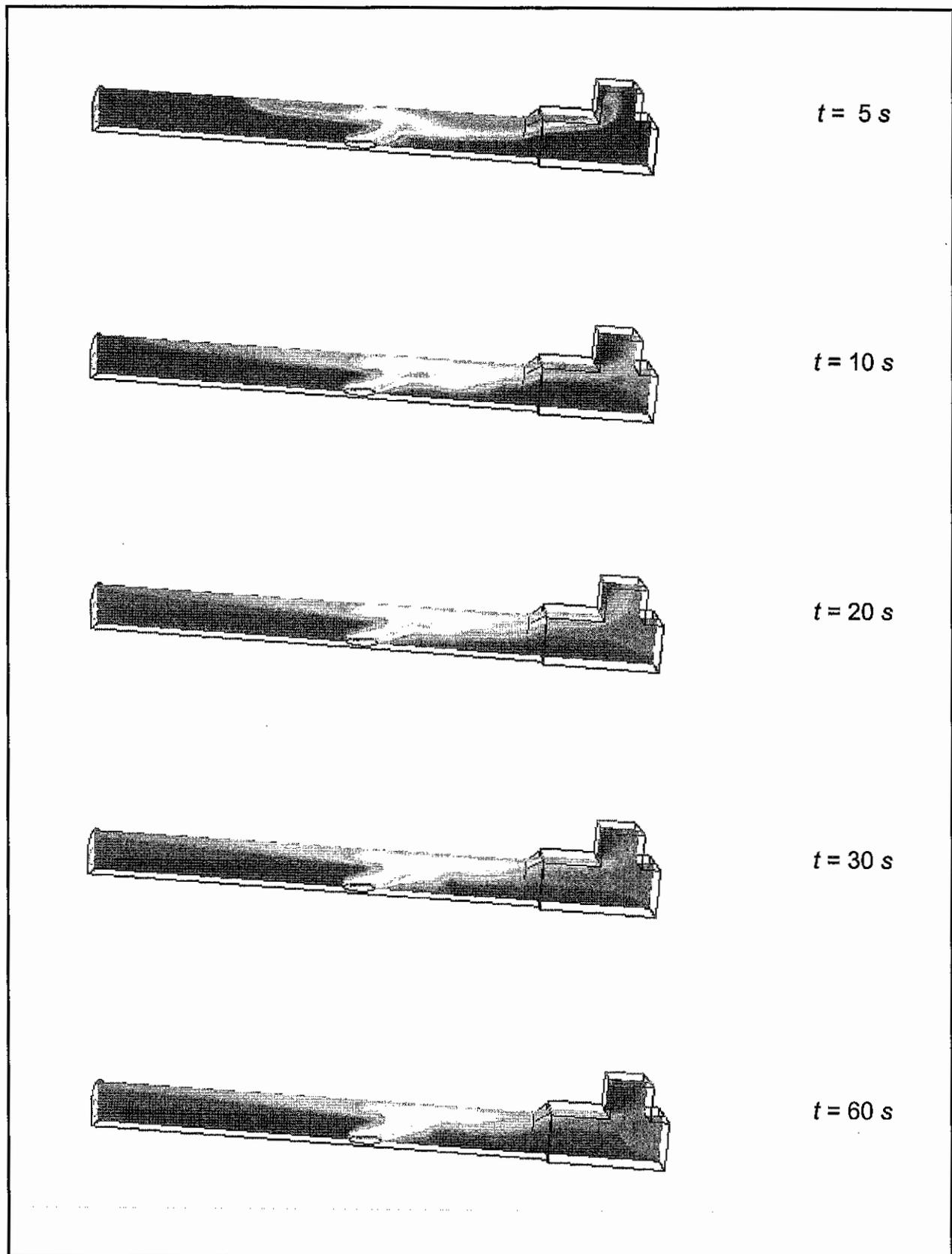


Bild 5.5: Temperaturverteilung in einem Längsschnitt durch den Brandkanal zu verschiedenen Zeiten - Temperaturbereich von 300 K (blau) bis 1450 K (rot)

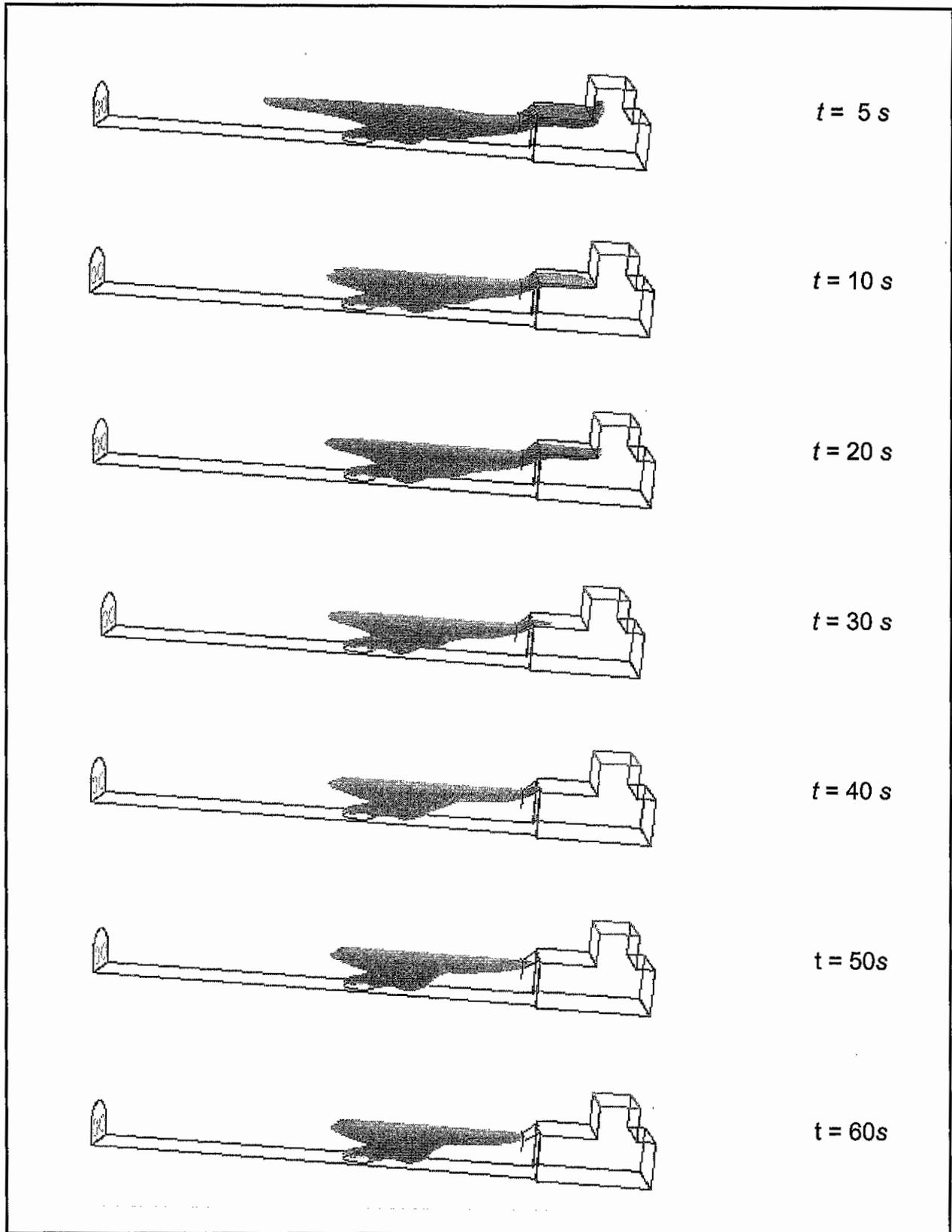


Bild 5.6: Isoflächen der Temperatur $T = 800\text{ K}$ für die erzwungene Strömung

5.2 Ausgewählte Vergleiche der Experimente und der Simulationsergebnisse

Im folgenden Abschnitt soll ein Vergleich der experimentellen Daten mit den Werten der Simulationsrechnungen an den verschiedenen Messquerschnitten vorgenommen werden. In den dargestellten Bildern verdeutlicht die durchgezogene Kurve die berechneten Werte, Messwerte sind durch Symbole (Rechteck, Kreis) gekennzeichnet.

5.2.1 Vergleiche bei freier Konvektion

Für den Brand bei freier Konvektion zeigt das Bild 5.7 einen Vergleich von gemessenen und berechneten Temperaturen am Ständer D. Es werden die Temperaturprofile zu zwei verschiedenen Zeiten, nach 30 s und nach 60 s, gegenübergestellt.

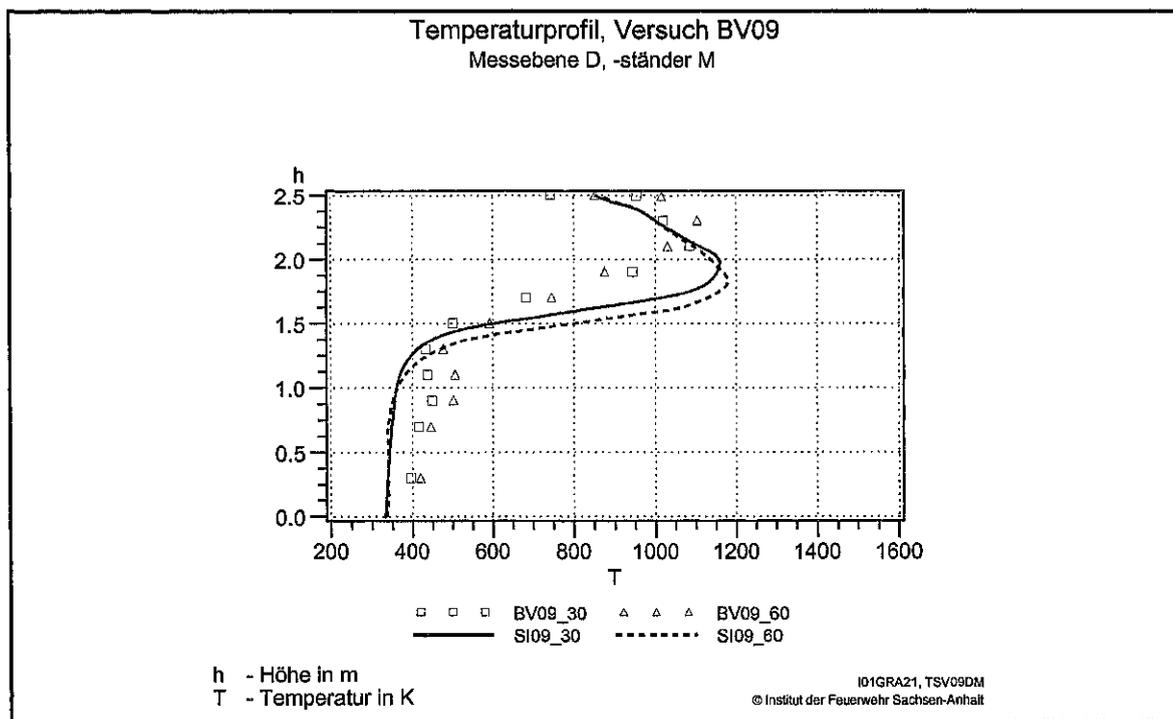


Bild 5.7: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer D für den Fall der freien Konvektion

Die Simulationsrechnungen erreichen Maximalwerte von ca. 1200 K, die maximalen gemessenen Temperaturen sind um 50-100 K niedriger. Im unteren Raumbereich, d. h. bis zur Tunnelhöhe von 1,2 m, liegen die berechneten Temperaturen mit max. 350 K um 50-100 K

unter den gemessenen Temperaturen. Danach ist bei den Simulationsrechnungen ein größerer Anstieg des Temperaturprofils zu verzeichnen als beim Brandversuch. Die Simulation zeigt eine Temperaturschichtung mit einem Maximum, das sich in geringerer Höhe als bei den Experimenten befindet. Die Maxima in den Temperaturprofilen, sowohl beim Experiment als auch bei der Simulation, haben dabei nur eine geringe Ausdehnung über die Höhe und nehmen in Richtung Tunneldecke schnell wieder ab. Vergleicht man die berechneten Temperaturprofile zu den verschiedenen Zeiten, so wird nach 60 s eine geringfügig höhere Temperatur (Temperaturdifferenz von 50 K) als nach 30 s verzeichnet und die Heißgasschicht erstreckt sich zum weiter fortgeschrittenen Zeitpunkt ebenfalls weiter nach unten, wie es auch die experimentellen Werte widerspiegeln.

Der Vergleich der Temperaturprofile am Ständer AII, dem Ständer, der in Mitte des Tunnelquerschnitts in 9 m Entfernung von der Brandwanne (lüfterseitig) angeordnet war, zeigt in Bild 5.8 für die Simulation ein deutlich flacheres Profil als bei den gemessenen Temperaturen.

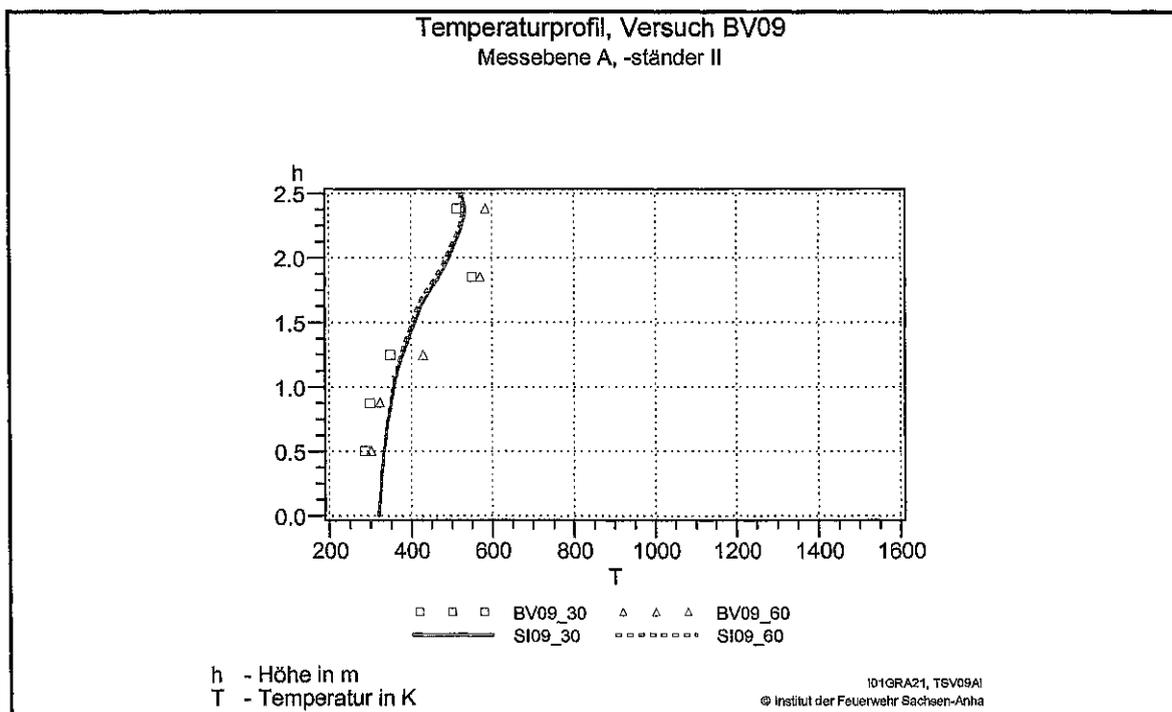


Bild 5.8: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer AII für den Fall der freien Konvektion

Die Simulationsrechnung ergibt für beide Zeitpunkte nahezu gleiche Profile mit Maximalwerten der Temperatur von ca. 530 K. Nach 30 s ist noch eine gute

Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation zu verzeichnen. Zum späteren Zeitpunkt, nach 60 s, zeigen die Messungen ausgeprägtere Profile mit maximalen Temperaturen von ca. 590 K. Die bei den Experimenten zu registrierende stärkere Temperaturschichtung mit fortschreitender Zeit wird von den Simulationen nicht wiedergegeben. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen liegen im Bereich von 50 bis 100 K. Die Höhe, in der eine Schichtung anhand der Profile erkennbar ist, lässt sich anhand des Experiments als auch der Rechnung übereinstimmend mit ca. 1,3 m ermitteln.

