

Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder
Arbeitskreis V
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 145

ENTWICKLUNG VON KOHLENMONOXID BEI BRÄNDEN IN RÄUMEN
TEIL 1

von

Dr. rer. nat. Georg Pleß (Projektleiter)

Dipl.-Chem. Ursula Seliger

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

März 2007

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: 145		Titel des Berichtes: Entwicklung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen		ISSN: 0170-0060
Autoren: Dr. rer. nat. Georg Pleß Dipl.-Chem. Ursula Seliger		durchführende Institution: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski		
Nummer des Auftrages: 45 (1/2004)H		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Datum des Berichtes: 16.03.2007				
Seitenzahl: 90	Bilder: *) 66	Tabellen: 21	Literaturverweise: 120	
<p>Kurzfassung:</p> <p>Die Bildung von Kohlenmonoxid bei Bränden ist eine der wesentlichen Ursachen der Gefährdungen, die für beteiligte Personen auftreten können. Der Hauptanteil aller Brandopfer ist der Inhalation von toxischem Brandrauch geschuldet. Entsprechend der Aufgabenstellung wurde eine Literaturlauswertung vorgenommen, die vor allem Themen wie Brandstatistik, Toxizität von Brandrauch und Untersuchungen des Bildungsmechanismus und der räumlichen Verteilung von Kohlenmonoxid umfasste. Auf der Grundlage einer Auswertung bereits publizierter Untersuchungen zur Bildung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen wurde eine Versuchskammer aufgebaut und mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Zu untersuchen war die Bildung von Kohlenmonoxid in Abhängigkeit von den sich mit Brandverlauf einstellenden Randbedingungen Ventilation und Temperatur. Zur Erprobung von Versuchskammer und Messtechnik wurde eine Serie von 21 Versuchen, bei denen Propangas als Brennstoff verwendet wurde, durchgeführt. Bei Variation der Brennerleistung und der Größe der Ventilationsöffnung wurden neben den Gaskonzentrationen im Raum sowie in der Türöffnung die Temperaturen und Druckdifferenzen gemessen. Die sich einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten der Gase in der Türöffnung sowie über dem Brenner wurden auf der Grundlage von Druckdifferenzmessungen berechnet. Die Auswertung der Messergebnisse umfasst die Darstellung der gemessenen Temperaturen, Gaskonzentrationen und Gasgeschwindigkeiten für ausgewählte Versuche in Abhängigkeit zur Höhe der Energiefreisetzungsrates und Größe der Ventilationsöffnung.</p>				
<p>Schlagwörter:</p> <p>Brandversuche, Raumbrand, Kohlenmonoxid, Brandrauch, Toxizität, Temperatur, Gaskonzentration, Gasgeschwindigkeit, Brandopferstatistik</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

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse und Literaturlauswertung	2
2.1	Brandopfer	2
2.1.1	Brandtote in Deutschland	2
2.1.2	Brandopfer International	5
2.2	Toxizität von Brandrauch	8
2.2.1	Sauerstoffmangel.....	8
2.2.2	Kohlenstoffdioxid	9
2.2.3	Kohlenstoffmonoxid	9
2.3	Untersuchung der Bildung von Kohlenmonoxid.....	25
2.3.1	Hauben-Versuche.....	26
2.3.2	Raumbrände	34
3	Untersuchungen am IdF.....	50
3.1	Geometrie des Versuchsaufbaus.....	50
3.2	eingesetzte Sensorik.....	51
3.2.1	Differenzdruckmessung.....	53
3.2.2	Messung des Volumenstroms des Brandmediums	53
3.2.3	Messung der Konzentrationen der Gase CO, CO ₂ , O ₂ und HC.....	54
3.2.4	Temperaturmessung.....	56
3.2.5	Messwerterfassung, Videoaufzeichnung	57
3.3	Versuchsdurchführung.....	58
3.4	Versuchsergebnisse	58
3.4.1	Brandlast.....	58
3.4.2	Temperaturen	59
3.4.3	Gaskonzentrationen.....	61
3.4.4	Gasgeschwindigkeiten.....	68
4	Vergleich der Versuchsergebnisse	69
5	Schlussfolgerungen.....	73
6	Literatur	74

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

Abkürzung	Erläuterung
A	- Aktivität
Abb	- Abbildung
AGBF	- Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren
ASTM	- American Society of Testing Materials
atm	- physikalische Atmosphäre (veraltet)
BHE	- Bundesverband der Hersteller- und Errichterfirmen von Sicherheitssystemen e. V.
BNC	Bayonet Navy Connectory (Stecker für koaxiale Kabeltypen)
CCD	Charge Coupled Devices (Halbleiter-Arrays für die Wandlung von Lichtsignalen)
CoGDEM	- The Council of Gas Detection and Environmental Monitoring
CTIF	- Comite Technique International de Prevention et d'Extinction du Feu
D	- Deutschland
DFV	- Deutscher Feuerwehrverband e. V.
dry	- trocken (ohne Wasseranteil im Gas)
exp	- Exponent zur e-Funktion
FED	- Fractional Effective Dose
FSE	Full-scale Room
FW	- Feuerwehr
g	- global
G	- Größenverhältnis geometrisch gleicher Räume
GDV	- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GER	- Globales Äquivalenzverhältnis
HRR	- Heat Release Rate (Wärmefreisetzungsrate)
HU	- Handlungsunfähigkeit
Hyp	- Index für Hyperventilation
ICD-10	- International Classification of Diseases (10. Revision)
IdF LSA	- Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
ISO	- International Organization for Standardization
KGSt	- Kommunale Gemeinschaftsstelle für Verwaltungsmanagement
kW	- Kilowatt
l	- Liter
log	- Logarithmus
LSA	- Land Sachsen-Anhalt
MAK	- maximale Arbeitsplatzkonzentration
max	- maximal
MIK	- maximale Immissionskonzentration
min	- Minute
ml	- Milliliter
NDIR	- nichtdispersive Infrarotspektroskopie
NFPA	- National Fire Protection Association

NIOSH	- National Institute for Occupational Safety and Health
NIST	- National Institute of Standards and Technology
ORBIT	- Optimierte Rettung Brandbekämpfung mit integrierter technischer Hilfeleistung
p	- Index für Plume
PMMA	- Polymethylmethacrylat
ppm	- Parts per Million
PTFE	- Polytetrafluorethylen
R	- Ruhe
RMV	- Respiratory Minute Volume (Atemminutenvolumen)
RSE	Reduced-scale Room
s	- Sekunde
TÜV	- Technischer Überwachungs-Verein
UHC	- Unburned Hydrocarbon (unverbrannter Kohlenwasserstoff)
vfdb	- Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V.
wet	- nass (mit Wasseranteil im Gas)
WHO	- World Health Organization
ZVEI	- Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

Symbol	Erläuterung
A	- Fläche der Ventilationsöffnung
A	- Kennzeichnung Sondenbündel Schenkellänge 2000 mm
B	- Kennzeichnung Sondenbündel Schenkellänge 500 mm
bar	- Druckeinheit
c	- Konzentration
c	- Molverhältnis
C ₂ H ₄	- Ethen, Ethylen
C ₃ H ₈	- Propan
CO	- Kohlenmonoxid
CO ₂	- Kohlendioxid
COHb	- Carboxihämoglobin
Cr	- Chrom
D	- kritische Menge an COHb Vol% (zur Bewusstlosigkeit führend)
D	- Kennzeichnung für Differenzdruckmessstellen
d	- Durchmesser
Δ	- Differenz
F	- Fractional Effective Dose (effektive Teildosis)
f(Re)	- von der Reynoldszahl abhängiger Korrekturfaktor (1,08-1,3)
G	- Kennzeichnung für Gasmessstellen
g	- Index für Gas
h	- Stunde
h	- Höhe
H	- Wasserstoffradikal
H ₂	- Wasserstoff (molekular)

H ₂ O	-	Wasser, Wasserdampf
Hb	-	Hämoglobin
HbCO		Carboxihämoglobin
HbO ₂		Oxihämoglobin
HC	-	Hydrocarbon (Kohlenwasserstoff)
HCN	-	Cyanwasserstoff, Blausäure
HO ₂	-	Perhydroxyl, Hydrogenperoxyl (Radikal)
i	-	Index für Stoff-Spezies
K	-	Grad Kelvin
M	-	Messung
N ₂	-	Stickstoff
Ni	-	Nickel
O ₂	-	Sauerstoff
OH	-	Hydroxyl (Radikal)
p	-	Druck
Φ	-	Äquivalenzverhältnis
q	-	Strahlungsfluss kW/m ²
Re	-	Reynoldszahl
ρ	-	Gasdichte
ρ ₀	-	Gasdichte bei Umgebungstemperatur
S	-	Skalierungsverhältnis
t	-	Zeit, Expositionsdauer
T	-	Kennzeichnung für Temperaturmessstellen
T	-	Temperatur
T ₀	-	Umgebungstemperatur
τ _{conv}	-	Zeit bis zum Eintritt der Handlungsunfähigkeit durch konvektiven Wärmeübertrag
τ _{rad}	-	Zeit bis zum Eintritt der Handlungsunfähigkeit durch Strahlungswärme
v	-	Gasgeschwindigkeit
V	-	Volumen
W	-	Watt
W	-	Brennstoffmasse
X	-	Molenbruch
X, Y	-	Codierung der Todesursachen-Kategorien

1 EINLEITUNG

Die Bildung von Kohlenmonoxid bei Bränden ist einer der wesentlichen Faktoren der Gefährdungen, die für beteiligte Personen auftreten können. Der Hauptanteil aller Brandopfer ist der Inhalation von toxischem Brandrauch geschuldet. Diese Opfer werden nicht nur im Brandraum aufgefunden. Auf Grund der Ausbreitung des Brandrauches erleiden auch Personen tödliche Expositionen, die sich in entfernteren Räumen im Abzugsbereich des Rauches befinden.

Kohlenmonoxid ist aber auch mitverantwortlich für die Ausbreitung von Bränden über den Brandraum hinaus infolge von Nach- und Durchzündungen in der Gasphase, wodurch die Sicherheit von Einsatzkräften gefährdet wird. Es ist somit für die Brandbekämpfung ein unbedingtes Erfordernis, die Zusammensetzung der Rauchgase im Raum abhängig von der Zeit der Brandentwicklung, der Raumtemperaturen und der Belüftungsbedingungen zu kennen, um spezielle Entwicklungsstadien des Brandes, wie Flammenüberschläge mit anschließendem dauerhaften Brennen aller brennbaren Stoffe im Raum (Flashover) oder Durchzündungen von Gasen (Backdraft) im Raum rechtzeitig abschätzen zu können.

Die Untersuchung der Bildung und Verteilung von Kohlenmonoxid bei Raumbränden erfordert die Untersuchung des Brandes in seiner Gesamtheit. Dazu zählen eine umfassende analytische Bewertung der Gasphase sowie die Aufnahme von Randbedingungen wie Ventilation und Temperaturen.

Gemäß der Aufgabenstellung wurde eine Literaturlauswertung vorgenommen, die vor allem Themen wie Brandstatistik, Toxizität von Brandrauch und Untersuchungen des Bildungsmechanismus und der räumlichen Verteilung von Kohlenmonoxid umfasste. Auf der Grundlage einer Auswertung bereits publizierter Untersuchungen zur Bildung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen wurde eine Versuchskammer aufgebaut und mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Zu untersuchen war die Bildung von Kohlenmonoxid in Abhängigkeit von den sich mit Brandverlauf einstellenden Randbedingungen Ventilation und Temperatur. Die Durchführung der ersten Versuche erfolgte mit Propangas als Brennstoff. Bei Variation der Brennerleistung und der Größe der Ventilationsöffnung wurden neben den Gaskonzentrationen im Raum sowie in der Türöffnung die Temperaturen und Druckdifferenzen gemessen. Die sich einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten der Gase in der Türöffnung sowie über dem Brenner wurden auf der Grundlage von Druckdifferenzmessungen berechnet. Die Auswertung der Messergebnisse wurde orientierend am internationalen Stand vorgenommen und im Vergleich mit bereits bekannten Ergebnissen diskutiert.

2 STAND DER ERKENNTNISSE UND LITERATURAUSWERTUNG

2.1 Brandopfer

2.1.1 Brandtote in Deutschland

Jährlich sterben in Deutschland mehrere hundert Menschen bei Bränden. Die Zahl der Todesopfer wird in einschlägigen Statistiken unterschiedlich angegeben, was sich in Publikationen widerspiegelt. Beispielsweise gibt [ROSSEL 2001] an, dass jährlich rund 600 Menschen bei Bränden sterben, die Mehrheit von ihnen in den eigenen vier Wänden. Fast ein Drittel der Brandopfer sind Kinder. Darüber hinaus werden etwa 6.000 Menschen bei Bränden schwer und rund 60.000 Menschen leicht verletzt. Das größte Risiko besteht nachts, denn 70 Prozent der Brandopfer werden im Schlaf überrascht. Die [INGENIEURBÜRO BRANDSCHUTZ GMBH 2004] spricht von jährlich ca. 200.000 Bränden in privaten Haushalten mit 800 Brandtoten (davon 200 Kinder) und ca. 6.000 Brandverletzten mit Langzeitschäden.

Im Feuerwehr-Jahrbuch 2005/2006 sowie in den Vorgängern veröffentlicht der [DFV 2006] statistische Angaben zur jährlichen Anzahl der Todesopfer bei Bränden in Deutschland. Diesen Angaben liegt das Datenmaterial des Statistischen Bundesamtes zugrunde. Offensichtlich wurden dafür nicht die Daten der Position Y 26 der ICD-10 (s. u.) einbezogen, woraus die Unterschiede zu den in diesem Bericht veröffentlichten Zahlen resultieren.

In der Gesundheitsberichterstattung des Bundes sind in den Zeitreihen der Sterbefälle, aufgeschlüsselt nach Todesursachen gemäß der internationalen Klassifikation ICD-10, detaillierte Angaben zu finden [STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND 2006]. Die Positionen „Tod durch Einwirkung von Rauch, Feuer und Flammen“ werden weiter untersetzt beispielsweise, ob das Brandereignis im Gebäude stattfand und der Brand unter Kontrolle war (z. B. Kamin, Ofen) oder nicht. Auch findet eine Aufschlüsselung nach Bundesländern statt. Vergleicht man diese Zahlen mit denen in Publikationen veröffentlichten, den Angaben der World Fire Statistics von [GENEVA ASSOCIATION 2005] und [CTIF 2005] oder beispielsweise mit dem Datenmaterial vom Ereignisbericht FW LSA des [IdF LSA 2005], stellt man erhebliche Abweichungen fest, wie aus der Tabelle 1 ersichtlich ist.

Gemäß dieser Auswertung hat Sachsen-Anhalt bezogen auf die Einwohnerzahl und gemessen am Bundesdurchschnitt überdurchschnittlich viele Brandopfer zu beklagen. Das gab Anlass zu weiterer Auswertung. Es wurden einerseits die Brandopferzahlen der Bundesländer aus den Positionen X00-X09 „Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen“ (mit weiterer Untersetzung zu Umständen und Örtlichkeiten) zusammen mit denen der Position Y26 „Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen, Umstände unbestimmt“ auf die Einwohnerzahl (100 000) des jeweiligen Bundeslandes bezogen. Weiterhin wurden die Unterkategorien von X00-X09 und Y26, welche als Ort des Ereignisses „zu Hause“ auswiesen, separat ausgewertet. Ausgespart wurden dabei die Todesfälle, bei denen das Ereignis zwar zu Hause, aber außerhalb von Gebäuden stattfand. Die Ergebnisse, dargestellt als Balkendiagramme, sind in den Abbildungen 2 und 3 zu sehen. Abgesehen von den 3 Städten Berlin, Hamburg und Bremen, treten die höchsten Opferzahlen in den neuen Bundesländern auf. Hier bietet sich eine genauere Untersuchung der Ursachen an. Hinsichtlich des prozentualen Anteils der Brandopfer aus Ereignissen der Kategorie „zu Hause“ lassen sich keine regionalen Unterschiede ableiten.

Tabelle 1: Todesopfer bei Bränden in Deutschland (D) und Sachsen-Anhalt (LSA)

Jahr	Quelle 1: World Fire Statistic Geneva Assoc.	Quelle 2: World Fire Statistic CTIF	Quelle 3: Statistisches Bundesamt				Quelle 4: Ereignisbericht Feuerwehr LSA	Brandtote pro 100 000 Einwohner (berechnet aus Material Quelle 3)			
	D	D	D		LSA		LSA	Gesamtzahl		Tote in Wohnungen*	
			I	II	I	II		D	LSA	D	LSA
1994	745		596	473	37	26	31	0,73	1,33	0,57	0,94
1995	770		614	503	26	18	33	0,75	0,94	0,61	0,65
1996	895		714	598	45	38	37	0,87	1,64	0,72	1,39
1997	730		585	501	28	20	28	0,71	1,03	0,60	0,73
1998	650		571	465	30	27	23	0,70	1,12	0,57	1,01
1999	630		549	442	30	24	21	0,67	1,13	0,54	0,91
2000	590	475	522	411	21	19	31	0,63	0,80	0,50	0,73
2001	600	478	534	405	31	23	33	0,65	1,20	0,49	0,89
2002	-	-	609	481	28	21	19	0,74	1,10	0,58	0,82
2003	-	475	533	403	26	20	27	0,65	1,03	0,49	0,79
2004	-	446	518	394	28	14	21	0,63	1,12	0,48	0,56
2005	-	-	-	-	-	-	29				

- I: 1994 – 1997 alle Todesopfer durch „Unfälle durch Feuer und Flammen“,
1998 – 2002 alle Todesopfer durch „Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen“
- I*: alle Todesopfer bei Bränden
- II: 1994 – 1997 Todesopfer durch „Brand in Privatwohnung“
1998 – 2002 Todesopfer durch „Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen: zu Hause“
- * ab 1998 „zu Hause“

Die grafische Darstellung der jährlichen Gesamttopferzahlen sowie deren Anteil in Wohnungen aus der Quelle [STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND 2006] pro 100 000 Einwohner über einen Zeitraum von 1990 bis 2004 zeigt insgesamt eine leicht fallende Tendenz (Abbildung 1).

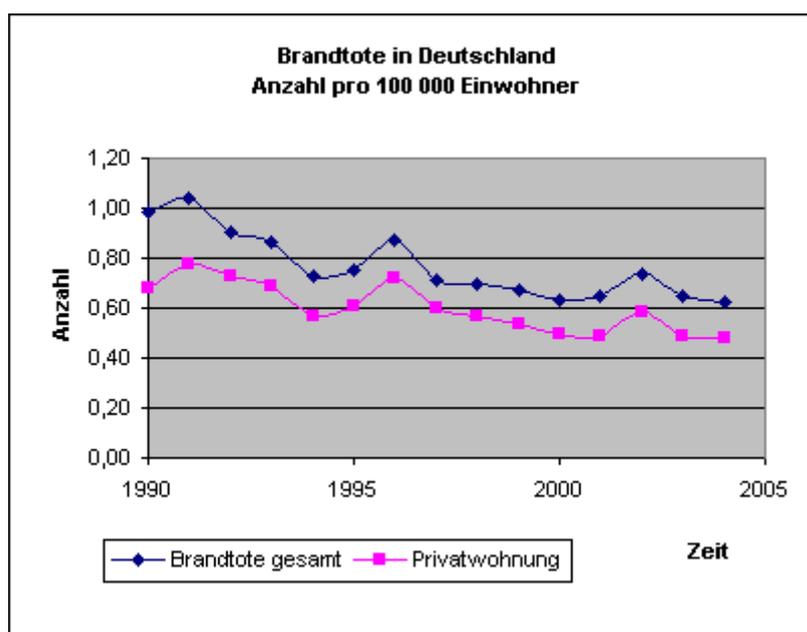


Abb. 1: Anzahl der Brandtoten in Deutschland sowie deren Anteil in Wohnungen pro 100 000 Einwohner

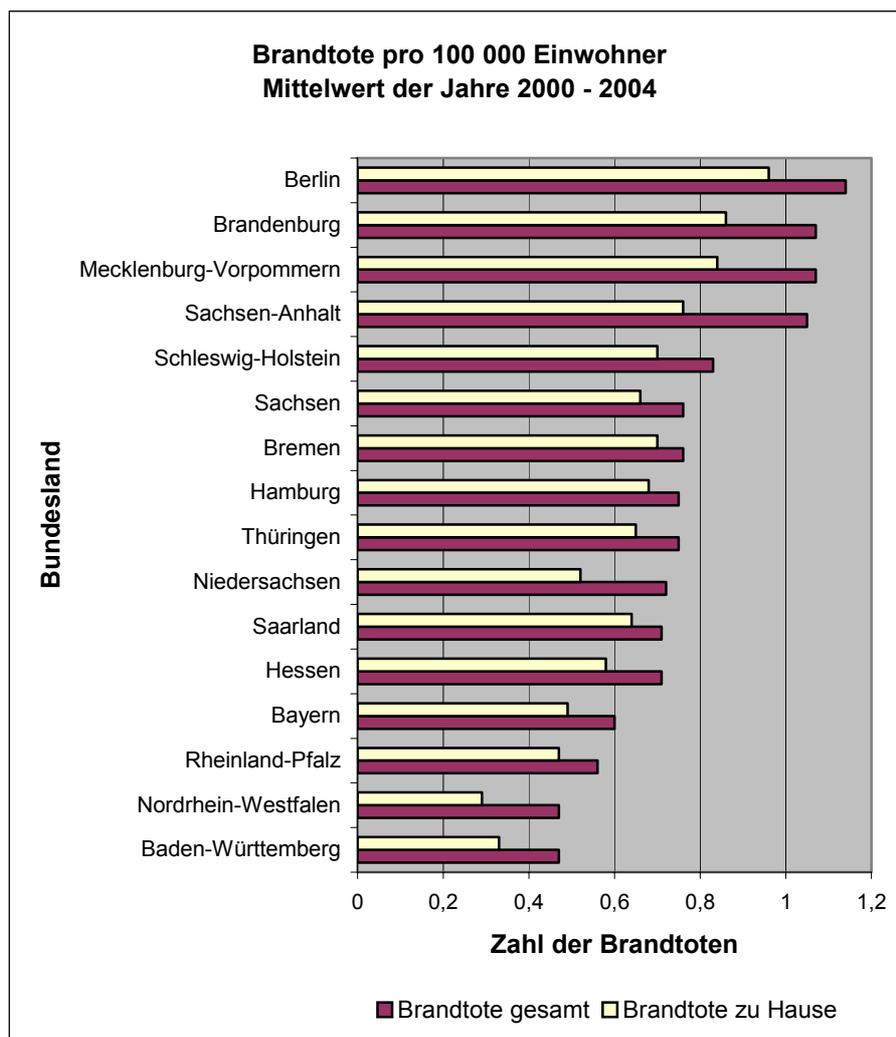


Abb. 2: Zahl der Brandtoten in den Bundesländern Deutschlands pro 100 000 Einwohner als Mittelwert für den Zeitraum von 2000 - 2004

Die von einem Brand ausgehende Gefährdung für Menschen resultiert aus den komplexen Wirkungen von Energie, Schadstoffen und Sauerstoffmangel auf den menschlichen Organismus. Die Energie kann direkt durch Flammen oder Wärmestrahlung auf die Hautoberfläche einwirken, aber auch mit den heißen Gasen inhaliert werden. Der inhalierte Brandrauch beinhaltet ein toxisches Potential, das in Abhängigkeit von Brandstoff und Brandbedingungen durch verschiedene Partikel, lungengängige Aerosole und toxische Gase bestimmt wird. Zusätzlich kann der Brandrauch die Sichtweite im Fluchtweg vermindern, so dass letztendlich eine Summe von Faktoren den Zustand und die Handlungsfähigkeit betroffener Menschen in Abhängigkeit von ihrer persönlichen Konstitution bestimmt. Eine Statistik zu Bränden in Deutschland, die im Zeitraum von Juli 2000 bis Juni 2001 stattfanden, ergab, dass 73 % aller Verletzungen bei Bränden ursächlich durch Rauchgas bedingt waren. Verbrennungen hatten nur einen Anteil von 5%. An den Todesfällen waren Verbrennungen und Rauchgasvergiftungen zu jeweils rund 30% beteiligt. Ergebnisse anderer Untersuchungen ergaben, dass bis zu 80% aller Brandopfer durch Rauchgas bedingt waren [BREIN, HEGGER 2002].

[STEINAU 2002] gibt an, dass mehr als 70% aller Brandopfer infolge eines Inhalationstraumas schon an der Brandstelle sterben. Eine Statistik zur Überlebenswahrscheinlichkeit von Brandopfern zeigt, dass Personen mit Verbrennungen von 20-40% der Körperfläche ohne Inhalationstrauma eine Überlebenschance von 98% haben, mit Rauchvergiftung sind es nur 62%.

Auch Feuerwehrleute zählen zum Personenkreis derer, die berufsbedingt den Gefahren bei Bränden ausgesetzt sind und einer höheren Exposition mit CO, toxischen Rauchgasen, hohen Temperaturen und Wärmestrahlung unterliegen [WHO 1999].

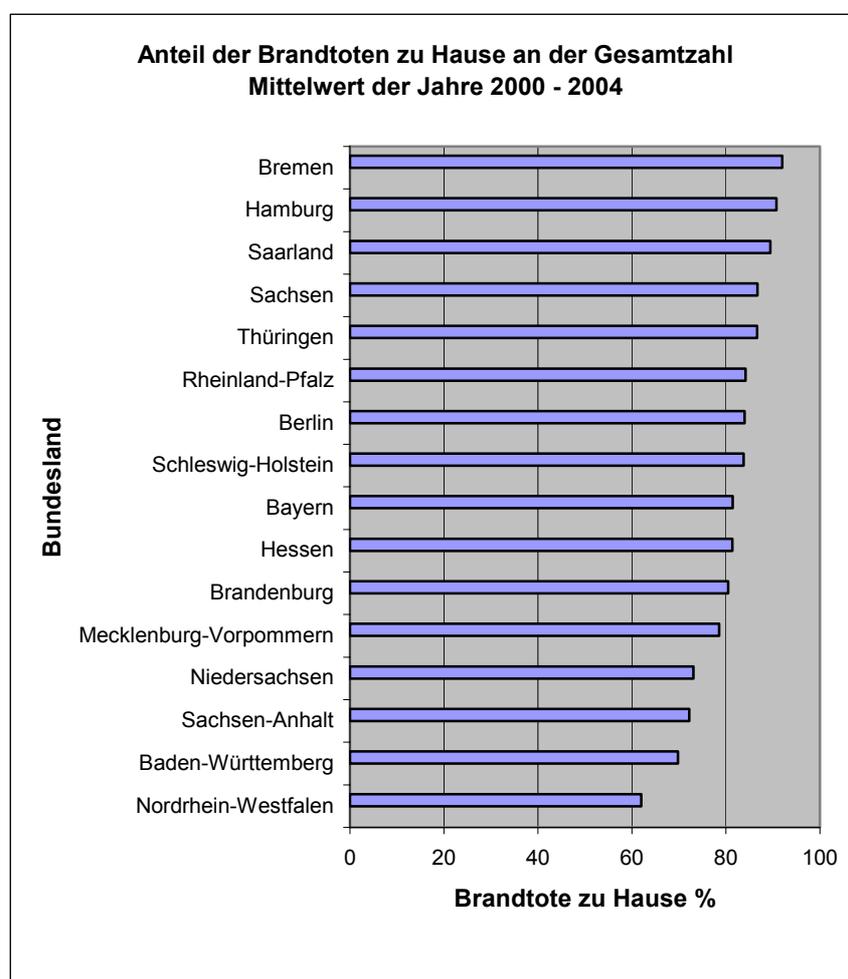


Abb. 3: Prozentualer Anteil der Brandtoten mit dem Brandereignis „zu Hause“ an der Gesamtzahl der Brandtoten in den Bundesländern Deutschlands als Mittelwert der Jahre 2000 - 2004

2.1.2 Brandopfer International

Aus einer Statistik zu Sterbefällen, die von der [WHO 2006] geführt wird, wurden die Angaben über Brandopferzahlen für den in Abbildung 4 dargestellten internationalen Vergleich entnommen. Die Statistik der [WHO 2006] basiert auf Angaben, die durch autorisierte Institutionen der jeweiligen Länder zugearbeitet werden. Voraussetzung ist die Klassifizierung der Sterbefälle gemäß ICD (International Classification of Diseases). Dem Datenmaterial nach zu urteilen, führen noch nicht alle Länder die Klassifizierung der Brandopfer nach dem sogenannten „Viersteller“ (mit weiterer Untersetzung zu Umständen und Örtlichkeiten) durch. Für die Übersicht in Abbildung 4 wurden deshalb nur Länder ausgewählt, die eine detaillierte Klassifizierung vorgenommen haben. Somit enthält die Grafik die Opfer, welche am Ereignisort „zu Hause“ bei Bränden (unkontrolliert und kontrolliert) in Gebäuden bzw. durch die Einwirkung von Rauch, Feuer und Flammen (spezifiziert oder nicht näher spezifiziert) zu Tode kamen.

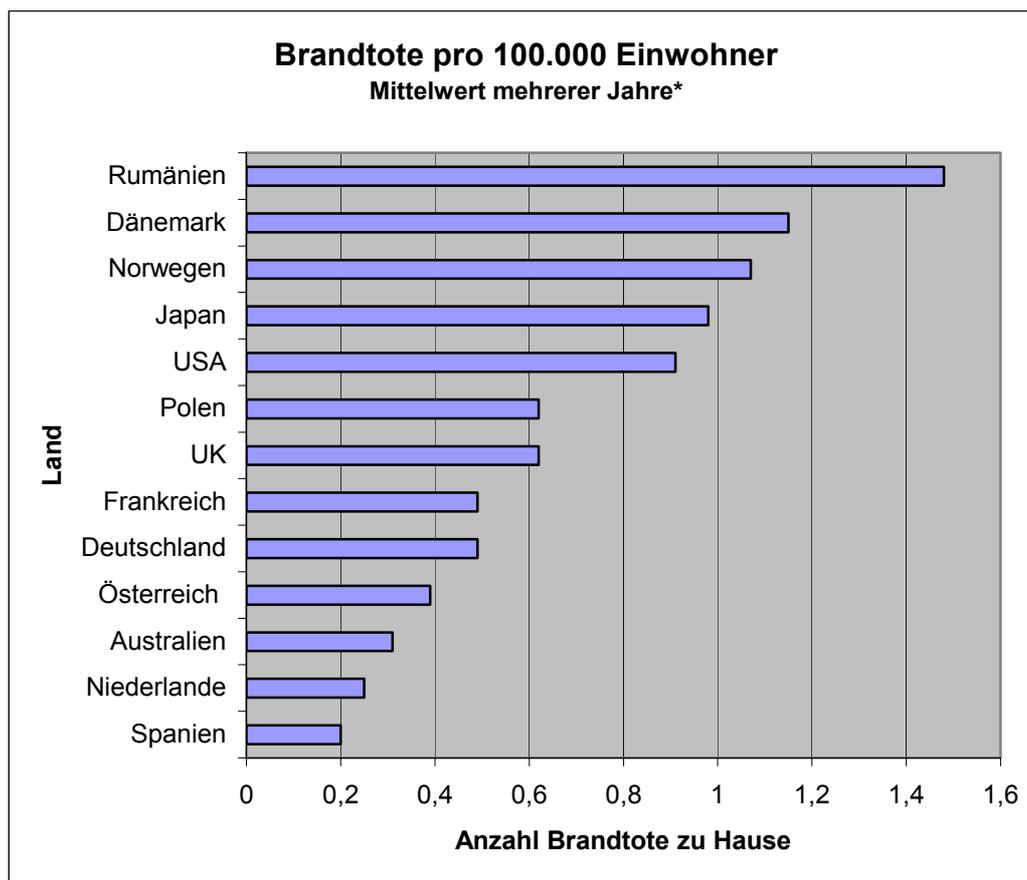


Abb. 4: Internationaler Vergleich der Angaben zur Anzahl der Brandtoten mit dem Brandereignis „zu Hause“ bezogen auf 100.000 Einwohner des jeweiligen Landes, Angabe als Mittelwert mehrerer Jahre *

*

Rumänien	2000 - 2004	USA	2001 - 2002	Deutschland	2000 - 2004
Dänemark	1999 - 2001	Polen	2000 - 2004	Österreich	2002 - 2005
Norwegen	2000 - 2004	UK	2001 - 2004	Australien	2002 - 2003
Japan	2000 - 2004	Frankreich	2000 - 2003	Niederlande	2001 - 2004
Spanien	2000 - 2004				

In den USA wurden 75 % der Brandopfer der Wirkung toxischer Gase zugeschrieben und speziell der Wirkung von Kohlenmonoxid 66 % mit einer jährlichen Steigerung von etwa 1 % [HALL 1997].

Die Mehrzahl der Opfer kommen bei Bränden nicht im eigentlichen Brandraum zu Tode sondern häufig in Räumen, welche in der unmittelbaren und auch weiter entfernten Umgebung zum Brandraum gelegen sind. Beispielsweise waren 1999 in den USA bei Gebäudebränden 3.040 Opfer zu beklagen, wovon sich etwa 2/3 in Räumen abseits vom eigentlichen Brandherd befanden [HALL 1997], [KARTER 2000]. [Lattimer 1996/1] beschreibt ebenfalls zwei Brandereignisse, wo bei Bränden in einem Pflegeheim bzw. Hospiz mehrere Menschen zu Tode kamen, weil sich der toxische Brandrauch über die Flure bis in andere entferntere Zimmer ausbreitete.

Für diesen Personenkreis gibt es durch technische Verbesserungen, Warnsysteme und effiziente Einsätze Potenzial für eine Rettung. Mit der Einführung der gesetzlichen Pflicht zur Ausrüstung von Wohnräumen mit Rauchwarnmeldern sind bis zum Jahr 2004 beispielsweise in den USA und Großbritannien die Anzahl der Brandtoten um 40 %, in Schweden sogar um 50 % zurückgegangen [FEUERWEHR VERSBACH 2006]. Gemäß dieser Übersicht (Abbildung 5)

waren bis dahin in Deutschland nur etwa 5 % aller Haushalte mit Rauchwarnmeldern ausgerüstet. In Großbritannien wurde seit den 80er-Jahren konsequent durch gesetzliche Vorgaben u. a. im Baurecht und Aufklärung der Bevölkerung über die Gefahren durch Brandgase und den Vorteil von Rauchmeldern die Ausrüstung der Haushalte mit diesen Geräten forciert. Bereits 1994 lag der Ausstattungsgrad der Haushalte bei 70 %. Zusätzlich gab es Regelungen, welche die Erhöhung der Brandfestigkeit von Wohnungseinrichtungen zur Folge hatten und Maßnahmen im vorbeugende Brandschutz. Bis zum Jahr 2010 sollen mittels dieser Strategie die Brandopferzahlen um weitere 20 % gesenkt werden [UK 2004].

Im Oktober 2000 startete in Deutschland eine bundesweite Aufklärungskampagne „Rauchmelder retten Leben“. Ende 2003 hatte Rheinland-Pfalz als erstes Bundesland die Verpflichtung zum Anbringen von Rauchwarnmeldern in neu gebauten Wohnungen gesetzlich in der Landesbauordnung festgelegt [BHE 2004]. Bis Mitte 2006 wurden in den Bundesländern Hessen, Saarland, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern sowie in Hamburg die Landesbauordnungen ebenso um diese Verpflichtung ergänzt [ALARM-TEC 2006].

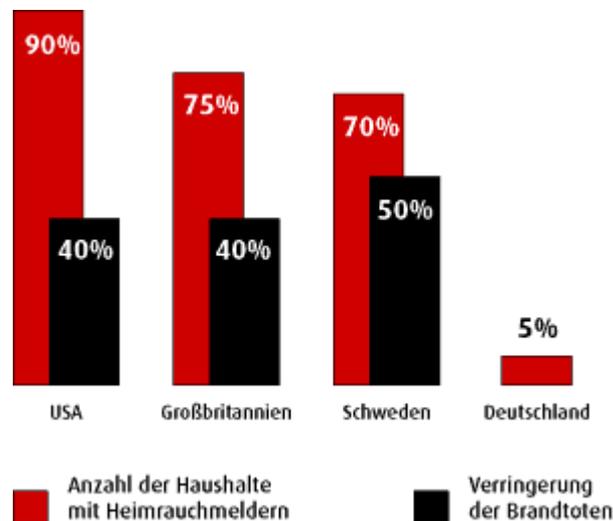


Abb. 5: Einfluss der Ausrüstung von Wohnräumen mit Rauchwarnmeldern auf die Anzahl der Brandtoten [FEUERWEHR VERSBACH 2006]

In einer ausführlichen Studie analysierte [MILLER 2005] das Verhalten von Menschen bei Wohnungsbränden in Neuseeland im Zeitraum von 1997 - 2003. In dieser Zeit starben 131 Menschen bei 109 Wohnungsbränden, deren Brandherd zu 37 % im Schlafräum und zu 32 % in der Küche lag. 53,8 % der Opfer befanden sich nicht im Brandraum sondern in anderen Räumen, meistens Schlafräumen. Eine Analyse zur Ausstattung mit Rauchmeldern ergab, dass in 60,6 % der betreffenden Wohnungen keine Rauchmelder installiert waren, in 8,3 % der Fälle die Rauchmelder inaktiv waren (Batterie fehlte etc.). In 16,5 % der Wohnungen waren funktionstüchtige Rauchmelder installiert. Eine Untersuchung der Opfer ergab die in Tabelle 2 ausgewiesenen Todesursachen, wobei hier auch die gleichzeitige Wirkung mehrerer Ursachen berücksichtigt wurde. Es wurde in dieser Studie ebenfalls untersucht, auf Grund welchen Verhaltens bzw. welcher Umstände diese Menschen zu Brandopfern wurden. Eine Übersicht der Ergebnisse zeigt Tabelle 3.

Tabelle 2: Opferzahl und Todesursachen bei Wohnungsbränden in Neuseeland
[MILLER 2005]

Todesursache	Opferzahl
Rauchinhalation	72
CO-Vergiftung	32
Hypoxie, Erstickung	14
Herzversagen	6
Brand-, thermische Verletzung	53
Verbrennung	3
Multi-Organversagen	3
Atemwegserkrankung	2

Tabelle 3: Menschliches Verhalten und andere Ursachen für Brandopferzahlen bei
Wohnungsbränden in Neuseeland [MILLER 2005]

Verhalten / Ursache	Opferzahl	Prozent
Brand nicht oder zu spät bemerkt	51	39,2
Flucht wegen Alter oder Behinderung unmöglich	26	20,0
Flucht versucht, aber vom Brand eingeholt	23	17,7
geflüchtet / gerettet, später an Verletzungen verstorben	14	10,8
eigener gescheiterter Versuch zur Brandbekämpfung	7	5,4
sich selbst zum Brand und damit in Gefahr begeben	5	3,8
Flucht wegen Behinderung nicht möglich	4	3,1

2.2 Toxizität von Brandrauch

Brandrauch ist je nach Brandstoff und Brandbedingungen ein Gemisch aus verschiedenen Bestandteilen (u. a. Gase mit toxischer Wirkung, lungengängige Aerosole, Partikel), dessen toxische Gesamtwirkung bisher unzureichend geklärt ist. In den meisten Fällen trägt das beim Brand gebildete Kohlenmonoxid das toxische Potential im Zusammenwirken mit Sauerstoffmangel sowie der atemfrequenzsteigernden Wirkung des ebenfalls im Brandrauch enthaltenen Kohlendioxids.

2.2.1 Sauerstoffmangel

Von Sauerstoffmangel (Hypoxie) spricht man, wenn die Konzentration bei Normaldruck unter 12 Vol% fällt. Die Einwirkung eines plötzlichen Sauerstoffmangels führt zur Unterversorgung des Gewebes, besonders des Gehirns, und ruft innerhalb kürzester Zeit die in Tabelle 4 aufgeführten sogenannten Sauerstoffmangelkrankheiten hervor [ROCHE 2006].

Tabelle 4: Sauerstoffmangelkrankheiten [ROCHE 2006]

Konzentration	Krankheitserscheinung
10 Vol%	Hyperventilation, Anstieg von Herzminutenvolumen und Blutdruck, Hypoglykämie, evtl. Zyanose
8 Vol%	Unbehagen, Konzentrationsstörungen, Euphorie
7 Vol%	Atemnot, Schwindelgefühl, Bewusstlosigkeit
3 Vol%	baldiger Erstickungstod

2.2.2 Kohlenstoffdioxid

Die Auswirkungen erhöhter Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen (auch Kohlendioxid, CO₂) auf den Menschen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Erwähnt werden muss, dass Kohlendioxid eine indirekte Wirkung auf den Sauerstoffhaushalt des Blutes hat. Bei erhöhter Konzentration wird im Blut über das Dissoziationsgleichgewicht der Kohlensäure der pH-Wert vermindert - das Blut wird saurer. Von diesem Absinken des pH-Werts ist das Hämoglobin betroffen. Bei niedrigerem pH-Wert verringert sich seine O₂-Bindungskapazität. Außerdem aktiviert CO₂ bei leicht gesteigerter Konzentration das Atemzentrum des Gehirns, bei deutlich höherer Konzentration dagegen wird der reflektorische Atemreiz vermindert oder sogar aufgehoben. Es kommt zum Atemstillstand. Diese Wirkungen treten viel rascher ein als eine Erstickung [WIKIPEDIA 2006].

Tabelle 5: Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf den Menschen [WIKIPEDIA 2006]

Konzentration	Wirkung
0,05 %	natürliche Konzentration der Luft
0,15 %	Hygienischer Innenraumluftrichtwert für frische Luft
0,3 %	MIK-Wert, unterhalb keine Gesundheitsbedenken bei dauerhafter Einwirkung
0,5 %	MAK-Grenzwert für tägliche Exposition von 8 h/Tag
1,5 %	Zunahme des Atemzeitvolumens um mehr als 40 %
3 %	300%ige Erhöhung der Atmung *
4 %	Atemluft beim Ausatmen
5 %	Kopfschmerzen, Schwindel, Bewusstlosigkeit
> 5 %	beschleunigter Herzschlag, Bluthochdruck, Atemnot, Bewusstlosigkeit (CO ₂ -Narkose)
8 %	Bewusstlosigkeit, Tod nach 30 – 60 min

* [KUNKELMANN 2002]

2.2.3 Kohlenstoffmonoxid

Kohlenstoffmonoxid (meistens kurz Kohlenmonoxid genannt, CO) ist ein farbloses, geruchloses und geschmackloses Gas, dessen physiologische Wirkung in der Blockierung des Hämoglobins (Hb) im Blut besteht. Es bildet das sogenannte Carboxihämoglobin COHb, wodurch der Transport von Sauerstoff im Blut beeinträchtigt wird. Die Symptome einer Intoxikation mit Kohlenmonoxid entstehen demzufolge aus einer Sauerstoff-Unterversorgung lebenswichtiger Organe und äußern sich bei entsprechender Konzentration in Bewusstlosigkeit, Ersticken und Tod. Die Affinität des Kohlenmonoxids zu Hämoglobin beträgt ein Vielfaches dessen von Sauerstoff (häufigste Angabe: 200-300fach z. B. [FIERRO 2000]). In der Studie der [WHO 1999] wird als Vielfaches 240–250 angegeben. Als Expositionspfad werden die Lungen angegeben, eine Aufnahme durch die Haut oder den Verdauungstrakt wird hier als nicht wahrscheinlich angegeben. Wegen der hohen Affinität des Kohlenmonoxids zum Hämoglobin bleibt dieses auch über eine gewisse Zeit als Carboxihämoglobin (COHb) gebunden.

Die Bildung von COHb ist ein reversibler Prozess, der von der Höhe des Ausgangswertes im Körper, der Konzentration in der Umgebung, der Expositionszeit, körperlicher Aktivität sowie durch die individuelle Konstitution beeinflusst wird. Die beiden letztgenannten Parameter beeinflussen z. B. das Atemvolumen. Von dem eingeatmeten CO werden etwa 80-90% an das Hb gebunden. Durch die Sauerstoffunterversorgung der Organe werden am meisten das Gehirn, das kardiovaskuläre System und die ausführende Skelettmuskulatur betroffen. Es ist bekannt, dass heftiger Sauerstoffmangel auf Grund von CO-Vergiftung, wenn auch

reversibel, kurzzeitige neurologische Defizite und ernste, oft verspätete, neurologische Schäden nach sich ziehen kann. Für verschiedene Bereiche an COHb-Werten werden die in Tabelle 6 aufgeführten Symptome angegeben [WHO 2000].

Tabelle 6: Symptome für verschiedene Bereiche an COHb-Werten [WHO 2000]

COHb-Wert	Symptome
10 %	Kopfschmerzen
> 10 %	Schwindel, Übelkeit, Erbrechen
> 40 %	Koma, Kollaps
50 – 60 %	oft tödlich

Ergebnisse aus Versuchen mit Tieren und invitro-Systemen zeigten, dass sich CO bei höheren Konzentrationen nicht nur an das Eisen des Hämoglobins sondern auch an andere Proteine wie Myoglobin (Einschränkung der Herzfunktion, Beeinträchtigung der Skelettmuskulatur-sauerstoffversorgung), Cytochromoxidase (Beeinträchtigung von Herz und Gehirn) und Cytochrom P-450 bindet. Es ist aber bisher ungewiss, ob diese Mechanismen beim Menschen genauso funktionieren [WHO 2000].

Mit Hilfe verschiedener mathematischer Modelle lassen sich an Hand der Belastung mit CO aus der Umwelt COHb-Werte berechnen. Die einfachste Gleichung wurde in der Zeit der Jahrhundertwende von Haldane aufgestellt, der seine Untersuchungen in den Kohleminen Englands ausführte. Mit dieser einfachen Gleichung (1) setzte er die Partialdrücke des Kohlenmonoxids und Sauerstoffs der Luft mit den Konzentrationen des Carboxihämoglobins und Oxihämoglobins des Blutes in Beziehung. M ist bekannt als Haldane-Konstante und beträgt näherungsweise 200 [PENNEY 2006].

$$\frac{[HbCO]}{[HbO_2]} = M \frac{(pCO)}{(pO_2)} \quad (1)$$

Gemäß dieser Gleichung steigt der COHb-Wert im Blut mit steigendem Partialdruck des CO in der Luft (steigenden ppm CO) und/oder mit fallendem O₂-Partialdruck in der Luft (verminderter O₂-Konzentration). Das bedeutet, dass eine tödliche Gefahr von CO-Konzentrationen ausgehen kann, die im allgemeinen nicht als tödlich gelten, wenn der O₂-Gehalt der Umgebungsluft besonders niedrig ist. Allein ein niedrigerer O₂-Partialdruck bewirkt, dass der COHb-Wert ansteigt. Ergebnisse dieser Gleichung sind für einen konstanten CO-Wert von 500 ppm in Abbildung 6 grafisch dargestellt [PENNEY 2006].

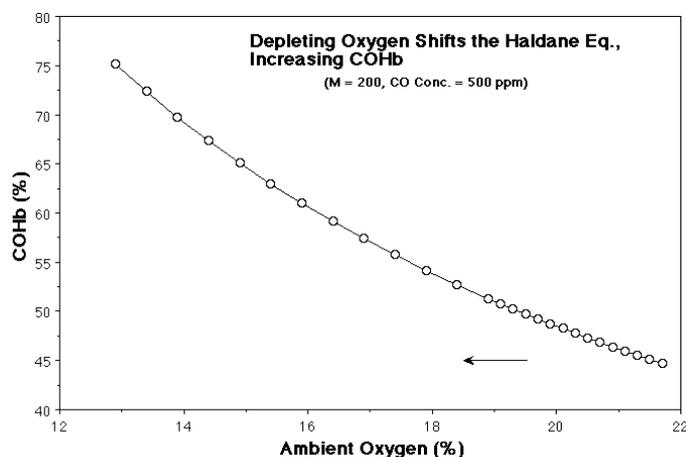


Abb. 6: Einfluss des O₂-Partialdruckes der Luft auf den COHb-Wert im Blut bei konstanter CO-Konzentration von 500 ppm, Ergebnisse der Haldane-Gleichung [PENNEY 2006]

[FORBES ET AL. 1945] untersuchten die Aufnahme von reinem CO bei Menschen, die sich in Ruhephase befanden, bei verschiedenen CO-Konzentrationen und Expositionsintervallen bis zum Erreichen von bestimmten COHb-Sättigungswerten im Blut und entwickelten eine Berechnungsgleichung, wonach der Anstieg des COHb-Wertes in einem schmalen Bereich nahezu proportional zur CO-Konzentration und Expositionsdauer zu sein scheint. Aus diesen und weiteren Arbeiten verschiedener Autoren wurden Berechnungen entwickelt, aus denen die exponentielle Abhängigkeit der CO-Aufnahme zu den Parametern deutlich wurde. [PENNEY 2006] stellte die Ergebnisse von [FORBES ET AL. 1945] grafisch dar (Abbildung 7).

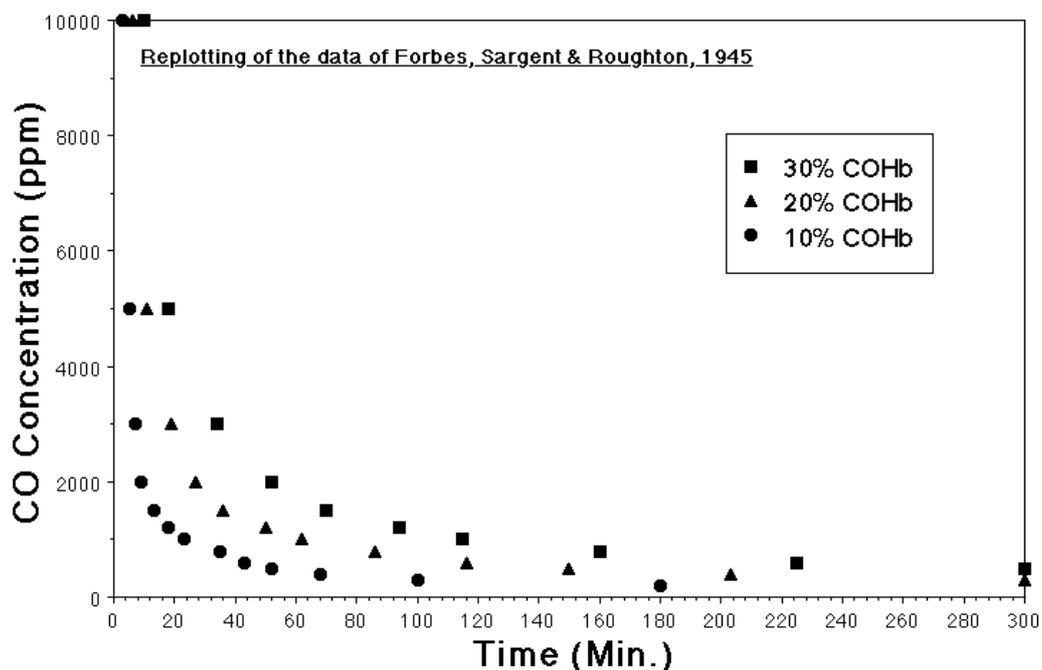


Abb. 7: Aufnahme von CO bei Menschen in Ruhephase bis zum Erreichen von COHb-Sättigungswerten im Blut in Abhängigkeit von CO-Konzentration und Expositionsdauer [PENNEY 2006]

Das bedeutendste Berechnungsmodell ist die Coburn-Foster-Kane-Exponentialgleichung, die alle bekannten physiologischen Parameter, die eine CO-Aufnahme beeinflussen, berücksichtigt. 1965 ursprünglich für die Berechnung des Carboxihämoglobinwertes als Folge der endogenen CO-Produktion entwickelt, soll es robust genug sein, erweiterten Ansprüchen zu genügen. Bei Exposition gegenüber einer konstanten Konzentration an CO steigt die COHb-Konzentration rapide zu Beginn und erreicht nach 6 – 8 h einen stationären Zustand. Die Ausscheidung erfolgt ebenfalls wieder über die Lungen in unveränderter Form, abhängig vom Sauerstoffgehalt in der Atemluft [WHO 2000]. Mit der Maßgabe, dass ein COHb-Wert von 2,5% nicht überschritten wird, eine normale Konstitution vorliegt und eine leichte bis moderate Belastung ausgeübt wird, wurden die in Tabelle 7 angegebenen Werte berechnet.

Tabelle 7: Bedingungen zum Erreichen eines COHb-Wertes von 2,5 [WHO 2000], berechnet mit der Coburn-Foster-Kane-Exponentialgleichung

CO-Konzentration		Expositionszeit
90 ppm	(100 mg/m ³)	15 min
50 ppm	(60 mg/m ³)	30 min
25 ppm	(30 mg/m ³)	1 h
10 ppm	(10 mg/m ³)	8 h

Ergebnisse von Berechnungen nach Coburn-Foster-Kane für niedrige CO-Konzentrationen durch eine Produktionsrate von endogenem CO von 0,007 ml/min zeigt Abb. 8 [EPA 1999].

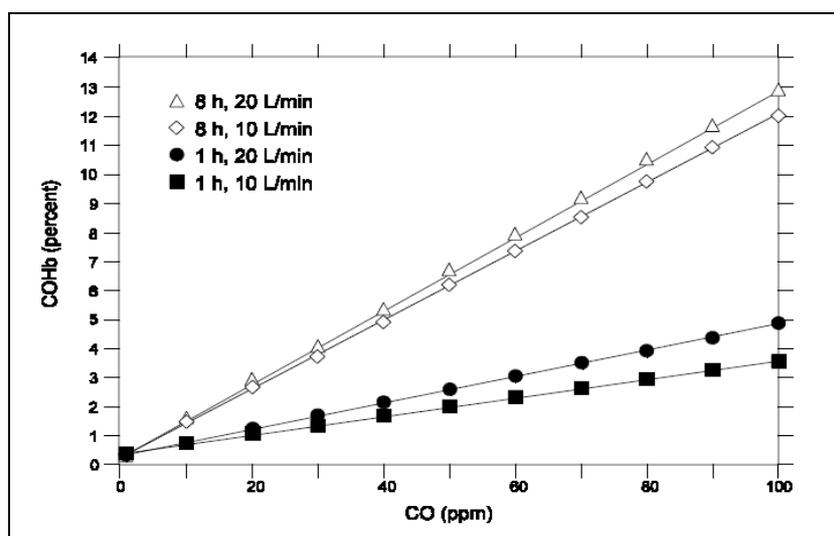


Abb 8: Berechnete COHb-Werte für 1- und 8-stündige Exposition bei Ruhe (Minutenventilationsrate 10 l/min) und leichter Belastung (20 l/min) unter Annahme folgender Parameter für erwachsene Nichtraucher: Höhe = 0, Ausgangswert COHb = 0,5 %, Haldane-Koeffizient = 218, Blutvolumen = 5,5 l, Hb-Wert = 15 g/100 ml, Lungendiffusionsvermögen = 30 ml/Torr min

Weitere Berechnungsergebnisse zur Entwicklung des COHb-Wertes im menschlichen Blut bei Exposition mit dem gleichen CO-Volumenstrom von 0,007 ml/min mittels Coburn-Foster-Kane-Gleichung von [PETERSON, STEWART 1975] veröffentlichte [PENNEY 2006] (Abb. 9).

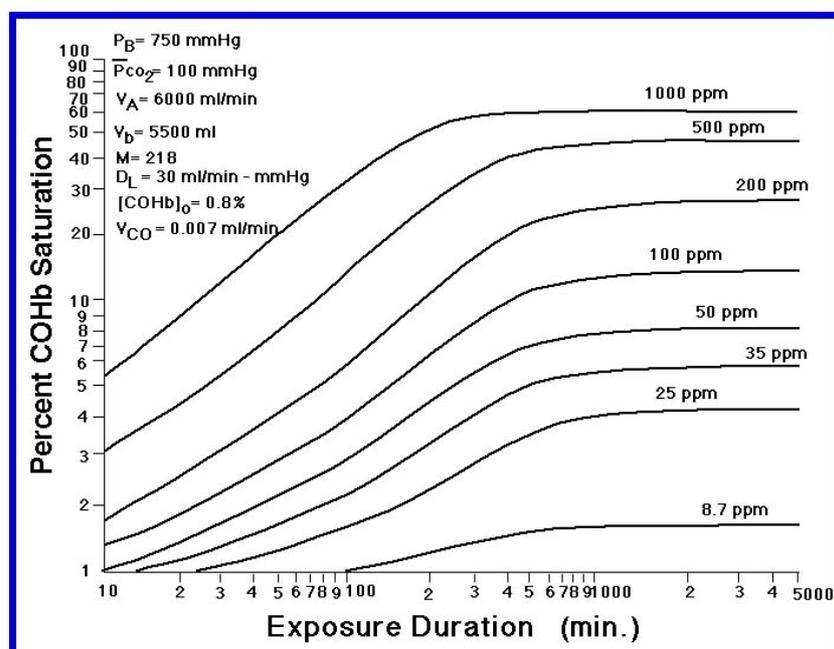


Abb. 9: Berechnete zeitliche Entwicklung des COHb-Blutwertes bei Exposition mit niedrigen CO-Konzentrationen, $P_{CO_2} = O_2$ -Partialdruck in Lungenkapillaren, V_A = alveolare Ventilationsrate, V_b = Blutvolumen, M = Gleichgewichtskonstante, D_L = Lungendiffusionskapazität, $[COHb]_0$ = Wert vor CO-Exposition, V_{CO} = Produktionsrate endogenes CO, [PENNEY 2006]

[PETERSON, STEWART 1975] belegten mit ihren experimentell gewonnenen COHb-Werten durch CO-Exposition von Menschen die Genauigkeit der Coburn-Forster-Kane-Gleichung. Sie stellten experimentelle und berechnete Ergebnisse grafisch dar. In den experimentell untersuchten Bereichen ist gute Übereinstimmung erkennbar. Die in Abbildung 10 gezeigte Darstellung wurde ebenfalls von [PENNEY 2006] veröffentlicht.

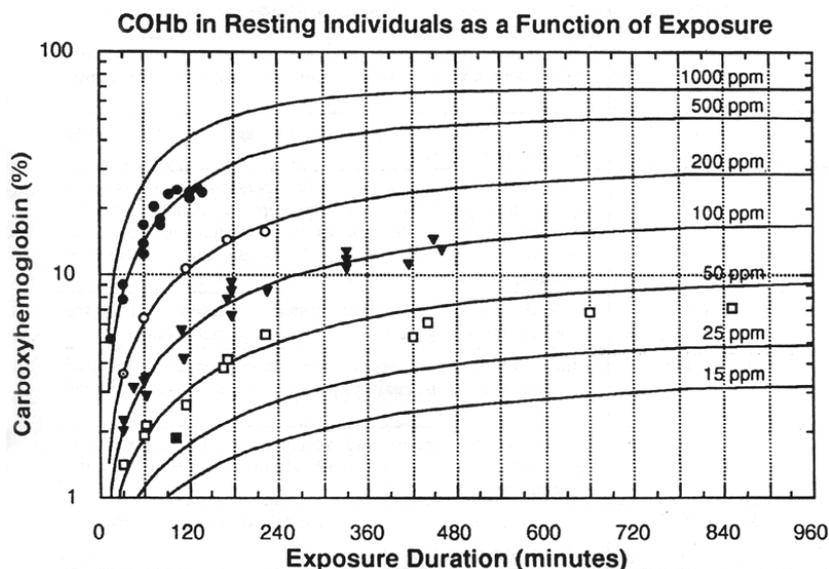


Abb. 10: Vergleich von berechneten und experimentell durch CO-Exposition erhaltenen COHb-Blutwerten von [PETERSON, STEWART 1975] in [PENNEY 2006]

[STEWART 1975] machte deutlich, dass von allen Variablen, die in diese Berechnungen einfließen, CO-Konzentration und Expositionsdauer den bedeutendsten Einfluss auf die COHb-Sättigung des Blutes haben. Daher kann eine kurze Exposition mit hoher CO-Konzentration eine signifikant höhere COHb-Sättigung bewirken. Bei der Einatmung des CO diffundiert dieses über die Alveolarmembran und das Blutplasma in die Erythrocyten, wo rasche Bindung an das Hb stattfindet. Limitierender Schritt ist die Diffusion durch das Plasma. Weil CO schlecht wasserlöslich ist, erfolgt die Aufsättigung des zirkulierenden Blutes (Erreichen des Gleichgewichtszustandes) relativ langsam. Je höher aber die CO-Konzentration in der Luft ist, desto schneller findet die Diffusion statt, werden also desto schneller toxische COHb-Konzentrationen erreicht [ARBEITSSICHERHEIT 1999].

Auch die alveolare Ventilation bestimmt als eine bedeutende Variable die COHb-Bildungsrate [STEWART 1975]. Je häufiger und je tiefer geatmet wird, umso länger ist die Kontaktzeit des CO an den kritischen Austauschflächen (Alveolen) und desto rascher ist die Aufsättigung. Das annähernde CO-Gleichgewicht Luft/Blut wird in Ruheatmung erst in ca. 10 Stunden erreicht. Auch eine Konzentration von 0,1 Vol% CO erzeugt erst nach 1 Stunde einen COHb-Wert von ca. 30% [ARBEITSSICHERHEIT 1999]. [FORBES 1945] stellte für die CO-Aufnahme eine fast proportionale Abhängigkeit von der Ventilationsrate bis zur Höhe von 20 l/min fest. Bei höherer Ventilation ist die CO-Aufnahme etwa 10 – 15 % geringer als nach proportionaler Anhängigkeit erwartet. In Abbildung 11 ist der Anstieg des COHb-Wertes pro Liter eingeatmeter Luft bis zu einer CO-Konzentration von 35.600 ppm dargestellt. Nach der Methode der kleinsten Quadrate wurde von [STEWART 1975] Gleichung (2) für die Berechnung der Änderung des COHb-Wertes abgeleitet.

$$\log (\Delta \% \text{ COHb} / \text{Liter}) = 1,036 \log (\text{ppm CO}) - 4,4793 \quad (2)$$

Hinsichtlich der akuten Toxizität weist [STEWART 1975] darauf hin, dass Intoxikationen mit CO-Konzentrationen von über 1 % Bewusstlosigkeit hervorrufen können, ohne dass die

allgemein als „klassisch“ bekannten und erwarteten Symptome, wie Kopfschmerzen, Übelkeit und Erbrechen auftreten. Kinder und Personen mit Erkrankungen des Kardiovaskularsystems, der Lunge, Anämie sowie einer gesteigerten Metabolismusrate haben eine weit größere Anfälligkeit gegenüber toxischen Effekten durch CO.

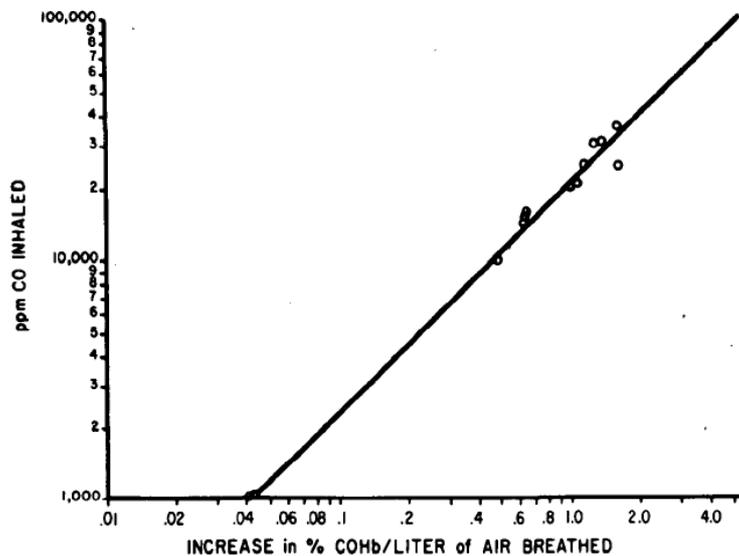


Abb. 11: Verhältnis zwischen CO-Exposition und Anstieg der venösen COHb-Sättigung (%) [STEWART 1975]

Den Einfluss körperlicher Aktivität auf die CO-Aufnahme wird aus Abbildung 12 deutlich. Mit steigender körperlicher Belastung steigt das Atemminutenvolumen von durchschnittlich 10 l/min bei Menschen in Ruhephase auf 20 l/min bei leichter Aktivität und auf 30 l/min bei schwerer körperlicher Arbeit. Es wird nicht nur mehr CO aufgenommen, durch die gesteigerte Aktivität wächst auch der Sauerstoffbedarf der Körpergewebe. Somit werden bei schwerer körperlicher Arbeit bereits COHb-Werte von 30 – 40 % als kritisch erachtet, dagegen in körperlicher Ruhe erst Werte von 60 – 70 % [ARBEITSSICHERHEIT 1999]. Ein Aspekt, der hinsichtlich der Bewertung von zur Verfügung stehenden Fluchtmöglichkeiten respektive Fluchtzeiten bei Brandereignissen von Bedeutung ist, da hier Aufregung, Angst und Orientierungslosigkeit wegen behinderter Sicht ebenfalls zur Steigerung der Atemfrequenz beitragen können.

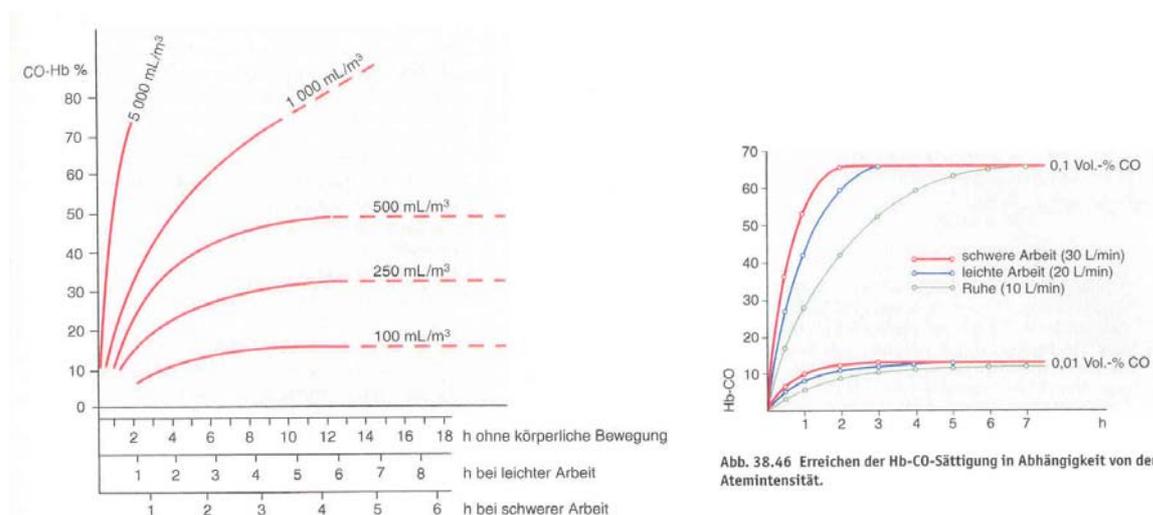


Abb. 12: CO-Aufnahme in Abhängigkeit von der Expositionshöhe und Expositionsdauer sowie dem Atemminutenvolumen [ARBEITSSICHERHEIT 1999]

In Tabelle 8 sind weitere Untersuchungsergebnisse verschiedener Autoren, die Untersuchungen zur CO-Exposition mit Menschen ausführten, aufgelistet.