In Bild 5.9 wurde der Vergleich der Temperaturprofile am Ständer BV vorgenommen, dem im Abstand von 9 m von der Brandwanne (torseitig) und in Querschnittsmitte angeordneten Messständer. Wiederum als durchgezogene Linie sind die berechneten Temperaturen nach 30 s, mit der gestrichelt gezeichneten Linie die Werte der Rechnung nach 60 s dargestellt.

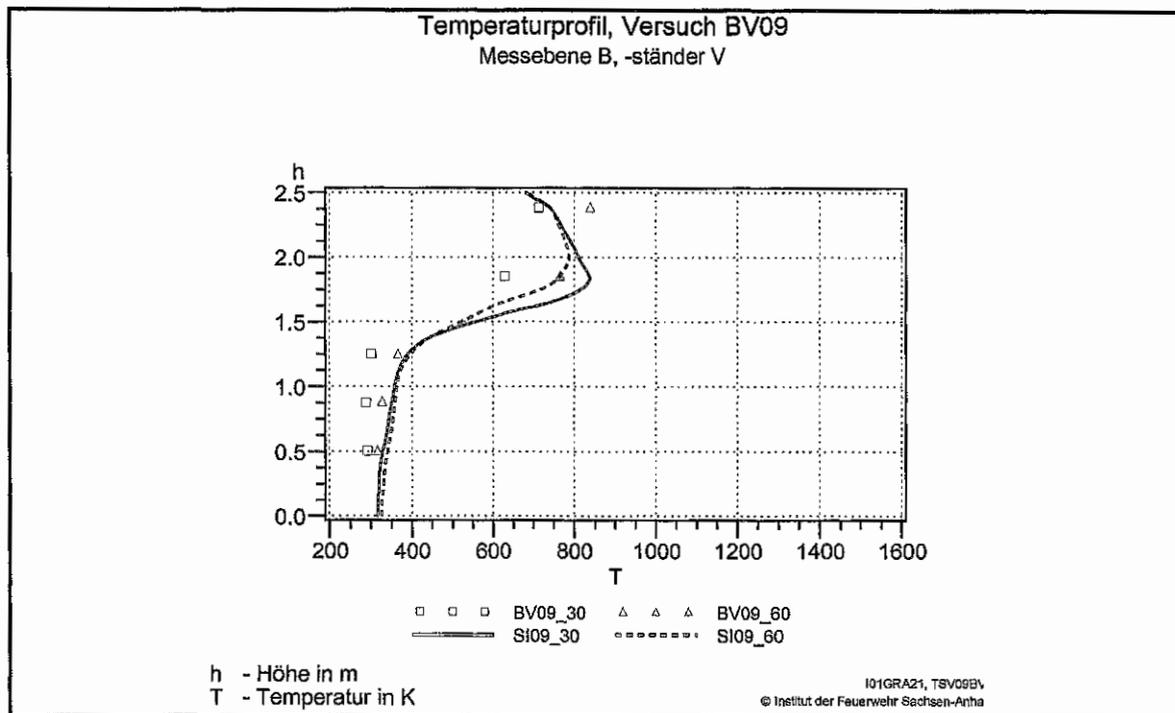


Bild 5.9 : Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer BV für den Fall der freien Konvektion

Das zeitliche Verhalten der Temperatur, wie es sich in den Versuchen zeigt, d. h. die Profile werden mit zunehmender Dauer in Deckennähe fülliger bei steigender Maximaltemperatur, wird von den Simulationsrechnungen nicht ausreichend realisiert. Die berechneten Temperaturprofile sind durch einen Verlauf mit einem Maximalwert in der Höhe von

ca. 1,8 m und 2 m gekennzeichnet. Zur Tunneldecke hin fällt die Temperatur wieder ab. Die anhand von 5 Messstellen ermittelten Temperaturprofile zeigen dagegen eine Temperaturschichtung mit zur Decke hin anwachsenden Temperaturen. Das Temperaturprofil aus den Rechnungen nach 30 s zeigt Abweichungen in der Temperatur von 200 K, wogegen das Profil nach 60 s in der Höhe der max. Temperatur eine Abweichung von max. 50 K, d. h. 5 % in Bezug auf den gemessenen Maximalwert von 850 K ausweist. Die Höhe, in der eine Schichtung anhand der Profile erkennbar ist, lässt sich wie auch bei den Ständern AII und D anhand des Experiments als auch der Rechnung mit 1,3 m ermitteln.

Die Geschwindigkeitsprofile am Ständer BV aus Simulation und Messung, dargestellt in Bild 5.10, zeigen übereinstimmend eine ausgeprägte Schichtung der Geschwindigkeit mit zur Tunneldecke hin stark ansteigenden Geschwindigkeiten.

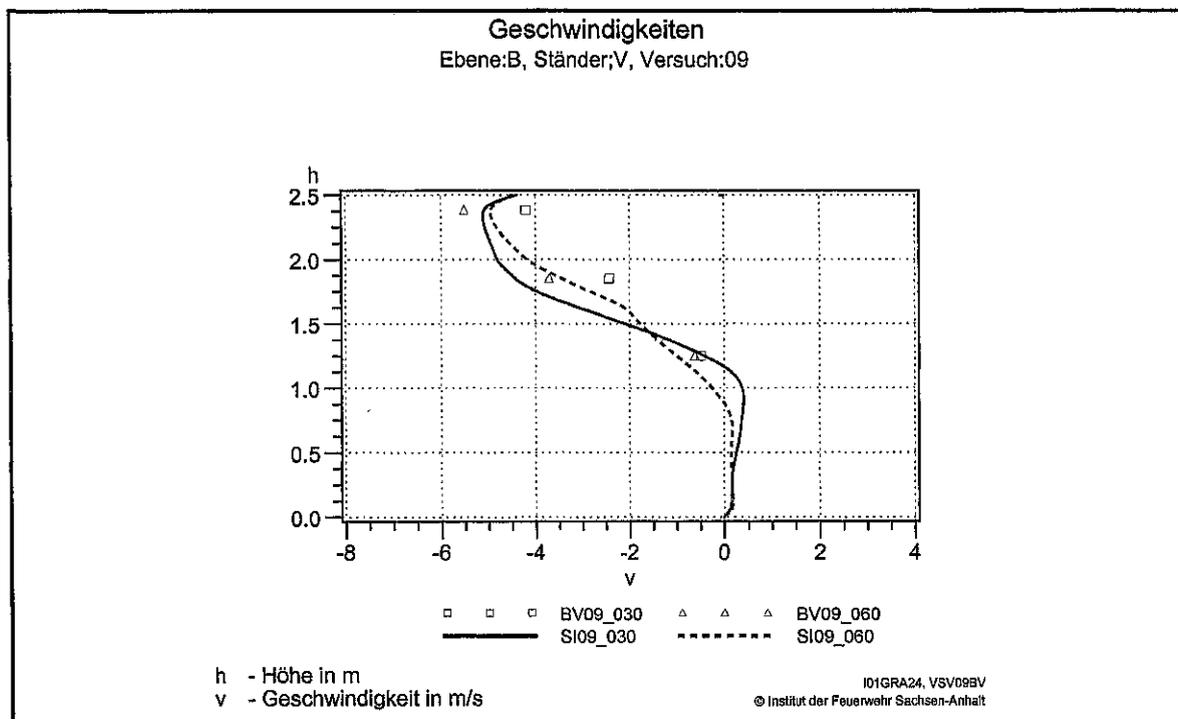


Bild 5.10: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Geschwindigkeit am Ständer BV für den Fall der freien Konvektion

Nach 30 s Versuchsdauer zeigen Berechnungs- und Messwerte große Abweichungen. Die Simulationenwerte nach 30 s liegen höher als die Messwerte. Der Vergleich von Mess- und Berechnungswert nach 60 s zeigt dann wieder eine sehr gute Übereinstimmung in Profilform und Größe der Geschwindigkeit, die um 10 % vom Maximalwert der Geschwindigkeit differiert.

Abdrängen der Plume in Richtung des Abgasschlotes (negative x-Richtung) dokumentiert. Dass die Abdrängung der Plume im realen Brandversuch nur geringe Ausmaße annimmt, zeigt die fast symmetrische Messwertverteilung in den beiden unteren Darstellungen. Dadurch werden in der Messfläche insgesamt höhere Temperaturen wirksam als bei den Berechnungen. Das Abdrängen der Plume weist hinsichtlich der gewählten Randbedingungen für die Simulationsrechnung auf eine zu starke Beeinflussung durch die simulierten Ventilationsbedingungen hin (Pressure-Inlet und Pressure-Outlet). Die Modellierung einer zu starken Seitenströmung ist vermutlich eine Ursache für die vom Experiment abweichende Profilform bei den Temperaturen, die ein Maximum in mittlerer Raumhöhe anstatt an der Decke zeigen (vgl. Bilder 5.7 und 5.9).

Dies wird auch durch die in der Ebene C gemessenen und berechneten Geschwindigkeiten gezeigt, die in Bild 5.12 dargestellt sind.

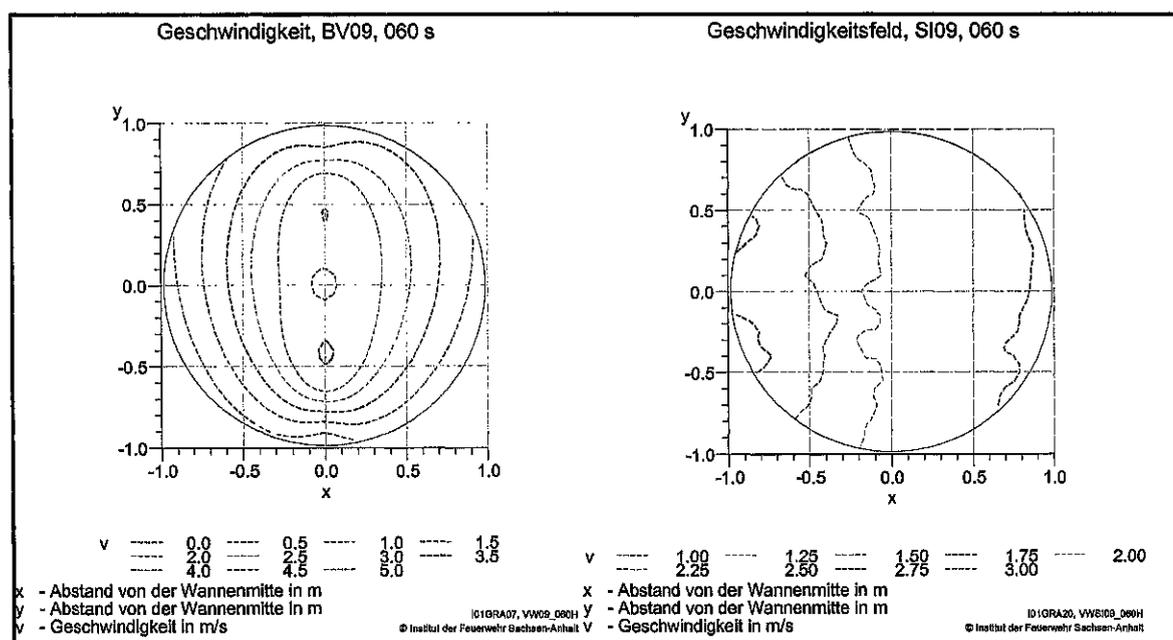


Bild 5.12: Gemessene (links) und berechnete Geschwindigkeit in der Messebene C nach 60 s für die Simulation des Brandes bei freier Konvektion

Der Vergleich von Versuch und Simulation wird in Bild 5.13 anhand von Geschwindigkeitsverteilungen nach 60 s Branddauer über die beiden Mittelachsen der Messebene vorgenommen. Bei den Berechnungswerten wurden neben der resultierenden Geschwindigkeit auch die Komponenten dargestellt, um die Strömungsrichtung zu verdeutlichen. In Bild 5.13 ist zur Orientierung eine Skizze der Messfläche mit der Anordnung der bidirektionalen Sonden, an denen die Messwerte erfasst wurden, gezeigt.

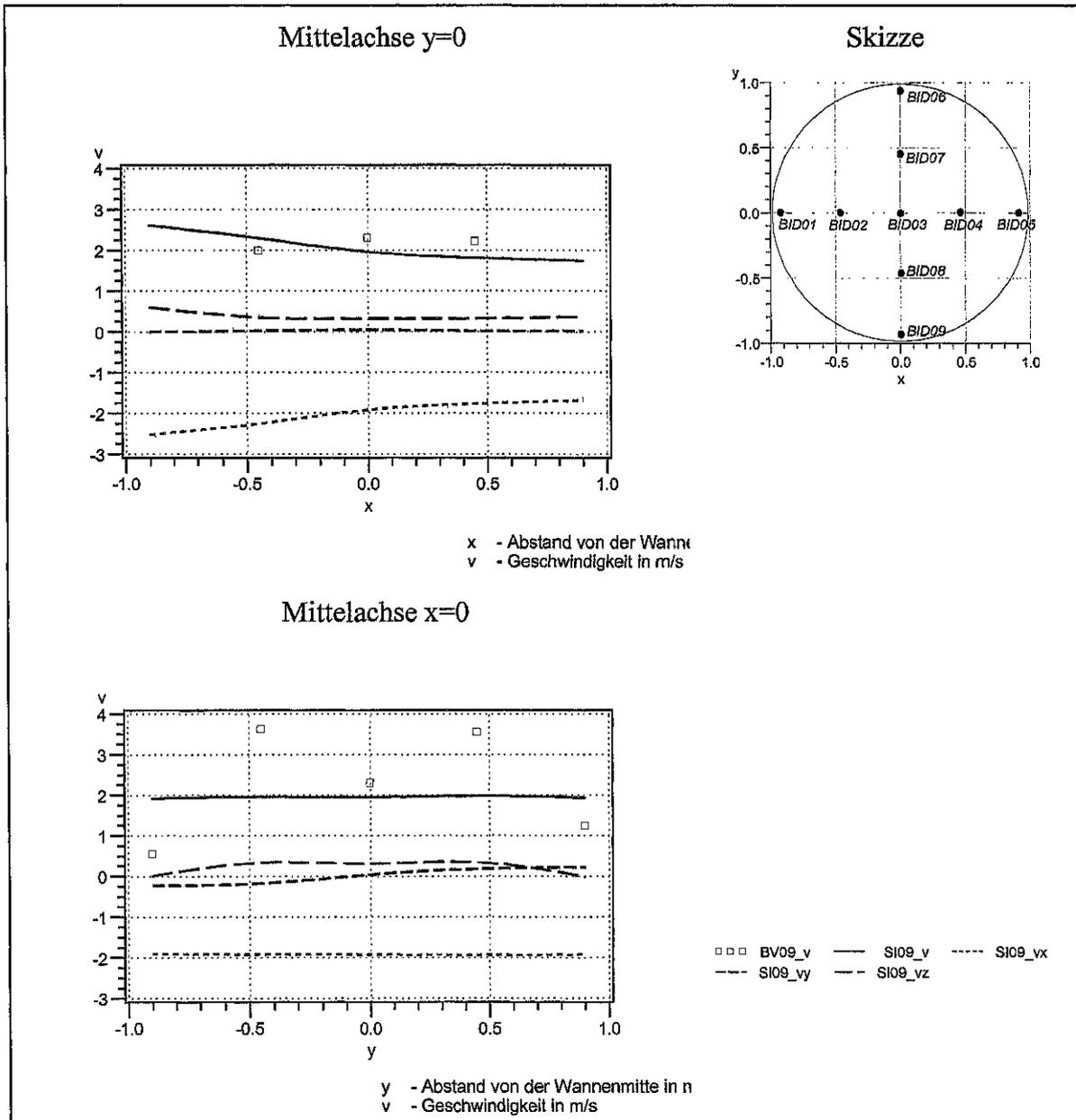


Bild 5.13: Vergleich von Simulationsrechnung (SI09) und Messwerten (BV09) für die Geschwindigkeit in Messebene C nach 60 s für den Fall der freien Konvektion