Tabelle 8: Ergebnisse verschiedener Autoren zur CO-Exposition von Menschen

CO-Konzentration	Expositionszeit	COHb-Wert	Bemerkungen	Quelle
3.000 ppm 3.000 ppm 667 ppm	3 min 1 min 1 min	10 %	intermittierend, bei 45 W, 90 W Belastung	Tikuisis et al. 1992
6.683 ppm	3,1 – 6,7 min	13,9 – 20,9 %	Exposition in Ruhe	Benignus et al. 1994
4.300 ppm	3 – 5 h	23 %		Parving 1972
5.000 ppm	2 – 3 min	4 %		Chevalier et al. 1966
60.000 ppm	18 s	17 – 19 %		Fisher et al. 1969
500 ppm	2,3 h	25%		Peterson, Steward 1970
11 %	30 s	4 %		Pace et. Al. 1950

Gesunde Menschen sollten laut [CoGDEM 2006] COHb-Werte von 3-5% ohne spürbare Symptome vertragen können. Raucher halten beispielsweise ein COHb-Level von 2 – 10 %. Starke Raucher erreichen sogar Werte bis 15 % [ARBEITSSICHERHEIT 1999].

Die, im Gegensatz zu manch anderen Berufsgruppen, bei Untersuchungen von Feuerwehrleuten festgestellte höhere Einschränkung der Lungenleistung wird mit der häufigen Exposition durch Brandrauch in Zusammenhang gebracht. Keine der darüber durchgeführten früheren Studien gab Auskunft über Höhe der Konzentration, Dauer der Exposition und Häufigkeit. Untersuchungen von Berufsfeuerwehrleuten vor und nach der Schicht sowie nach jedem Einsatz durch [SHEPPARD ET AL. 1986] zeigten, dass die in der Ausatemluft vorhandene Konzentration an CO (100 ppm, 132 ppm) gut übereinstimmten mit den berechneten COHb-Werten von 17–22 %.

[ANDERSON ET AL. 1983] fanden bei Untersuchungen von Brandopfern bei einem Anteil von nahezu 55% einen tödlichen Carboxihämoglobinwert (> 50%) und bei weiteren 13% Werte, die Bewegungsunfähigkeit erzeugen. Mit diesem Ergebnis ordnen sie etwa 2/3 aller Brandopfer der Wirkung von CO zu. [GILL ET AL. 2003] untersuchten die Opfer des Brandes im Happy Land Social Club in der Bronx von New York 1990. Alle 87 Opfer kamen durch die Rauchinhalation zu Tode. Es wurden COHb-Werte von 37 bis 93 % gefunden, wobei 97 % der Toten einen COHb-Wert größer 50 % aufwiesen. Weniger als ein Drittel hatten thermische Verletzungen. [MILLER 2005] veröffentlichte die in Abbildung 13 dargestellte Übersicht von COHb-Werten im Blut als Ergebnisse der Untersuchung von 109 Opfern bei Wohnungsbränden in Neuseeland. [GERLING ET AL. 2001] untersuchten 115 Todesfälle, welche in den Jahren von 1990 – 1999 Opfer einer thermischen Einwirkung und/oder eines Brandes in Lübeck (Deutschland) und Umgebung waren. Sie fanden die in Abbildung 14 dargestellte Verteilung der Opferzahl auf die angegebenen Bereiche der COHb-Blutwerte.

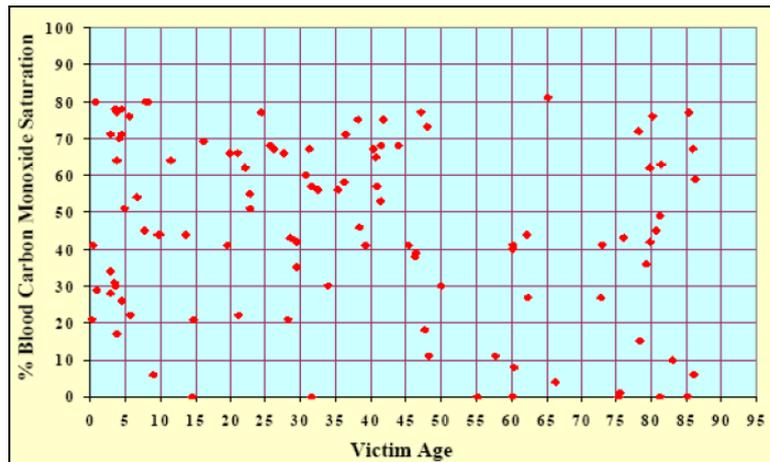


Abb. 13: COHb-Blutwerte von Brandopfern in Neuseeland [MILLER 2005]

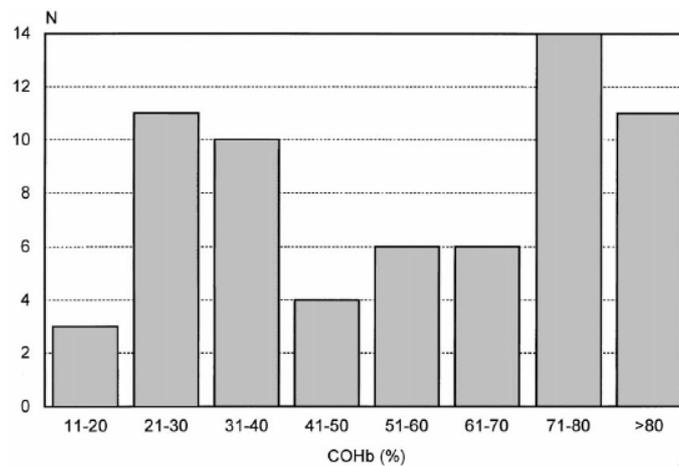


Abb. 14 : COHb-Werte im Blut von Opfern thermischer und/oder Brandwirkung [GERLING ET AL. 2001]

Zum Abbau des COHb-Blutspiegels durch Einatmen von Raumluft wird eine Halbwertszeit von 2 – 6,5 h angegeben in Anhängigkeit vom Ausgangswert [WHO 2000]. [TOMASZEWSKI 1999] gibt eine Halbwertszeit von 4 – 5 h an. Eine Sauerstofftherapie kann diese auf 1 h senken. Nach [SHOCHAT, LUCCHESI 2004] beträgt die Halbwertszeit bei Einatmen von Raumluft 3 - 4 h, bei Einatmen von 100%igem Sauerstoff 0,5 – 1,5 h bei einem Sauerstoffdruck von 2,5 atm 15 – 23 min. [PENNEY 2006] veröffentlichte den in Abbildung 15 dargestellten Abbau des COHb-Blutgehaltes in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck und der Behandlungszeit.

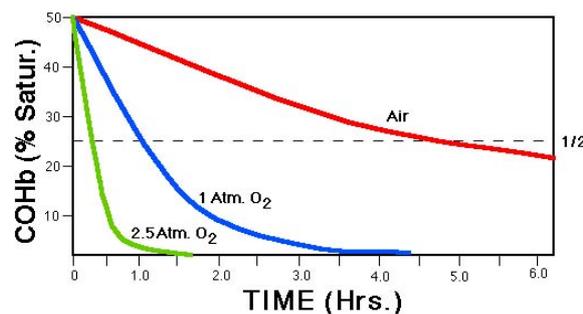


Abb. 15: Abbau des COHb-Blutgehaltes in Abhängigkeit vom O₂-Partialdruck und der Behandlungszeit [PENNEY 2006]

[SHIMAZU 2001] berichtete über den Abbau des COHb-Blutgehaltes einer 44-jährigen männlichen Person, die während eines Brandes 30 min der Exposition von CO ausgesetzt war (Abbildung 16). Diese Person litt unter leichten Verletzungen durch die Rauchinhalation, kleinen Verbrennungen und CO-Vergiftung. Wie aus der Grafik ersichtlich ist, muss hier durch die Exposition mit CO vor der Behandlung ein COHb-Wert von 60 – 70 % vorgelegen haben. Die erste Blutentnahme (Punkt A) erfolgte nach einer 20-minütigen Gabe von Sauerstoff auf dem Transport in das Krankenhaus. Dort erfolgte eine Intubation und Beatmung mit 100% Sauerstoff für 5 h. Aus dem Beitrag ging nicht hervor, ob der Mann die CO-Vergiftung überlebt hat. [SHIMAZU 2001] belegt anhand von Beispielen, dass die Halbwertszeit des COHb-Wertes auch stark von der vorangegangenen Expositionsdauer abhängig ist, da sie die Verteilung des CO im Körper beeinflusst.

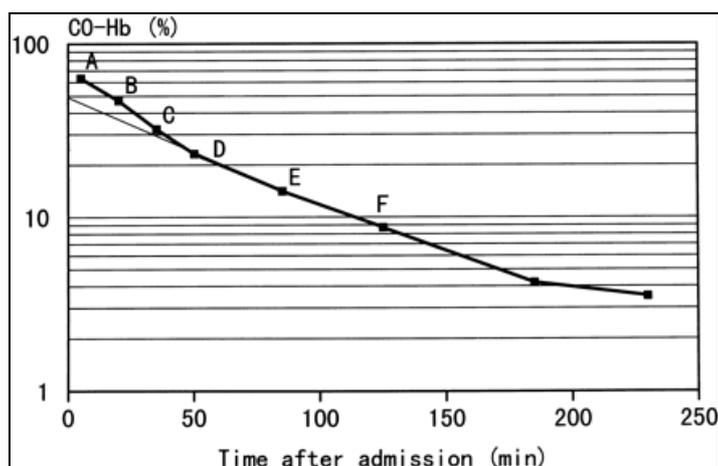


Abb. 16: Verlauf des COHb-Wertes eines Brandopfers während 5-stündiger Sauerstofftherapie [SHIMAZU 2001]

Hinsichtlich einer Exposition mit CO werden von der [NFPA 2000] die folgenden Wirkungen in Abhängigkeit von Konzentration und Expositionszeit genannt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Wirkungen von CO bei bestimmten Konzentrationen und Expositionszeiten [NFPA 2000]

Konzentration*	Expositionszeit	Wirkung
50 ppm	-	Schwell (Grenz) wert ohne nachteilige Wirkung
200 ppm	2 – 3 h	leichte Kopfschmerzen sind möglich
400 ppm	1 – 2 h	Kopfschmerzen, Übelkeit
800 ppm	45 min	Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindelgefühl
	2 h	Kollaps, möglicherweise Bewusstlosigkeit
1.000 ppm	1 h	Bewusstlosigkeit
1.600 ppm	20 min	Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindelgefühl
3.200 ppm	5 – 10 min	Kopfschmerzen, Schwindelgefühl
	30 min	Bewusstlosigkeit
6.400 ppm	1 – 2 min	Kopfschmerzen, Schwindelgefühl
	5 – 10 min	Bewusstlosigkeit, Todesgefahr
12.800 ppm	1 – 3 min	unmittelbare physiologische Effekte, Bewusstlosigkeit, Todesgefahr

* 10.000 ppm entsprechen 1 Vol%, MAK-Wert Deutschland 30 ppm

Von der [WHO 1999] werden folgende Wirkungen des CO in Abhängigkeit von Konzentration und COHb-Wert veröffentlicht (Tabelle 10).

Tabelle 10: Wirkungen des CO in Abhängigkeit von der CO-Konzentration respektive COHb-Wert [WHO 1999]

CO ppm	COHb %	Symptome
10	2	-
70	10	keine nennenswerten Effekte, Kurzatmigkeit bei großer Anstrengung, beklemmendes Gefühl in der Stirn möglich, Erweiterung der Hautblutgefäße
120	20	Kurzatmigkeit bei leichter Anstrengung, gelegentlich Kopfschmerzen mit Schläfenpochen
220	30	deutliche Kopfschmerzen, Reizbarkeit, Erschöpfung, gestörtes Urteilsvermögen, Schwindel möglich, getrübbte Wahrnehmung
350 – 520	40 – 50	Kopfschmerz, Verwirrung, Kollaps, Schwäche
800 – 1220	60 – 70	Bewusstlosigkeit, wiederholt Krämpfe möglich, Atemstillstand, bei ausreichender Expositionsdauer Tod
1950	80	schnell tödlich

[SHOCHAT, LUCCHESI 2004] weisen darauf hin, dass die Symptome vielleicht nicht gut mit den COHb-Levels korrelieren könnten, da sie oft nicht das klinische Bild reflektieren. Sie geben u. a. an, dass eine Exposition mit 100 ppm CO nach Erreichen des Gleichgewichtes einen COHb-Wert von 16 % erzeugt, was ausreicht, um klinische Symptome hervorzurufen.

Vom US National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH 1996] wurde angegeben, dass eine Exposition mit 80 –100 ppm CO für 1-2 h eingeschränkte Beweglichkeit hervorruft, Personen mit gesundheitlichem Risiko Schmerzen in der Brust und unregelmäßigen Herzschlag bekommen können. 100 –200 ppm rufen Kopfschmerzen, Übelkeit und geistige Beeinträchtigung hervor. Ab 700 ppm für 1 h und mehr ist mit ernsteren Wirkungen auf das Zentralnervensystem (Taumel, Verwirrung, Persönlichkeitsveränderung, Muskelschmerzen) sowie Koma und Tod zu rechnen. Die Symptome können mehrere Tage oder Wochen anhalten, nachdem die Exposition beendet ist und die vergiftete Person scheinbar wiederhergestellt ist.

Bei einem COHb-Wert von 30 –40 % ist wegen der nachlassenden Urteilsfähigkeit und Entschlusskraft sowie auftretender Koordinationsstörungen keine Selbstrettung mehr möglich [NOTFALLMEDIZIN 2006].

Nach kurz dauernder, auch schwerer Vergiftung, ist bei geeigneten Maßnahmen meist eine rasche Gesundung zu erwarten. Folgezustände und Spätschäden werden fast ausschließlich nach längerer CO-Einwirkung beobachtet. Es zeigen sich dann nervöse und psychische Störungen sowie funktionelle und organische Veränderungen. Eine chronische CO-Erkrankung kann auch durch kleinere, aber über längere Zeiträume eingeatmete, CO-Konzentration hervorgerufen werden [ARBEITSMEDIZIN 2004]. [SÜMMERER 2004] schätzte ein, dass eine in den ersten Wochen auftretende Besserung des Befindens nach CO-Vergiftung über weiterhin ablaufende zerebrale Prozesse hinwegtäuschen kann. Auch nach Wochen und Monaten können noch erhebliche Spätschäden, u. U. sogar mit Todesfolge auftreten. Diese Spätfolgen treten nicht nur nach schweren Vergiftungen auf. Aus französischen und amerikanischen Publikationen ist bekannt, dass diese auch nach so genannten leichten Intoxikationen mit einem COHb-Wert um 10 % beobachtet wurden. Mit Spätfolgen haben einer Veröffentlichung in [MEDIZIN-NETZ 2004] zufolge 10-40 % der Opfer zu kämpfen.

Bekannt sind die gesundheitlichen Spätfolgen der ehemaligen Angehörigen der US Army, die am Golf-Krieg teilnahmen und der Inhalation der Rauchgase der brennenden Ölquellen ausgesetzt waren. Mehrere Studien befassen sich mit der Untersuchung, wobei die

Schwierigkeiten in der Ableitung der Exposition mit Rauchgas liegen [COWAN ET AL. 2002], [SMITH ET AL. 2002].

In Deutschland wurde zur Einführung des „Neuen Steuermodells“ in den Kommunen von der KGSt der „Produktkatalog Feuerwehr“ erstellt. Darauf basierend hat die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren [AGBF 1998] als Empfehlung für die Produkte „Brandbekämpfung“ und „Technische Hilfeleistung“ die wesentlichen Qualitätskriterien erarbeitet. Diese sind „Hilfsfrist“, „Funktionsstärke“ und „Erreichungsgrad“ für ein standardisiertes Schadensereignis. Im In- und Ausland gilt als „kritisches“ Schadensereignis der Brand, der regelmäßig die größten Personenschäden fordert. In deutschen Städten ist dies der Wohnungsbrand im Obergeschoss eines mehrgeschossigen Gebäudes bei verqualmten Rettungswegen. Da die Qualitätskriterien für das Produkt „Brandbekämpfung“ auch für das Produkt „Technische Hilfeleistung“ als hinreichend eingeschätzt wurden, beschränken sich diese Betrachtung auf den „Kritischen Wohnungsbrand“. Gemäß der Bundesstatistik ist die häufigste Todesursache bei Wohnungsbränden die Rauchgasintoxikation (CO-Vergiftung), somit folgte daraus als zeitkritische Aufgabe bei einem Brand die Menschenrettung. Grundlage für die Abschätzung der Exposition mit CO und der daraus folgenden gesundheitlichen Gefährdung von Personen bei einem Wohnungsbrand waren wissenschaftliche Untersuchungen (ORBIT-Studie) von [Beyerle et al. 1978] in den siebziger Jahren. Danach liegen bei Rauchgasvergiftungen von Personen die sogenannte Erträglichkeitsgrenze bei 13 Minuten und die Reanimationsgrenze bei ca. 17 Minuten nach Brandausbruch (siehe Abbildung 17). Diese Zeiten wurden als Grenzwerte für die Festlegung der Hilfsfrist anerkannt.

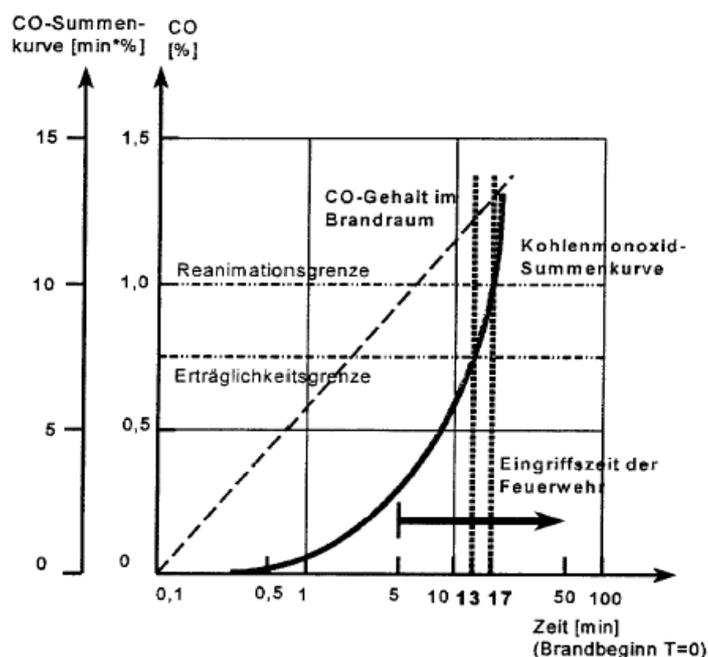


Abb. 17: CO-Konzentration, Erträglichkeitsgrenze und Reanimationsdauer in Abhängigkeit von der Vorbrenndauer [Beyerle et al. 1978]

Leider waren die in der Studie angegebenen Quellen nicht komplett erhältlich, so dass keine Hinweise auf das hier zugrunde liegende Brandszenario, Versuchsdaten oder Erkenntnisse zu finden waren, die als Grundlage für die in der Grafik dargestellten Werte und Kurven hätten dienen können. So bleiben die hier vermittelten Aussagen nicht nachvollziehbar. Zu beachten wäre außerdem, dass sich seit dieser Zeit Entwicklungen im Bauwesen hin zu energiesparenden Maßnahmen vollzogen haben, die ein mögliches Brandgeschehen beeinflussen. Die Ventilationsbedingungen wurden bewusst durch den Einbau von dichter

schließenden Fenstern und Türen verändert. Dämmstoffe werden mittlerweile in viel größerem Umfang verwendet, wie auch das Materialaufkommen einer Wohnungseinrichtung einem zeitlichen Wandel unterliegt.

Durch Ablesen von Werten aus der grafischen Darstellung der ORBIT-Studie (Abbildung 17) ließ sich die zeitliche Entwicklung der CO-Konzentration in normaler Darstellung rekonstruieren (Abbildung 18). Dem Verlauf nach zu urteilen, könnte für die Auswertung ein reales Brandgeschehen zugrunde gelegen haben. In den ersten 5 Minuten entwickelte sich die CO-Konzentration bis auf einen Wert von etwa 1 Vol%, während in den nachfolgenden 8 Minuten ein Konzentrationsanstieg bis etwa 1,2 Vol% erfolgte. Werden dafür die vorgenannten Erkenntnisse von [Steward 1975] zur Berechnung von COHb-Blutwerten angewandt, lassen sich mit Gleichung (2) folgende Ergebnisse errechnen:

Parameter	COHb	Parameter	COHb
Person mit Ruheatmung (10l/min) mittlere CO-Konzentration von 0,5 Vol% (5.000 ppm) Expositionszeit 5 min (0-5. min)	11	Person mit leichter Aktivität (20l/min) mittlere CO-Konzentration von 0,5 Vol% (5.000 ppm) Expositionszeit 5 min (0-5. min)	23
Person mit Ruheatmung (10l/min) mittlere CO-Konzentration von 1,1 Vol% (11.000 ppm) Expositionszeit 8 min (6.-13. min)	41	Person mit leichter Aktivität (20l/min) mittlere CO-Konzentration von 1,1 Vol% (11.000 ppm) Expositionszeit 8 min (6.-13. min)	81

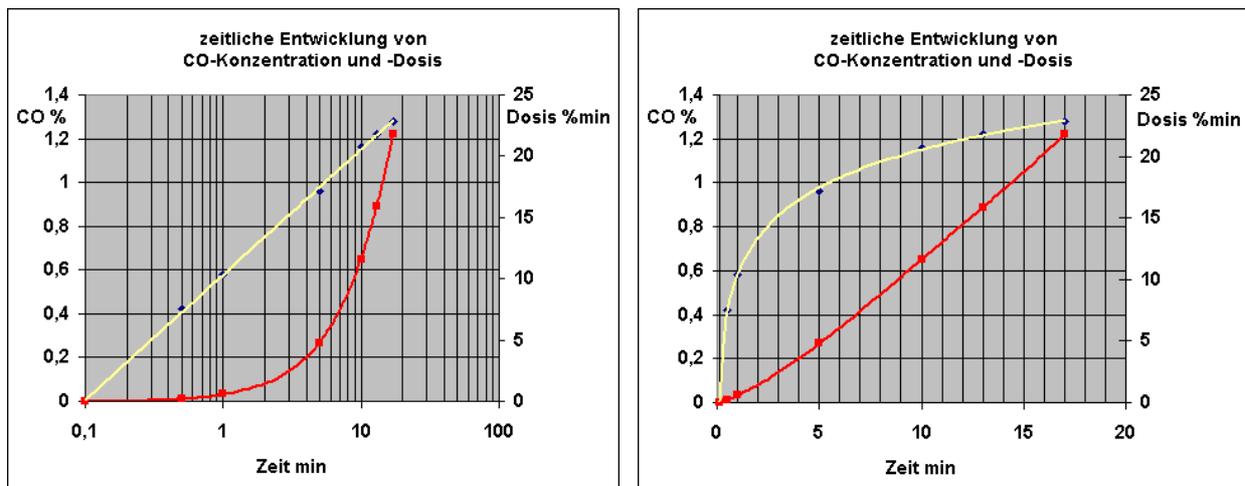


Abb. 18: CO-Entwicklung bei einem Brand laut ORBIT-Studie [Beyerle et al. 1978] (ausgelesene Werte neu dargestellt)

Die Ergebnisse für die Berechnung der ersten 5 min Expositionszeit stimmen gut mit dem Verlauf der Kurve 5000 ml/m³ in Abbildung 12 überein. In den ersten 5 Minuten sollten je nach Atemintensität COHb-Werte erreicht werden, die bereits Symptome wie Kopfschmerzen, Herzklopfen, Kurzatmigkeit und u. U. Schwindel, Einschränkung des Bewusstseins sowie Gliederschlaflheit oder –lähmung hervorrufen. Die folgenden 8 Minuten sollten gemäß der Berechnung zu COHb-Werten führen, die Kreislaufkollaps, Lähmung, Krämpfe, Bewusstlosigkeit und Atemstillstand bewirken. Eine Selbstrettung ist in diesem Zustand nicht mehr möglich (siehe [NOTFALLMEDIZIN 2006]). Die Untersuchungen von Brandopfern zeigten, dass in deren Blut durchaus auch COHb-Werte unter 50% zu finden waren. Gar nicht mit einberechnet werden hierbei die Wirkungen der anderen Brandrauchbestandteile wie z. B. Kohlendioxid, die Auswirkungen des verminderten Sauerstoffgehaltes oder der hohen Temperaturen.

Mittlerweile werden die Zeitangaben aus der ORBIT-Studie als die „gefährlichsten Mythen“ bezüglich der zur Verfügung stehenden Fluchtzeit bei Wohnungsbränden bezeichnet. Im Oktober 2000 wurde auf Initiative des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV), der „Arbeitsgruppe Heimrauchmelder“ des Fachverbandes Sicherheitssysteme des Zentralverbandes der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) sowie des Bundesverbandes der Hersteller- und Errichterfirmen von Sicherheitssystemen (BHE) eine bundesweite Aufklärungskampagne „Rauchmelder retten Leben“ gestartet. Aktive Unterstützung erfährt diese Kampagne u. a. durch die vfdb und den DFV. In den Schriften [BERATERHANDBUCH] und dem [FALTBLATT] „Rauchmelder retten Leben“ wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass entgegen der allgemeinen Annahme, 10 Minuten Zeit zur Flucht zu haben, durchschnittlich lediglich 4 Minuten dafür zur Verfügung stehen und dass eine Rauchvergiftung bereits nach 2 Minuten tödlich sein kann. Zu gleichen Aussagen kommen z. B. auch [Purser 2002] und [KUNKELMANN 2002] bei der Auswertung von Untersuchungen zu Wohnungsbränden. Tödliche Sauerstoff- und Brandgaskonzentrationen treten bereits in weniger als 3 Minuten auf. Ebenso teilte [HOFMANN 2006] mit, dass sich Brände durch den gestiegenen Anteil an Kunststoffen in Wohnungen heute schneller entwickeln als vor 30 Jahren und demzufolge die Fluchtzeiten auf 2 – 4 Minuten verkürzen.

Die Begriffe Erträglichkeitsgrenze und Reanimationsgrenze im Zusammenhang mit einer CO-Intoxikation waren in keiner medizinischen Publikation zu finden. Der [AUSSCHUSS KRANKENHAUS 2003] stellte im Rahmen einer Untersuchung zur Anwendung der hyperbaren Sauerstofftherapie bei Kohlenmonoxidintoxikation den medizinisch-wissenschaftlichen Wissensstand zu dieser Thematik fest. Es wurde dargelegt, dass es keine klare Evidenz für die Definition eines toxischen COHb-Spiegels im Blut gibt und somit zwischen COHb-Spiegel und der Abschätzung der Schwere des Verlaufs der CO-Intoxikation sowie der Prognose keine verlässliche Beziehung angegeben werden kann.

Dennoch müssen aus der Sicht des Brandschutzes für die Auslegung von Flucht- und Rettungswegen Methoden zur Einschätzung der toxischen Wirkung von Brandgasen und der thermischen Belastung genutzt werden.

[Purser 2002] wendet für die Abschätzung der Toxizität bei Inhalation von Brandrauch das „Fractional Effective Dose“ (FED)-Konzept an. Dieser Wert ist das Verhältnis aus der zur Zeit t erreichten Dosis (Produkt aus Konzentration c und Expositionszeit t) zu der Dosis, die Handlungsunfähigkeit (in der Regel Bewusstlosigkeit) oder Tod hervorruft. Die Dosis, für die Abschätzung der Inhalationstoxikologie ansonsten gebräuchlich, kann normalerweise im Falle des CO nicht angewandt werden, weil dessen Aufnahme in den Körper einer exponentiellen Funktion folgt. Lediglich bei kurzer Expositionszeit mit Konzentrationen, die so hoch im Verhältnis zu der im Körper sind, dass sie Handlungsunfähigkeit oder Tod erzeugen, wird die CO-Aufnahme nahezu linear. Zur Einschätzung der voraussichtlichen toxischen Gefahr bei einem Brandgeschehen ist deshalb die Vorhersage des Zeitpunktes, zu dem ein Opfer eine toxische Dosis inhaliert haben wird, erforderlich. Bei sich verändernden Brandverhältnissen ist die Dosis durch Integration der Konzentrations-Zeit-Kurve einer toxischen Komponente des Brandrauches erhältlich. Eine praktische Methode stellt das FED-Konzept dar. Hier wird das Konzentrations-Zeit-Produkt eines jeden relevanten Stoffes für eine kurze Zeitspanne während eines Brandablaufes durch dasjenige Konzentrations-Zeit-Produkt dividiert, welches einen toxischen Effekt wie z. B. Handlungsunfähigkeit oder Tod hervorruft. Die Einzeldosen werden über die Expositionszeit aufsummiert. Handlungsunfähigkeit oder Tod tritt ein, wenn der Wert 1 erreicht wird. Die gesuchte Zeit t bis zum Eintreten der Handlungsunfähigkeit bzw. des Todes ergibt sich aus der Summe der Zeitintervalle. Die Abschätzung der Toxizität auf der Basis des FED-Konzeptes fand Eingang in den vfdb-Leitfaden der Ingenieurmethoden des Brandschutzes [VFDB-REFERAT 4 2005].

Bei Inhalation von CO wird die toxische Dosis eigentlich durch den im Körper verursachten COHb-Wert repräsentiert, so dass die Gleichung (2) von [STEWART 1975] entsprechend in der Form eines COHb-Verhältnisses (3) genutzt werden kann für die Abschätzung des

Eintretens der Handlungsunfähigkeit oder des Todes von Brandopfern. Die Berechnung der weiteren in Brandgasen festgestellten narkotisierenden Gase HCN und CO₂ erfolgt mit den Gleichungen 4 und 5. Die Wirkung von Sauerstoffmangel wird einbezogen, ebenso die durch CO₂ hervorgerufene Hyperventilation (Gleichungen 6 und 7). Bei Eingabe der Randbedingungen für das Eintreten der Handlungsunfähigkeit oder des Todes wird diese erreicht, wenn die Summe aller Einzeldosen F_j (Gleichung 8) über das Zeitintervall der Exposition den Wert 1 erreicht [Purser 2002].

Die Konzentrationen c_{CO} und c_{HCN} sind in den Einheiten ppm anzugeben, die Konzentrationen c_{CO₂} und c_{O₂} in Volumenprozent. RMV ist das Atemminutenvolumen in l/min. D bezeichnet die kritische Menge COHb Vol% im Blut, die zur Bewusstlosigkeit führt. RMV und D hängen von individuellen körperlichen Merkmalen sowie dem Aktivitätsgrad ab. Typische Werte für einen 70 kg schweren Erwachsenen, der sich in Ruhe befindet, sind D = 40 % und RMV = 8,5 l/min. Bei leichter körperlicher Beanspruchung verändern sich die Werte in D = 30 % und RMV = 25 l/min. Für kleinere Kinder sind die Zeiten bis zum Eintreten der Bewegungsunfähigkeit etwa um den Faktor 2 kürzer [VFDB-REFERAT 4 2005].

Im Falle des CO₂ ist die Wirkung der Hyperventilation und damit verstärkte Aufnahme der weitaus stärker toxischen Gase CO und HCN von größerer Bedeutung. Gleichzeitig wird jedoch auch F_{CO₂} berechnet, da bei Abwesenheit oder geringer Konzentration der anderen Komponenten die maximal tolerierbare Expositionsdauer t durch die toxische Wirkung des CO₂ bestimmt wird. Dagegen zeigt Sauerstoffmangel kaum einen Effekt bei Gegenwart von schädlichen CO₂-Konzentrationen. Dies liegt zum einen an dem Effekt der Hyperventilation, zum anderen an einer Verschiebung der Sauerstoff-Dissoziationskurve und der daraus resultierenden Verbesserung der Sauerstoff-Übergabe an die Gewebezellen [KÖNNECKE 2000].

$$F_{CO} = \frac{3,317 \cdot 10^{-5} \cdot RMV \cdot c_{CO}^{1,036} \cdot \Delta t}{D} \quad (3)$$

$$F_{HCN} = \frac{\Delta t}{\exp(5,396 - 0,023 \cdot c_{HCN})} \quad (4)$$

$$F_{CO_2} = \frac{\Delta t}{\exp(6,1623 - 0,5189 \cdot c_{CO_2})} \quad (5)$$

$$F_{O_2} = \frac{\Delta t}{\exp(8,13 - 0,54 \cdot (20,9 - c_{O_2}))} \quad (6)$$

$$V_{Hyp} = \exp(0,2 \cdot c_{CO_2}) \quad (7)$$

$$F = \max[(F_{CO} + F_{HCN}) \cdot V_{Hyp} + F_{O_2}, F_{CO_2}] \quad (8)$$

Wird die FED-Methode auf die in der Grafik der ORBIT-Studie veröffentlichte CO-Entwicklung angewandt, kann zumindest für den Einfluss des Kohlenmonoxids eine Wirkung berechnet werden. Als Randbedingungen wurden die o. a. Parameter für Erwachsene in Ruhe bzw. unter leichter Beanspruchung zugrunde gelegt. Es ergeben sich die in Abbildung 19 dargestellten Werte für F_{CO}, wonach bei einem 70 kg schweren Erwachsenen, der sich in Ruhe befindet, nach etwa 10,5 min mit dem Eintreten der Bewusstlosigkeit sowie nach etwa

12,5 min mit dem Eintreten des Todes zu rechnen ist. Würde dieser Mensch der gleichen CO-Entwicklung unter leichter körperlicher Belastung ausgesetzt sein, wäre nach etwa 3,5 min mit Bewusstlosigkeit zu rechnen und nach gut 5 min mit dem Tod. Es ist anzumerken, dass sich die zeitliche Prognose unter Einbeziehen der zeitlichen Entwicklung der Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen noch weiter verschlechtern würde.