Die berechnete x-Komponente der Geschwindigkeit ist negativ, d. h. die Strömung zeigt in Richtung der negativen x-Koordinate (Torrichtung). Der Betrag der x-Komponente ist in Torrichtung am höchsten. Die beiden anderen Geschwindigkeitskomponenten haben im Vergleich zur x-Komponente nur eine geringe Größe. Damit beschreiben die im Diagramm für den Längsschnitt bei $y = 0$ (obere Abbildung) dargestellten Verläufe der Berechnungswerte ein nach oben und zur Torseite gerichtetes Geschwindigkeitsfeld. Die gemessenen Geschwindigkeiten im Längsschnitt stimmen bei Abweichungen von ca. 10 %, ...

bezogen auf den maximalen gemessenen Wert in der Messebene C, gut mit der berechneten resultierenden Geschwindigkeit überein. Die Messwerte, von denen nur die an den Sonden BID2, BID3 und BID4 verfügbar sind, zeigen eine Verteilung mit einem Maximum in der Mitte. Eine Neigung des Geschwindigkeitsfeldes ist anhand der Messwerte nicht erkennbar.

Über den Querschnitt bei $x = 0$ (untere Abbildung) wird bei den Berechnungswerten für die Komponenten der Geschwindigkeit eine symmetrische, für den Betrag der Resultierenden eine fast konstante Verteilung ermittelt. Neben einer gering in z-Richtung (nach oben) und jeweils zum Brandwannenrand nach außen gerichteten y-Komponente nimmt die in Richtung des Abgasschlotes orientierte x-Komponente den größten Anteil an und bestimmt die Richtung der Strömung. Die Messwerte im Querschnitt bei $x = 0$ weisen Abweichungen bis zu 40 % von den berechneten Geschwindigkeiten auf. Ein Vergleich der berechneten Werte der x-Komponente und der resultierenden Geschwindigkeit zeigt, dass an allen Messpunkten (BID1 bis BID9) die resultierende Geschwindigkeit im Wesentlichen von der x-Komponente bestimmt wird (vgl. Tabelle 5.1). Das heißt, dass ein stark in negative x-Richtung geneigtes Geschwindigkeitsfeld berechnet wird. Die Messwerte spiegeln dieses Verhalten nicht wider.

Tabelle 5.1: Gemessene und berechnete Geschwindigkeiten nach 60 s an ausgewählten Messtellen für den Fall der freien Konvektion

BV09/SI09		Berechnungsgröße an der Messstelle			
Messstelle	Messwert in m s^{-1}	Resultierende Geschwindigkeit in m s^{-1}	x- Komponente in m s^{-1}	y- Komponente in m s^{-1}	z- Komponente in m s^{-1}
BID1	NaN	2,60	-2,53	-0,01	0,59
BID2	1,98	2,29	-2,26	0,02	0,34
BID3	2,29	1,95	-1,93	0,04	0,31
BID4	2,21	1,80	-1,77	0,01	0,32
BID5	NaN	1,73	-1,69	0,01	0,36
BID6	1,24	1,94	-1,92	0,22	-0,02
BID7	3,55	1,98	-1,94	0,18	0,34
BID8	3,63	1,96	-1,92	-0,17	0,34
BID9	0,55	1,92	-1,91	-0,22	0,00

5.2.2 Vergleiche bei erzwungener Konvektion

Das Bild 5.14 zeigt den Vergleich der Temperaturprofile aus Simulation und Versuch am Ständer D für den Brand bei erzwungener Konvektion. Die berechneten Temperaturen nach 30 s zeigen eine weit zum Boden ausgedehnte Heißgaszone, die von den gemessenen Werten stark abweicht und dabei einen größeren Bereich umfasst als die zum späteren Zeitpunkt berechnete Heißgaszone. Die berechneten Profile spiegeln das in den Experimenten festgestellte Zeitverhalten sowie die Form der Temperaturschichtung nicht korrekt wieder. Nach 30 s sind die größten Abweichungen vorhanden, hier werden zu hohe Belastungen ermittelt. Nach 60 s werden zwar größtenteils in der Maximaltemperatur von 1200 K gute Übereinstimmungen erzielt, jedoch weicht die Form des berechneten Profils deutlich vom Messprofil ab.

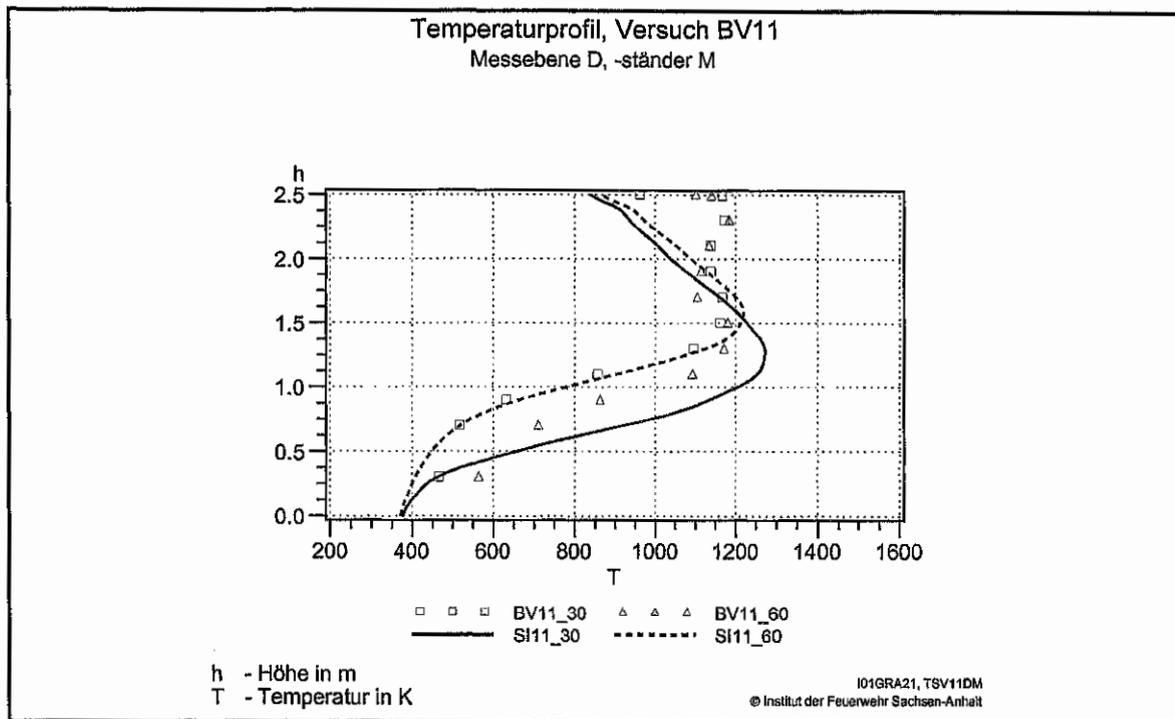


Bild 5.14: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer D für den Fall der erzwungenen Konvektion

Die Messungen zeigen eine Schichtung, die durch eine nahezu gleichbleibende Temperatur von 1100-1200 K gekennzeichnet ist und sich von der Höhe von 1 m bis zur Brandkanaldecke erstreckt. Die Simulation unterscheidet sich davon durch ein ausgeprägtes Maximum in mittlerer Höhe und danach zur Decke hin abfallender Temperatur.

Auch die in Bild 5.15 gezeigten Profile am Ständer AII verdeutlichen Unterschiede zwischen Modellierung und Versuch. Der Versuch dokumentiert eine konstante Temperatur über die Höhe im Bereich der Raumtemperatur, die Simulation weist bereits eine geringe Temperaturschichtung infolge des Abtransports und der Zirkulation heißer Gase aus der Brandzone entgegen der Zuluftströmung aus („backlayering“).

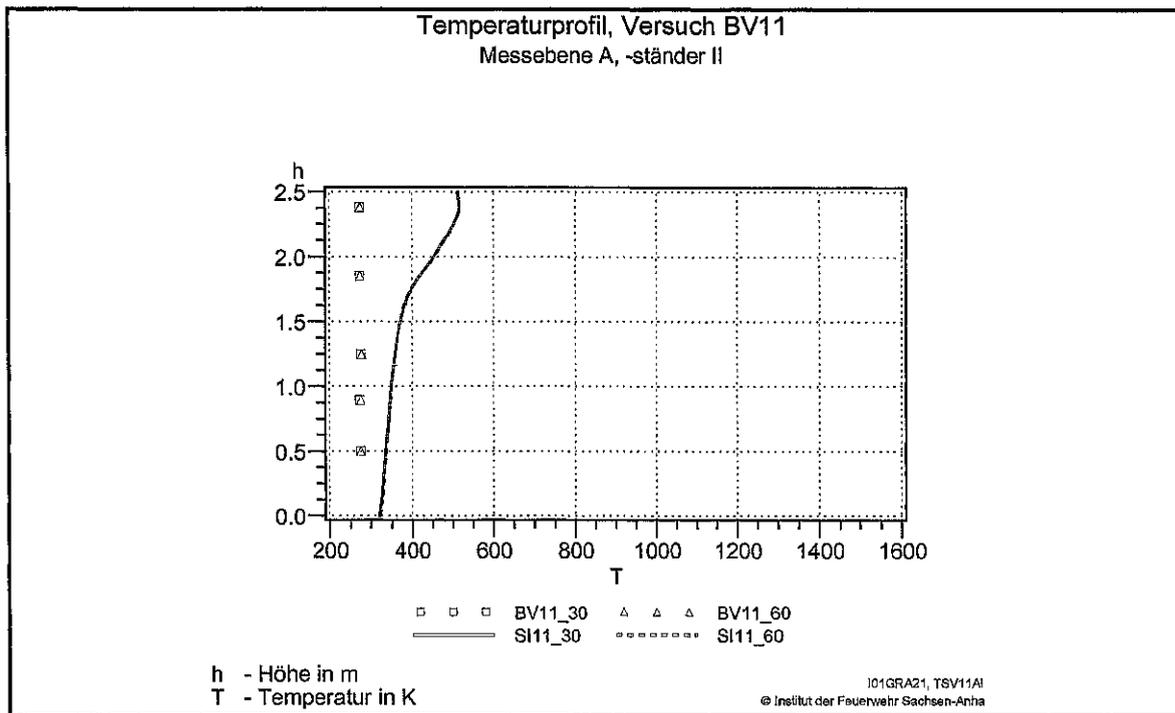


Bild 5.15: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer AII für den Fall der erzwungenen Konvektion

Im Bild 5.16, beim Vergleich der Temperaturverteilungen über die Höhe am Ständer BV, werden ähnliche Verhältnisse widerspiegelt wie bereits am Ständer D beobachtet. Nach 30 s wird eine die Messungen weit überschreitende Temperatur (Differenz von 300 K im oberen Raumbereich) ermittelt. Die Rechnung zum späteren Zeitpunkt, nach 60 s, erfasst die stark ausgeprägte Temperaturschichtung gar nicht und weist damit im unteren Raumbereich deutlich zu geringe Temperaturen aus.

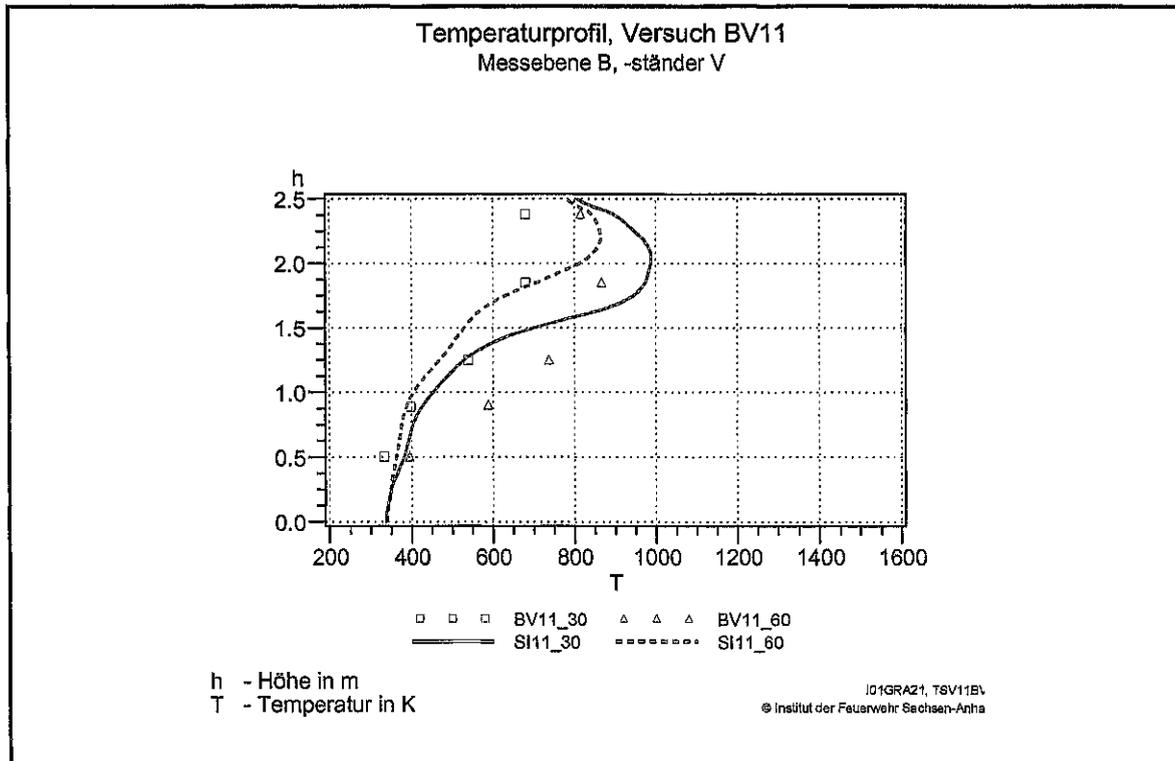


Bild 5.16: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur am Ständer BV für den Fall der erzwungenen Konvektion

Das gemessene und berechnete Geschwindigkeitsprofil am Ständer BV für das Szenario des Brandes unter Zwangsventilation ist im Bild 5.17 gegenübergestellt. Während nach 30 s Simulation und Rechnung um max. 1 m s^{-1} voneinander abweichen, was einem Fehler von ca. 15 % bezogen auf die Maximalgeschwindigkeit entspricht, werden die nach 60 s gemessenen Geschwindigkeitsprofile mit Maximalwerten von 7 m s^{-1} durch die Rechnung nicht wiedergegeben.

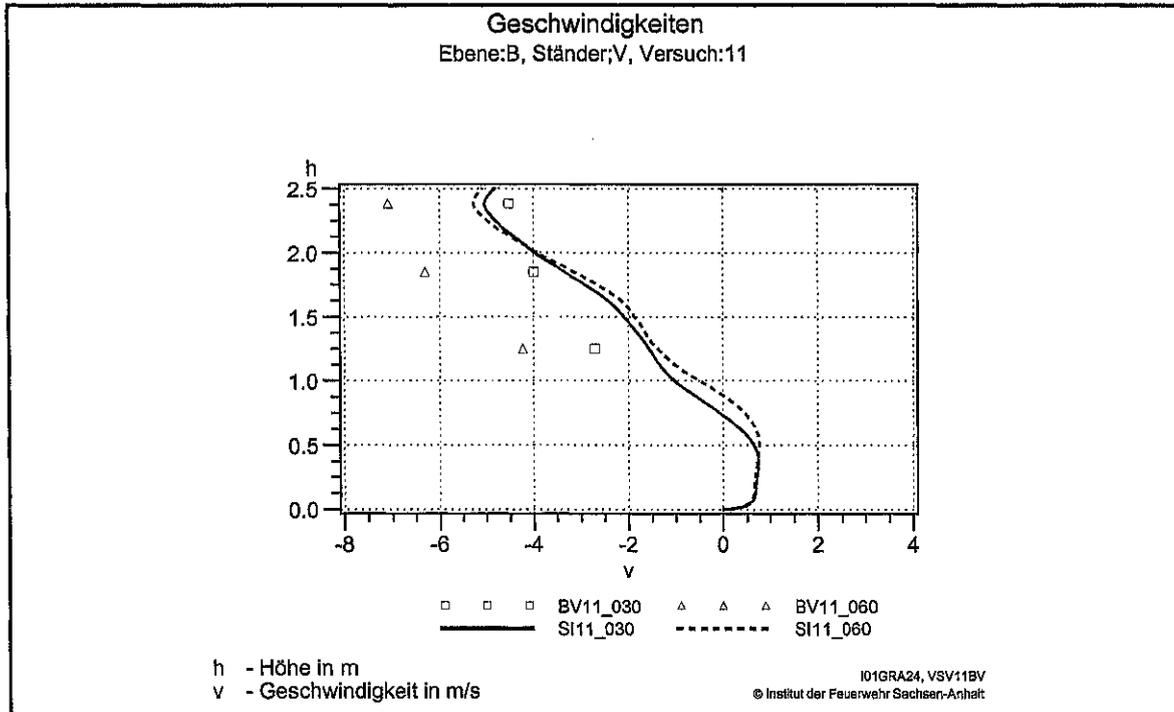


Bild 5.17: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Geschwindigkeit am Ständer BV für den Fall der erzwungenen Konvektion

Die Temperaturverteilungen in Messebene C aus Versuch und Rechnung für den Fall des Brandes bei erzwungener Konvektion (definierter Seitenwind) nach 60 s Branddauer sind anhand von Isothermen in Bild 5.18 gegenübergestellt. Die beiden oberen Abbildungen zeigen die Simulationsergebnisse, darunter sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Sowohl bei der Rechnung als auch bei der Simulation ist eine Verdrängung der Plume in Richtung des Abgasschlotes aus der asymmetrischen Temperaturverteilung zu erkennen. Der Versuch weist höhere Temperaturen in der Messfläche auf, was z. B. anhand der Isolinien für die Temperatur von 400 K und die Temperatur von 500 K sichtbar wird. Das deutet darauf hin, dass in der Simulationsrechnung das Isothermenfeld stärker in Richtung Tor verschoben ist, als es im Versuch tatsächlich der Fall ist.

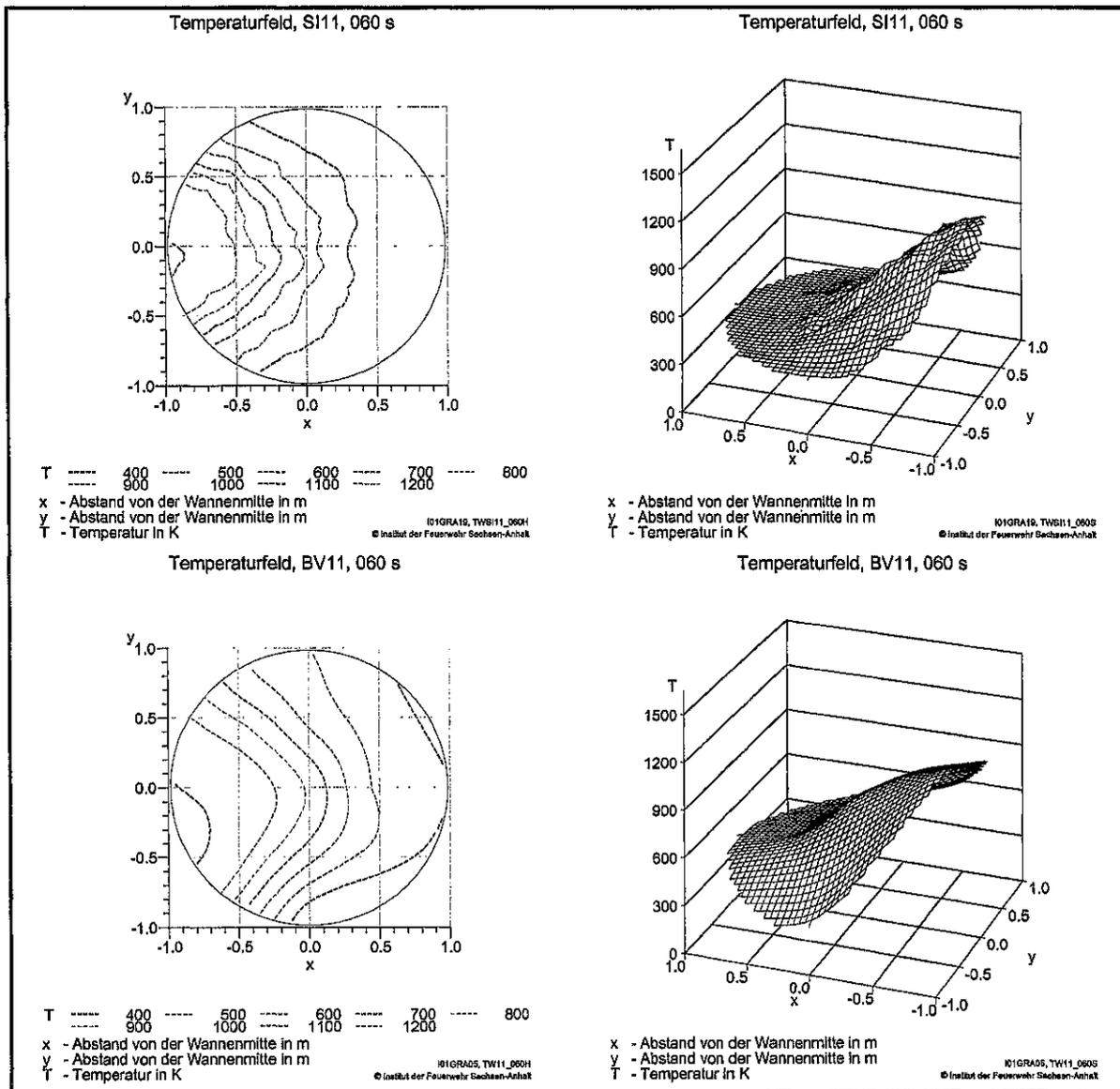


Bild 5.18: Vergleich von Simulationsrechnung und Messwerten für die Temperatur in Messebene C nach 60 s für den Fall der erzwungenen Konvektion

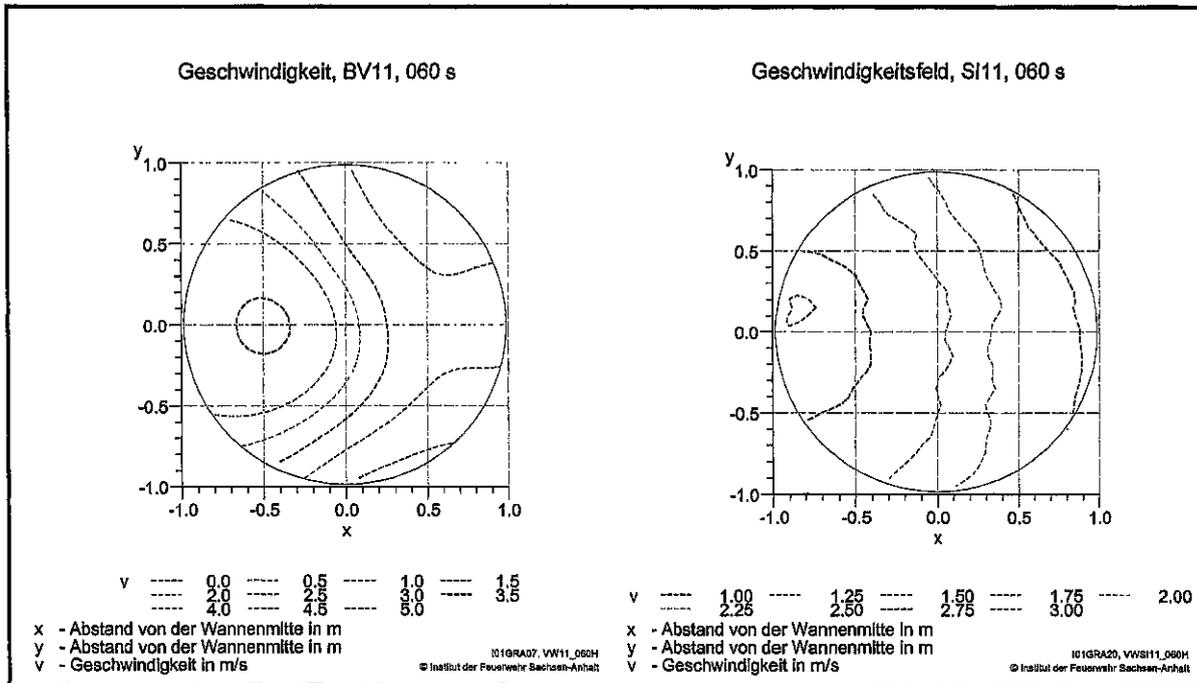


Bild 5.19: Gemessene (links) und berechnete (rechts) Geschwindigkeit in Messebene C nach 60 s für den Fall der erzwungenen Konvektion

In Bild 5.19 wurde eine Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Messebene C anhand der Isotachen für die Mess- und Berechnungswerte vorgenommen. Der Messung liegen insgesamt 7 verwertbare Messsignale zugrunde. In den Simulationsrechnung werden die Geschwindigkeiten an 353 Punkten entsprechend der Vernetzung in der Ebene ermittelt. Zum Vergleich wird der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit verwendet. Sowohl Berechnung als auch Versuch zeigen eine zur x-Achse asymmetrische Verteilung mit Verschiebung der Maxima in Richtung negativer x-Koordinate (Torrichtung). Die Messwerte liegen größtenteils im Bereich von 0,7 bis 3,7 m s^{-1} , die Berechnungen ergeben Geschwindigkeiten zwischen 1,5 und 3 m s^{-1} und liegen damit im Bereich der Messungen.

Detailliertere Vergleiche der einzelnen Messwerte mit den Berechnungen sind in Bild 5.20 anhand von Geschwindigkeitsverteilungen über die Mittelachsen der Messebene C möglich. Der in der oberen Abbildung dargestellte Längsschnitt ($y = 0$) zeigt für die Berechnung eine resultierende Geschwindigkeit, die in Richtung der negativen x-Achse ansteigt. Dabei ist die x-Komponente der Geschwindigkeit dominierend. Das negative Vorzeichen spiegelt die Ablenkung der Strömung in Richtung des Tores wider. Die Messwerte in Längsrichtung zeigen diese Ablenkung noch verstärkt. In Richtung des Tores liegen die Messwerte über den

Berechnungen, zur abgewandten Seite darunter. Die Abweichungen betragen bis zu 25 % (BID2) bezogen auf den maximalen gemessenen Wert.

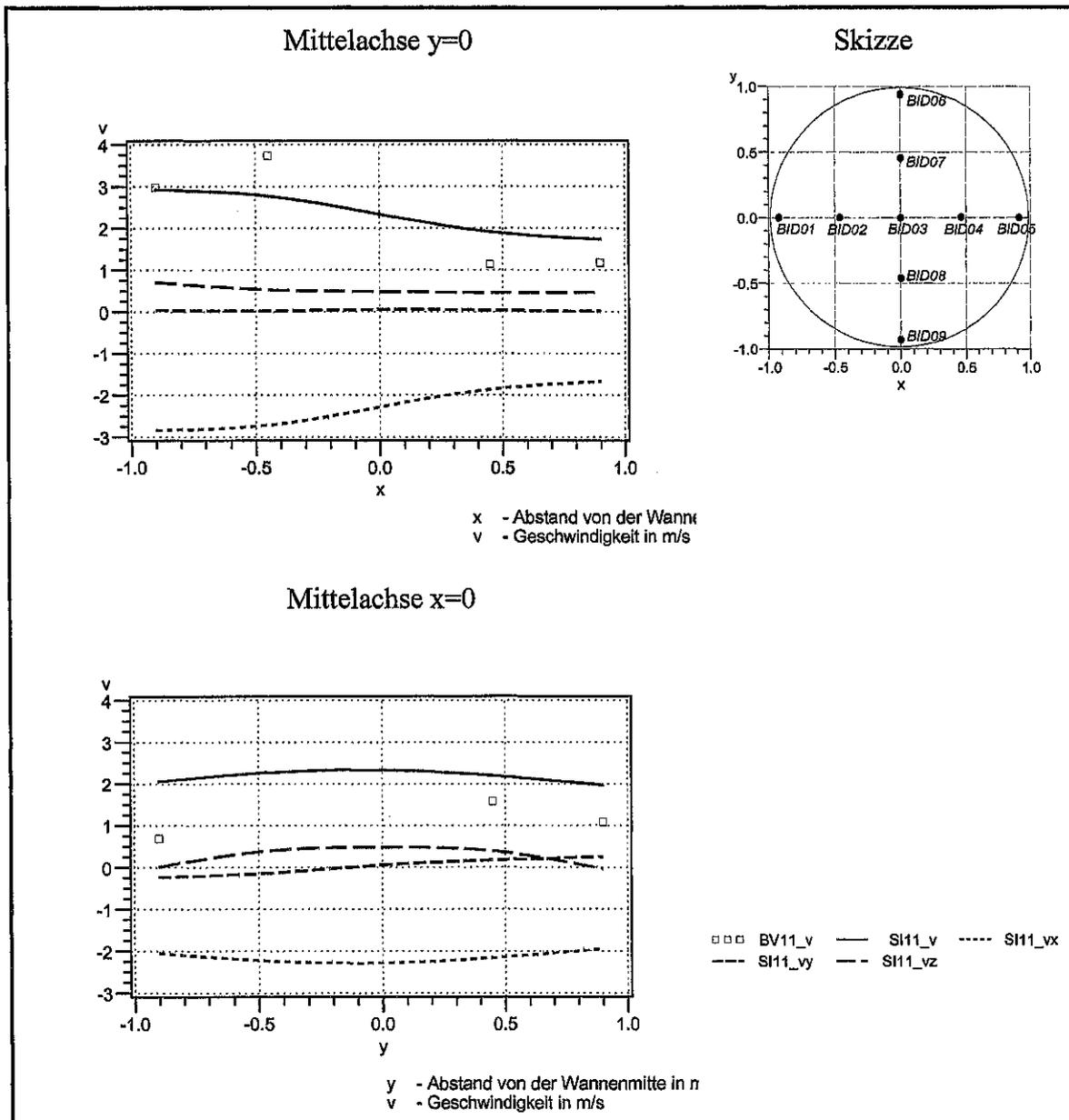


Bild 5.20: Vergleich von Simulationsrechnung (SI11) und Messwerten (BV11) für die Geschwindigkeit in Messebene C nach 60 s für den Fall der erzwungenen Konvektion

Der Querschnitt in der unteren Abbildung aus Bild 5.20 zeigt für die berechneten Geschwindigkeiten symmetrische Verteilungen. Die gemessenen Werte liegen dabei unter den Berechnungswerten für die resultierende Geschwindigkeit. Die Abweichungen betragen 25 bis 35 % bezogen auf den max. Messwert.