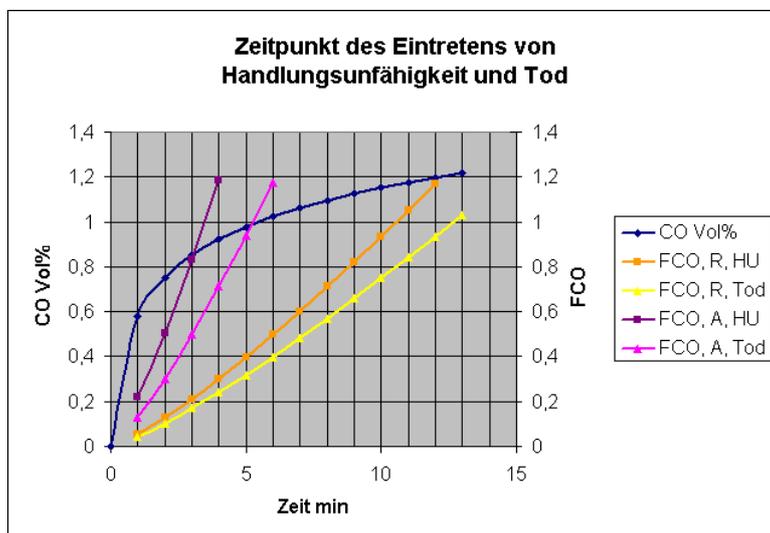


Abb. 19: Zeitpunkt des Eintretens von Handlungsunfähigkeit und Tod in Abhängigkeit von den Randbedingungen CO-Konzentration, Expositionszeit, RMV und Sauerstoffbedarf (Legende: F_{CO} effektive Teildosis CO, R Ruhe, A leichte Aktivität, HU Handlungsunfähigkeit)

Eine gleiche Abschätzung ist hinsichtlich der thermischen Belastung von Brandopfern möglich [Purser 2002]. [KÖNNECKE 2000] gibt drei grundlegende Mechanismen der thermischen Einwirkung an, die zur Handlungsunfähigkeit und, in letzter Konsequenz, zu schweren körperlichen Schäden bis hin zum Tod führen können:

- Hitzeschock
- Hautverbrennung
- Verbrennungen des Atmungsapparates

In Tabelle 11 werden einige typische, bei stark erhöhter Umgebungstemperatur auftretende Reaktionen genannt. Die Grenztemperatur, unterhalb derer eine erfolgreiche Flucht noch für möglich erachtet wird, liegt bei etwa 150 – 160°C.

Tabelle 11: Physiologische Reaktionen auf erhöhte Lufttemperatur [KÖNNECKE 2000]

Temperatur °C	Physiologische Reaktion
125	Atemprobleme
140	Toleranzzeit von 5 min
150	Probleme bei Mundatmung, Temperaturlimit für Flucht
160	schnell einsetzende, unerträgliche Schmerzen bei trockener Haut
180	irreversible Verletzungen nach 30 s
205	Toleranzzeit des Atmungssystems ist geringer als 4 min, bei feuchter Haut

Ein Hitzeschock kann sich einstellen, falls Personen längere Zeit einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt sind, die jedoch nicht zu direkten Verbrennungen führt. Entsprechende kritische Temperaturen für das Auftreten von Verbrennungen hängen von der

Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer ab und reichen von 120°C bei trockener Luft bis hin zu etwa 80°C. Ursache für einen Hitzeschock ist ein allmählicher Anstieg der Körpertemperatur. Werte über 40°C können zu Bewusstseinsbeeinträchtigungen und körperlichen Schäden führen, Temperaturen über 42,5°C können unbehandelt innerhalb weniger Minuten tödlich sein. Die kritische Expositionsdauer für diese Art von Hitzeschock liegt bei etwa 15 Minuten [KÖNNECKE 2000].

Hautverbrennungen hängen von dem die Hautoberfläche erreichenden Wärmestrom ab und sind weitgehend unabhängig vom Mechanismus der Wärmeübertragung. Für den Evakuierungsfall besonders wichtig sind Konvektion und Wärmestrahlung. Neben der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer spielen hier die Luftströmung sowie die Art der Bekleidung eine wesentliche Rolle. Während im Bereich der Grenztemperatur zwischen Hitzeschock und Verbrennungen die Toleranzzeit bei 15 - 25 Minuten liegt, sinkt diese bei Temperaturen von ca. 200°C (trockenen Luft) auf 3 - 4 Minuten. Bei Wärmestrahlung liegt die Erträglichkeitsschwelle bei etwa 2,5 kW/m². Erreicht der Wärmestrom an der Hautoberfläche Werte von über 10 kW/m², treten bereits innerhalb weniger Sekunden ernsthafte Verbrennungen auf. Neben dem unmittelbar dadurch hervorgerufenen Schmerz können Verbrennungen der Hautoberfläche auch zu einem Schockzustand führen, der durch den Verlust von Körperflüssigkeit verursacht wird. Es kommt zu einem Kreislaufversagen bis hin zum Kollaps oder zur Bewusstlosigkeit [KÖNNECKE 2000], [Purser 2002].

Bei Verbrennungen des Atemtraktes spielt die Luftfeuchtigkeit eine noch größere Rolle als bei anderen Einwirkungsarten. Grundsätzlich gilt, dass die zuvor angegebenen Kritikalitätsgrenzen für Hautverbrennungen (kritische Lufttemperatur bzw. kritischer Wärmestrom) auch für den Schutz vor Verbrennungen des Atemtraktes ausreichen. Bei Temperaturen oberhalb von 200°C kann es zu einem plötzlich einsetzenden Inhalations-Hitzeschock kommen [KÖNNECKE 2000]. [Purser 2002] gibt als Temperaturgrenzwert bei Inhalation von wasserdampfgesättigter Luft, wie sie beispielsweise bei der Brandbekämpfung mit Wasser auftreten kann, 60°C an.

Für die nähere Umgebung von großen Flammen und unterhalb von Heißgasschichten lassen sich kritische Bestrahlungsstärken angeben. Unterhalb des Schwellenwertes von 2,5 kW/m² ist die Wärmestrahlung für wenigstens einige Minuten tolerabel, darüber wird jedoch schnell der Bereich erreicht, der nur für wenige Sekunden erträglich ist, wie aus Tabelle 12 hervorgeht. Der Schwellenwert von 2,5 kW/m² wirkt etwa auf Personen, die sich unterhalb einer Heißgasschicht mit einer Temperatur von ca. 200°C bewegen [Purser 2002]. Bei einem Fullscale-Test von [Putorti, McElroy 2000] in einem zweistöckigem Einfamilienhaus wurde im Brandraum dieser Grenzwert nach etwa 100 s Branddauer überschritten.

Tabelle 12: Grenzen der Erträglichkeit von Wärmestrahlung und Konvektion [Purser 2002]

Einwirkung	Intensität bzw. Temperatur	erträgliche Einwirkzeit
Wärmestrahlung (Einwirkung auf Haut)	10 kW/m ²	Schmerz nach 4 s
	4 kW/m ²	Schmerz nach 10 – 20 s
	2,5 kW/m ²	Schmerz nach 30 s
Konvektion (Atemwege, Haut)	< 40°C (bei H ₂ O-Sättigung)*	> 30 min
	< 60°C (bei H ₂ O-Sättigung)	> 30 min
	100°C (< 10% H ₂ O)	12 min
	120°C (< 10% H ₂ O)	7 min
	140°C (< 10% H ₂ O)	4 min
	160°C (< 10% H ₂ O)	2 min
	180°C (< 10% H ₂ O)	1 min

* [BREIN 1997]

Die Zeit t bis zum Eintreten der individuellen Handlungsunfähigkeit in Abhängigkeit von der lokalen Umgebungstemperatur lässt sich auf empirischer Basis abschätzen. Für die kombinierte Wirkung von Wärmestrahlung und Konvektion gibt [Purser 2002] ein von der Expositionsdauer abhängiges Modell an (Gleichung 9). Hier wird ebenfalls mit $FED_{\text{thermisch}} = 1$ die Grenze der Handlungsfähigkeit erreicht. Der Wert t_{conv} ist aus Gleichung 10 erhältlich. Für Bestrahlungsstärken $q < 2,5 \text{ kW/m}^2$ tendiert laut [Purser 2002] t_{rad} gegen Null und somit ist für $q > 2,5 \text{ kW/m}^2$ Gleichung 11 anzuwenden. Nach dem vfdb-Leitfaden vom [VFDB-REFERAT 4 2005] wird für Bestrahlungsstärken bis $2,5 \text{ kW/m}^2$ mit Gleichung 11 gearbeitet und für größere Werte mit Gleichung 12. Für die Berechnung ist die Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ einzusetzen, die Zeit in Minuten.

$$FED_{\text{thermisch}} = \sum \left(\frac{\Delta t}{\tau_{\text{conv}}} + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{rad}}} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{\text{conv}} = \frac{5 \cdot 10^7}{T^{3,4}} \quad (10)$$

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1,33}{q^{1,33}} \quad (11)$$

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{4}{q^{1,35}} \quad (12)$$

[Purser 2002] bezieht in seine Abschätzungen zur Vorhersage der zeitlichen Grenzwerte für das Eintreten der Handlungsunfähigkeit von in Brandgeschehen involvierte Personen außerdem noch Parameter mit ein, wie Inhaltsstoffe des Brandrauches, die eine reizende Wirkung auf den Atmungstrakt und die Augen ausüben, sowie die Sichtverhältnisse und fasst diese zu einem Modell für die Abschätzung der toxischen und physikalischen Gefährdungen bei Bränden zusammen. Dieses Konzept wird von [Purser 2002] auf die Ergebnisse aus verschiedenen skalierten Brandversuchen angewandt und diskutiert.

Das FED-Konzept zur Abschätzung der Wirkungen aus toxischer und thermischer Exposition von Personen, die sich in Brandräumen und auf Fluchtwegen befinden ist Gegenstand einer Richtlinie [ISO TS13571 2002] zur Abschätzung der zur Verfügung stehenden Fluchtzeit.

2.3 Untersuchung der Bildung von Kohlenmonoxid

Wie bereits dargestellt, ist bei normalen Wohnungsbränden (Raumbränden) der Anteil des Kohlenmonoxids im Brandrauch im Allgemeinen der wesentlichste toxische Wirkstoff. Die Bildung des Kohlenmonoxids wird durch eine komplexe Funktion aus Luftversorgung, Mischverhalten von Luft und Brennstoff sowie Brennstofftyp bestimmt [KARLSSON, QUINTIERE 2001]. Der Aufklärung der Reaktionen, die zur Bildung von Kohlenmonoxid führen, sowie der beeinflussenden Randbedingungen galten eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten in den letzten drei Jahrzehnten. Untersuchungen von Bränden in geometrisch unterschiedlichen Räumen sollten zum Verständnis des Prozesses der Bildung von Kohlenmonoxid beitragen und der Ableitung von Parametern für die Entwicklung und Anwendung von Raumbrandmodellen für die prognostische Abschätzung der zu erwartenden Gefährdungen bei Raumbränden dienen. Selten standen Daten aus realen Brandereignissen zur Verfügung.

2.3.1 Hauben-Versuche

Grundlegende Untersuchungen des Prozesses der CO-Bildung begannen mit den sogenannten Hauben-Versuchen. Sie wurden an der Harvard University und am California Institute of Technology entworfen, um idealisiert den Zwei-Schicht-Zonen-Modellen zu entsprechen, welche für die Modellierung des Verhaltens von Raumbränden entwickelt wurden. Diese teilen einen Raumbrand in zwei Abschnitte, eine relativ kühle und wenig beeinträchtigte untere Schicht und eine zweite obere Schicht, welche die Verbrennungsprodukte enthält, deshalb heiß ist sowie derart beeinträchtigt wird, dass sich ein unterventilierter Brand einstellen kann. Während des Verlaufs eines Raumbrandes ändern sich die relativen Größen, Temperaturen und Zusammensetzungen dieser beiden Schichten sehr stark.

Das Prinzip der Hauben-Versuche bestand darin, die Verbrennungsprodukte von einem frei im Raum brennenden Feuer in einer darüber befindlichen Haube aufzufangen, so dass sich darin eine Heißgasschicht herausbilden konnte. Die vertikale Position der Flammen konnte so variiert werden, dass sich bei voller Ventilation die Verbrennungsregion bis in die Haube ausdehnen konnte. Bei unterventilierter Verbrennung schrumpften die Flammen und Produkte der unvollständigen Verbrennung sammelten sich in der Haube. Es zeigte sich, dass die Gase der Heißgasschicht entfernt von der Plume gut gemischt waren. Durch Variation der Brennergröße und Trennung der Brandquelle von der Unterseite der Heißgasschicht war eine systematische Veränderung des Massenverhältnisses der Verbrennungsgase in der Haube, das durch den Brennstoff und die eintretende Luft bestimmt wird, möglich. Normalerweise dauerten die Brände lang genug, dass Temperatur und Zusammensetzung der Heißgasschicht einen stationären Zustand erreichen konnten. Messungen der Stoffkonzentrationen in der Heißgasschicht in diesem Zustand erlaubten die Ableitung des Verhältnisses der Masse der Verbrennungsprodukte, eingebracht durch den Brandstoff, zur Masse der eintretenden Luft. Es ist üblich, dieses Massenverhältnis durch dasjenige zu teilen, welches für die komplette Verbrennung des Brandstoffes zu vollständig oxidierten Produkten (z. B. H_2O und CO_2 bei normalen Kohlenwasserstoffen) erforderlich ist. Der daraus resultierende Parameter ist als Äquivalenzverhältnis Φ bekannt. Für brennstoffarme Mischungen ist Φ kleiner als 1, bei stöchiometrischen Mischungen nimmt Φ den Wert 1 an und für brennstoffreiche Mischungen ist Φ größer als 1.

Bei den Hauben-Versuchen wurden verschiedene Φ definiert:

- **Äquivalenzverhältnis der Plume Φ_p**
Massenflussrate des Brennstoffs dividiert durch die Masseneintrittsrate Luft in die Plume unterhalb der Schicht, normiert als Stöchiometrieverhältnis des Brennstoffs
- **Globales Äquivalenzverhältnis Φ_g (GER)**
Verhältnis der Gasmasse der Heißgasschicht, eingebracht durch den Brennstoff, dividiert durch die Gasmasse Luft, normiert als Stöchiometrieverhältnis

Im Fall des stationären Zustandes, wenn Luft und Brennstoff ausschließlich über die Plume in die Heißgasschicht gelangen, sind Φ_p und Φ_g identisch.

[BEYLER 1983, 1986/1, 1986/2] von der Harvard University versuchte als erster eine Korrelation seiner Messungen der Konzentrationen an Verbrennungsgasen in der Heißgasschicht mit dem GER. Er gilt als Begründer dieses Konzeptes. Das von ihm benutzte Hauben-System ist in der Abbildung 20 dargestellt. Werte für Φ_p wurden bestimmt durch Messungen der Brennstoffflussrate, des gesamten Gasflusses in die Haube sowie Bestimmung der Zusammensetzung der Heißgasschicht. Durch Entnahme einer definierten Gasmenge aus der Haube wurde gewährleistet, dass sich darin eine konstante Schichtdicke einstellte. [BEYLER 1983, 1984] beobachtete bei diesen Versuchen, dass die untere Seite der Heißgasschicht nicht gut ausgebildet war, weil sich hier die Verbrennungsgase mit der

Laborluft mischten. Außerdem liefen Flammen entlang der Unterseite der Heißgasschicht bei Φ_p von 1,4-1,8. Dieses Grenzschichtbrennen begrenzte das höchste Φ_p , welches untersucht werden konnte.

Weil die Experimente unter stationären Bedingungen ausgeführt wurden war bei guter Näherung $\Phi_p = \Phi_g$. Weiterhin wurde eine sehr gute Korrelation der hauptsächlichen Gasinhaltsstoffe mit Φ_g gefunden, welche unabhängig von der Brennergröße, der Temperatur der Heißgasschicht sowie des Abstandes von Heißgasschicht und Brandquelle ist. Eine Darstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 21 zu sehen. Signifikant und übereinstimmend mit Raumbränden ist, dass die CO-Konzentrationen niedrig sind wenn der Brand überventiliert ist ($\Phi_p < 1$) und schnell ansteigen, wenn der Brand unterventiliert wird ($\Phi_p > 1$). Außerdem ist ersichtlich, dass die Konzentration von CO bei $\Phi_p > 0,5$ zu steigen beginnt, während das bei den anderen Produkten der unvollständigen Verbrennung wie Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe erst bei leicht höheren Φ_p der Fall ist. Bei einem Φ_p von 1 sind ungefähr noch 2 % O_2 im Brandgas vorhanden, sogar bei den höchsten untersuchten Φ_p waren noch messbare Mengen an O_2 vorhanden. Das führte zu der Schlussfolgerung, dass bei Koexistenz von Brennstoff und Sauerstoff zusätzliche Reaktionen möglich sind, wenn die Temperatur ansteigt.

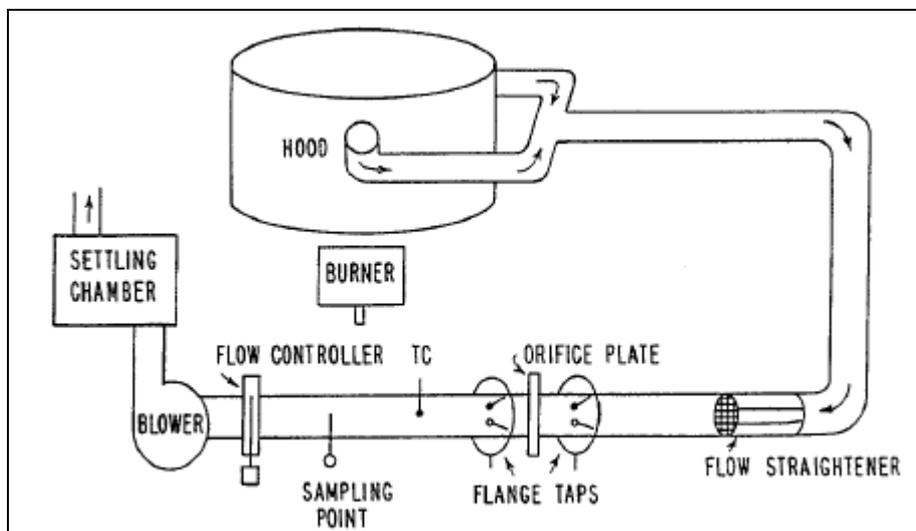


Abb. 20: Skizze des Aufbaus der Hauben-Versuche von [BEYLER 1983]

[BEYLER 1983, 1986/1] untersuchte eine Reihe von verschiedenen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen und fand, dass in jedem Fall die Konzentrationsergebnisse zu einer Kurve zusammenfallen, wenn sie als Funktion des GER dargestellt werden. Die Absolutwerte der Konzentrationen für ein einzelnes Verbrennungsprodukt hingegen variieren mit dem Brennstoff. Die Ergebnisse sind sowohl als Volumen-Prozente wie auch als Yields (Verhältnis der tatsächlichen zur maximal möglichen Produktion in g Stoff pro g Brennstoff angegeben) dargestellt. Er schlussfolgerte, dass die CO-Bildung durch zwei Konstanten charakterisiert werden kann: eine für magere Bedingungen ($\Phi_p < 0,7$) und die andere für reiche Bedingungen ($\Phi_p > 1,2$) mit einer Übergangsregion bei etwa $\Phi_p = 1$. Alle Brennstoffe ergaben niedrige CO-Konzentrationen von weniger als 1 % bei $\Phi_p < 0,7$ in der Haube, mit Ausnahme von Toluol, das hohe Konzentrationen an CO auch bei überventilierten Verbrennungen bildete. Erheblich höhere CO-Konzentrationen wurden gebildet bei $\Phi_p > 1,2$.

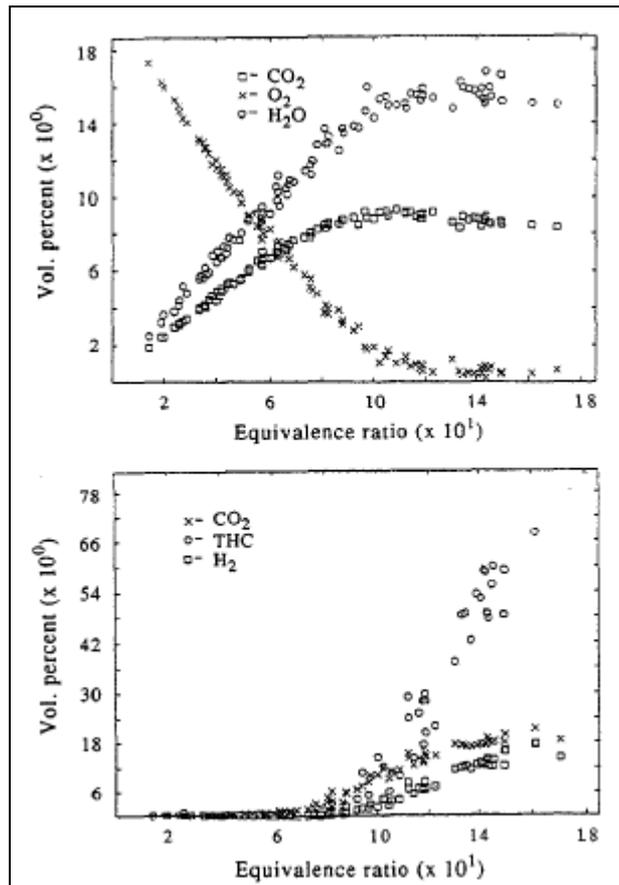


Abb. 21: Messwerte der Rauchgaszusammensetzung in Volumenprozent bei Propanbränden im Haubensystem von [BEYLER 1983]

[PITTS 1995] veröffentlichte Ergebnisse aus Untersuchungen von [BEYLER 1983] und [BEYLER 1986/2] (Tabelle 13). Für brennstoffreiche Bedingungen ergaben sich nahezu konstante Yields mit 0,2 g CO / g verbrannten Stoff, während die Konzentrationen stark vom Brennstoff abhängen.

Tabelle 13: CO-Bildung unter brennstoffreichen Bedingungen
Ergebnisse aus Beylers Untersuchungen [PITTS 1995]

Brennstoff	Formel	CO Vol%	CO Yields (g/g)
Propan	C ₃ H ₈	1,8	0,23
Propen	C ₃ H ₆	1,6	0,20
Hexan	C ₆ H ₁₄	1,6	0,20
Toluen	C ₇ H ₈	0,7	0,11
Methanol	CH ₃ OH	4,8	0,24
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	3,6	0,22
Isopropanol	C ₃ H ₇ OH	2,4	0,17
Aceton	C ₃ H ₆ O	4,4	0,30
Polyethylen	-CH ₂ -	1,7	0,18
Poly(methyl-methacrylat)	-C ₅ H ₇ O ₂ -	3,0	0,19
Ponderosa Pine	C _{0,95} H _{2,4} O	3,2	0,14

[PITTS 1995] schlussfolgerte aus den in Tabelle 13 aufgeführten Ergebnissen, dass teilweise oxidierte Brennstoffe wie Alkohole und Ketone zu höheren CO-Konzentrationen führen als Alkane oder Alkene. Die niedrigsten Konzentrationen wurden bei Toluol erhalten. [BEYLER

1983] begründet diese Beobachtung mit der thermischen Stabilität der Moleküle. Bei den meisten Brennstoffen ist die Reaktion des freien OH-Radikals mit den Molekülen des Brennstoffs viel schneller als die korrespondierende Reaktion mit CO. Gerade die Reaktion von OH mit CO ist hauptsächlich für die Konvertierung von CO zu CO₂ verantwortlich. Im Fall des Toluens ist wegen dessen ungewöhnlicher Stabilität die Reaktionsrate mit OH wesentlich geringer im Vergleich zu anderen Kohlenwasserstoffen. Deshalb ist hier CO in der Lage, erfolgreich mit den Brennstoffmolekülen um das OH-Radikal zu konkurrieren und wird deshalb effizienter oxidiert. Die von [BEYLER 1986/2] untersuchten festen Brennstoffe folgen diesem Trend.

Folgende generelle Schlussfolgerungen konnten aus Beylers Untersuchungen zur CO-Bildung in den Hauben-Experimenten gezogen werden [PITTS 1995]:

- Die hauptsächlichlichen Brandprodukte einschließlich CO korrelieren mit den Werten von Φ_g .
- Bei hohen und niedrigen Werten von Φ_g werden relativ konstante Konzentrationen an CO gebildet.
- Die Bildung von CO ist bei brennstoffreichen Bedingungen beträchtlich größer als bei brennstoffarmen Bedingungen.
- Die CO-Konzentrationen, die bei brennstoffreichen Bedingungen gebildet werden, sind abhängig vom Brennstoff, korrelieren aber mit der Brennstoffstruktur. Brennstoffe, die Sauerstoff im Molekül enthalten, bilden die höchsten CO-Werte während thermisch stabile Brennstoffe die niedrigsten ergeben. Kohlenwasserstoffe liegen im mittleren Bereich. Die CO-Yields zeigen weitaus weniger Variation.

[CETEGEN 1982] vom California Institute of Technology untersuchte vor allem den Eintrag in eine aufwärts strömende Plume mit einem deutlich veränderten Haubensystem (Abbildung 22). Um die Position der Grenzschicht steuern zu können, strömten die Gase in eine erste innere Haube und von dort in eine zweite Haube, aus der das Gas dann abgeführt wurde. In dieser Anordnung war es möglich, die Grenzschicht geschlossen am unteren Rand der ersten Haube zu positionieren. Vorteilhaft war, dass die Grenzschicht dünner war und ihre Lage besser definiert war im Vergleich zu den Versuchen von Beyler. [CETEGEN 1982] benutzte Erdgas als Brennstoff und bestimmte die Konzentrationen der Verbrennungsprodukte in der Heißgasschicht. Die Darstellung des gebildeten CO als Molenbruch und Funktion von Φ_p zeigte vernachlässigbar geringe Mengen für $\Phi_p < 0,6$, einen rapiden Anstieg zwischen $0,5 < \Phi_p < 1,6$ und im weiteren einen nahezu konstanten Verlauf bei ungefähr 0,024 bis zum höchsten Wert von $\Phi_p = 2,3$, für den Messungen aufgezeichnet wurden. Diese Ergebnisse waren in guter Übereinstimmung mit denen von Beyler für eine ganze Reihe von Brennstoffen. Leider gab es keine Messungen der O₂-Konzentration. Zündungen an der Grenzfläche wurden bis $\Phi_p = 2,5$ nicht beobachtet, ein Hinweis auf bessere Ausbildung der Grenzschicht im Gegensatz zu Beylers Versuchen.

In einer weiteren Arbeit am California Institute of Technology benutzte [Lim 1984] das gleiche Haubensystem wie Cetegen und führte genauere Untersuchungen der Gaskonzentrationen in der Heißgasschicht bei Bränden von Erdgas im stationären Bereich durch. Er variierte sowohl die Gasflussrate wie auch den Abstand des Brenners zur Grenzschicht. Genau wie bei den vorangegangenen Untersuchungen waren die Konzentrationen der Gasbestandteile unabhängig vom Ort der Probenahme in der Haube. Die grafischen Darstellungen der Ergebnisse für CO und O₂ zeigen die gleiche Kurvenform wie bei Beyler und Cetegen. Wie schon Beyler beobachtete auch Lim eine Restkonzentration an O₂ von 1-2 % für $\Phi_p > 1$. Mit der Annahme, dass das Erdgas / Luft-Gemisch für ein gegebenes Φ_g in den Zustand des chemischen Gleichgewichtes gelangt, wurden für einige Temperaturen Konzentrationen berechnet und mit gemessenen Werten verglichen (Abbildungen 23). Es wurde angenommen, dass diese Berechnungen für den Zustand des chemischen Gleichgewichtes Vorhersagen der beobachteten Konzentrationsabhängigkeit von Φ_g erlauben könnten. Diese

Berechnungen scheiterten aber völlig bei der Vorhersage der Konzentration des restlichen O_2 für $\Phi_g > 1$ [PITTS 1995].