5.2.3 Vergleich berechneter Konzentrationen mit den Messwerten

Zur Messung der Gaskonzentrationen wurde eine Dreifachsonde verwendet (vgl. Abschnitt 3.2.5), deren Probesonde im Rauchgasstrom in der Höhe von 2,3 m in Tunnelmitte und in 5,75 m Entfernung von der Brandwannenmitte angebracht wurde (vgl. Messanordnung in Bild 3.5). Mit der Dreifachsonde werden Konzentrationen von O₂, CO₂ und CO an einem Punkt erfasst. Aus der Simulation werden die in Tunnelmitte und in der Brandwannenentfernung von 5,75 m berechneten Konzentrationsprofile für O₂ und CO₂ verwendet und den O₂- und CO₂-Messwerten gegenübergestellt. Im Gegensatz zum Simulationsmodell, das für die Reaktion eine vollständige Verbrennung des Heptan in die Reaktionsprodukte H₂O und CO₂ voraussetzt, werden bei den Messungen auch CO-Anteile erfasst und die Gasanalyse wird am trockenen Gas durchgeführt. Um dennoch die Ergebnisse vergleichen zu können, wurden die Messwerte nachträglich umgerechnet. Diese Umrechnung [Pless 03] erfolgte unter der Annahme, dass die CO-Anteile mit Sauerstoff ebenfalls zu CO₂ verbrennen und bei der Verbrennung Wasserdampf entsteht, entsprechend der für das Simulationsmodell zugrundegelegten Reaktionsgleichung.

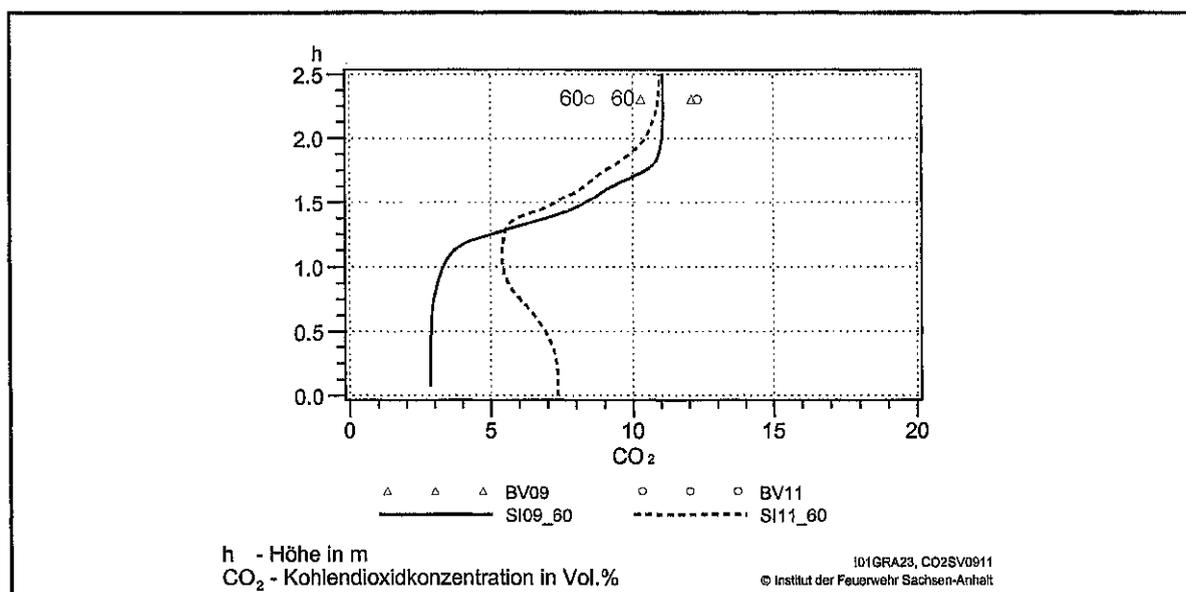


Bild 5.21: Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Volumenkonzentrationen an CO₂ für den Fall der freien (rot) und der erzwungenen (grün) Konvektion

In Bild 5.21 sind für den Fall der freien und der erzwungenen Konvektion die nach 60 s berechneten CO₂-Konzentrationsprofile als Kurven und Messwerte zu verschiedenen Zeiten als Punkte dargestellt. Der nach 60 s gemessene Wert ist durch die Zahl 60 markiert. Als

zusätzliche Messwerte (nicht markierte Symbole) wurden die in der Phase des Vollbrandes ermittelten Konzentrationen in die Diagramme eingefügt. Eine analoge Darstellung für die gemessenen und berechneten O_2 -Konzentrationen folgt in Bild 5.22.

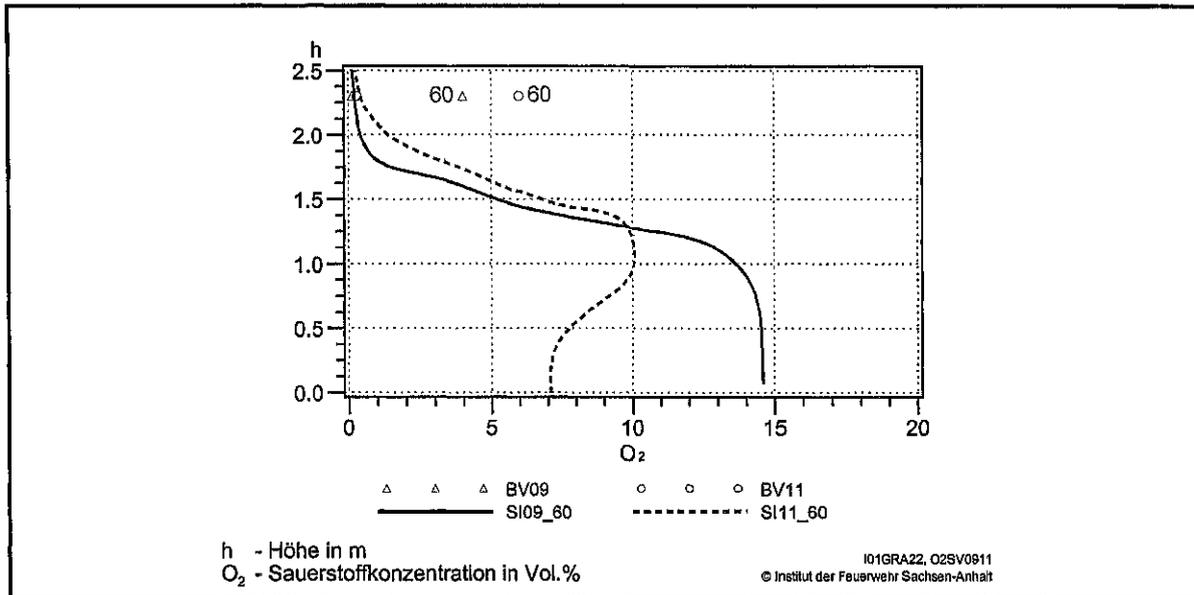


Bild 5.22: Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Volumenkonzentrationen an O_2 für den Fall der freien (rot) und der erzwungenen (grün) Konvektion

Messergebnis und Simulation nach 60 s zeigen deutliche Unterschiede in den Konzentrationen. Insbesondere die O_2 -Volumenkonzentration weist mit dem Messwert von 4 % bei der freien Konvektion (BV09) und 6 % für den Zuluftversuch (BV11) gegenüber der berechneten Konzentration von 0,3 % sehr große Abweichungen auf. Bei den CO_2 -Konzentrationen stehen dem für beide Szenarien ermittelten Berechnungswert von 11,1 % Messwerte von 10,3 % (BV09) und 8,5 % (BV11) nach 60 s gegenüber. Dieser nicht zufriedenstellende Vergleich resultiert aus den Unterschieden in der zeitlichen Änderung der physikalischen Größen beim Realbrand und der Simulation. Bei den Simulationsrechnungen wird bereits nach 30 bis 60 s ein Strömungsfeld berechnet, das sich in weiteren Zeitschritten nur wenig ändert. Aus diesem Grunde sind Simulationsrechnungen nur bis zur Branddauer von 60 s durchgeführt worden. Bei den Versuchen erstreckt sich die Entwicklung des Strömungs-, Temperatur- und Konzentrationsfeldes über einen darüber hinausgehenden Zeitabschnitt. Am Beispiel des Brandversuches BV09, der als Referenzversuch für die Simulation des Brandes bei freier Konvektion dient, ist ein Ansteigen der CO_2 -Konzentrationen und gleichzeitig ein Absinken der O_2 -Konzentrationen über einen Zeitraum von 3-4 min zu beobachten (vgl. auch Bilder 3.37 und 3.39). Die erreichten Maximalwerte

bleiben dann in der Vollbrandphase bis zum Verbrauch des Brandmaterials erhalten. Für den Brandversuch BV11, dem Referenzversuch für den Brand bei erzwungener Konvektion, werden die Maxima bzw. Minima der Konzentrationen früher als beim Brand unter freier Konvektion erreicht. Eine ausgeprägte Plateauphase in den Konzentrations-Zeitverläufen (vgl. Bilder 3.48 und 3.49) fehlt nur aufgrund der geringen Brandmasse von nur 40 l HP. In Tabelle 5.2 sind einige Messwerte (umgerechnet auf vollständige Verbrennung) zur Verdeutlichung der zeitlichen Änderung der CO₂- und O₂-Konzentrationen aufgeführt. Weitere Werte der gemessenen Volumenkonzentrationen für die Brandversuche BV07 bis BV12 sind im Anhang zu finden.

Tabelle 5.2: Gemessene O₂- und CO₂-Volumenkonzentrationen für die Brandversuche BV09 (links) und BV11(rechts)

BV09 SI09	Umgerechneter Messwert		Berechnungswert nach 60 s		BV11 SI11	Umgerechneter Messwert		Berechnungswert nach 60 s		
	t _{Br} in s	CO ₂ in %	O ₂ in %	CO ₂ in %		O ₂ in %	t _{Br} in s	CO ₂ in %	O ₂ in %	CO ₂ in %
	0	0,05	20,94			0	0,09	21,14		
	30	7,70	7,96			30	6,24	9,96		
	60	10,30	3,99	11,08	0,23	60	8,47	5,99	10,9	0,43
	90	10,72	2,45			90	11,22	1,92		
	120	10,70	2,23			110	12,31	0,29		
	150	11,10	2,78			120	11,83	0,00		
	180	12,14	0,14							
	210	12,10	0,17							
	240	11,68	0							
	300	11,57	0							

Die unterlegten Felder zeigen die in der Vollbrandphase gemessenen Konzentrationen. Für den Brandversuch BV09 sind diese Werte nach 180 s Branddauer, bei dem Versuch BV11 bereits nach 110 s erreicht. In beiden Szenarien (erzwungene und freie Strömung) sind die Messwerte nach 60 s noch im Ansteigen (CO₂) bzw. Absinken (O₂) begriffen, während die berechneten Konzentrationsprofile bereits die Endwerte widerspiegeln.

Die Messwerte der CO₂-Konzentration in der Vollbrandphase (nicht markierte Symbole in den Bildern 5.21 und 5.22) sind für beide Szenarien in nahezu gleicher Größe vorhanden (12,1 und 12,3 Volumenprozent) und weichen mit einem Fehler von ca. 10 % von dem berechneten Wert am Messpunkt in der Höhe von 2,3 m ab. Das berechnete Konzentrationsprofil für den Fall der freien Strömung (durchgezogene Linie in Bild 5.21) zeigt eine ausgeprägte Schichtung. Vom Boden bis zur Höhe von 1,1 m ist eine fast konstante CO₂-Konzentration von 3 Volumenprozent vorhanden, die dann bis zur Höhe von 1,7 m auf 11 % ansteigt und bis zur Decke konstant erhalten bleibt. Die Simulation der erzwungenen Strömung zeigt bis zur mittleren Höhe des Tunnels eine deutlich höhere Volumenkonzentration von 5-7 % gegenüber der freien Strömung, wobei die höheren Werte in Bodennähe zu verzeichnen sind. Die O₂-Profile zeigen dazu komplementäre Verteilungen für beide Szenarien. Bei der freien Strömung (durchgezogene Linie in Bild 5.22) werden vom Boden bis zur Tunnelhöhe von 1,1 m konstante Volumenkonzentrationen an O₂ von ca. 15 % ermittelt, die dann zur Tunneldecke hin stark absinken, so dass bereits in der Höhe von 1,7 m weit unter 1 % liegende O₂-Konzentration berechnet werden.

Die in der Phase des Vollbrandes gemessenen O₂-Konzentrationen stimmen sehr gut mit den am Messpunkt berechneten O₂-Konzentrationen überein (vgl. Tabelle 5.2). Dies gilt für die erzwungene und die freie Strömung gleichermaßen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Im einem 34 m langen Brandkanal wurden Brandversuche mit Heptan und Siedegrenzenbenzin durchgeführt. Der größte Teil der Versuche fand ohne zusätzliche Belüftung statt, so dass sich die Strömung infolge der freien Konvektion des Brandes einstellen konnte. Bei zwei Versuchen erfolgte die seitliche Belüftung mittels eines im Brandkanal fest installierten Ventilators, wodurch sich eine erzwungene Strömung ausbildete.

In allen Versuchen wurden Geschwindigkeiten und Temperaturen in verschiedenen Messebenen, Gaskonzentrationen an definierten Messpunkten sowie Masseverlusten des Brandstoffes gemessen. In zwei Versuchen erfolgte zusätzlich die Messung der Gesamtwärmestromdichte an einem Messpunkt.

Die in den Versuchen ohne seitliche Belüftung gemessenen Abbrandgeschwindigkeiten lagen im Bereich von $0,041$ bis $0,048 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, die Maximalgeschwindigkeiten zwischen 6 und 8 m s^{-1} . Anhand der gemessenen Temperaturen war deutlich die Temperaturschichtung erkennbar, wobei Maximaltemperaturen von ca. 1200 K auftraten.

In Brandversuchen mit Seitenlüftung (erzwungene Konvektion) wurden mit $0,065$ und $0,066 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ höhere Abbrandgeschwindigkeiten erzielt als in den Versuchen mit natürlicher Belüftung. Die Maximaltemperaturen erreichten mit ca. 1300 K leicht höhere Werte und es konnten maximale Geschwindigkeiten im Bereich von ca. $11-12 \text{ m s}^{-1}$ lokal registriert werden. Bei den Brandversuchen mit Seitenlüftung waren Temperaturschichtungen über die Tunnelhöhe vorhanden, die sich weiter nach unten erstrecken als in den Versuchen ohne Seitenlüftung.

Ein Einfluss der verschiedenen Brandstoffe (Heptan und Siedegrenzenbenzin) auf das Abbrandverhalten war anhand der gemessenen Temperaturen, Geschwindigkeiten und Abbrandraten nicht erkennbar. In den Brandversuchen ohne Zwangsbelüftung wurde die Gesamtwärmestromdichte gemessen. Die Maximalwerte betragen ca. $4,5 \text{ W cm}^{-2}$.

Die Konzentrationsmessungen der Gase ergaben für die Versuche mit freier Konvektion einen Volumenanteil von 12% CO_2 und $1,9 \%$ CO sowie einen vernachlässigbaren Volumenanteil an O_2 im Bereich von $0,1$ bis $0,2 \%$. Bei den Versuchen mit Seitenlüftung waren die Messwerte für den Volumenanteil an CO mit $1,5$ und $1,7 \%$ nur geringfügig kleiner als bei den Versuchen ohne Seitenlüftung.

Es wurden Simulationsrechnungen mit dem Programmsystem FLUENT durchgeführt.

In vorbereitenden Berechnungen für einen Brandkanalabschnitt erfolgte die Untersuchung der Unabhängigkeit der numerischen Lösung von der Zeit- und Ortsdiskretisierung für die Simulation der freien und der erzwungenen Konvektion. Eine Zeitschritunabhängigkeit und Gitterunabhängigkeit, überprüft anhand von berechneten Temperaturen und Geschwindigkeiten, konnte ab Simulationszeiten von 15 s mit Abweichungen von ca. 10 % gezeigt werden.

Begleitend zu den Brandversuchen wurden Simulationsrechnungen für den Brand ohne Seitenbelüftung sowie den Brand bei vorgegebener Seitenströmung durchgeführt. Die Definition der Randbedingungen erfolgte anhand der in den Brandversuchen gemessenen Größen (Abbrandgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit der Gase im Messquerschnitt der Zuluftebene).

Die Simulationsrechnungen wurden über eine Branddauer von 60 s durchgeführt. In beiden Simulationsrechnungen waren zu diesem Zeitpunkt Verteilungen der Geschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen der Brandgase zu verzeichnen, die sich in den weiteren Zeitschritten nur noch unwesentlich änderten. Für den Fall der erzwungenen Konvektion war dieses Verhalten bereits nach ca. 30 s zu beobachten.

Der Vergleich von Simulationsrechnung und Brandversuch wurde für zwei verschiedene Zeitpunkte vorgenommen, nach 30 s und nach 60 s. Für den Fall der freien Konvektion zeigte der Vergleich der vertikalen Temperaturprofile eine gute Übereinstimmung zwischen Messwert und Berechnungswert mit Abweichungen von ca. 10 %. Die Höhe der Schichtung betrug bei Experiment und Rechnung ca. 1,3 m. Der Vergleich des berechneten und gemessenen Geschwindigkeitsprofils am torseitig angeordneten Messständer wies eine übereinstimmende Profilform auf. Die Abweichungen der Geschwindigkeit nach 60 s betragen ca. 10 %.

Gemessene Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen in der horizontalen Messebene über der Brandwanne zeigten für den Fall der freien Konvektion eine symmetrische Verteilung, wogegen bei den berechneten Verteilungen eine Verschiebung in Richtung der Hauptströmungsrichtung vorhanden war. Bei der Simulation der freien Strömung wurde ein in Richtung des Tores geneigtes Geschwindigkeits- und Temperaturfeld ermittelt.

Im Fall der erzwungenen Konvektion wiesen die nach 30 s berechneten Temperaturprofile auf

der Torseite weiter zum Boden ausgedehnte Temperaturschichtungen (Ständer D) auf als zum späteren Zeitpunkt. Der Vergleich berechneter und gemessener Temperaturprofile ergab eine unterschiedliche Profilform, wobei nach 60 s eine Übereinstimmung im Maximalwert der Temperatur festzustellen war.

Das vertikale Geschwindigkeitsprofil auf der Abluftseite lieferte bei den Berechnungen nahezu gleiche Geschwindigkeiten nach 30 und 60 s. Bei den Messwerten war eine zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeiten zu verzeichnen, d. h. zum späteren Zeitpunkt waren ausgeprägtere Profile bei höherer Deckengeschwindigkeit vorhanden. Eine Übereinstimmung der Profile konnte nur nach 30 s beobachtet werden, zum späteren Zeitpunkt waren die Messwerte deutlich größer.

Die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen in der Messebene über der Brandwanne zeigten qualitativ eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Beide Verteilungen waren asymmetrisch und in Richtung der Seitenströmung verschoben. Mittlere Geschwindigkeiten und Temperaturen in der Messebene über der Brandwanne lagen bei Simulation und Versuch in der gleichen Größenordnung.

Der Vergleich der maximalen Gaskonzentrationen am Messpunkt, zeigte für die berechneten und gemessenen CO₂-Konzentrationen Abweichungen bis zu 10 % vom Maximalwert. Die O₂-Konzentrationen lagen für Berechnung und Messung im Bereich von 0,14 bis 0,43 Volumenprozent bei einer Ausgangskonzentration von 21 %.

Der Vergleich von Simulation und Experiment für die freie Strömung wies eine bessere Übereinstimmung in den vertikalen Profilen der Geschwindigkeit und Temperatur auf. In der horizontalen Messebene über der Brandwanne war dies nicht der Fall.

Der Vergleich für die erzwungene Strömung ergab für die vertikalen Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile teilweise ungenügende Übereinstimmungen in Form und Zeitverhalten. Die Temperatur- und geschwindigkeitsverteilungen in der Messebene über der Brandwanne stimmten gut überein.

Zum Erreichen einer besseren Übereinstimmung von Experiment und Simulation ist die Modellierung an den Rändern des Berechnungsgebietes durch eine genauere Anpassung der Randbedingungen für die Geschwindigkeit und den Druck in den Belüftungsquerschnitten zu verbessern. Dazu ist es notwendig, die Zu- und Abluftbedingungen im Experiment an zusätzlichen Messstellen zu erfassen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit den Ergebnissen des ersten Teils des Forschungsvorhabens die experimentellen und numerischen Grundlagen für den zweiten Teil des Vorhabens geschaffen wurden. Die experimentelle Anordnung hat sich als geeignet erwiesen, Messdaten für Poolbrände in Tunnelbauten zu gewinnen. Es wurde ein Datenpool geschaffen, der als Grundlage zur Verifizierung von Brandsimulationsprogrammen dienen kann. Dieser Datenpool ist im zweiten Teil des Forschungsvorhabens zu erweitern.

LITERATUR

[AHLBORN1]

Flügelrad-Anemometer Typ 9915 S1, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH,
Holzkirchen

[AHLBORN2]

Staurohr nach Prandtl Typ FD 9912-97 T, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik
GmbH, Holzkirchen

[Albring 78]

Albring, W.: Angewandte Strömungslehre, Akademie-Verlag, Berlin 1978

[Biollay and Chasse 94]

Biollay, H.; Chasse, P.: Proc. 8th Int. Conf. Aerodyn. a. Ventil. Vehic. Tunnels,
Liverpool, 1994, pp.357-38

[Breitfuss]

Analyse- und Visualisierungssoftware ANACOMP/ANAVIS, Breitfuss Messtechnik
GmbH, Harpstedt

[Chasse 95]

Chasse, P.: Validation du Code Flow3D sur un Essai incendie du Tunnel de l'Offenegg,
Validation du Code Flow3D sur un E Centre d'Etude des Tunnels, 1995,

[Cox et al. 89]

Cox, G.; Chitty, R.; Kumar, S.: Fire Safety Journ., 15 (1989), pp. 103-106

[Digital]

Endoskopkamera für Hochtemperatureinsatz, Digital-Elektronik Magdeburg GmbH,
Magdeburg

[FIRETUN 95]

EUREKA-Project EU 499: FIRETUN Fires in Transport Tunnels, Report on Full-Scale Tests, Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. D-40230 Düsseldorf, 1995, Düsseldorf

[Fisher-Rosemount 93a]

Fisher-Rosemount GmbH & Co.: Anlage zum Auftrag Nr. A00.7.1466, Hanau 1993

[Fisher-Rosemount 93b]

Fisher-Rosemount GmbH & Co.: Betriebsanleitung Gaskühler RAE, Hanau 1993

[Fisher-Rosemount 93c]

Fisher-Rosemount GmbH & Co.: Betriebsanleitung BINOS[®] 100-2M, 3. Ausgabe 05/93

[Fisher-Rosemount 91]

Fisher-Rosemount GmbH & Co.: Betriebsanleitung BINOS[®] 100, Ausgabe 06/91

[Fletscher et al. 94]

Fletscher, D.F.; Kent, J.H.; Apte, V.B.; Green, A.R.: Fire Safety Journ., 23(1994), pp. 305-325

[FLUENT 01]

Fluent 6.0, User's Guide, Online, Fluent Inc. 2001-11-29

[FLUENT 98]

FLUENT 5 User's Guide. FLUENT Incorporated, 1-4, Lebanon, 1998

[FLUENT4 97]

Fluent 4.4 User's Guide Vol. 3, Second Edition, Fluent Inc. May 1997

[Gefährliche Güter 88]

Brandschutz- und sicherheitstechnische Kennwerte gefährlicher Stoffe, Band 1, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin 1988

[Grabski et al. 02]

Grabski, R., Kutz, M., Ihme, U.: Simulation zur Brandunterdrückung mit Wasserdampf (LOEWE II), Simulation zum Löschen mit Wasserdampf in Einsatzsituationen – Teil 2: Realsimulation, Institutsbericht Nr. 412, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2002

[Gyarmati 70]

Gyarmati, I.: Nonequilibrium Thermodynamics, Fieldtheory and Variational Principles, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1970

[Haack 00]

Haack, A.: Aktuelle Sicherheitsfragen in Tunneln. Tunnel 5(2000), S 36-55

[Haack et al. 95]

Haack, A.; Meyeroltmanns, W.: Erfassung, Analyse und Bewertung der derzeitigen Rettungskonzepte bei Brandunfällen in Verkehrstunneln für Straße und Schiene. Forschungsbericht der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. an den BMFT und die Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA), Köln, 1995

[Haack 90]

Haack, A.: Tunnel, 1(1990), S. 7-13

[Heins und Kordina 90]

Heins, Thomas; Kordina, Karl: Untersuchungen über die Brand- und Rauchentwicklung in unterirdischen Verkehrsanlagen - Katastrophenschutz in Verkehrstunneln. IBMB, TU Braunschweig, Abschlußbericht an das Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Förderkennzeichen BI7 - 81 07 87-14, Braunschweig, 1990

[Ingason and Romanov 02]

Ingason, H.; Romanov, L.; Use of Mobile Fans in Tunnels, SP Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, SP Report 2002:06, 2002, Borås

[Ingason et al. 94]

Ingason, H.;Gustavsson, S.;Dahlberg, M.: Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires, BRANDFORSK-project-723-924, SP Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, SP-REPORT 1994:08, 1994, Boras

[Karlsson and Quintiere 00]

Karlsson, B.; Quintiere, J.G.: Enclosure Fire Dynamics, CRC Press LLC, Boca Raton, 2000

[Khali 82]

Khali, E. E.: Modelling of Furnaces and Combustors, Cambridge Wells, Abacus Press, 1982

[Kutz und Kohl 99]

Kutz, M.; Kohl, K.-J. : Ausbreitungsmodell für Brandgase bei Großbränden, Abschlussbericht 1013/95/3 BZS-III A/96, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1999

[Kumar 92]

Kumar, S.: Fire Development and Smoke Spread in Tunnels-Some Modelling Considerations. Proc. of the 1st Intern. Confer. on Safety in Road and Rail Tunnels, Basel, 1992, 379-394

[Kumar and Cox 88]

Kumar, S.; Cox, G.: Proc. 6th Int. Symp. Aerodyn. a. Ventil. Vehic. Tunnels, Bedford, 1988, pp.515-526

[Kumar and Cox 87]

Kumar, S.; Cox, G.: Fire Safety Science-Proc. of the 2nd. Intern. Sympos., pp. 851-860,1987

[Kumar and Cox 85]

Kumar, S.; Cox, G.: Proc. 5th Intn. Symp. Aerodyn. a. Ventil. Vehic. Tunnels, Lille, 1985, pp.81-76

[Kuo 86]

Kuo, K. K.: Principles of Combustion, JOHN Wiley & SONS, New York, 1986

[Lacroix 95]

Lacroix, D.: Möglichkeiten und Ergänzbarkeit von großmaßstäblichen Brandversuchen, Modellversuchen und numerischer Simulation bei der Untersuchung von Tunnelbränden, Proceedings, S. 124-135 , Dresden, 1995

[Mägerle 00]

Mägerle, Rudolf: Branddetektion und Löschung von Tunnelbränden im Test. s+s report, 2000, 2, 36-41

[McCaffrey and Heskestad 76]

McCaffrey, B. J.; Heskestad, G.: A Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application, Combustion and Flame, 26(1976), S.125-127

[MED]

Heat Flux Transducers for the Direct Measurement of Heat Transfer Rates. MEDTHERM Corporation Bulletin 118, Huntsville, USA

[Müller 00]

Müller, Markus: Löschanlagenkonzepte für Tunnel. s+s report, 2000, 6, 18-23

[Nam and DeGiorgio]

Nam, S.; DeGiorgio, V. A.: CFD Application to Smokemovement in clean Room Environments based on CO₂ Concentration

[Noll 93]

Noll, B.: Numerische Strömungsmechanik, Springer, Berlin 1993

[Novozhilov 01]

Novozhilov, V.: Computational Fluid Dynamics modeling of Compartment Fires, Progress in Energy and Combustion Science, 27(2001), S. 611-666

[Peekel]

Messwerterfassungssystem Autolog 2100, Peekel Instruments GmbH, Bochum

[Pierce et al. 01]

Pierce, JBM.; Deveaud, CB.; Moss, JB.: Mass Loss Rate and Near-Field Open Pool Fire Measurements- A Comparison with Compartment Fires, Interflamm 2001, S. 1349-1354

[Pleß 03]

Pleß, G.: Umrechnung gemessener Gaskonzentrationen, Arbeitshinweise (unveröffentlicht), 2003

[Richter 89]

Richter, W.: Bemessung und Betriebsverhalten von Hausschornsteinen, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1989

[SAS 02]

SAS System unter Microsoft Windows - Release 8.02. SAS Institute Inc., Cary, 2002

[Schnell 01]

Schnell, Michael: EUSAS-Workshop Brandschutz in Tunnel. s+s report, 2001, 1, 14-15

[Schnitgerhans 99]

Schnitgerhans, Holger: Forschungsreisen in die Unterwelt - Versuchsstollen Hagerbach im Schweizer Kanton St. Gallen. New World - Das Siemens-Magazin, 1999, 3, 24-29

[Simcox et al. 92]

Simcox, S ; Wilkes, N.S.; Jones, I.P.: Fire Safety Journ.,18(1992), pp. 49-73

[Simcox et al. 88a]

Simcox, S; Wilkes, N.S.; Jones, I.P.: Report No. AERE-G 4677, Harwell Laboratory, Harwell, 1988, zitiert in [Simcox et al. 92], p. 49

[Simcox et al. 88b]

Simcox, S; Wilkes, N. S.; Jones, I.P.: Report No. AERE-G 4782, Harwell Laboratory, Harwell, 1988, zitiert in [Simcox et al. 92], p. 49

[Steinert 95]

Steinert, Carola: Messung und Simulation von Fahrzeugbränden in Tunneln.
Dissertation

[Synotec]

Differenzdruckaufnehmer Setra Modell 264, ± 25 Pa, Synotech GmbH, Linnich

[Tewarson 95]

Tewarson, A.: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, SFPE Handbook of Fire Protection Engineers, 2. Edition, National Fire Protection Association Press, Quincy, 1995

[Thies]

Wetterstation, Adorf Thies GmbH & Co KG, Göttingen

[Tuovinnen et al. 96]

Tuovinnen, H.; Holmstedt, G.; Bengtson, S.: FireTechn., 2nd. Quarter(1996), pp. 98-119

[Wahl and Ebhart 02]

Wahl, G.; Ebhart, J.: Sicherheitsmaßnahmen für die Thüringer Tunnelkette im Verlauf der BAB 71, Fachgespräch Tunnelsicherheit, 4.07.2002, Essen

[Warnatz 97 et al.]