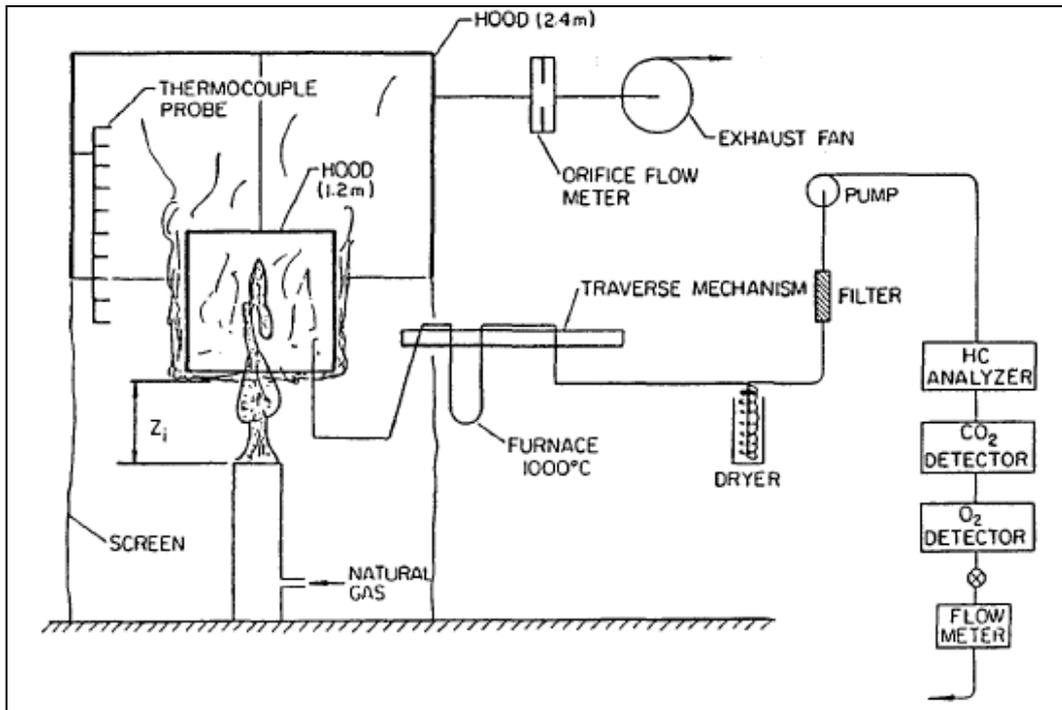


Abb. 22: Skizze des Haubensystems von [CETEGEN 1982]

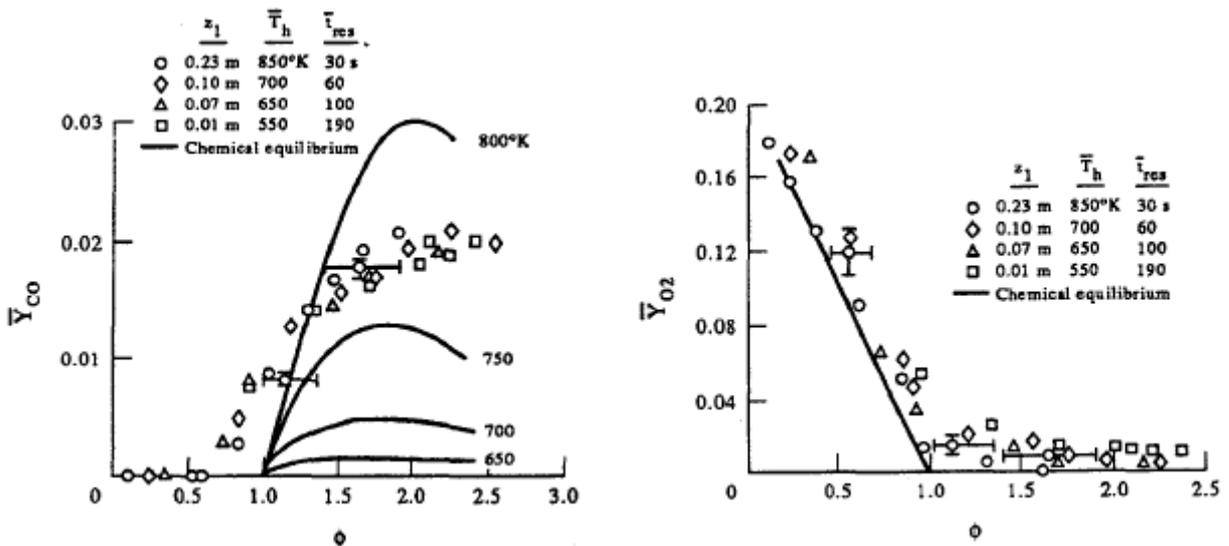
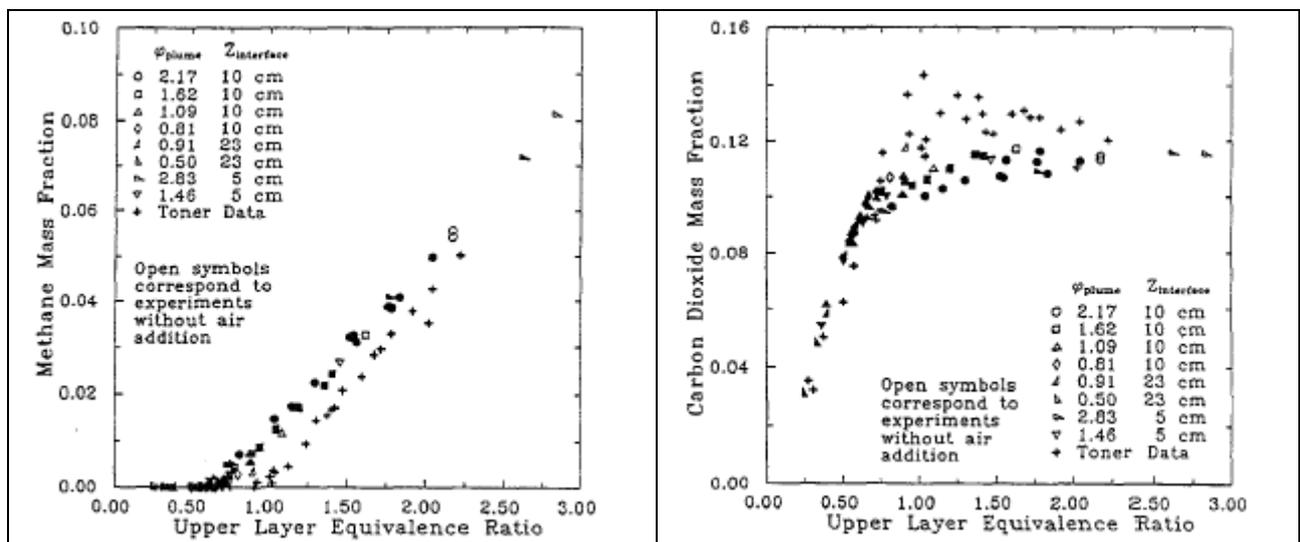


Abb. 23: Versuchsergebnisse als Molenbruch CO und O_2 in Abhängigkeit zum Φ im Vergleich zu berechneten Werten (durchgezogene Linien) für verschiedene Temperaturen bei Annahme von Gleichgewichtsbedingungen [Lim 1984]

Eine qualitative Verbesserung der Gasanalytik bei Verwendung der Hauben-Versuchsanordnung von Cetegen gelang [TONER 1986]. Er ersetzte die einzelnen Gasanalysatoren durch ein Gaschromatographie-System, mit dem die Messungen der Konzentrationen einer großen Anzahl von Stoffen, die in der Heißgasschicht enthalten waren, genauer wurden. Er konnte die Konzentrationen einer ausreichenden Anzahl von

Stoffen aufzeichnen, so dass durch Kombinieren der Messungen mit geeigneten Erhaltungssätzen die Bilanzierung der Konzentrationen aller bedeutenden Stoffe möglich war, ohne Annahmen bezüglich des Brandverhaltens machen zu müssen. Auch bei diesen Untersuchungen war der Brennstoff Erdgas, dessen Masseflussrate ebenso variiert wurde wie der Abstand zur Grenzfläche. Alle ermittelten Konzentrationen korrelierten gut mit den Werten von Φ_g . Das einzige Produkt der unvollständigen Verbrennung, das für $\Phi_g < 1$ beobachtet wurde, ist CO. H_2 und CH_4 erschienen nur für $\Phi_g > 1$. Werte für den CO-Molenbruch begannen bei $\Phi_g > 0,5$ zu steigen und waren bei 1 % für $\Phi_g = 1$. Ab $\Phi_g > 1,5$ scheint die CO-Konzentration den Wert bei einem Molenbruch von 0,019 zu halten. Mit diesen Ergebnissen erreichte auch [TONER 1986] eine gute Übereinstimmung mit den bereits diskutierten Arbeiten. Es gab nur eine wesentliche Ausnahme: Die O_2 -Konzentrationen für $\Phi_g > 1$ näherten sich 0. Im Verhältnis zu den früheren Arbeiten war das Ergebnis das erste Anzeichen, dass die Korrelation mit den Werten von Φ_g von einer unbestimmten Variablen abhängen könnte. Die Versuchsergebnisse von [TONER 1986] sind in der Abbildung 24 zusammen mit denen von [MOREHART 1990] zu sehen.

Unter Beibehalten der Gasanalytik von Toner entwickelte [MOREHART 1990] am California Institute of Technology eine neue Hauben-Versuchseinrichtung. Die Haube war beträchtlich größer als die vorhergehenden. Die Ausbildung der Heißgasschicht geschah in der gleichen Art und Weise. Die Haube war innen im oberen Teil mit einem Rohrsystem mit Löchern ausgerüstet. So konnte in ausreichender Entfernung von der Plume zusätzliches Gas direkt in die Heißgasschicht eingebracht werden. Ziel war, Φ_p und Φ_g unabhängig voneinander zu variieren, während in der Heißgasschicht stationäre Bedingungen beibehalten werden konnten. Durch Einströmen von Luft in die Heißgasschicht konnte Φ_g niedriger eingestellt werden als Φ_p . Mit dieser Versuchsführung sollte ein sich entwickelnder Raumbrand modelliert werden. In dem frühen Stadium eines solchen Brandes ist genügend O_2 verfügbar und die sich ausbildende Heißgasschicht ist brennstoffarm. Wenn der Brand sich ausbreitet, wächst der O_2 -Bedarf und die Plume, welche die Heißgasschicht erreicht, ist reicher als die Verbrennungsgase, die darüber eingeschlossen sind. Schließlich wird die Heißgasschicht reich genug (d. h. die O_2 -Konzentration sinkt in ausreichendem Maße) dass die Plume in dieser Schicht erlischt und Konzentrationen von Produkten der unvollständigen Verbrennung ansteigen. Eine quasi-stationäre Verbrennung kann erreicht werden, bei der Φ_p und Φ_g gleich sind. MOREHART schlug ein Konzept eines Modells für die Beschreibung eines sich entwickelnden Raumbrandes vor, welches die Ergebnisse der neuen Messungen berücksichtigte. Gemäß [PITTS 1995] ist dieses Konzept nicht umgesetzt worden. [COOPER 1990, 1991/1, 1991/2] vom NIST entwickelte eine andere Näherung für die Zusammenfassung der Ergebnisse der Hauben-Experimente in ein Zonenmodell.



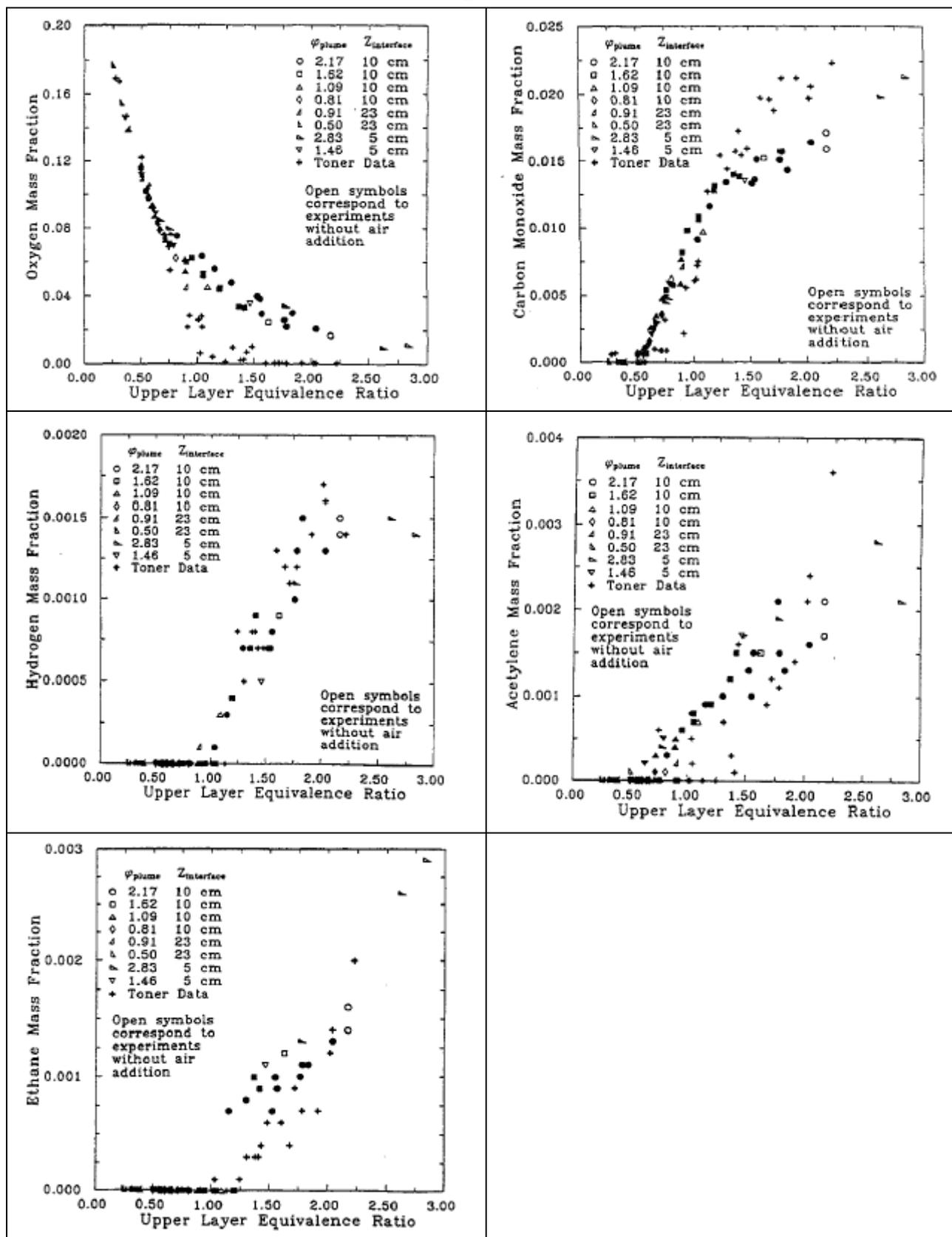


Abb. 24: Massenbrüche der gemessenen Rauchgasbestandteile als Funktion von Φ_g , offene Symbole $\Phi_g = \Phi_p$ (keine Zuführung zusätzlicher Luft in die Oberschicht), ausgefüllte Symbole stellen den Fall $\Phi_g \neq \Phi_p$ dar, Versuchsergebnisse von [TONER 1986] und [MOREHART 1990] dargestellt von [PITTS 1995]

In Auswertung der vorgenannten Ergebnisse weist [PITTS 1995] darauf hin, dass die meisten Stoffkonzentrationen in der Haube gut korrelieren, wenn sie als Funktion von Φ_g dargestellt werden. Die Ergebnisse für $\Phi_g < \Phi_p$ und $\Phi_g = \Phi_p$ liegen auf der gleichen Kurve. Daraus wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Konzentrationen der Verbrennungsgase in der Oberschicht nur vom Wert des Φ_g abhängen. Das suggeriert, dass die Bildungsrate der Stoffe nur von dieser Variablen abhängen. Diese Beobachtung ist von Bedeutung, weil demnach Gleichgewichtsmessungen dieses Typs hätten benutzt werden können, die unmittelbaren Konzentrationen bei einem sich entwickelnden Brand vorherzusagen. Leider offenbaren aber die Ergebnisse von [MOREHART 1990] auch neue Zweifel bezüglich des GER, denn es gibt trotz gleicher Versuchsbedingungen Unterschiede zu den Ergebnissen von [TONER 1986].

[PITTS 1995] diskutiert die Ergebnisse von Beyler sowie aller am California Institute of Technology ausgeführten Hauben-Experimente und kommt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Zusammensetzung der Heißgasschicht in den Hauben korreliert gut bei Darstellung der Konzentration über Φ_g . Das gilt auch, wenn Φ_p nicht gleich Φ_g ist.
- Die Korrelation ist unabhängig von der Anwendungsrate des Brennstoffs und der Trennung von Brennstoffquelle und Grenzschicht.
- Die Korrelation ist abhängig vom Brennstoff selbst und von der Temperatur der Heißgasschicht.

Die Existenz dieser Korrelation wurde als GER-Konzept bezeichnet. Bevor die Temperaturabhängigkeit erkannt wurde, bestand die Meinung, dass mit Hilfe dieser Korrelation die Ergebnisse der Hauben-Experimente einfach zur Vorhersage der Bildungsrate von CO bei Bränden benutzt werden könnten. [PITTS 1995] schätzte ein, dass die Temperaturabhängigkeit die Anwendung des GER-Konzeptes sehr verkompliziert.

Auch wenn entsprechende Daten nur in begrenztem Umfang vorhanden sind, scheint es doch einige Übereinstimmungen für die Temperaturabhängigkeit des GER zu geben. Wenn die Temperatur der Heißgasschicht geringer ist als 500 K, sind die Reaktionsraten sehr langsam und die Korrelation ist unabhängig von der Temperatur. Wenn die Temperatur auf Werte von 500 – 700 K ansteigt, sind Veränderungen in der Zusammensetzung der Produkte erkennbar durch Oxidation von zusätzlichem Brennstoff unter Bildung von CO, CO₂ und H₂O. Die Konzentration von H₂ scheint relativ unempfindlich auf Temperatureffekte zu sein. Der Grad der Reaktion von O₂ scheint gut mit der Temperatur zu korrelieren. [TONER 1986] erreichte die höchsten Temperaturen in der Haube und stellte fest, dass in der Heißgasschicht der O₂ weitgehend verbraucht war. Die Abhängigkeit der CO- und CO₂-Konzentration in der Heißgasschicht von der Temperatur ist gemäß [PITTS 1995] nicht ganz klar. Hier gehen die Ergebnisse der einzelnen Experimentatoren auseinander. Erkannt wird als Haupteinflussgröße die Temperatur, aber auch die Verweilzeit der Komponenten in der Heißgasschicht scheint eine bedeutende Variable zu sein.

[PITTS 1995] schlussfolgert, dass die O₂-Konzentration gegen Null geht wenn sich die Temperatur der Heißgasschicht 900 K nähert. In diesem Fall sind keine zusätzlichen Reaktionen in der Heißgasschicht mehr möglich und eine einheitliche Korrelation der Zusammensetzung der Heißgasschicht mit Φ_g könnte für brennstoffreiche Bedingungen existieren. Das sind die Bedingungen, die für die gefährlichsten Raumbrände charakteristisch sind. Da aber die Temperaturen der Heißgasschicht bei voll entwickelten Raumbränden höher sind als 900 K, ist zu schlussfolgern, und das basiert ausschließlich auf den Ergebnissen der Hauben-Experimente, dass das GER-Konzept für Raumbrände anwendbar ist, wenn geeignete Korrekturen für die Temperatureinflüsse integriert werden.

2.3.2 Raumbrände

[PITTS 1995] berichtet über Raumbrände, die [RASBASH, STARK 1966] in einem kleinen Raum mit Holzwolle und anderen Materialien ausführten. Da dieser Versuchsraum verschieden dimensionierte Schlitze in einer Wand hatte, bildete sich, wie erwartet, auch das Schichtsystem nicht gut aus. Die Temperaturen waren ganz niedrig, nur bei zwei Versuchen wurden mehr als 700 K erreicht. Die Werte der „trockenen“ Gaskonzentrationen korrelierten gut mit den Werten des Parameters $A \cdot h^{1/2} / W$. Wobei A die Fläche der Ventilationsöffnungen ist, h deren Höhe und W die Brennstoffmasse. Bei großen Öffnungen und wenig Brennstoff waren die CO-Konzentrationen nahe Null, je schlechter die Ventilation (kleine Öffnung, viel Brennstoff) desto höher stiegen sie an. Es wurden CO-Werte um die 10 % erreicht. Für Sauerstoff wurde ebenfalls eine Abhängigkeit zu $A \cdot h^{1/2} / W$ gefunden. Die kleinsten Konzentrationen lagen bei 1 %, bei den meisten Versuchen waren sie größer als 5 %.

[GROSS, ROBERTSON 1963, 1965] führten Brände mit verschiedenen großen Holzkrippen in drei geometrisch ähnlichen Räumen durch (Breite:Länge:Höhe = 1:2:1 mit den Seitenlängen von 0,16; 0,49 und 1,5 m). Die Ventilation erfolgte durch verschiedene Fenster. Die Messdaten der Temperatur und der trockenen Gaskonzentrationen wurden in Beziehung gesetzt zu einem normierten Ventilationsparameter $A \cdot h^{1/2} / S^2$. S ist hierbei ein Skalierungsverhältnis. Bei kleinen Ventilationsparametern waren die mittleren Raumtemperaturen sehr niedrig. Sie stiegen linear mit dem Ventilationsparameter bis Plateaus erreicht wurden bei Werten von $A \cdot h^{1/2} / S^2 > 3000 \text{ cm}^{5/2}$. Die Plateautemperatur zeigte eine starke Abhängigkeit vom Maßstab. Mit der Raumgröße stieg diese von 500 K bis 1000 K. Die Sauerstoffgehalte sanken schnell mit dem Ventilationsparameter bis auf Werte nahe Null für $A \cdot h^{1/2} / S^2 > 1000 \text{ cm}^{5/2}$. CO₂ zeigte eine ähnliche Abhängigkeit mit Asymptoten bei ~19 % im mittleren und ~ 17 % im größten Raum. Die CO-Werte stiegen ebenfalls mit dem Ventilationsparameter. Sie erreichten im mittleren Raum Maximalwerte > 12 % und im größten Raum 8 %.

[TEWARSON 1972] führte ähnliche Untersuchungen durch und stellte seine Ergebnisse (Gaskonzentrationen, Temperaturen, Brandraten) als Funktion von $A \cdot h^{1/2}$ dar. Die Ergebnisse aus den Experimenten in verschiedenen großen Räumen konnten mit dem Term $A \cdot h^{1/2} / S^{1,9}$ dargestellt werden. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen von [GROSS, ROBERTSON 1963], die 2 als Exponent für S benutzt hatten. Diese Untersuchungen lieferten Beispiele für Raumbrände mit sowohl niedrigen Temperaturen in der Oberschicht, wo Brennstoff und Sauerstoff nebeneinander vorhanden sind, als auch hohen Temperaturen, bei denen sehr hohe Werte für CO nachgewiesen wurden, während Sauerstoff sehr gering war. [TEWARSON 1984] versuchte, aus seinen Versuchsdaten unter Hinzunahme weiterer Daten die Bildung von chemischen Stoffen bei Holzkrippenbränden zu quantifizieren. Die Darstellung des Quotienten aus gebildeter CO-Masse pro verbrauchter Brennstoffmasse (CO-Yields) über dem Luft-zu-Brennstoff-Stöchiometrieverhältnis (Kehrwert des GER, im deutschen Sprachgebrauch als Zuluftverhältnis bezeichnet) ließ den Schluss zu, dass bei brennstoffreichen Bedingungen pro g verbrannter Holzmasse etwa 0,2 g CO gebildet wurden und dass die Werte sinken mit steigendem Luft-zu-Brennstoff-Stöchiometrieverhältnis.

[MORIKAWA, YANAI 1986] untersuchten Brände einer Palette von Materialien (Kunststoffe, Textilien, Holz), die typisch für Wohnungseinrichtungen sind. Der würfelförmige Versuchsraum mit den Seitenlängen von je 2 m wurde im Bodenbereich kontrolliert belüftet, die Rauchgase wurden im Oberteil abgeführt. An verschiedenen Stellen im Raum wurden die Temperaturen gemessen und erreichten Werte von 900 – 1300 °C. Die Messungen der Gaskonzentrationen, angegeben als Konzentrationen unter Einbeziehung von Wasserdampf (wet-concentration), erfolgten im Abgasrohr. Die CO-Konzentrationen stiegen anfangs ganz beträchtlich und erreichten im Allgemeinen Werte größer 7 %, wobei gelegentlich auch Konzentrationen größer 10 % gemessen wurden. Die Sauerstoffkonzentrationen blieben während der intensiven Brandphase im Bereich von 5 %. Diese Ergebnisse unterschieden sich damit von denen der vorgenannten Untersuchungen, bei denen gleichzeitig hohe

Konzentrationen von Brennstoffmolekülen und Sauerstoff bei solchen hohen Temperaturen beobachtet wurden [PITTS 1995].

[PITTS 1995] schätzte ein, dass es schwierig ist, aus den Untersuchungen insgesamt Schlussfolgerungen ziehen zu können. Nicht nur die Ventilationsbedingungen waren sehr verschieden, auch die Testmethoden und Messeinrichtungen unterschieden sich sehr. Er kam zu dem Schluss, dass auch nach einer Reihe von Untersuchungen die Bildung von CO bei Feststoffbränden in Räumen nicht gut charakterisiert war.

Um die Möglichkeit der Korrelation des GER mit den in der Oberschicht bei Raumbränden gebildeten Gaskonzentrationen zu untersuchen, wurde von [GOTTUK 1992] die in Abbildung 25 dargestellte Testeinrichtung aufgebaut. Die Raummaße betragen Breite : Länge : Höhe 1,2 m : 1,5 m : 1,2 m. Die Luft wurde durch ein Rohr unter dem Boden zugeführt. Durch Schlitze entlang des Bodens war ein langsames und gut über die Fläche verteiltes Eintreten der Luft gewährleistet. So konnte sich das Zweischichtsystem gut aufbauen. Außerdem war es möglich, den eintretenden Luftstrom zu messen. Ein einzelnes Fenster in der Wand, dessen Größe variiert wurde, diente als Abluftöffnung. Die Masseverlustrate des Brennstoffs und der Zuluftstrom wurden gemessen und ins Verhältnis gesetzt. So war es möglich, Φ_p einfach durch Teilen dieses Verhältnisses durch das, welches für die stöchiometrische Verbrennung erforderlich ist, zu berechnen. Es wurde in diesen Experimenten festgestellt, dass die meisten Brände irgendwann einen Pseudo-Gleichgewichtszustand erreichen und dass $\Phi_p = \Phi_g$ ist. Vier Brennstoffe wurden untersucht: Hexan, PMMA, Holz und Polyurethanschaum. Für die Entnahme der Gasproben aus der Oberschicht benutzte [GOTTUK 1992] eine ungekühlte Edelstahlsonde. Während des Versuches wurde die Sonde an verschiedene Positionen bewegt. So wurde nachgewiesen, dass die Stoffkonzentration in der Oberschicht außerhalb der Plume unabhängig vom Messort ist. Als Beispiele werden hier die gemessenen Konzentrationen an O_2 und CO wiedergegeben (Abbildung 26). Zu beachten ist, dass die Angabe als „nasses“ Gas erfolgte, obwohl das Wasser vor der Analyse entfernt wurde. Es wurde die Annahme getroffen, dass das Molverhältnis von H_2O zu CO_2 bei jedem Φ_p das gleiche ist, wie bei der stöchiometrischen Verbrennung (siehe Kapitel 3.4.3.).

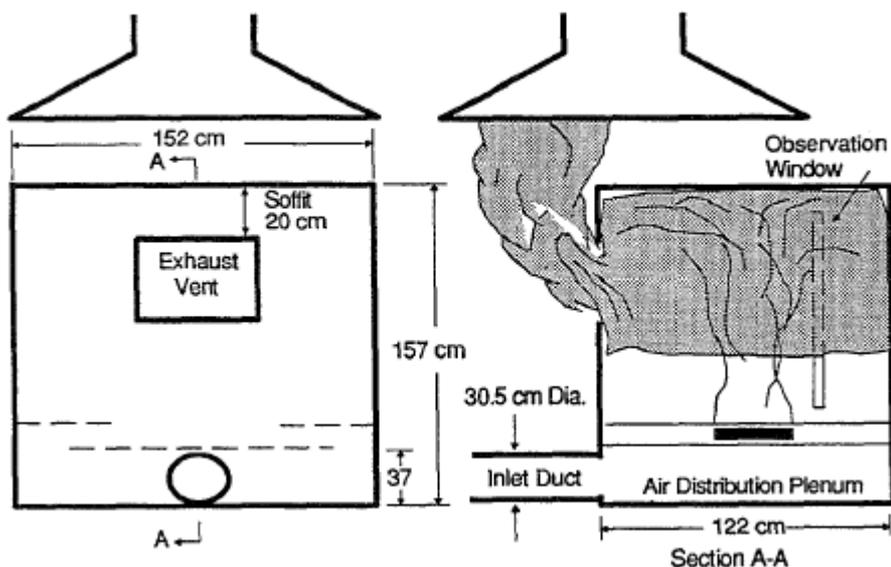


Abb. 25: Testeinrichtung zur Untersuchung von Raumbränden mit Ausbildung eines Zweischichtsystems nach [GOTTUK 1992]

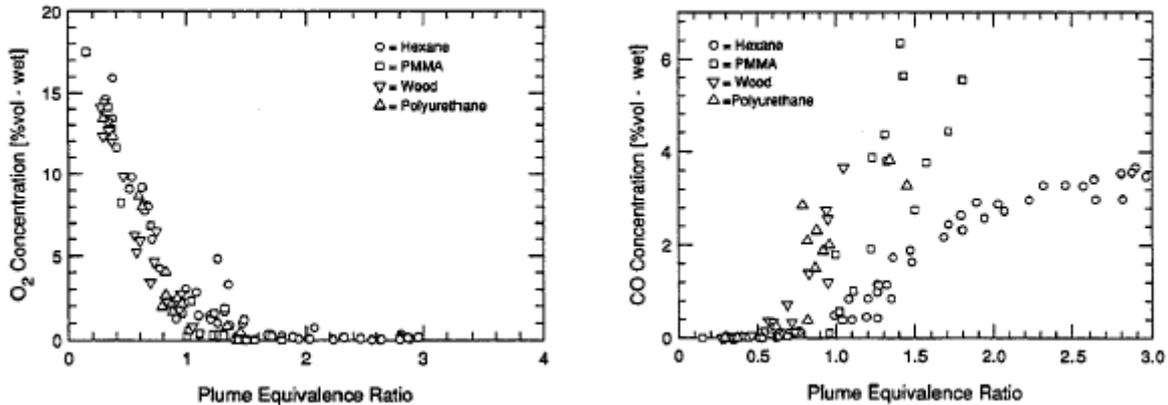


Abb. 26: Konzentrationen von O₂ und CO während der stationären Brandphase von vier verschiedenen Brennstoffen in Abhängigkeit von Φ_p [GOTTUK 1992]

[BEYLER 1986/2] hatte ebenfalls Hexan, Holz und PMMA in der Hauben-Versuchseinrichtung verbrannt. Die dabei festgestellten CO-Yields zeigten eine ähnliche Abhängigkeit von Φ_p wie bei [GOTTUK et al. 1992]. In beiden Fällen zeigte sich ein S-förmiger Verlauf, nur dass die Werte beim Raumbrand um etwa 0,5 versetzt waren. Ein Vergleich der Werte für die CO-Yields beim Brand von Holz ist in der Abbildung 27 dargestellt. Laut [PITTS 1995] korreliert der Unterschied in der Höhe der CO-Yields-Kurve zu dem in der Oberschicht festgestellten Temperaturunterschied zwischen Haube (470 – 800 K) und Raum (800 – 1170 K) und belegt die Aussage von [MOREHART ET AL. 1990]. Ein Vergleich der Yields für O₂ und CO₂ dagegen ist nicht schlüssig, deutet aber darauf hin, dass die Erhöhung der Temperatur der Oberschicht im Ergebnis die Verringerung des O₂-Gehaltes zur Folge hat, aus der in erster Linie die Bildung von CO₂ resultiert. Gleiche Schlussfolgerungen zieht er aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse von [TONER ET AL. 1987] mit denen von [GOTTUK et al. 1992] sowie [MOREHART ET AL. 1990] und [BEYLER 1984, 1986/1]: Höhere Temperaturen führen zur Bildung von sowohl CO als auch CO₂, aber die CO₂-Bildung ist bevorzugt.

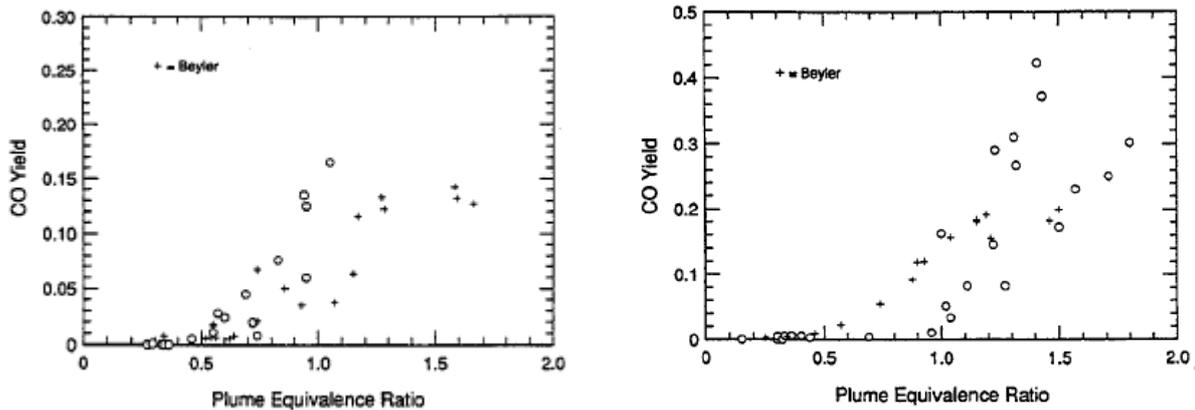


Abb. 27: Vergleich der Werte für CO-Yields beim Brand von Holz (links) und PMMA (rechts) in der Haube [BEYLER 1986/2] und im Raum [GOTTUK et al. 1992], veröffentlicht von [PITTS 1995]

[PITTS 1995] führte weiter aus, dass die Ergebnisse die Idee unterstützen, dass die Gaszusammensetzung, welche bei den niedrigen Temperaturen in den Hauben gemessen wurde, eine andere wäre, wenn dort die Oberschicht höhere Temperaturen erreicht hätte. Obwohl die Daten begrenzt sind, kann laut [PITTS 1995] sicher argumentiert werden, dass die CO-Yields nur leicht ansteigen bei hohen Temperaturen in der Haube sowie im Raum bei hohen Φ_g . Weiterhin sollte die Hochtemperatur-Abhängigkeit der CO-Bildung von Φ_g abgeschätzt werden können durch ein einfaches Anheben der S-Kurve von den

Niedrigtemperatur-Versuchen der Haube auf höhere Φ_g bei $\sim 0,5$. Das würde aber erfordern, dass sich die relativen Bildungsrate der Stoffe in der Plume verändern wenn die Temperatur gestiegen ist. In Auswertung der Untersuchungen erwartete [PITTS 1995], dass es einen Bereich von Temperaturen und Oberschicht-Verweilzeiten gibt, für den die Vereinfachung mit zwei S-Kurven fehlschlägt. Dieser Bereich ist schmal und liegt etwa bei 800 K. Die Hochtemperatur-Kurve eines Brennstoffs sollte bei den Temperaturen, die typisch für einen voll entwickelten Raumbrand sind, adäquat sein.

Mit der in Abbildung 25 gezeigten Testeinrichtung untersuchten [GOTTUK et al. 1995] auch den Einfluss der Temperatur auf die CO-Bildung bei Raumbränden mit Hexan, PMMA, Holz und flexiblem PUR-Schaum. Weil es signifikante Unterschiede zwischen den Aspekten der Hauben-Experimente und tatsächlichen Raumbränden gibt, war einzuschätzen, ob das GER-Konzept auch gültig ist für die Verhältnisse realistischer Brände. Es wurde gezeigt, dass empirische Korrelationen zwischen den Yields der Hauptbestandteile der Oberschicht und dem GER für diese Raumbrände bestehen. [GOTTUK et al. 1995] zogen für ihren Vergleich die Hauben-Ergebnisse von [BEYLER 1983] heran. Die Auswertung für Hexanbrände sowohl in der Haube wie auch im Raum ist in Abbildung 28 dargestellt. Sie belegten damit, dass die Bildung von CO in erster Linie von der Dynamik der Raumströmung, d. h. dem Äquivalenzverhältnis abhängt. Die für Raumbrände entwickelte Beziehungen sind qualitativ gleich den von [BEYLER 1983] für die Umgebung einfacher Schichten entwickelten, nur dass quantitative Unterschiede existieren. Gemäß [GOTTUK et al. 1995] lag der hauptsächliche Unterschied zwischen den beiden Arten von Experimenten in der Temperatur der Oberschicht. Im Bereich des GER von 0,5 – 1,5 wurde in der Haube eine mittlere Temperatur von 556 K festgestellt, während sie beim Raumbrand 970 K betrug. Sie führten an, dass die Umwandlung des CO in CO₂ durch eine Reaktion mit steigender Temperaturabhängigkeit im Bereich von 500 – 2000 K abläuft. Deshalb sehen sie es als wahrscheinlich an, dass auf Grund der niedrigeren Temperatur in der Haube die chemische Reaktion nach der Flamme bzw. in der Oberschicht zum Erliegen kommt. Weil CO gegenüber CO₂ das erste Produkt der Kohlenwasserstoffoxidation ist, kann der Reaktionsabbruch zu höheren Werten an CO zu Lasten der CO₂-Produktion führen. Sie zitierten [TAMANINI 1981], der entsprechende Untersuchungen an Propandiffusionsflammen unternommen hatte. Er benutzte eine Apparatur, mit der es möglich war, die Plume bei verschiedenen Höhen zu löschen. Seine Ergebnisse belegten, dass unten in der Plume die CO-Produktion maximal war, während oben in der Flamme grundsätzlich eine Reduzierung auf Null erfolgte, weil es zu CO₂ oxidiert wurde. Diese Untersuchungen lassen laut [GOTTUK ET AL. 1995] darauf schließen, dass eine Flamme, die weiter oben in der Plume gelöscht wird, weil sie in die Oberschicht eines Raumbrandes eintaucht, größere Mengen an CO produzieren wird, als ein Brand mit kleiner oder keiner Plume in der Oberschicht.