Warnatz, J; Maas, U.; Dibble, R.: Verbrennung: Physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung, 2. Auflage, Berlin etc., Springer, 1997

[Wolschendorf 02]

Wolschendorf, Heinz: Erfahrungen bei der Brandbekämpfung im Elbtunnel Hamburg,
Fachgespräch Tunnelsicherheit, 4.07.2002, Essen

[Woodburn and Britter 96a]

Woodburn, P.J.; Britter, R.E.: Fire Safety Journ. 26(1996), pp. 35-62

[Woodburn and Britter 96b]

Woodburn, P.J.; Britter, R.E.: Fire Safety Journ. 26(1996), pp. 62-390

[Xue et al. 01]

Xue, H.; Ho, J.C.; Cheng, Y.M.: Fire Safety Journ. 36(2001), pp. 37-54

[Xue et al. 95]

Xue, H.; Chew, T.C.; Cheong, H.F.: Comb. Sci. and Techn. 105?(1995), pp. 117-129

[Xue et al. 94]

Xue, H.; Hihara, E.; Saito, T.: JSME Intn. J., Ser. B, 37(1994)1, pp. 187-194

[Xue et al. 93]

Xue, H.; Hihara, E.; Saito, T.: Int. J. Heat Mass Transfer 36(1993)7, pp. 1739-1748

ANHANG A MESSWERTE DER GESCHWINDIGKEIT UND DER TEMPERATUR FÜR DIE BRANDVERSUCHE BV07 BIS BV12

INHALT

VERZEICHNIS DER TABELLEN

- A1.1 Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV07
- A1.2 Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV07
- A1.3 Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV07
- A1.4 Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV07
- A1.5 Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV07
- A1.6 Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV07
- A2.1 Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV08
- A2.2 Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV08
- A2.3 Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV08
- A2.4 Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV08
- A2.5 Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV08
- A2.6 Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV08
- A3.1 Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV09
- A3.2 Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV09
- A3.3 Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV09
- A3.4 Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV09
- A3.5 Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV09
- A3.6 Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV09
- A4.1 Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV10

- A4.2 Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV10
- A4.3 Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV10
- A4.4 Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV10
- A4.5 Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV10
- A4.6 Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV10
- A5.1 Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV11
- A5.2 Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV11
- A5.3 Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV11
- A5.4 Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV11
- A5.5 Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV11
- A5.6 Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV11
- A6.1 Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV12
- A6.2 Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV12
- A6.3 Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV12
- A6.4 Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV12
- A6.5 Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV12
- A6.6 Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV12

Tabelle A1.1: Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV07

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit in s	T06	T07	T08	T09	T10
0	281	282	282	280	282
5	282	281	282	281	282
10	284	282	282	283	281
20	445	411	292	288	285
30	525	532	367	311	289
60	575	546	426	327	303
120	635	583	456	392	323
180	643	607	484	417	338
240	650	619	499	431	346
300	662	633	509	433	351

Tabelle A1.2: Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV07

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit	T21	T22	T23	T24	T25
0	281	282	281	281	282
5	281	282	282	280	282
10	294	290	282	282	281
20	483	436	292	288	289
30	643	565	312	304	302
60	773	672	367	330	318
120	830	678	396	346	331
180	857	760	445	379	358
240	871	799	465	401	375
300	906	886	495	426	389

Tabelle A1.3: Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV07

Zeit in s	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers D											
	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	283	282	282	282	282	281	281	281	281	281	283	281
5	303	325	307	291	284	283	283	283	284	283	304	283
10	406	484	405	371	326	302	295	295	297	294	392	292
20	762	964	893	767	565	390	371	376	384	364	659	353
30	940	1110	1062	934	741	512	469	449	457	425	810	404
60	968	1083	948	826	723	544	480	507	484	439	870	411
120	904	1148	1052	899	770	555	509	523	504	442	938	407
180	956	1183	1200	1129	906	653	609	596	607	532	988	473
240	984	1159	1209	1148	944	720	636	615	629	551	1005	493
300	1013	1186	1211	1178	1003	792	667	633	630	578	1035	516

Tabelle A1.4: Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV07

		Temperatur in K an den Messstellen des Messeben C							
Zeit in s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	281	281	281	281	281	281	281	281	281
5	308	332	585	385	308	331	468	467	303
10	515	900	1141	709	381	462	882	653	373
20	715	1162	1215	769	493	667	1180	962	497
30	745	1091	1183	917	574	682	1178	1190	559
60	734	1192	1035	852	537	567	1106	1150	497
120	794	1130	1100	878	480	531	1109	1139	585
180	1087	1134	1062	660	476	617	989	864	624
240	1103	1164	1056	653	485	626	949	863	681
300	1107	1167	913	610	491	636	864	832	719
Zeit in s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	
0	281	281	281	281	281	281	281	281	
5	310	385	331	316	358	325	308	309	
10	489	698	493	397	533	521	481	415	
20	680	1190	584	534	1201	745	1125	844	
30	746	1107	693	632	1144	829	1050	1019	
60	653	810	637	565	1071	667	755	671	
120	699	1035	564	524	1067	678	753	769	
180	708	991	553	519	1118	572	889	1084	
240	801	1077	565	540	1107	585	922	1120	
300	960	1121	578	551	1156	594	837	1088	

Tabelle A1.5: Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV07

Zeit in s	Geschwindigkeit in m s^{-1}							
	Messstände AII				Messstände BV			
	St02	St04	St05	FI02	St07	St09	St10	FI05
0	NaN	NaN	NaN	0,00	0,11	0,07	NaN	ausgefallen
5	0,26	0,66	0,67	0,01	0,34	0,32	0,56	
10	1,8	NaN	0,39	0,25	2,12	1,24	NaN	
20	NaN	NaN	2,86	0,66	3,33	1,87	0,52	
30	NaN	NaN	3,66	0,67	4,42	2,57	0,73	
60	1,82	NaN	3,3	0,75	4,87	3,53	0,96	
120	3,92	0,52	3,16	0,68	6,43	3,65	1,41	
180	5,6	NaN	4,61	0,86	8,38	3,99	1,54	
240	6,4	0,73	3,76	0,9	NaN	4,49	1,86	
300	6,06	1,79	3,32	0,85	2,67	4,61	2,22	

Tabelle A1.6: Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV07

Zeit in s	Geschwindigkeiten in m s^{-1} in Messebene C								
	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	NaN	0	NaN	NaN	0,24	0,45	NaN	0	0
5	NaN	1,62	1,13	1,75	0,17	0,58	2,92	2,36	NaN
10	2,61	4,1	4,56	1,93	0,74	1,31	3,07	1,78	0,76
20	0,39	1,95	2,16	0,75	0,39	0,38	4,03	0,83	NaN
30	1,21	3,16	2,35	2,9	0,24	1,02	3,83	4,17	0,48
60	1,27	3,85	2,25	1,07	0,7	1,43	2,37	1,64	0,82
120	1,25	1,67	3,06	0,74	NaN	0,81	2,88	2,35	2,03
180	2,41	1,46	1,45	NaN	0,55	1,19	1,1	1,37	NaN
240	2,99	3,11	1,65	0,37	0,45	1,27	1,21	1,3	NaN
300	1,36	3,03	NaN	NaN	0,6	1,03	NaN	0,42	NaN

Tabelle A2.1: Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV08

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit in s	T06	T07	T08	T09	T10
0	282	280	279	279	278
5	283	281	280	279	279
10	332	320	282	281	280
20	476	492	314	294	286
30	538	570	400	313	294
60	573	549	418	320	301
120	615	604	470	383	324
180	633	620	491	405	339
240	645	632	501	412	343
300	652	634	510	418	349

Tabelle A2.2: Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV08

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit	T21	T22	T23	T24	T25
0	283	279	278	277	276
5	284	279	278	278	277
10	450	342	281	279	280
20	667	535	295	292	290
30	729	602	317	302	300
60	815	675	359	325	316
120	911	735	435	369	340
180	901	799	477	406	355
240	936	892	502	410	367
300	932	891	510	433	387

Tabelle A2.3: Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV08

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers D											
Zeit in s	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	285	282	281	280	280	280	281	280	280	279	286	279
5	384	424	377	337	320	300	290	290	291	288	338	286
10	581	679	589	487	411	334	316	317	322	314	455	310
20	932	1160	1141	1041	761	471	432	424	439	410	752	397
30	1006	1142	1066	922	697	547	483	478	482	441	833	414
60	998	1141	1013	851	698	550	474	486	485	429	888	410
120	967	1159	1199	1134	950	696	610	590	591	536	974	471
180	951	1169	1201	1175	1024	758	640	606	594	552	1015	478
240	972	1167	1212	1205	1097	838	702	674	637	584	1031	514
300	990	1168	1212	1212	1096	812	700	682	656	603	1043	524

Tabelle A2.4: Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV08

		Temperatur in K an den Messstellen der Messebe C							
Zeit in s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	287	346	361	320	294	307	315	444	300
5	421	897	893	498	350	451	961	551	327
10	557	1083	1181	685	424	561	1144	804	374
20	751	1196	1164	733	507	671	1145	943	438
30	709	1194	1134	941	574	784	1195	1168	471
60	751	1200	1179	762	476	649	1029	1059	464
120	1127	1210	978	577	439	630	830	820	533
180	1142	1186	905	559	470	654	779	689	557
240	1159	1161	854	570	471	635	766	684	595
300	1012	1177	866	567	478	648	741	693	626
Zeit in s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	
0	321	332	368	308	291	310	293	303	
5	406	577	429	362	489	511	460	377	
10	557	959	511	444	986	650	899	571	
20	810	1241	594	551	1212	706	1130	1097	
30	715	988	706	623	958	844	1013	903	
60	632	915	608	522	1124	644	827	741	
120	739	1185	529	469	1116	542	940	1161	
180	1026	1018	531	483	1147	543	944	1082	
240	1140	968	551	505	1134	560	979	942	
300	1153	973	551	507	1133	565	903	922	

Tabelle A2.5: Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV08

		Geschwindigkeit in m s^{-1}						
		Messstände AII			Messstände BV			
Zeit in s	St02	St04	St05	F102	St07	St09	St10	F105
0	0,47	ausgefallen	NaN	0,00	0,39	0,36	0	ausgefallen
5	1		0,83	0,00	2,19	1,63	0,72	
10	0,85		1,93	0,75	3,18	1,83	NaN	
20	NaN		2,87	0,74	4,41	2,12	0,11	
30	NaN		3,67	0,87	4,7	2,65	0,79	
60	2,45		3,2	0,87	6,04	3,14	0,73	
120	5,04		2,96	0,9	7,37	3,67	1,47	
180	5,98		5,5	1,02	15,8	4,34	1,8	
240	6,13		2,85	1,2	16,71	4,66	2,17	
300	6,01		2,24	0,97	10,45	4,74	2,36	

Tabelle A2.6: Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV08

		Geschwindigkeiten in m s^{-1} in Messebene C							
Zeit in s	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	0,71	2,2	2,16	0,82	NaN	0,67	2,67	1,5	NaN
5	1,57	3,03	3,4	2,2	NaN	0,89	5,23	2,48	NaN
10	NaN	3,71	2,59	NaN	0,66	0,97	1,38	0,96	NaN
20	NaN	2,1	3,03	NaN	NaN	1,35	1,92	2,53	1,31
30	1,66	3,65	3,38	2,72	0,6	2	2,5	1,96	1,04
60	0,83	2,95	3,57	1,93	0,59	1,19	2,87	1,33	0,31
120	2,14	3,6	NaN	0,24	0,67	0,98	NaN	1,12	0
180	2,59	2,9	1,27	0,59	0,32	1,05	1,73	0,66	0,23
240	2,49	3,03	1,33	0	0,32	1,06	0,74	NaN	0,36
300	1,8	1,26	1,84	1,03	NaN	0,52	0	NaN	0,63

Tabelle A3.1: Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV09

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit in s	T06	T07	T08	T09	T10
0	279	278	277	277	276
5	279	278	277	277	276
10	280	278	278	277	277
20	406	405	284	281	280
30	514	551	349	307	286
60	584	571	431	324	302
120	647	575	459	398	318
180	651	588	469	405	328
240	651	612	485	425	335
300	657	635	503	436	342

Tabelle A3.2: Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV09

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit	T21	T22	T23	T24	T25
0	280	277	276	276	275
5	280	277	276	276	275
10	294	284	276	276	276
20	538	473	285	281	280
30	713	629	302	295	293
60	840	767	366	331	317
120	875	737	390	345	328
180	879	794	409	359	339
240	904	857	438	374	355
300	925	878	456	399	369

Tabelle A3.3: Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV09

Zeit in s	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers D											
	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	281	279	278	278	277	277	278	276	276	276	279	276
5	288	285	289	284	278	278	280	278	278	277	284	277
10	354	335	352	336	312	291	286	284	284	282	314	281
20	708	689	748	645	520	386	341	344	350	336	517	330
30	955	1019	1086	945	684	501	433	437	450	417	743	397
60	1015	1104	1031	876	746	593	477	506	502	447	853	421
120	994	1115	1040	873	747	567	495	502	505	450	907	419
180	985	1136	1140	1005	788	595	528	525	542	477	934	439
240	959	1131	1167	1074	826	634	561	554	575	499	959	461
300	931	1139	1177	1114	851	661	587	575	592	529	979	482

Tabelle A3.4: Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV09

Temperatur in K an den Messstellen der Messebe C									
Zeit in s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	276	276	276	276	276	276	276	276	276
5	288	339	487	387	292	292	330	563	298
10	333	673	968	716	365	379	640	626	330
20	690	1157	1170	834	499	648	1140	959	422
30	787	1055	1209	885	595	872	1172	1112	486
60	743	1127	1105	864	580	665	1142	1105	488
120	785	1158	1142	774	538	664	1062	1029	568
180	929	1190	1127	757	526	679	1085	962	633
240	888	1120	1113	686	523	687	1047	947	680
300	945	1083	1137	655	529	673	1009	945	720
Zeit in s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	
0	275	276	276	276	276	276	276	276	
5	289	353	326	299	299	352	294	299	
10	361	585	455	370	478	652	379	408	
20	582	1165	654	520	1131	780	891	826	
30	713	1098	712	621	1082	856	1061	1018	
60	613	872	719	606	1032	744	669	627	
120	644	960	592	552	1115	709	684	792	
180	643	805	575	548	958	670	1076	1043	
240	635	797	578	553	992	610	1106	1030	
300	655	807	586	565	1007	600	1079	1064	

Tabelle A3.5: Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV09

		Geschwindigkeit in m s^{-1}						
		Messstände AII			Messstände BV			
Zeit in s	St02	St04	St05	F102	St07	St09	St10	F105
0	0	ausgefallen	NaN	0	NaN	0	NaN	ausgefallen
5	0,15		0,48	0,04	0,3	0	NaN	
10	1,71		NaN	0,11	1,77	1,43	NaN	
20	1,05		1,73	0,51	3,41	2,1	0,46	
30	0		2,5	0,65	4,2	2,42	0,48	
60	1,77		2,92	0,76	5,5	3,7	0,61	
120	3,91		2,64	0,69	NaN	3,54	1,17	
180	4,99		2,67	0,7	NaN	3,75	1,39	
240	5,29		1,29	0,87	NaN	4,12	1,71	
300	5,56		1,11	0,73	NaN	4,14	1,81	

Tabelle A3.6: Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV09

		Geschwindigkeiten in m s^{-1} in Messebene C							
Zeit in s	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	NaN	NaN	NaN	0,61	NaN	0,24	NaN	1,89	0,24
5	NaN	0,38	2,36	1,25	0,39	1,25	2,03	1,48	NaN
10	1,27	0,65	2,13	2,38	NaN	0,44	3,27	3,61	0,37
20	1,34	3,14	3,04	1,8	NaN	1,07	3,35	1,66	0
30	1,03	3,93	4,41	3,86	0,74	1,43	3,84	2,3	0
60	NaN	1,98	2,29	2,21	NaN	1,24	3,55	3,63	0,55
120	2,14	1,51	3,24	0,57	NaN	1,35	1,33	1,31	0,64
180	1,12	3,1	2,29	0,4	NaN	1,07	0,94	2,21	0,68
240	0,52	1,97	2,92	0,92	NaN	0,96	2,46	2,68	NaN
300	1,08	1,15	1,46	1,4	NaN	0,99	2,04	0,7	1,1

Tabelle A4.1: Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV10

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit in s	T06	T07	T08	T09	T10
0	282	279	279	278	277
5	282	280	279	279	278
10	312	302	282	279	279
20	470	467	302	292	285
30	536	579	379	322	294
60	594	562	431	328	307
120	623	603	468	382	323
180	635	616	486	399	334
240	649	631	502	410	341
300	660	646	515	419	345

Tabelle A4.2: Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV10

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit	T21	T22	T23	T24	T25
0	282	278	279	277	277
5	282	280	278	278	277
10	345	321	280	278	279
20	564	511	290	287	286
30	680	631	314	301	299
60	805	740	358	327	318
120	866	810	413	369	348
180	892	860	444	392	362
240	889	870	456	407	372
300	910	965	484	439	392

Tabelle A4.3: Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV10

Zeit in s	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers D											
	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	284	282	280	279	279	279	282	279	279	279	283	279
5	379	343	351	329	305	289	287	285	286	284	309	283
10	530	469	501	418	367	320	301	299	302	297	354	295
20	939	929	974	849	627	429	381	382	400	381	613	367
30	1069	1075	1029	906	710	539	484	478	475	447	787	416
60	1046	1104	1006	845	733	589	473	481	487	437	867	413
120	1062	1158	1190	1109	873	651	572	562	580	533	982	477
180	1038	1147	1190	1150	929	697	613	591	596	555	1002	492
240	1010	1143	1188	1133	944	701	608	593	606	564	1008	501
300	1035	1158	1204	1220	1160	857	694	655	640	599	1039	533

Tabelle A4.4: Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV10

Temperatur in K an den Messstellen der Messebe C									
Zeit in s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	284	301	362	294	284	287	295	378	284
5	464	836	856	479	334	447	804	577	307
10	551	1048	1184	679	392	588	1029	694	333
20	794	1199	1199	740	479	681	1120	870	395
30	760	1208	1151	950	573	816	1163	1176	430
60	780	1151	1082	836	516	686	1114	1132	449
120	1104	1198	1121	611	489	648	941	865	525
180	1124	1162	1010	609	498	677	918	755	582
240	1145	1155	1000	605	503	672	851	774	627
300	1135	1187	916	592	525	662	870	750	661
Zeit in s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	
0	286	323	291	286	309	289	298	285	
5	375	587	393	332	432	474	377	349	
10	503	962	464	400	855	638	723	561	
20	700	1215	581	520	1241	691	1111	1023	
30	723	1024	683	622	979	796	1021	1032	
60	618	855	654	560	1131	679	653	641	
120	703	1147	550	505	1055	569	1014	1133	
180	739	1155	561	519	1031	566	1004	1167	
240	804	1146	569	530	1092	573	985	1156	
300	1150	1021	574	538	1143	573	901	1050	

Tabelle A4.5: Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV10

Geschwindigkeit in $m s^{-1}$								
	Messstände AII				Messstände BV			
Zeit in s	St02	St04	St05	F102	St07	St09	St10	F105
0	NaN	ausgefallen	NaN	0	0,62	0,44	0	ausgefallen
5	NaN		0,55	0	NaN	0,2	0,75	
10	0,99		0,92	0,51	NaN	NaN	NaN	
20	1,53		2,09	0,58	NaN	NaN	NaN	
30	0		2,88	0,77	NaN	NaN	NaN	
60	1,22		2,65	0,71	NaN	NaN	NaN	
120	3,63		2,26	0,9	0,77	NaN	NaN	
180	5,32		2,38	0,9	NaN	NaN	0,3	
240	5,76		NaN	0,89	NaN	NaN	0	
300	5,87		NaN	0,98	NaN	NaN	0,86	

Tabelle A4.6: Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV10

Geschwindigkeiten in $m s^{-1}$ in Messebene C									
Zeit in s	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	0,45	1,67	3,46	0,55	0,38	0,77	1,22	0,44	0,3
5	1,23	3,34	4,87	1,29	0,64	1,07	2,93	1,45	NaN
10	1,55	4,95	5,15	1,57	0,64	1,42	4,35	1,75	NaN
20	0,81	2,59	NaN	1,6	NaN	NaN	3,64	NaN	NaN
30	1,51	3,61	1,94	0,31	NaN	1,2	3,11	4,85	0,92
60	2,22	2	3,53	1,1	NaN	1,48	1,89	1,85	NaN
120	2,27	1,76	1,96	0,62	0	0,89	2,37	1,03	0
180	2,41	0,7	NaN	1,76	0,22	0,84	2,02	1,12	0,49
240	1,94	2,38	NaN	0,5	NaN	0,83	1,81	0,89	0,44
300	2,36	2,19	NaN	NaN	0	0,74	1,59	NaN	0,26

Tabelle A5.1: Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV11

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit in s	T06	T07	T08	T09	T10
0	274	273	273	273	273
5	273	273	273	273	274
10	274	273	274	274	274
20	274	274	275	275	275
30	274	274	277	276	276
60	275	275	278	279	277
120	275	276	279	280	278
180	274	273	274	274	274
240	273	272	273	273	273
300	273	273	273	273	273

Tabelle A5.2: Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV11

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit	T21	T22	T23	T24	T25
0	279	274	274	274	274
5	300	304	287	280	279
10	355	374	328	297	289
20	544	595	469	359	322
30	681	681	541	399	333
60	816	867	738	591	396
120	981	1016	846	647	460
180	495	395	355	319	312
240	388	325	300	290	288
300	364	308	292	287	284

Tabelle A5.3: Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV11

Zeit in s	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers D											
	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	298	289	302	294	291	287	288	284	281	279	293	277
5	419	377	411	390	370	353	331	318	307	298	335	295
10	567	510	563	551	515	494	463	414	375	339	418	329
20	911	918	1092	1120	1083	949	809	646	541	458	714	413
30	1168	1173	1139	1140	1169	1163	1096	858	633	518	963	467
60	1142	1185	1135	1115	1106	1182	1172	1094	864	711	1102	565
120	1105	1174	1126	1129	1162	1235	1229	1188	1164	998	1095	642
180	661	402	368	345	334	339	335	332	334	341	659	349
240	552	328	303	295	290	292	292	292	294	302	551	317
300	436	306	294	289	284	285	286	287	291	296	493	313

Tabelle A5.4: Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV11

Temperatur in K an den Messstellen der Messebe C									
Zeit in s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	353	385	333	311	287	286	305	389	287
5	836	598	486	398	327	343	370	503	320
10	844	701	549	416	367	381	433	588	356
20	1064	869	650	440	387	444	506	540	342
30	1106	905	652	440	397	462	486	546	346
60	1093	983	782	497	419	513	589	662	348
120	1107	983	740	507	429	536	682	599	372
180	444	475	471	376	334	407	464	363	360
240	308	301	295	286	281	294	291	294	368
300	289	288	286	281	278	286	284	287	367
Zeit in s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	
0	533	468	300	289	355	290	312	420	
5	759	607	379	325	489	344	378	577	
10	950	799	437	354	578	381	444	670	
20	957	742	449	380	733	416	539	701	
30	1001	743	463	390	653	430	509	618	
60	1108	926	483	413	796	463	640	771	
120	972	779	489	429	1012	485	669	841	
180	394	361	348	326	503	369	469	333	
240	296	297	291	285	290	284	289	297	
300	287	288	283	281	284	280	283	288	

Tabelle A5.5: Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV11

		Geschwindigkeit in m s^{-1}							
		Messständer AII			Messständer BV				
Zeit in s	St02	St04	St05	F102	St07	St09	St10	F105	
0	0,74	ausgefallen			1,07	2,18	1,85	1,88	ausgefallen
5	NaN				1,18	2,6	2,32	2,22	
10	NaN				0,54	3,09	2,94	2,22	
20	NaN				0,02	3,99	3,58	2,77	
30	0,74				2,65	4,51	3,99	2,7	
60	1,49				1,29	7,07	6,3	4,22	
120	NaN				1,66	13,5	9,75	6,06	
180	0,6				1,01	NaN	NaN	2,73	
240	0,69				1,25	NaN	NaN	1,65	
300	0,37				0,85	NaN	NaN	1,44	

Tabelle A5.6: Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV11

		Geschwindigkeiten in m s^{-1} in Messebene C							
Zeit in s	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	2,11	NaN	ausgefallen	0,8	0,35	NaN	1,22	0,81	NaN
5	3,19	2,8		0,91	0,99	0,47	NaN	NaN	NaN
10	3,36	NaN		0,36	1,12	1,62	2,54	2,04	NaN
20	4,36	3,67		NaN	1,7	1,54	1,17	NaN	0,94
30	3,3	2,09		1,47	2,83	0,79	2,36	2,31	1,06
60	2,97	3,74		1,13	1,17	1,08	1,57	NaN	0,69
120	2,23	3,88		0,88	1,22	1,61	0,99	0,74	0
180	NaN	NaN		0,59	1,48	NaN	1,3	NaN	0,58
240	NaN	0,39		NaN	1,36	1,31	0,43	0,25	0,92
300	NaN	NaN		0,57	0,81	1,02	0,92	NaN	0,85

Tabelle A6.1: Temperaturen am Ständer AII für Brandversuch BV12

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit in s	T06	T07	T08	T09	T10
0	272	269	270	270	269
5	271	269	270	269	270
10	270	269	270	270	270
20	270	270	271	271	271
30	270	269	272	272	272
60	269	270	273	273	273
120	270	270	273	275	273
180	269	268	269	269	269
240	268	268	268	268	269
300	268	268	268	268	268

Tabelle A6.2: Temperaturen am Ständer BV für Brandversuch BV12

	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers AII				
Zeit	T21	T22	T23	T24	T25
0	279	272	272	271	270
5	288	284	272	271	272
10	353	381	312	286	282
20	581	622	500	385	324
30	715	732	596	447	341
60	865	891	752	637	414
120	1032	1058	882	690	480
180	481	401	357	313	304
240	389	313	300	288	284
300	360	299	290	285	279

Tabelle A6.3: Temperaturen am Ständer D für Brandversuch BV12

Zeit in s	Temperatur in K an den Messstellen des Ständers D											
	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	276	273	272	272	273	274	274	272	272	272	281	272
5	414	415	400	368	351	334	319	300	290	287	372	287
10	618	633	648	627	669	673	573	435	366	352	533	337
20	888	925	1009	1040	1067	1039	903	692	558	506	729	438
30	1091	1139	1192	1196	1222	1215	1183	1001	672	565	927	501
60	1105	1186	1227	1246	1254	1274	1290	1224	988	746	1036	564
120	1103	1254	1296	1292	1302	1305	1290	1258	1094	904	1133	641
180	661	368	348	340	338	337	337	332	328	338	648	341
240	527	309	293	289	286	288	290	291	293	302	546	319
300	416	296	288	283	280	280	282	282	284	291	498	306

Tabelle A6.4: Temperaturen in Messebene C für Brandversuch BV12

		Temperatur in K an den Messstellen des Messeben C							
Zeit in s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	284	297	347	308	274	275	282	277	272
5	812	619	468	363	316	336	403	389	286
10	988	759	562	429	356	403	466	489	303
20	1002	899	669	442	393	468	539	579	326
30	1097	944	683	461	417	493	570	562	333
60	1122	975	799	504	430	520	676	638	339
120	1144	1101	862	524	434	547	691	592	357
180	423	473	526	399	343	357	400	378	375
240	304	300	296	284	279	291	292	292	369
300	283	283	281	276	274	282	280	280	342
Zeit in s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	
0	283	278	278	275	309	278	284	275	
5	562	468	338	312	511	356	398	438	
10	859	727	402	347	644	391	506	516	
20	985	768	450	383	801	431	627	705	
30	926	731	475	401	839	449	614	613	
60	1013	846	489	411	900	483	623	743	
120	984	790	488	420	928	501	759	667	
180	418	423	363	328	445	362	397	344	
240	303	298	287	281	291	281	286	294	
300	285	283	277	275	282	276	280	283	

Tabelle A6.5: Geschwindigkeiten in den Messebenen A und B für Brandversuch BV12

Geschwindigkeit in m s^{-1}								
Messständer AII					Messständer BV			
Zeit in s	St02	St04	St05	Fl02	St07	St09	St10	Fl05
0	0,14	ausgefallen	ausgefallen		1,39	2	1,9	ausgefallen
5	0,2			2,69	2,74	1,92		
10	0,98			3,14	3,16	2,17		
20	NaN			4,7	4,14	3,15		
30	0,79			5,81	4,96	3,21		
60	0,34			9	6,8	4,63		
120	NaN			NaN	NaN	5,93		
180	NaN			NaN	NaN	2,48		
240	NaN			NaN	1,02	1,93		
300	0,33			NaN	0,89	1,23		

Tabelle A6.6: Geschwindigkeiten in der Messebene C für Brandversuch BV12

Geschwindigkeiten in m s^{-1} in Messebene C									
Zeit in s	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	2,14	1,31	0,33	2,22	NaN	0,61	ausgefallen	0,68	ausgefallen
5	3,56	2,96	NaN	NaN	0,68	0,93		NaN	
10	NaN	NaN	0,24	0,67	NaN	1,11		2,05	
20	4,23	2,4	NaN	1,72	0,2	0,82		1,17	
30	4,28	3,93	2,52	1,13	1,61	1,76		1,97	
60	1,31	1,35	1,19	2,19	0,99	0,61		3,13	
120	3,6	4,05	NaN	NaN	1,39	1,69		1,78	
180	NaN	0,83	NaN	1,07	0,6	NaN		0,66	
240	NaN	0,56	0,25	NaN	0,81	1,24		0,49	
300	NaN	NaN	NaN	0,42	1,52	0,38		0,74	