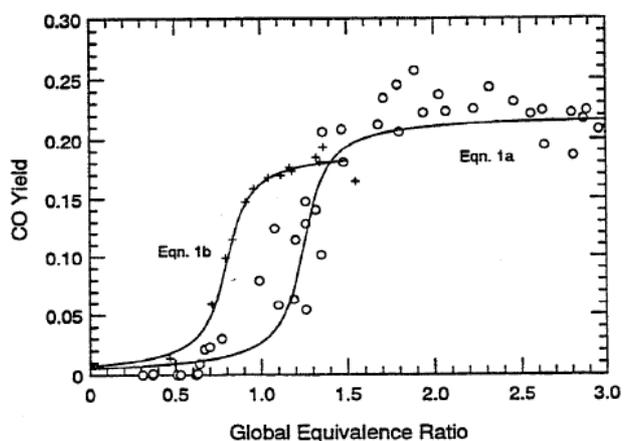


Abb. 28: CO-Yields aus Hauben-Untersuchungen [BEYLER 1983] und Raumbränden [GOTTUK ET AL. 1992] mit Hexan in Abhängigkeit zum GER [GOTTUK ET AL. 1995]

Um die Differenz in den GER-Yields-Beziehungen aus Hauben- und Raum-Versuchen aufzuklären, bestimmten [GOTTUK ET AL. 1995] zuerst die Reaktivität der Oberschicht aus den Hauben-Versuchen für eine Reihe isothermer Bedingungen, die sowohl für die Verhältnisse in der Haube als auch für einen Raum charakteristisch sind. Sie stellten die Hypothese auf, dass das Gemisch einer Oberschicht aus den Hauben-Experimenten bei Temperaturen, wie sie in der Oberschicht bei Raumbränden auftreten, reagieren würde und die gleiche Zusammensetzung wie bei Raumbränden erreichen würde. Unter Annahme verschiedener Randbedingungen modellierten sie, in gleicher Weise wie [PITTS 1995] das mit Ergebnissen von [MOREHART 1990] ausführte, die Ergebnisse aus ihren Untersuchungen und denen von [BEYLER 1983] sowohl für die Temperaturen als auch die Verweilzeiten für Hauben- und Raumbrände in einem Reaktor. Für Temperaturen, die charakteristisch für Raumbrände sind, ergab die Modellierung für überventilierte Bedingungen eine sehr gute Übereinstimmung von berechneter Oberschichtzusammensetzung zu den gemessenen Werten. Für unterventilierte Verhältnisse aber lagen die aus der Modellierung stammenden Werte erheblich über den tatsächlich gemessenen. Für CO betrug sie bis zum Vierfachen des Messwertes, für CO₂ dagegen bis zu 26 % niedriger als gemessen. Die berechneten O₂-Konzentrationen lagen bei fast Null und somit etwas niedriger als mit etwa 1 % gemessen.

Laut [GOTTUK ET AL. 1995] deutet diese Modellierung darauf hin, dass die Oxidation von Kohlenwasserstoffen (hier C₂H₄) schneller ist als die CO-Oxidation. Solange wie C₂H₄ im Gemisch vorhanden sind, läuft keine CO-Oxidation ab. Die CO-Konzentration steigt mit Beginn der C₂H₄-Oxidation. Wenn die C₂H₄-Konzentration zurückgeht, wird der restliche verfügbare Sauerstoff für die Umwandlung des CO in CO₂ genutzt. [PITTS 1995], der in seinen Untersuchungen zu gleichen Ergebnissen kam, legte dar, dass die freien Radikale H, OH und HO₂, die für die CO- und H₂-Oxidation erforderlich sind, in Gegenwart signifikanter Mengen unverbrannter Kohlenwasserstoffe nur in geringer Menge vorhanden sind, weil sie beträchtlich besser mit diesen reagieren. Bei Abwesenheit von Kohlenwasserstoffen wächst der Pool an Radikalen und CO wird, wie in den überventilierten Fällen, oxidiert. In Übereinstimmung mit dem Modell trat während der Kohlenwasserstoff-Oxidation ein verringerter O₂-Wert auf wegen Untervertilation auf Grund von anfänglich hohen C₂H₄-Konzentrationen. Daraus resultierten hohe CO- und H₂-Konzentrationen sowie ein Rest C₂H₄. Die CO₂-Produktion war vernachlässigbar, auch ein Indiz für die nicht erfolgende CO-Oxidation. [GOTTUK ET AL. 1995] sahen in diesen Ergebnissen den Beleg, dass die höheren Temperaturen (T > 900 K) der Raumbrände in der Oberschicht bei überventilierten bis leicht unterventilierten Verhältnissen ($\Phi < 1,1$) eine fast komplette Oxidation von CO zu CO₂ ermöglichten, während die Reaktion von CO zu CO₂ bei den Hauben-Temperaturen eingefroren war, woraus höhere CO-Konzentrationen resultierten. Zur Erklärung der Diskrepanz zwischen den für unterventilierte Bedingungen berechneten und gemessenen CO-Werten führen sie eine Diskussion möglicher Fehlerquellen im Modell bzw. in den angenommenen Randbedingungen.

Eine detaillierte Aufzeichnung über horizontale und vertikale Stoff-Verteilungen bei Raumbränden erfolgte von [BRYNER ET AL. 1994/1]. Der Testraum war ein 2/5-skaliertes Raum nach [ASTM E603] und [ISO 9705] mit den Maßen 0,98 x 1,46 x 0,98 m für Breite x Länge x Höhe. Für die Skalierung der Türöffnung wurde das Standardgesetz für die Raumventilation $A \cdot h^{1/2} = C G^2$ (A Öffnungsfläche, h Türhöhe, G Größenverhältnis geometrisch gleicher Räume, C Konstante) benutzt und ergab die Maße 0,48 x 0,81 m. Der Versuchsraum hatte einen Stahlrahmen, an dem Bleche als äußere Wandverkleidung angebracht waren. Von innen waren die Wände mit Kalziumsilikatplatten ausgekleidet. Bei einem Teil der Versuche erhielten Decke und Wände des Brandraumes eine Auskleidung mit Sperrholz. Der Versuchsraum wurde unter einem Kalorimeter platziert, um die aus dem Raum austretenden Verbrennungsgase auf CO und CO₂ untersuchen zu können und die Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate HRR) zu bestimmen. An zwei Stellen innerhalb des Raumes (im vorderen und hinteren Teil) wurden Gas- und Temperaturmessungen ausgeführt. Die O₂-Messung wurde nach dem paramagnetischen Prinzip durchgeführt, CO und CO₂ wurden mittels nichtdispersiver Infrarotspektroskopie gemessen. Bei einigen Tests

wurde ein Analysator zur Messung von Kohlenwasserstoffen eingesetzt sowie das Φ -Meter zur Bestimmung des lokalen Äquivalenzverhältnisses in Brandgasen. Letztgenanntes Gerät wurde am NIST entwickelt und gebaut. Das Prinzip ist, dass in einem Hochtemperatur-Ofen überschüssige Brennstoffe und Produkte der unvollständigen Verbrennung katalytisch zu CO_2 und H_2O umgesetzt werden. Unter diesen Bedingungen ist durch Messung des O_2 die Berechnung des lokalen Äquivalenzverhältnisses möglich. Als Brandquelle wurde in diesen Untersuchungen ein Erdgas-Brenner (Durchmesser 15 cm) in der Mitte des Versuchsraumes betrieben. In mehr als 140 Versuchen wurden durch Variieren der Brennstoffrate HRR's von 7 – 650 kW erzeugt. Die Brände dauerten lang genug (15 – 20 min), um ein pseudo-stationäres Brandverhalten zu erreichen. Gasproben wurden an verschiedenen Stellen in der Ober- und Unterschicht aus dem Raum entnommen. In der Horizontalen lagen die Messstellen 0,2 m unter der Raumdecke. Weiterhin wurde eine Sonde im vorderen Teil des Raumes positioniert (0,29 m von der linken Wand, 0,1 m von der Vorderseite sowie 0,1 m von der Decke entfernt). Bei allen Versuchen wurde eine gut ausgebildete Oberschicht im Raum beobachtet, während die Unterschicht hell und klar erschien. Bei überventilierten Bedingungen fanden die Brände im Raum statt. Sobald sich unterventilierte Bedingungen einstellten, war vereinzelt Brennen außerhalb des Raumes zu beobachten, was bei sehr unterventilierten Bränden ein beträchtliches Ausmaß annahm. Zusätzlich war bei unterventilierten Bedingungen ein Brennen entlang der Grenzschicht zwischen Ober- und Unterschicht zu verzeichnen. Als Beispiel ist die zeitliche Entwicklung der Gaszusammensetzung im vorderen und hinteren Teil des Raumes eines unterventilierten 500 kW-Brandes in Abbildung 29 dargestellt. Die Werte wurden unter Annahme eines stöchiometrischen Verhältnisses von H_2O zu CO_2 um den Wasseranteil korrigiert. Der berechnete Wasseranteil ist ebenfalls angegeben. Die CO -Konzentrationen waren im vorderen Teil höher als im hinteren. Auch die Temperaturen betragen im vorderen Teil etwa 1300 K, während sie im hinteren Teil etwa 300 K niedriger waren. Nach Einschätzung der Autoren deuten die Werte darauf hin, dass im hinteren Teil trotz niedrigerer Temperaturen eine effizientere Verbrennungsreaktion abläuft.

Einige Brände führten [BRYNER ET AL. 1994/1] bei sehr schmaler Türöffnung (1 cm) durch. Bei dieser Bedingung war die Ventilation sehr eingeschränkt und ein viel kleinerer Brand konnte eine brennstoffreiche Oberschicht ausbilden. Wegen der geringeren HRR waren die gemessenen Temperaturen viel niedriger und blieben unter 700 K. Der geringe zeitliche Temperaturanstieg wurde von den Autoren mit der Aufheizung der Wände begründet. Sie beobachteten, dass die Grenzschicht zwischen Ober- und Unterschicht gut ausgebildet war und Vermischungen innerhalb der Oberschicht sowie entlang der Grenzschicht weniger heftig stattfanden als bei weit geöffneter Tür. In Abbildung 30 ist die zeitliche Entwicklung der CO -Konzentration eines 25 kW-Brandes dargestellt. Da bei diesen kleinen Bränden die Bestimmung von Φ_g nicht möglich war, wurde Φ_l mittels Φ -Meter bestimmt. [PITTS 1995] verglich diese Ergebnisse mit denen, die [MOREHART 1990] bei gleichen Φ_g in den Hauben-Experimenten erreichte und fand eine gute Übereinstimmung (Tabelle 14). Daraus leitete er ab, dass die Hauben-Versuche mit ihren niedrigen Temperaturen zur Vorhersage der Konzentrationen in Verbrennungsgasen für Brände mit gut ausgebildeter Oberschicht, geringen Vermischungen und Temperaturen unter 700 K genutzt werden können.

Tabelle 14: Konzentration der Verbrennungsgase bei Versuchen mit niedrigen Temperaturen im reduced-scale Raum (RSE) und aus Hauben-Experimenten [PITTS 1995]

		RSE			Hauben-Versuch		
HRR kW	Φ_l	Konzentration (wet) Vol%			Konzentration (wet) Vol%		
		CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂
7	0,45	0,003	4,7	10,0	0,00	5,1	9,6
10	0,68	0,23	6,5	6,5	0,35	6,2	7,0
15	1,2	0,8	7,1	3,9	1,3	6,9	3,8
25	1,5	1,0	7,3	2,1	1,5	6,9	2,5

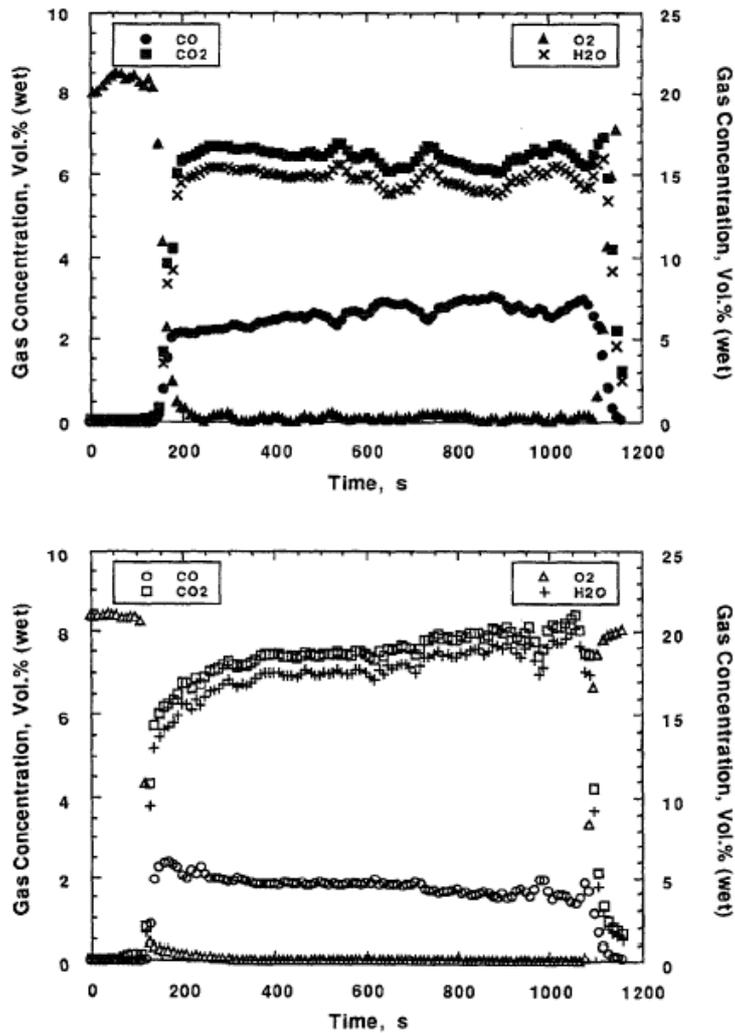


Abb. 29: zeitliche Entwicklung der Gaskonzentrationen (wet-Bedingungen, H₂O berechnet) in der Oberschicht bei einem 500 kW-Erdgasbrand, gemessen im vorderen Teil (oberes Bild) und im hinteren Teil (unteres Bild) [BRYNER ET AL. 1994/1]

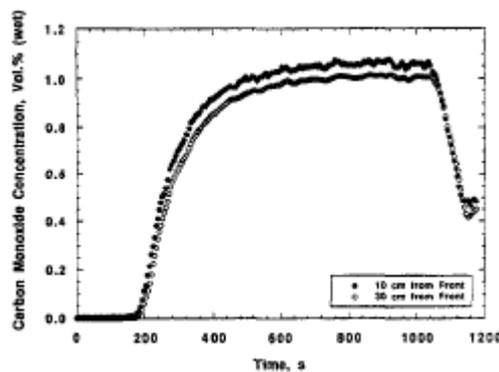


Abb. 30: zeitliche Entwicklung der CO-Konzentration bei einem 25 kW-Erdgasbrand mit der Türweite 1 cm, Messwerte aus dem vorderen und hinteren Teil des Raumes [BRYNER ET AL. 1994/1]

Bezüglich der CO-Verteilung ergaben die Messungen von [BRYNER ET AL. 1994/1] für Energiefreisetzungsraten von 400 und 600 kW horizontale Unterschiede, wobei die höchste CO-Konzentration bei beiden Energiefreisetzungsraten im vorderen Teil zwischen 3,0 und 4,0 % lag. Bei 400 kW variierte die CO-Konzentration zwischen 1,0 und 3,0 % in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand von der Vorderwand. Die Ergebnisse des 600 kW-Brandes zeigten völlig gleichmäßige CO-Konzentrationen im Raum bei dieser Höhe der Probenahme. Bei beiden Energiefreisetzungsraten war bei einem horizontalen Abstand von 0,51 m von der Vorderseite ein Gebiet hoher CO-Konzentration auszumachen, was auf die Nähe zum Brenner zurückgeführt wurde. Die vertikale Verteilung des CO wurde aus Bränden mit 250 und 600 kW bestimmt. Hierbei wurde die Sonde innen im Eingang platziert und von der Decke zum Boden bewegt. Die Ergebnisse zeigten im Gegensatz zur bisherigen Annahme einer gleichmäßigen Verteilung in der Oberschicht vertikale Unterschiede bei den Spezies-Werten. Beim 250 kW-Brand und einem Abstand von mehr als 0,15 m unter der Decke sanken die Werte für CO rapide von nahezu 2,5 – 3,0 % auf weniger als 1,0 %, während beim 600 kW-Brand die CO-Werte gleichmäßig zu sein schienen nur niedriger als bei der o. a. fest am Messort verbliebenen Sonde bei Abständen zwischen 0,15 und 0,41 m unter der Decke. [BRYNER ET AL. 1994/1] schlussfolgerten aus diesen Untersuchungen, dass die Spezies-Konzentrationen in der oberen Gasschicht bei kleinen vertikalen und horizontalen Entfernungen signifikant variieren können.

[BRYNER ET AL. 1995] setzten die vorgenannten Untersuchungen an einem Full-Scale-Objekt fort. Dieser Raum entsprach in seinen Maßen Breite x Höhe x Länge 2,44 x 2,44 x 3,67 m der [ISO 9705] und [ASTM E603] und war ebenso aus Stahl aufgebaut. Die Innenauskleidung war 3-lagig mit Gipsplatten und obenauf liegenden Kalziumsilikatplatten. In der vorderen Wand war eine Tür von 0,76 m Breite und 2,03 m Höhe. Im Zentrum des Raumes befand sich der Erdgasbrenner (\varnothing 0,35 m, Höhe 0,38 m), aus dem der Brennstoff mit der gleichen Geschwindigkeit austrat, wie im 2/5-skalierten Raum. Auch hier betrug die Branddauer 15 – 20 min. Es wurden 12 Versuche mit HRR's von 450 – 3500 kW durchgeführt. Die dabei gemessenen CO- und O₂-Konzentrationen sind in der Abbildung 31 dargestellt.

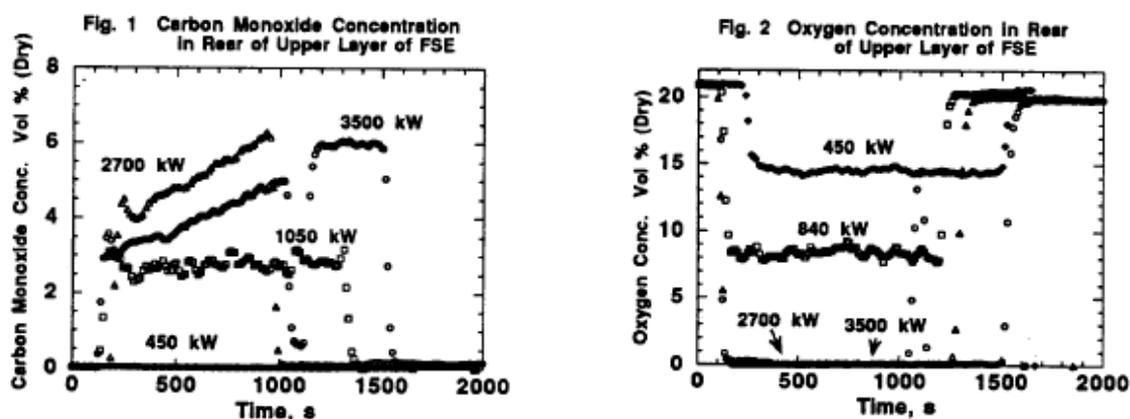


Abb. 31: zeitliche Entwicklung der Konzentration von CO und O₂ in der Oberschicht im hinteren Teil des Full-Scale-Raumes [BRYNER ET AL. 1994/2]

Die Autoren verglichen die Versuchsergebnisse für Temperaturen und Gaskonzentrationen der Oberschicht aus beiden Räumen unter dem Aspekt der Bedingungen überventiliert, fast stöchiometrisch und unterventiliert für jeweils annähernd gleiche GER's im Full-Scale- und Reduced-Scale-Objekt an (Abbildungen 32 - 34). Die Messstellen lagen im Frontbereich sowie im hinteren Teil des Brandraumes. Brände mit HRR größer als 200 kW und 1400 kW im Reduced-Scale- bzw. Full-Scale-Raum verursachten post-flashover-Bedingungen.

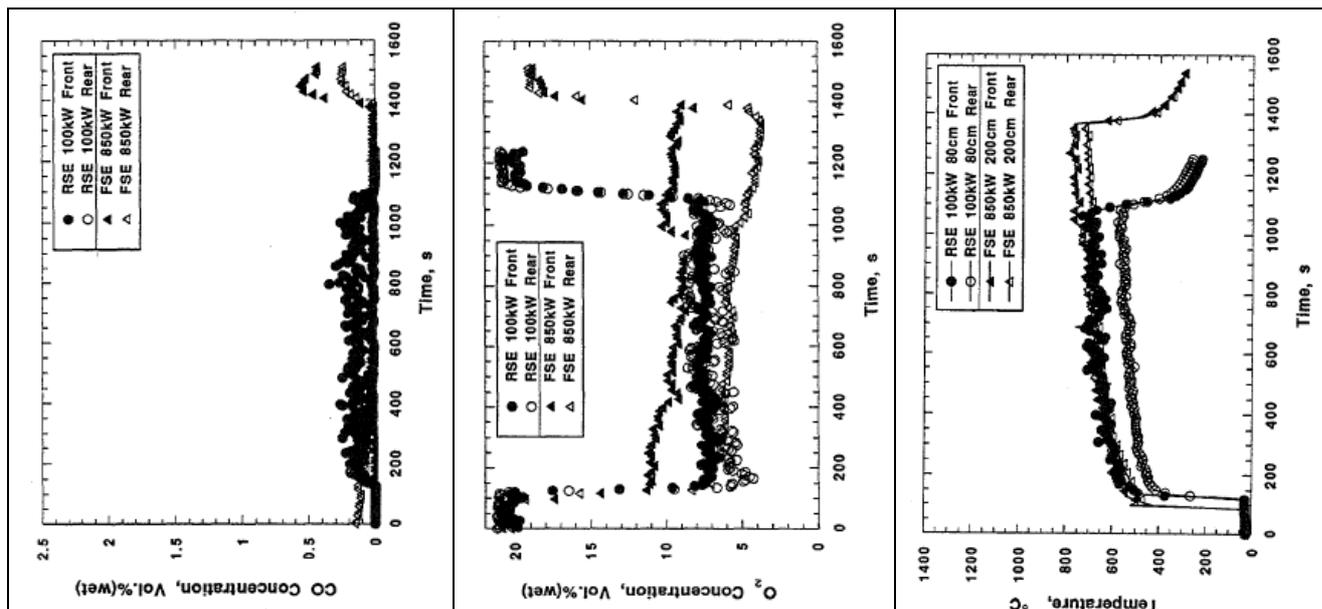


Abb. 32: zeitliche Entwicklung der CO- und O₂-Konzentrationen sowie Temperaturen in der Oberschicht überventilierter Brände im Full-Scale- und Reduced-Scale-Objekt [BRYNER ET AL. 1995]

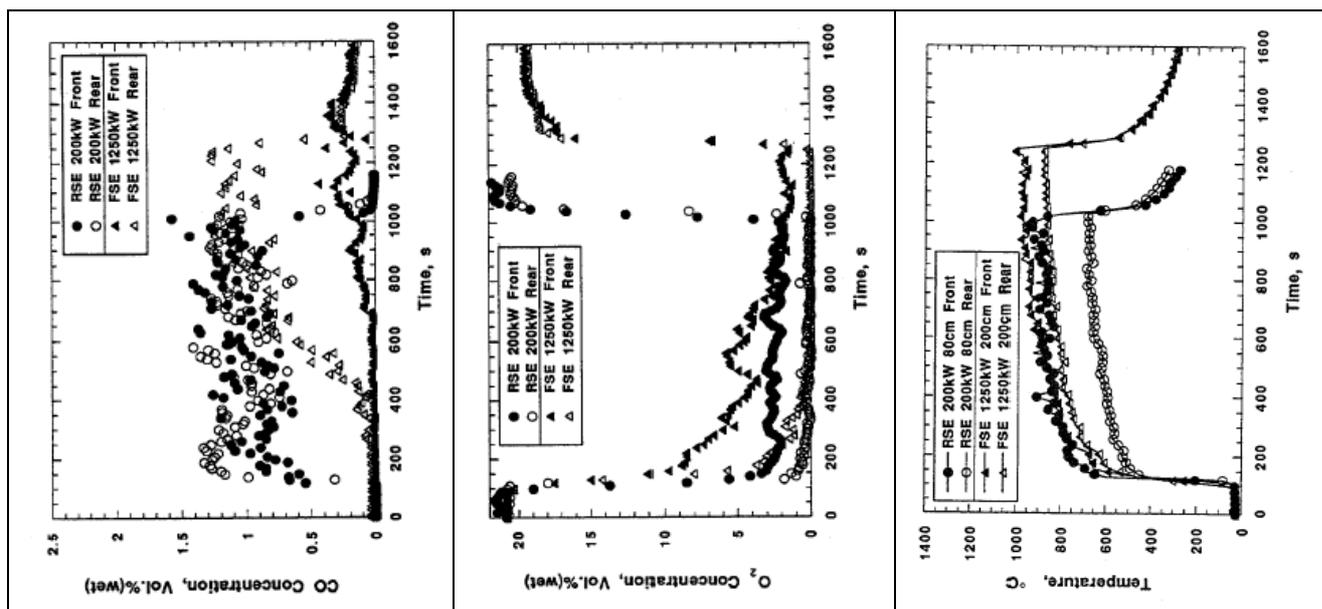


Abb. 33: zeitliche Entwicklung der CO- und O₂-Konzentrationen sowie Temperaturen in der Oberschicht zweier Brände mit nahezu stöchiometrischer Ventilation im Full-Scale- und Reduced-Scale-Objekt [BRYNER ET AL. 1995]

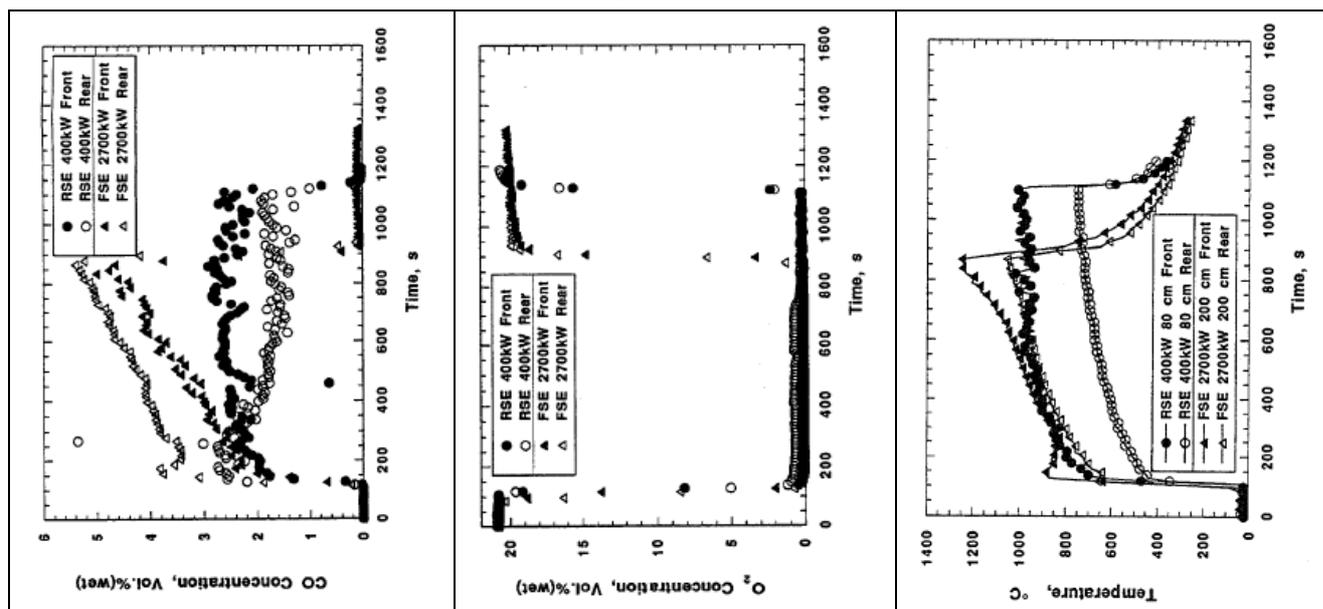


Abb. 34: zeitliche Entwicklung der CO- und O₂-Konzentrationen sowie Temperaturen in der Oberschicht zweier unterventilierter Brände im Full-Scale- und Reduced-Scale-Objekt [BRYNER ET AL. 1995]

[BRYNER ET AL. 1995] stellten beim Vergleich der Ergebnisse aus den Untersuchungen in den verschiedenen großen Räumen fest, dass sich die Ableitung der Türgröße mit dem Skalierungsparameters $Ah^{1/2}$ als akkurat erwies. Dieser Parameter enthält das Quadrat eines geometrischen Skalierungsfaktors, der für diesen RSE 0,4 betrug. Als die Massenflussraten vom RSE entsprechend für den FSE vergrößert wurden, erwarteten die Autoren einen Faktor von 6,25 der sich mit 6,6 und 6,7 dann auch innerhalb der Fehlergrenze bestätigte. Gute Übereinstimmung fanden sie ebenfalls zwischen berechneter HRR von 1250 kW zur Erzeugung unterventilierter Verhältnisse und einem Versuchsergebnis von 1400 kW. Hinsichtlich der Konzentrationen von CO und O₂ sowie deren Verteilung in der Oberschicht und der Temperaturen gab es Unterschiede nicht nur zwischen den beiden Versuchsräumen sondern auch zwischen Front- und Hinterbereich im Raum. Die Temperaturen waren bei beiden Räumen im Frontbereich generell höher, während bei den Gaskonzentrationen das tendenzielle Verhalten sehr verschieden war, wie aus den Abbildungen 32 - 34 ersichtlich ist. [BRYNER ET AL. 1995] leiteten daraus ab, dass die Bildung der Verbrennungsprodukte nicht allein durch die Ventilationsbedingungen bestimmt wird. Sie diskutieren als Ursache die unterschiedlichen Temperaturen, die für den FSE mit 100 – 200 °C höher lagen. Ziel der Skalierung der Räume ist die Einstellung ähnlicher Ventilationsverhältnisse. Daraus ergibt sich aber, dass z. B. die Türöffnung des RSE einen längeren Teil in der Frontwand ausmacht als im FSE und dadurch im RSE ein größerer Anteil der HRR durch Strahlung aus der Öffnung verloren geht. Auch hat der RSE einen im Verhältnis zum Raumvolumen höheren Anteil an Wandfläche als es im FSE der Fall ist. Auch hier sehen die Autoren einen größeren Verlust an HRR infolge Wärmeleitung durch die Wände. Die höheren Temperaturen im FSE sind damit eine mögliche Erklärung für die dort gemessenen höheren CO-Konzentrationen. Gemäß [PITTS 1997] liegen diese etwa 50 % über denen durch Anwendung des GER-Konzeptes zu erwartenden Werten. Als Ursache diskutiert er den Lufteintritt an der Türöffnung, der mit schneller Vermischung direkt in die heiße Oberschicht erfolgt?, ohne den Weg durch die Plume zu nehmen. Das führt zur Ausbildung von lokal unterschiedlichen Äquivalenzverhältnissen. Der Luftsauerstoff reagiert dort direkt mit dem überschüssigen Brennstoff und bildet bevorzugt CO. Die daraus resultierende Wärmefreisetzung führt letztlich zu höheren Temperaturen im Frontbereich. Das GER-Konzept war auf der Basis der Hauben-Versuche entwickelt worden und schließt diese für Raumbrände typischen Verhältnisse nicht mit ein. Für die Vorhersage der CO-Bildung bei Raumbränden,

Zur Aufklärung der Ereignisse bei zwei realen Bränden, bei denen Menschen durch Rauchinhalation zu Tode kamen, untersuchten [LATTIMER ET AL. 1996/2] den Transport hoher Konzentrationen von CO aus einem Brandraum in einen angrenzenden Korridor ähnlich der in der in Abbildung 35 gezeigten Testeinrichtung. Der Korridor war hier im rechten Winkel zum Brandraum angesetzt. Es wurde der Einfluss der Stärke der Oberschicht auf die Oxidation der Produkte der unvollständigen Verbrennung aus dem Brandraum untersucht und somit die Entwicklung der Konzentrationen entlang des Korridors. Mittels zweier Öffnungen wurde variiert, wie der Strom der Plume, der den Korridor erreicht, dort in die umgebende Atmosphäre eintaucht. Durch die Kontrolle der Tiefe der Oberschicht der um den O₂-Gehalt verringerten Brandgase, die sich während der pre-flashover-Phase im Korridor ansammelten, wurde die O₂-Konzentration, die in die Plume bei Erreichen des Korridors eindringt, variiert. Je stärker die Schicht wurde, desto höher stiegen die Konzentrationen von CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHC) an, während die CO₂-Konzentrationen sanken. Reichte die Schichtstärke bis unter die Unterkante der Öffnung, wurden CO-Konzentrationen wie im Brandraum oder höher gemessen. Die höchsten Konzentrationen wurden bei externem Brennen gemessen. Hierbei war zu erkennen, dass die Gase ungleichmäßig durch den Korridor transportiert wurden. Weil der Brandraum seitlich angefügt war, strömte die Hauptmenge der Gase zur gegenüber liegenden Seite des Korridors und dann seitlich entlang. Das spiegelte sich in der räumlichen und zeitlichen Konzentrationsverteilung sowie der Temperatur wider. In der post-flashover-Phase wurden beispielsweise an der dem Brandraum gegenüberliegenden Wand des Korridors CO-Konzentrationen von größer 2 % gemessen, während auf der anderen Seite nur 0,8 % festgestellt wurden. Die aus den Messungen berechneten Stoff-Yields wurden gegen eine dimensionslose Schichtdicke grafisch aufgetragen. Die dimensionslose Schichtdicke γ , definiert als die Dicke σ der Oberschicht dividiert durch den Abstand z zwischen der Unterkante der Öffnung und der Raumdecke, repräsentiert hierbei den Grad, in welchem der Strom der Brandprodukte aus dem Brandraum bei Eintritt in den Korridor von um den O₂-Gehalt verminderten Brandgasen umgeben ist.

[PITTS 1997] schätzte auf Grund der vorgenannten Untersuchungen ein, dass die Abschätzung der CO-Bildungsrate bei Raumbränden allein auf der Basis des GER-Konzeptes fehlschlägt. Er hatte bei seinen chemisch-kinetischen Betrachtungen gezeigt, dass eine Mischung aus Verbrennungsgasen, welche bei niedrigen Temperaturen „eingefroren“ ist, wieder beginnt zu reagieren und Konzentrationen des thermodynamischen Gleichgewichts erreicht bei Temperaturen, wie sie bei Raumbränden auftreten. In diesem Temperaturbereich ist die CO-Bildung stark favorisiert. Eine plausible Erklärung der hohen CO-Konzentrationen bei Raumbränden kann nur darin liegen, dass die Temperaturen auf einen Wert steigen, bei dem die brennstoffreiche Gasmischung der Oberschicht zu reagieren beginnt und in ein Gleichgewicht kommt. Die letztendlich erreichbare CO-Konzentration wird somit eine Funktion der Verweilzeit der Gase sowie der Reaktionsgeschwindigkeit. [PITTS 1997] schlussfolgert, dass die nachfolgend aufgeführten vier Mechanismen die CO-Bildung bei Raumbränden bestimmen:

- Quenching einer turbulenten Fire Plume bei Erreichen der brennstoffreichen Oberschicht
- direktes Einmischen von Sauerstoff in die brennstoffreiche Oberschicht bei hoher Temperatur mit nachfolgender Reaktion
- Pyrolyse von Holz (bzw. Zellulosematerial) in einer durch hohe Temperaturen beeinträchtigten Umgebung
- Verbrennungsprodukte erreichen Gleichgewichtskonzentrationen in der brennstoffreichen heißen Oberschicht

Lediglich der erstgenannte Mechanismus, der aus den Hauben-Versuchen resultiert, wird durch das GER-Konzept erfasst. Somit wird durch dessen alleinige Anwendung bei Raumbränden die geringste CO-Menge vorhergesagt. [PITTS 1997] stellt einen Algorithmus vor, der insgesamt 8 Parameter berücksichtigt.

[LÖNNERMARK ET AL. 1996] führten am Swedish National Testing and Research Institute full-scale Tests in der Versuchsanordnung nach [ISO 9705] mit festen und flüssigen Brandstoffen durch. Die Belüftung wurde mit verschiedenen Türweiten variiert sowie durch Veränderung der Türschwelle. Konzentrationsmessungen fanden in der Türöffnung und in der Abgashaube statt. In der Türöffnung wurde eine Sonde mit sieben gleichen Löchern diagonal durch den Abgasstrom positioniert, wodurch eine räumliche Mittelung der möglichen Spezies-Verteilung erfolgte. Der Vergleich der Messwerte von Türöffnung und Abgashaube zeigte, dass in der Abgashaube niedrigere CO-Konzentrationen als in der Türöffnung auftraten. Ein von [WIECZOREK ET AL. 2004/1] erwartetes Ergebnis, weil aufgrund der hohen Temperatur und des Vorhandenseins von zusätzlichem Sauerstoff in der Haube günstige Bedingungen für die Umwandlung von CO in CO₂ herrschten. Ein weiterer Anhaltspunkt für diese zusätzliche Reaktion sind die in der Abgashaube gemessenen höheren Konzentrationen an CO₂. Bezüglich des Auftretens von Flammen außerhalb des Brandraumes erfolgten von [LÖNNERMARK ET AL. 1996] keine Angaben. Aufgrund bereits vorliegender Erfahrungen schätzten [WIECZOREK ET AL. 2004/1] ein, dass auch hier bei einem Äquivalenzverhältnis größer 1 Verbrennungsreaktionen außerhalb des Raumes stattgefunden haben müssen.

Die Ergebnisse veranlassten [WIECZOREK ET AL. 2004/1] das Problem der richtigen Durchführung von Messungen aufzugreifen. Wie experimentell in früheren Untersuchungen erzeugt, repräsentieren gut durchgemischte gleichmäßige Schichten nicht wirklich die Umgebung eines Raumbrandes. Somit verbieten sich nach Auffassung der Autoren auch Einzelpunkt-Messungen für die Beurteilung der Gaszusammensetzung. Sie weisen darauf hin, dass es nur zwei Richtlinien gibt, die überhaupt die Messungen bei Raumbränden behandeln – [ISO 9705] und [ASTM E603-98a]. Wobei diese nicht für die detaillierte Analyse toxischer Verbrennungsprodukte entwickelt wurden sondern lediglich für Messungen in der Abgashaube, die zur Bestimmung der Heat Release Rate nach der Methode des Sauerstoffverbrauchs benötigt werden. Die Autoren führen weiter aus, dass im Laufe der Jahre small-scale und full-scale Experimente entwickelt wurden, deren Aufbau den beiden Richtlinien entlehnt wurden. So kam es zu Messungen im Rauchgas in der Abgashaube an Positionen, an denen das Rauchgas bereits gut vermischt ist. Diese Messungen sind nicht unbedingt repräsentativ für die Konzentration der einzelnen Rauchgasbestandteile, die den Brandraum verlassen, weil zusätzliche Reaktionen ablaufen können (und es normalerweise auch machen), wenn die sauerstoffreiche Umgebungsluft zusammen mit den Brandgasen in die Abgashaube eintritt. Das Ablaufen dieser zusätzlichen Reaktionen hängt stark von der Gastemperatur ab. Deshalb finden die deutlichsten Veränderungen in der Rauchgaszusammensetzung zwischen Raumöffnung und Abgasrohr statt bei unterventilierten Bedingungen im Raum, wenn der Brand jenseits der Raumöffnung abläuft [LÖNNERMARK ET AL. 1996]. Aus diesem Grund wurden bei manchen Untersuchungen bereits Messungen in der oberen Schicht oder in der Ausgangsöffnung des Brandraumes vorgenommen. Die Verteilung der Rauchgasbestandteile im Raum zeigte fast immer räumliche Unterschiede. Deshalb sind Einzelpunktmessungen der Rauchgasbestandteile nicht repräsentativ für das gesamte Brandraumvolumen und das Gas, welches aus dem Brandraum austritt. Auf der Grundlage experimenteller Arbeiten von [GOTTUK 1992] konnten diese Unterschiede quantifiziert werden. Er realisierte in der Versuchsanordnung die Trennung und Messung der ein- und austretenden Gasströme und simulierte so ein ideales Zweischicht-System. Er führte die Messungen in der oberen Schicht des Brandraumes und im Zentrum der Abgasöffnung bei drei unterschiedlich dimensionierten Öffnungsflächen durch und kam zu der Aussage, dass in der Kammer eine gut vermischte einheitliche Schicht existiert. Leider wurden die Messungen bei den verschiedenen Versuchen aber nicht gleichzeitig an beiden Positionen durchgeführt, so dass die Ergebnisse letztendlich nicht miteinander vergleichbar sind. Messungen von CO-Konzentrationen, welche ausgeführt wurden, obwohl bereits außerhalb des Raumes ein Flammenbrand und damit zusätzliche Reaktionen mit dem hier vorhandenen Sauerstoff möglich wurden, ergaben niedrigere Werte. Diese Ergebnisse repräsentieren nicht die CO-Konzentrationen, die bei einem Brand im Raum entstehen [WIECZOREK ET AL. 2004/1].

[WIECZOREK ET AL. 2004/1] untersuchten die Anwendbarkeit des GER- Konzeptes bei Bränden in Räumen mit typischen Gebäudemerkmalen. Ziel dieser Studie am Virginia Tech Building Fire Research Laboratory war die Untersuchung des Transports toxischer Rauchgasbestandteile vom Brandraum in entfernter gelegene Räume eines Gebäudes. Die Autoren führten Propanbrände bei vier verschiedenen Ventilationsbedingungen in einem half-scale Raum nach [ISO 9705] durch. Sie beurteilten das GER-Konzept anhand früherer Ergebnisse sowie eigener ausführlicher Messungen an der Ausgangsöffnung des Brandraumes (Abbildung 36), basierend auf den drei dort möglichen Grenzbedingungen der Zuführung in einen „Flur“: Verbrennungsgase, Kombination aus Verbrennungsgasen und Flammen, komplett Flammen. Sie untersuchten die Parameter, die sich auf die Quantifizierung der Rauchgasbestandteile auswirken.

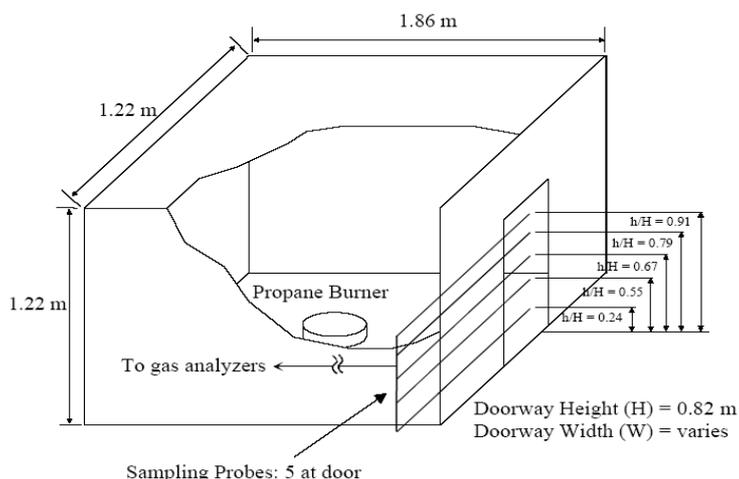


Abb. 36: Geometrie des Brandraumes von [WIECZOREK ET AL. 2004/1]

Die Messungen führten [WIECZOREK ET AL. 2004/1] bei stationären Umgebungsbedingungen durch, d. h. der Raum wurde für 20 – 30 min völlig aufgeheizt, bis die Temperaturänderung ungefähr bei 1 K/min lag. Dann erfolgte für eine Zeitspanne von 180 – 240 s die Datenaufzeichnung. Diese Vorgehensweise erlaubte die Durchführung mehrerer Versuche täglich ohne zwischenzeitliche Abkühlphase. In der Tür wurden zur Variation der Ventilation Weiten von 0,165 m (schmal), 0,33 m (normal) und 0,66 m (weit) eingestellt. Aus den Messwerten wurden zeitlich gemittelte und räumlich integrierte Massenflüsse der Spezies in der Ausgangsöffnung des Raumes erzeugt. Die Energiefreisetzungsraten (153, 270 und 470 kW) wurden so auf die Ventilationsöffnungen abgestimmt, dass sich bei allen Versuchen nahezu das gleiche GER von 0,6 einstellen sollte. Trotzdem trat bei allen Versuchen ein sogenanntes externes Brennen auf, d. h. auf Grund der Flammenausdehnung brannten diese auch außerhalb des eigentlichen Brandraumes. Deshalb beinhalten die Ergebnisse Messungen sowohl in den heißen Gasen der Verbrennungsprodukte als auch in der Plume. [WIECZOREK ET AL. 2004/1] kamen zu folgenden Ergebnissen:

- Die allgemeine Annahme, dass im Raum eine gleichmäßige Oberschicht und unterhalb der Plume eine gut durchmischte gleichmäßige Umgebung existiert, bestätigte sich nicht. Es gab Konzentrationsunterschiede innerhalb der Schicht.
- Trotz gleicher Brennstoff-Luft-Verhältnisse wurden bei allen Versuchen erhebliche Unterschiede in der Gaszusammensetzung festgestellt. Die in der Türöffnung auftretenden Konzentrationen an CO und UHC hängen in erster Linie von der Größe eines Brandes im Raum ab. Eine nur auf dem GER basierende Prognose zum Brandablauf im Brandraum war nicht möglich.

Für die Bewertung ihrer Versuchsergebnisse schufen sie deshalb eine dimensionslose Heat Release Rate, auf die normierte Stoff-Yields bezogen wurden.

[KUNKELMANN 1996] führte eine ganze Reihe von Raumbränden durch. Er nutzte eine Versuchseinrichtung bestehend aus Brandraum (Grundfläche 5000 x 4500 mm, Höhe 2750 mm) mit Fenster und Tür zu einem Flur mit angrenzendem Nebenraum gemäß Skizze in Abbildung 37. Sämtliche Räume waren innen mit Silikat-Brandschutzbauplatten ausgekleidet. Auf die Darstellung der Doppelfassade sowie weiterer Details wurde verzichtet.

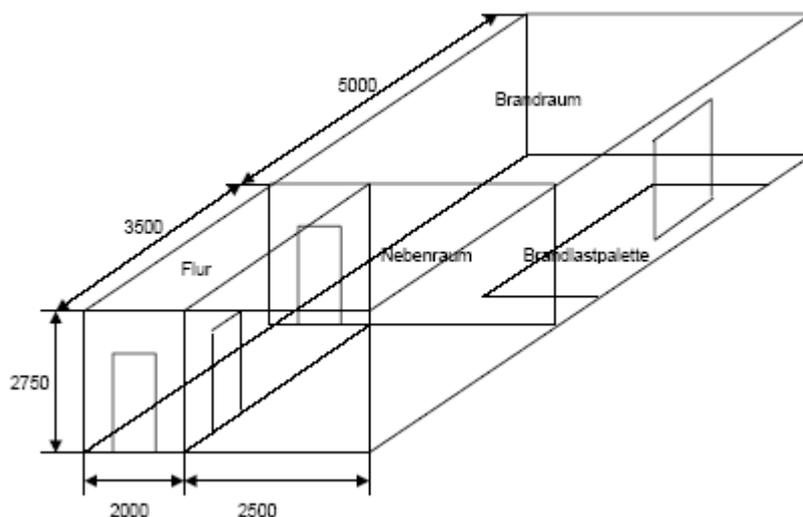


Abb. 37: Skizze des Brandraumes nach [KUNKELMANN 1996]

Als Brandlast wurde von [KUNKELMANN 1996] eine sogenannte Brandlastpalette (L x B x H = 3000 x 1500 x 1500 mm) eingesetzt, deren Materialbestückung in Tabelle 15 wiedergegeben ist. In Versuchen war ermittelt worden, dass das Abbrandverhalten dieser Paletten bei Verwendung von 2 Stück hinsichtlich der Temperatur- und Rauchgasentwicklung im Brandraum in etwa dem einer normalen Wohneinrichtung entspricht.

Tabelle 15 : Einzelmassen und Heizwerte der Brandlastpalette [KUNKELMANN 1996]

Stoff	Masse kg	Massenanteil	Heizwert H _u MJ/kg
Holz ¹	152,1	0,912	16
Styropor (PS 15 SE)	3,2	0,019	40
Linoleum	8,8	0,053	19
Nadelfilz (PP)	1,1	0,007	43
Vorhang (50% Baumwolle, 50% Polyester)	1,1	0,007	20
Brennspiritus	0,4	0,002	25
mittlerer Heizwert bzw. Summe	166,7	1	16,9

¹ Holzfeuchte 7 – 8,5 %

Der zeitliche Verlauf der Messwerte für Temperatur, Abbrandmasse, Gaskonzentrationen etc. stand in engem Zusammenhang mit den Ventilationsöffnungen. Diese wurden während der Versuchsdurchführung teilweise variiert, d. h. Türen wurden wiederholt geöffnet und geschlossen und Fenster gingen zu Bruch bzw. waren von vornherein unverglast. Aus der Abbrandrate wurde der Wärmestrom berechnet, wobei vom Autor eingeschätzt wurde, dass dieser bedingt durch unvollständige Verbrennung real nur zu 35 – 50 % erreicht wurde. Aus den von [KUNKELMANN 1997] veröffentlichten Versuchsdaten wurde durch Auslesen von Werten aus grafischen Darstellungen eine Bewertung der toxischen Exposition mit Eintreten

von Handlungsunfähigkeit und Tod von im Brandraum befindlichen Personen durch Anwendung des FED-Konzeptes versucht. Als Beispiel wurde Versuch 7 ausgewählt, bei dem 2 Brandlastpaletten durch 2 Zündwannen und Zündkrippen in Brand gesetzt wurden. Das soll, so der Autor, in etwa dem Brand einer Wohnzimmereinrichtung entsprechen. Die Ventilation des Raumes erfolgte durch ein angekipptes Fenster. Es wurden die in Tabelle 16 aufgeführten Werte (geschätzte Mittelwerte der jeweiligen Minute) ausgelesen und in die Berechnung übernommen.

Tabelle 16: Berechnung der toxischen Wirkung der Brandgase CO und CO₂ mittels FED-Konzept aus Versuchsdaten von [KUNKELMANN 1997]

Zeit min	CO-Konzentration Vol%	CO ₂ -Konzentration Vol%	F HU, Ruhe	F Tod, Ruhe	F HU, aktiv	F Tod, aktiv
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0	0,5	0,01	0,01	0,01	0,01
5	0	1,5	0,01	0,01	0,01	0,01
6	0	2,0	0,02	0,02	0,02	0,02
7	0	1,5	0,02	0,02	0,02	0,02
8	0	1,5	0,03	0,03	0,03	0,03
9	0,1	4,5	0,07	0,07	0,14	0,10
10	0,5	10,0	0,87	0,78	2,17	1,47
11	1,9	14,5	9,28	8,29		

Ebenso wurde mit von [KUNKELMANN 2001] veröffentlichten Versuchsdaten verfahren. Bei dem Versuch (8) befand sich im Brandraum eine komplette Wohnzimmereinrichtung mit einer Brandlast von 754 kg Möbel, die mittels Zündwanne in Brand gesetzt wurde. Die Ventilation erfolgte durch das geöffnete Fenster des Raumes. Die Sonden für die Gasprobenahme waren in einer Höhe von 1,5 m über dem Fußboden des Brandraumes positioniert. Es wurden die in Tabelle 17 aufgeführten Werte (geschätzte Mittelwerte der jeweiligen Minute) ausgelesen und in die Berechnung übernommen.

Tabelle 17: Berechnung der toxischen Wirkung der Brandgase CO und CO₂ mittels FED-Konzept aus Versuchsdaten von [KUNKELMANN 2001]

Zeit min	CO-Konzentration Vol%	CO ₂ -Konzentration Vol%	F HU, Ruhe	F Tod, Ruhe	F HU, aktiv	F Tod, aktiv
1	0	0,1	0	0	0	0
2	0,1	1,0	0,02	0,01	0,05	0,03
3	0,6	4,0	0,18	0,15	0,65	0,04
4	1,0	9,5	1,58	1,32	5,27	3,29
5	1,5	16,0				
6	5,0	17,0				

Ohne Beachtung des Einflusses der Wärmebelastung ergibt sich allein aus der Exposition mit diesen Gaskonzentrationen im ersten Beispiel eine Fluchtzeit von 9 bzw. 10 Minuten, im zweiten Beispiel stehen dafür dagegen nur knapp 4 Minuten zur Verfügung. Danach treten jeweils mit minimalem Unterschied sowohl bei Personen mit Ruheatmung als auch bei leichter Aktivität Handlungsunfähigkeit und Tod ein.

3 UNTERSUCHUNGEN AM IDF

Wie bereits erwähnt, bestand die Aufgabe in diesem Teil des Projektes im Aufbau einer geeigneten Versuchseinrichtung für die Untersuchung der zeitlich abhängigen Veränderung der bei Bränden verschiedener Ventilation im Abgas enthaltenen Gaskonzentrationen und hier speziell der des Kohlenmonoxids. Gleichzeitig sollte die Auslegung der Versuchseinrichtung eine Beurteilung möglicher Veränderungen in der Zusammensetzung des Abgases entlang des Ausbreitungsweges nach Austritt aus dem Brandraum gestatten. Um die Versuchsergebnisse international vergleichbar gestalten zu können, erfolgte eine Orientierung am Trend.

3.1 Geometrie des Versuchsaufbaus

Dem allgemeinen Trend folgend, wurde für die Untersuchung der sich in Abhängigkeit verschiedener Parameter bei Raumbränden einstellenden Kohlenmonoxidkonzentration ein sogenanntes half-scale Objekt gemäß [ISO 9705] aufgebaut. Für die Beurteilung der Konzentrationsveränderungen entlang des Ausbreitungsweges vom Rauchgas wurde ebenfalls ein entsprechender angrenzender Raum, hier Flur genannt, aufgebaut. Rahmen und äußere Verkleidung von Brandraum und Flur wurden aus Edelstahl gefertigt. Im Innenraum erfolgte bei beiden Teilen eine Auskleidung mit 25 mm starken Brandschutzbauplatten aus Kalziumsilikat Typ Supalux® - D der Firma CAPE Boards Deutschland GmbH. Die Temperaturbeständigkeit war bis 1000 °C zugesichert. Die Wärmeleitfähigkeit war mit 0,1 W/m²K bei 20 °C ausgewiesen. Die Maße des freien Innenraumes im Brandraum wurden entsprechend der Skalierung (1/2 [ISO 9705]) festgelegt. Um bei dieser Reduzierung der Brandraumgröße die Ähnlichkeit der Verhältnisse im Brandraum bezüglich des Originalobjektes zu wahren, sind die Kriterien Verweilzeit und Ventilation auf der Basis der Froude-Zahl zu skalieren. Für die Türöffnung ergeben sich daraus die o. a. Maße. Eine Herleitung dieser Skalierung ist bei [MCKAY 2002] gegeben.

ISO 9705 (Full Scale)

Raum: 3,6 x 2,4 x 2,4 m
Tür: 0,8 x 2,0 m



1/2 ISO 9705 (Half Scale)

Raum: 1,8 x 1,2 x 1,2 m
Tür: 0,33 x 0,83 m

Als Brandmedium wurde Propangas gewählt. Ein runder Brenner wurde auf dem Boden im Zentrum des Brandraumes installiert. Die Maße sind aus der Skizze in Abbildung 38 ersichtlich. Alle Elemente des Brenners wurden aus Edelstahl gefertigt. Abweichend von der in den vorgenannten Arbeiten gewählten Höhe des Brenners erhielt der hier verwendete Brenner eine Wandhöhe von 0,3 m. Das war der Tatsache geschuldet, dass zur Reduzierung des Einströmimpulses des Gases in den Brennertopf eine Ableitung des eintretenden Gasstromes gegen den Boden des Brenners erfolgte. Hierfür erhielt das Zuleitungsrohr einen Aufsatz mit zwei gebogenen Rohrenden. Darüber wurde eine Lochplatte eingelegt, auf welcher eine Gesteinsschüttung eingebracht wurde, um eine gute Verteilung des austretenden Gases über der Brandfläche zu erreichen.

Die Versorgung mit Propangas erfolgte aus der Gasphase eines erdgedeckten 16 m³ Tanks über eine unterirdisch verlegte Gasleitung bis zu einer Verteilerstation vor der Versuchshalle. Von dort führte ein flexibler Gasschlauch bis zum Anschluss der Versorgungssteuerung des Brandraumes. In der Leitung zwischen Hauptventil und Steuerungskasten war der Impulszähler für den Gasfluss installiert. In der Steuerung der Gaszufuhr wurden die Funktionen Zünd- und Hauptbrenner mit verschiedenen Steuer- und Sicherheitselemente verbunden. Der Zündbrenner wurde von hier aus per Knopfdruck über Magnetventile mit Propan und Luft versorgt. Die Vermischung erfolgte im Zuleitungsrohr, so dass an der Austrittsöffnung ein zündfähigen Gas / Luft – Gemisch vorhanden war. Die Zündung erfolgte piezoelektrisch. Nach Ausbildung einer stabilen Zündflamme, die Kontrolle erfolgte mittels

Ionisationsüberwachung, wurde das Magnetventil für die Gaszufuhr des Hauptbrenners freigegeben und konnte per Schalter aktiviert werden. Auf diese Weise war sichergestellt, dass bei Verlöschen des Hauptbrenners auf Grund schlechter Ventilationsbedingungen dessen Gaszufuhr automatisch geschlossen wurde. Als weitere Sicherheitseinrichtung wurde ein Gaswarnsystem aufgebaut, dessen Sensoren bei unbeabsichtigtem Gasaustritt an der Verteilerstation und im Bereich der Brandrauminstallation Alarm auslösen und die Gaszufuhr beenden. Die Installationen der Propangasversorgung und der Gaswarnanlage wurden durch den TÜV abgenommen. Die beiden Bestandteile der Versuchseinrichtung Brandraum und Flur sind in Abbildung 39 zu sehen.

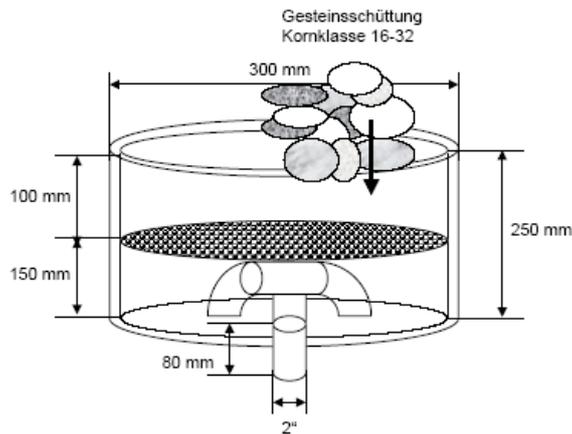


Abb. 38: Skizze und Bild des Propangasbrenners



Abb. 39: Brandraum und Flur der Versuchseinrichtung

3.2 eingesetzte Sensorik

Für die bisher ausgeführten Versuche wurde der Brandraum in zwei Ebenen mit Sensoren für die Messung von Differenzdrücken und Temperaturen ausgestattet. Die Messstellen der Differenzdrücke sind mit „D“ gekennzeichnet, die Temperaturmessstellen tragen die Bezeichnung „T“. Eine Messebene für Differenzdrücke und Temperaturen befand sich senkrecht über dem Brenner in der Mitte des Brandraumes. Die zweite Messebene für Differenzdrücke und Temperaturen wurde in der Türöffnung installiert. In dieser Messebene befanden sich auch die Messstellen für die aus dem Brandraum austretenden Gaskonzentrationen. Im hinteren Teil unter der Decke des Brandraumes wurde zusätzlich eine Gasprobensonde für Messungen der Gaskonzentrationen über den Raumquerschnitt eingebaut. Für die Markierung der Stellen zur Gasbeprobung wurde „G“ verwendet. In Abbildung 40 ist eine Übersicht zur Anordnung der Messstellen im Versuchsaufbau gegeben.

Draufsicht

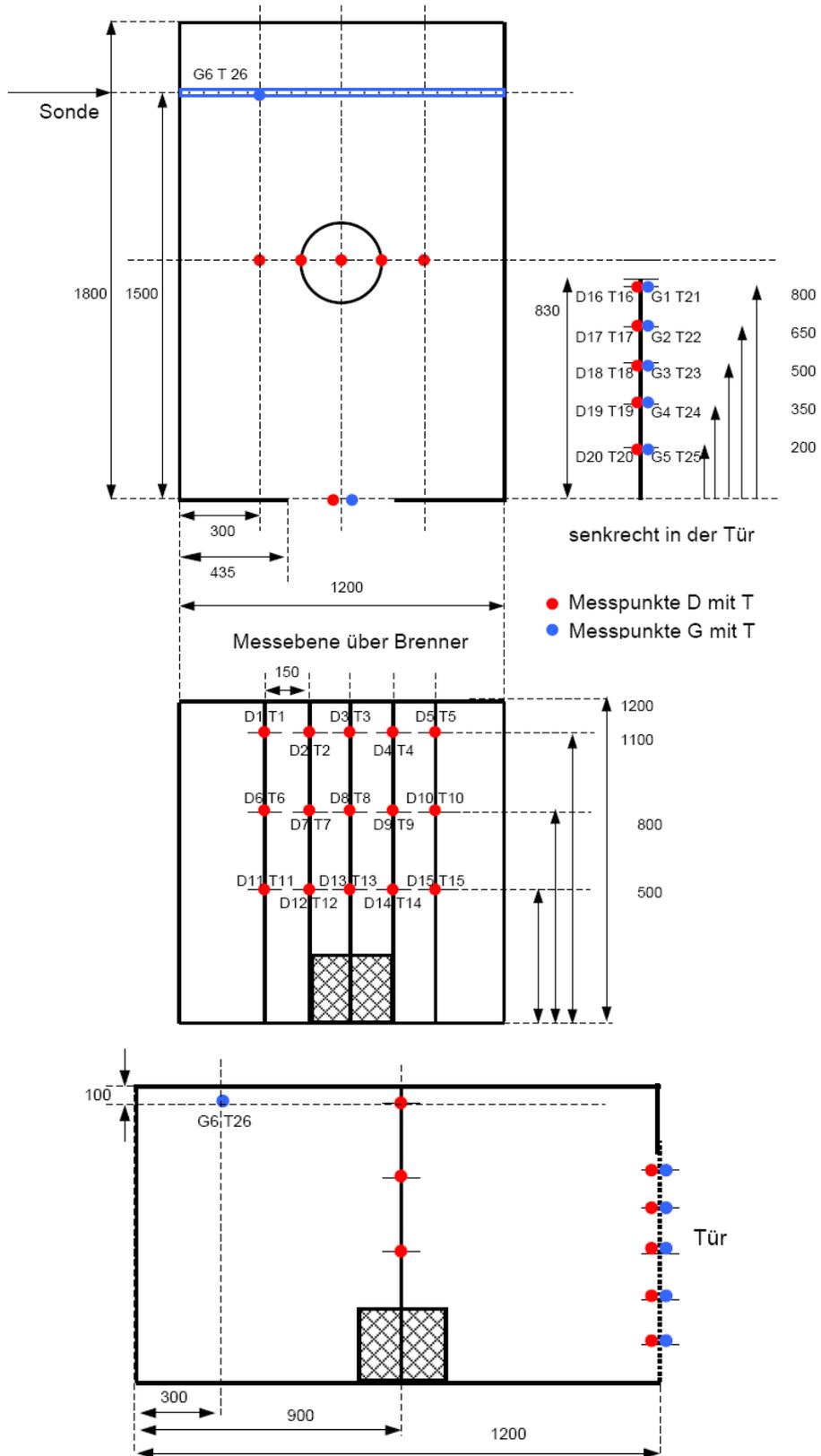


Abb. 40: Skizze der Messanordnung mit den Positionen der bidirektionalen Sonden, Thermoelemente und Gasprobenahmestellen

3.2.1 Differenzdruckmessung

Um Aussagen über den Austrag an Rauchgas, und hier speziell Kohlenmonoxid, aus dem Brandraum treffen zu können, wurden senkrecht über die Mitte der Türöffnung fünf bidirektionale Sonden installiert (Bild 3.3). Diese sind gemäß der Entwicklung von [MCCAFFREY, HESKESTAD 1976] gefertigt (Material Edelstahl) und arbeiten nach dem Differenzdruckprinzip, wie aus Abbildung 41 ersichtlich ist. Die Orientierung der Sondenköpfe erfolgte auf die zu erwartende Strömungsrichtung und damit in waagerechter Ausrichtung (Abbildung 42).

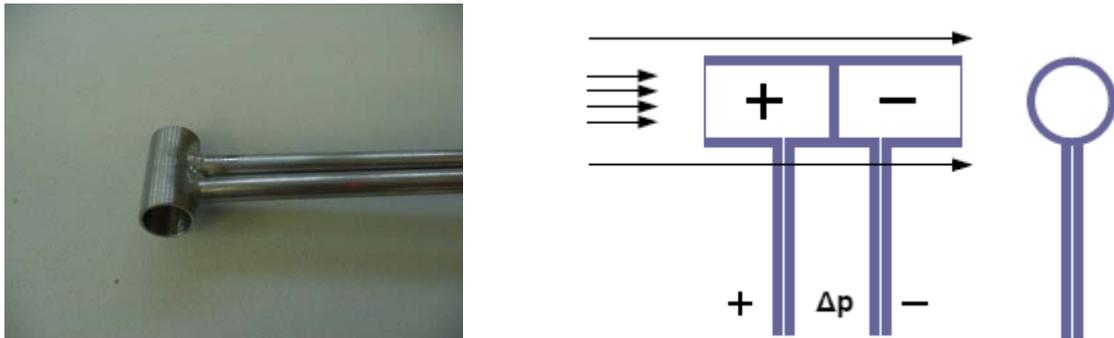


Abb. 41: Bidirektionale Strömungssonde und Prinzipskizze

Zur Erlangung von Daten für die Modellierung der Strömung im Brandraum wurden gemäß Abbildung 40 in der Mitte über dem Brenner 15 weitere bidirektionale Sonden in einem Messraster angeordnet. Hier wurden die Sondenköpfe in senkrechter Ausrichtung eingebaut (Abbildung 43).



Abb. 42: Messebene in der Türöffnung

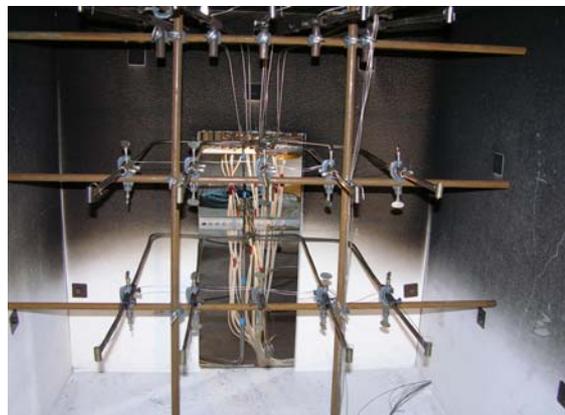


Abb. 43: Messebene im Brandraum

3.2.2 Messung des Volumenstroms des Brandmediums

Als Brandmedium wurde Propangas eingesetzt, welches aus der Gasphase eines 16 m³ fassenden erdgedeckten Tanks entnommen wurde. Auf Grund der Größe des Reservoirs war ein kontinuierlicher Gasstrom gewährleistet. Die Menge der Gaszufuhr wurde mittels Stellrad am Ventil vorgegeben. Die Erfassung des Gasverbrauches erfolgte mit einem Impulszähler, der in der zuführenden Gasleitung installiert war. Vor Beginn und nach Ende eines jeden Versuches wurde der Gasverbrauch abgelesen und über die Versuchszeit gemittelt.

3.2.3 Messung der Konzentrationen der Gase CO, CO₂, O₂ und HC

Zur Beprobung des Rauchgases wurden verschiedene Sonden angefertigt. Als Material kam ausschließlich hitzebeständiger Edelstahl (Material 1.4841) zum Einsatz, da in mehreren Arbeiten über mögliche katalytische Effekte hinsichtlich Folgereaktionen des beim Brand gebildeten CO am Sondenmaterial bei Verwendung von Kupfer berichtet wurde [MOREHARD ET AL. 1990], [RASBASH, STARK 1966], [GROSS, ROBERTSON 1963], [GROSS, ROBERTSON 1965]. Die Sonden wurden nicht gekühlt. Untersuchungen von [BRYNER ET AL. 1994/1] mit gekühlten und ungekühlten Edelstahlsonden belegten, dass in ungekühlten Sonden das Ausmaß zusätzlich ablaufender Reaktionen im Gas nicht signifikant ist. Für Messungen über den Querschnitt des Brandraumes wurden fünf Sonden (Wandstärke 2 mm) mit jeweils 56 Bohrungen (28 Bohrungen mit $d = 3$ mm, 28 Bohrungen mit $d = 2$ mm) in Anlehnung an die [ISO 9705] gefertigt (Abbildung 44), obwohl gemäß der Erkenntnisse aus dem SAFIR-Projekt [HAKKARAINEN 1999] eine Mindestgröße von 3 mm für die Bohrungen zu bevorzugen wäre. Für punktuelle Messungen wurden zwei Sondenbündel A und B mit jeweils fünf verschiedenen langen Rohren (Wandstärke 1 mm) gemäß Abbildung 45 hergestellt.

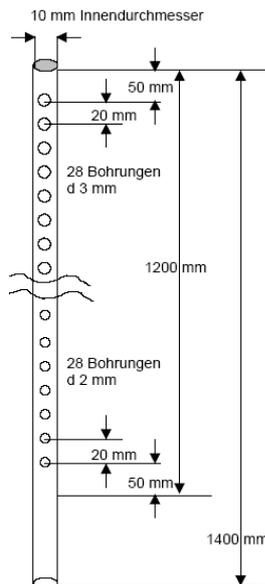
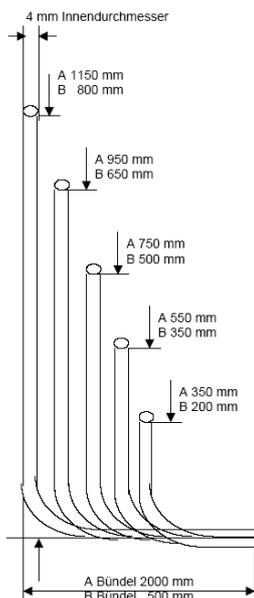


Abb. 44: Skizze und Bild der Gassonde für Messungen über den Raumquerschnitt



Anordnung der Rohre

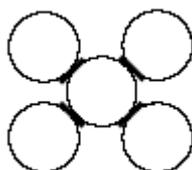


Abb. 45: Skizze und Bilder der Gassondenbündel

Für die Messung der Gaskonzentrationen wurde ein System, bestehend aus fünf Analysatoren des Typs BE 150 der Firma HORIBA jeweils verbunden mit tragbaren Gasaufbereitungen (Gaskühler) vom Typ CSS-M der Firma M&C Products, aufgebaut (rechts in Abbildung 46). Diese ermöglichen eine gleichzeitige Messung der Gase CO, CO₂ und HC (als Propan- oder Hexan-Äquivalent) unter Nutzung der nicht dispersiven Infrarotabsorption an fünf voneinander unabhängigen Messorten. Die zusätzliche Ausstattung der Analysatoren mit galvanischen Messzellen ermöglicht die Messung von O₂. Die Analysatoren sind für die in Tabelle 18 angegebenen Messbereiche ausgelegt [HORIBA 2004]:

Tabelle 18: Messbereiche, Auflösung und Anzeigegenauigkeit der Gasanalysatoren

Gasart	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
CO	0 – 15 Vol%	0,01 Vol%	0 – 10 Vol% ± 0,02 Vol%
CO ₂	0 – 20 Vol%	0,01 Vol%	0 – 16 Vol% ± 0,3 Vol% 16 – 18 Vol% ± 5 % der Anzeige
O ₂	0 – 25 Vol%	0,02 Vol%	keine Angaben
HC	0 – 10.000 ppm	1 ppm	0 – 2000 ppm ± 4 ppm 2000 – 5000 ppm ± 5 % der Anzeige

Zur Kalibrierung der CO- und CO₂-Analysatoren wurde ein Prüfgasgemisch mit 7,09 Vol% CO und 12,1 Vol% CO₂ in Stickstoff verwendet. Die Kalibrierung für HC erfolgte mit Propan-Prüfgas (1 Vol% in Stickstoff). Die Überprüfung der Genauigkeit der CO-Analysatoren im unteren Konzentrationsbereich wurde mit einem Prüfgasgemisch von 800 ppm CO in Stickstoff durchgeführt. Die angezeigten Werte lagen im angegebenen Genauigkeitsbereich.

Die Verbindung der Probenahmesonden mit dem Gasanalysestystem erfolgte mit PTFE-Schlauch (Außendurchmesser 6 mm, Innendurchmesser 4 mm). Die Analysatoren können mit einem Messgasfluss von 1 – 3 l/min betrieben werden. Bei den bereits ausgeführten Versuchen wurde ein Fluss von 1 l/min verwendet. Auf eine Beheizung der Schläuche wurde verzichtet. Die Messungen sind zur Vermeidung von Kondensatabscheidung in den Analysatoren nur im trockenen Gas erlaubt. Kondensierbare Bestandteile werden vor Zuführung des Gases in die Analysatoren in den Gasaufbereitungsgeräten entfernt. Deren Arbeitstemperatur beträgt 5 °C. Die teilweise bereits in den zuführenden Schläuchen auftretende Kondensation wurde in Kauf genommen, da eine Absorption der zu bestimmenden Gase im Kondensat aufgrund früherer Untersuchungen als vernachlässigbar eingeschätzt werden konnte [PLEß, SELIGER 1993]. Die Probegasströme durchliefen mehrere Filterstufen. Die Abscheidung grober Partikel erfolgte in Edelstahl-Leitungsfiltern, ausgestattet mit Filterkerzen aus Metallvlies mit einer Porenweite von 3 µm der Firma Seebach® GmbH. Im weiteren Gasweg folgten jeweils ein Inline-Filter mit 0,2 µm PTFE-Membran von Nalgene® Labware sowie ein Feinstfilter (Frontplattenfilter mit 0,3 µm Glasfasermicrofilter der Munktell & Filtrak GmbH), mit dem die Gasaufbereitungsgeräte standardmäßig ausgestattet sind. Die letzte Filtration erfolgte direkt in den Gasanalysatoren, wo sich jeweils ein weiterer Inline-Filter (Nylongehäuse mit Glasfaserfilterhülse 0,1 µm der Firma Contec® GmbH) im Gasweg befindet.

Ein weiteres Gasanalysestystem der Firma Fisher-Rosemount GmbH & Co. (links in Abbildung 46), ebenfalls ausgestattet mit Gaskühler, NDIR-Analysatoren sowie einem paramagnetischen Sauerstoffanalysator erlaubte die Installation eines weiteren Messortes. Hier erfolgte die Zuführung des Probegasstromes über Edelstahlsonde, beheizbares Edelstahlfilter (Metallvliesfilterkerze, Porenweite 2 – 5 µm) und beheizbaren PTFE-Schlauch. In der Gasaufbereitung (Arbeitstemperatur 5 °C) erfolgt eine weitere Filtration mittels PTFE-Filterhülse, Porenweite 2 µm. Auf dem Weg in die Analysatoren durchläuft der Probegasstrom dann noch ein PTFE-Inline-Filter mit der Porenweite 0,2 µm. Auch hier muss,

bedingt durch das Messprinzip, die Messung der Gaskonzentrationen im trockenen Gas erfolgen. Der Messgasfluss kann im Bereich von 0,2 – 1,5 l/min für NDIR-Analysator bzw. 0,2 – 1,0 l/min für O₂-Analysator gewählt werden. Benutzt wurde der vom Hersteller empfohlene Fluss von 1 l/min. Mit diesem System sind Messungen in den folgenden Bereichen möglich:

CO	0 – 1.000 ppm *
CO	0 – 8 % *
CO ₂	0 – 15 % *
CO ₂	0 – 100 % *
O ₂	0 - 21 % *
HC	0 – 2 % * (Äquivalent Methan, kalibriert mit Propan, deshalb Genauigkeit ≤ 3 %)

* Auflösung ≤ 1 %, Genauigkeit ≤ 2 %, jeweils Messbereichsendwert



Abb. 46: Ansicht der Messtechnik mit den Gasanalysesystemen

3.2.4 Temperaturmessung

Jeder Messpunkt für Druckdifferenz und Gaskonzentration wurde mit einem Mantelthermoelement des Typs K (NiCr/Ni) mit indirekter Messstelle (Abbildung 47) ausgestattet. Es wurden Produkte verschiedener Hersteller verwendet. Für die Thermolemente gelten folgende technische Daten:

Manteldurchmesser	1 mm
Mantellänge	5 und 10 m
Genauigkeitsklasse	II nach DIN/ICE 584
Messbereich	233 – 1573 K
Abweichung	± max (0,0075 T ; 2,5 K (T gemessene Temperatur in K)
t ₉₀ -Zeit	ca. 0,2 s



Abb.47 : eingesetzte Thermolemente

3.2.5 Messwerterfassung, Videoaufzeichnung

Für die Online-Messungen und sofortige Datenübertragung mittels Interface-Kabel über eine RS232-Schnittstelle in den PC wurde ein System der Firma Ahlborn GmbH benutzt, welches aus den Messwerterfassungsmodulen ALMEMO® 89906 durch Vernetzung aufgebaut wurde. Jedes Modul hat 9 galvanisch getrennte Messeingänge. Über programmierbare ALMEMO®-Stecker konnten alle Sensoren für die Messungen der Temperaturen und Druckdifferenzen sowie mittels Übergabebaustein auch die Fisher-Rosemount-Gasanalytoren in das System integriert werden, da sie analoge Ausgangssignale liefern. Alle aktivierten Messstellen werden ständig mit der Messrate 2,5 M/s abgefragt. Als Ausgabezyklus wurden 2 s eingestellt. Der Messwert ist somit der Mittelwert aus der Messrate über den Zyklus. Die Programmierung der Stecker und die Konfiguration der Module wurde mit der zugehörigen Software AMR-Control durchgeführt. Die Messdatenaufnahme und -weiterverarbeitung erfolgte mit der WINDOWS®-Software WIN-Control, welches mit einer Exportfunktion die Übernahme der Daten in Microsoft-Excel ermöglichte.

Die Analytoren des HORIBA-Systems geben keine analogen Signale aus, deshalb konnten sie nicht in das Messwerterfassungssystem integriert werden. Sie wurden mit der dafür entwickelten Software SMA 370 PC über einen separaten PC betrieben. Die Messwerte werden ohne Mittelung als Einzelwerte ausgegeben. Es wurde eine Abtastrate von 1 s gewählt. Mittels der Exportfunktion konnten die Messdaten in Microsoft-Excel übernommen werden.

Je ein Versuch mit der weiten und der schmalen Türöffnung wurden mit einer Endoskop-Spezialkamera aufgezeichnet (Abbildung 48). Diese Kamera ist eine gemeinsame Entwicklung des Institutes der Feuerwehr mit der DEM digital-elektronik magdeburg GmbH. Sie besteht aus einer Miniatur-Farb-CCD-Kamera, welche von einem wassergekühlten Schutzrohr umgeben ist. Ein Temperaturfühler gibt ein Alarmsignal, wenn die Temperatur der Kamera 60 °C überschreitet. Untersuchungen zeigten, dass die Kamera in Flammen und bei Umgebungstemperaturen von weit über 1000 °C einsetzbar ist [WIENECKE 1999], [KOHL ET AL. 2003]. Die in der Front liegende Optik wird durch Einblasen eines leichten Luftstromes von Ablagerungen durch Brandgase freigehalten. Mittels BNC-Kabel erfolgt die Signalübertragung zum Recorder und Monitor.



Abb. 48: Endoskop-Spezialkamera

3.3 Versuchsdurchführung

Jeder Versuch wurde bezüglich der Temperatur bei Umgebungsbedingungen bzw. bei höchstens 60 °C Innentemperatur der Kammer (herrührend vom vorhergehenden Versuch) begonnen. Die Differenzdruckaufnehmer wurden vor jedem Versuch auf Null zurückgesetzt. Die Gasanalytoren erhielten pro Versuchstag eine Kalibrierung.

Vor Beginn jedes Versuches wurde die Messwertaufzeichnung gestartet. Als Versuchsbeginn galt die Aktivierung des Zündbrenners, der bei stabilem Brand den Start des Hauptbrenners ermöglichte. Das dauerte in der Regel etwa 20 s. Generell war eine Versuchsdauer von 30 Minuten vorgesehen und erfolgte bei der Mehrzahl der Versuche. Lediglich bei automatischem Schließen der Gaszufuhr wegen Verlöschens des Hauptbrenners auf Grund der Ventilationsverhältnisse oder manueller Abschaltung der Gaszufuhr wegen des Auftretens hoher Konzentrationen an unverbranntem Propan resultierten kürzere Brandzeiten.

Es wurden 20 auswertbare Versuche mit Wärmefreisetzungsraten von 23 bis 79 kW durchgeführt. Dabei variierte die Türweite. Es gab die Einstellungen weit (0,33 m), schmal (0,165 m) und Schlitz (0,1 m). Zusätzlich wurde der Einfluss des Zündbrenners bei der schmalen Türweite untersucht.

3.4 Versuchsergebnisse

Für die Verarbeitung der Messwerte wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Messgeräte arbeiten ohne Trägheit und Anzeigefehler.
- Die Gase verhalten sich wie ideale Gase.
- Der mit der Luft eintretende Stickstoff nimmt nicht an der Verbrennung teil.

Die zeitliche Synchronisation der aufgezeichneten Messdaten erfolgte mit Hilfe des Temperaturanstiegs und des Auftretens von Kohlenmonoxid im untersuchten Gas an den Messstellen im hinteren Teil des Brandraumes und an der Oberkante der Türöffnung.

3.4.1 Brandlast

Als Brandlast galt die in dem Brandraum während der Versuchszeit verbrannte Menge an Propangas. Die Voreinstellung eines definierten Gasflusses war mit der ursprünglich eingebauten Armatur nicht möglich. Die Einstellung des Handrades am Ventil ließ nur eine grobe Orientierung zu. So konnte nur nach Versuchsende die verbrauchte Gasmenge abgelesen werden. Für weitere Arbeiten mit der Versuchsanlage erfolgt ein Umbau. Die Tabelle 19 gibt eine Übersicht der Brandlasten und Versuchsparameter. Die Angabe der Energiefreisetzungsrate wurde aus Gasfluss und Heizwert (Propan 93 MJ/m³) berechnet und ist als orientierende Größe zu verstehen. Bei Versuch Nr. 1 wurde die Wirkung des Zündbrenners untersucht.

Tabelle 19: Übersicht zu Brandlasten und Versuchsparameter

Versuch Nr.	Türweite m	Versuchsdauer s	Brandlast Propan m ³ (bei 3,5 bar)	Energiefreisetzungsrate kW
1	0,165	1890	0,004	0,7
2	0,33	1800	0,450	80
3	0,165	1740	0,433	79
4	0,095	1460	0,367	80
5	0,095	1440	0,367	81
6	0,165	1800	0,450	80
7	0,165	1740	0,450	83
8	0,33	2100	0,539	82
9	0,1	1540	0,394	81
10	0,1	1260	0,327	83
11	0,165	1800	0,463	82
12	0,33	1740	0,450	83
13	0,33	240	0,207	275
14	0,33	900	0,338	120
15	0,33	1695	0,600	113
16	0,33	1890	0,645	109
17	0,165	915	0,328	114
18	0,165	1170	0,412	112
19	0,105	740	0,278	120
20	0,105	540	0,218	129
21	0,33	1020	0,492	154

3.4.2 Temperaturen

Die Temperaturmessungen waren in erster Linie für die Weiterverarbeitung der Messdaten aus den Druckdifferenzmessungen und der Gasanalyse erforderlich. Ein Teil der Temperaturdaten wurde für Modellierungsaufgaben verwendet. Bei diesen Versuchen wurden Temperaturmessungen im hinteren Teil unter der Decke des Brandraumes, neben und über dem Brenner sowie in der Türöffnung vorgenommen (Abbildung 40). Die zeitliche Entwicklung der Temperatur im hinteren Raumteil 0,1 m unter der Decke sowie 0,5 m über dem Boden neben dem Brenner (Auszug der ersten 5 min) ist für vier verschiedenen starke Energiefreisetzungsraten bei der weitesten Türöffnung in Abbildung 49 dargestellt. Die Temperaturen an den Messstellen in der Raummitte oberhalb des Brenners liegen je nach Stärke der Energiefreisetzung 100 – 300 °C höher. Zum Vergleich dazu wird die zeitliche Entwicklung der Temperaturen an zwei Messstellen im Raum für die Versuche mit einer Energiefreisetzung von 83 kW und 110 kW bei drei verschiedenen weiten Türöffnungen in den Abbildungen 50 bzw. 51 gezeigt. Auch hier werden zur besseren Ansicht der Startphase die ersten 5 min in Ausschnitten wiedergegeben. Die höheren Temperaturen werden bei allen Türweiten an der Decke erreicht, wobei über die Versuchszeit eine Abnahme des Temperaturunterschiedes beider Messstellen deutlich wird. Der Einfluss der Türweite ist erkennbar: Die Temperaturen bei weiter Türöffnung sind am niedrigsten. Die höchsten Temperaturen erbringt die halb offene Tür. Bei den Versuchen mit Türschlitz liegen die Temperaturen dazwischen. Das ist sicherlich der Tatsache geschuldet, dass bei dieser Ventilation die Verbrennung nicht mehr vollständig abläuft und somit die Energiefreisetzung etwas niedriger ausfällt. Eines ist bei allen Versuchen gleich: Innerhalb der ersten Minute

treten Temperaturen auf, die in kurzer Zeit das Erreichen der thermischen Schädigungsschwelle bei Menschen hervorrufen können. [MORITZ, HENRIQUES 1947] geben z. B. für 160°C das Erreichen der Schädigungsschwelle nach 1,5 Minuten an. Bereits beim Brand des Zündbrenners (0,7 kW) übersteigt die Temperatur in weniger als 1 Minute unter der Raumdecke 100 °C und erreicht nach etwa 6 Minuten 150°C (Abbildung 52), wodurch laut [MORITZ, HENRIQUES 1947] nach einer Zeit von 2 Minuten die Schädigung des Atmungstraktes erfolgt. Lediglich im Bodenbereich würde demnach, ohne die aus der Oberschicht einwirkende Wärmestrahlung zu berücksichtigen, bei der dort gemessenen Temperatur bis zum Erreichen der Schädigungsschwelle eine Zeit von 15-17 Minuten vergehen. Die Abschätzung des zeitlichen Aspektes der thermischen Belastung und somit Überlebenschancen von im Brandraum befindlichen Personen aus diesen Messungen ist insofern nicht möglich, weil durch Freisetzen einer gleichbleibend starken Energie von Versuchsbeginn an die Situation einer Brandentwicklungsphase nicht widerspiegelt wird. Das Aufheizen des Brandraumes geschah somit unter Bedingungen, die mit realen Bränden nicht vergleichbar sind. Außerdem wurde nicht in der gesamten Raumgeometrie gemessen.

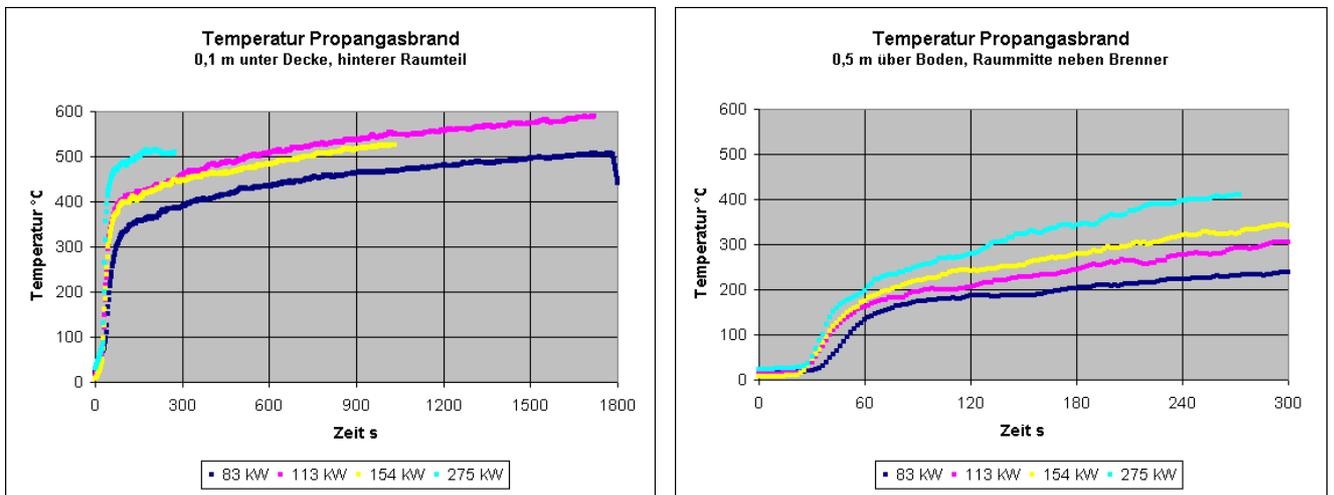


Abb. 49: zeitliche Entwicklung der Temperaturen im Brandraum bei Propangasbränden mit Energiefreisetzungsraten von 83 kW, 113 kW, 154 kW und 275 kW bei weiter Türöffnung, rechts: Messstelle unter der Decke im hinteren Raumteil, gesamte Versuchszeit, links: Messstelle über dem Boden neben dem Brenner, Auszug der ersten 5 min

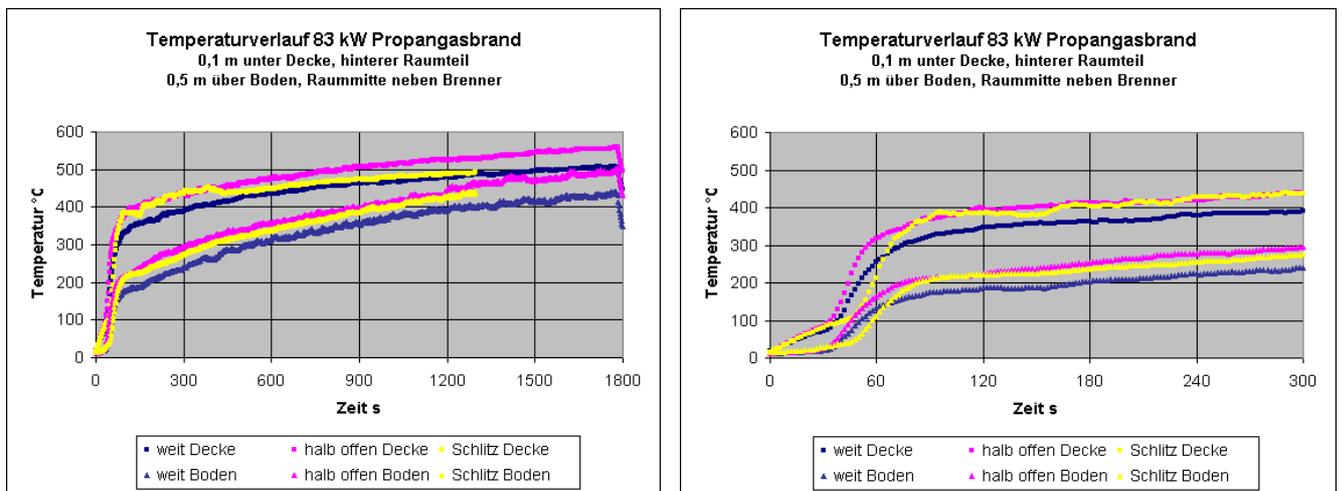


Abb. 50: zeitliche Entwicklung der Temperaturen im Brandraum bei einem Propangasbrand mit einer Energiefreisetzungsrate von 83 kW bei unterschiedlich weiten Türöffnungen (Quadrat: Messstelle 0,1 m unter der Decke hinterer Raumteil, Dreieck: Messstelle 0,5 m über dem Boden neben Brenner), rechts: gesamte Versuchszeit, links: Auszug der ersten 5 min

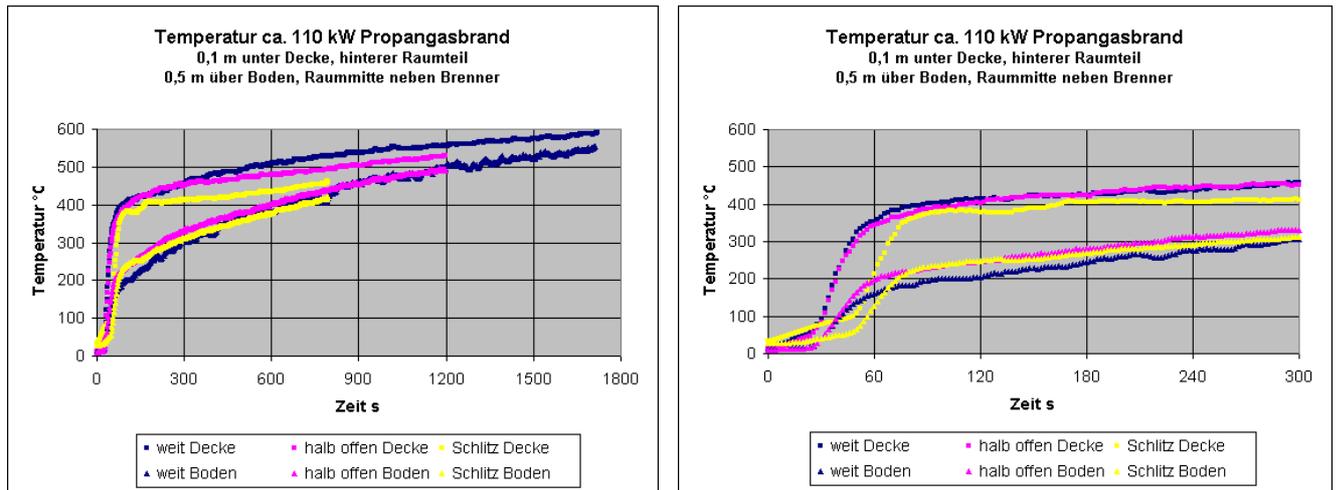


Abb. 51: zeitliche Entwicklung der Temperaturen im Brandraum bei einem Propangasbrand mit unterschiedlicher Türöffnung und Energiefreisetzungsraten von 113 kW (weit), 112 kW (halb offen), 120 kW (Schlitz), (Quadrat: Messstelle 0,1 m unter der Decke hinterer Raumteil, Dreieck: Messstelle 0,5 m über dem Boden neben Brenner), rechts: gesamte Versuchszeit, links: Auszug der ersten 5 min

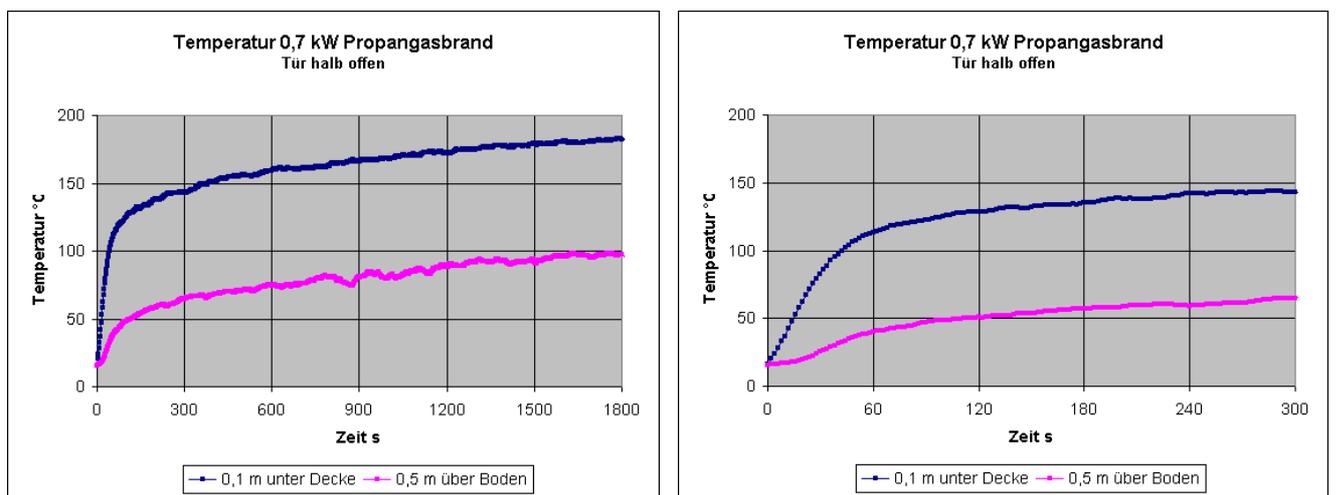


Abb. 52: zeitliche Entwicklung der Temperatur im Brandraum bei einem Propangasbrand mit einer Energiefreisetzungsrate von 0,7 kW bei einer Türbreite von 0,165 m, links: gesamte Versuchszeit, rechts: Auszug der ersten 5 min

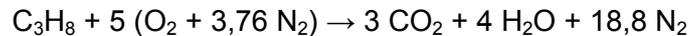
3.4.3 Gaskonzentrationen

Weil vor Messung der Gaskonzentrationen zum Schutz der Analysatoren kondensierbare Bestandteile aus den Gasprobeströmen entfernt wurden, beziehen sich die Messwerte auf trockenes Gas (dry) und weisen demzufolge höhere Konzentrationen auf, als am Messort tatsächlich vorgelegen haben. Die Umrechnung auf reale Verhältnisse (nass, wet) kann deshalb nach Gleichung 13 erfolgen [WIECZOREK 2003].

$$X_{i,wet} = (1 - X_{H_2O})X_{i,dry} \quad (13)$$

[GOTTUK, LATTIMER 2002] schätzten ein, dass zuverlässige Messungen der Wasserdampfkonzentrationen schwer zu erhalten sind. Sie fanden in Abhängigkeit von den Bedingungen Schwankungen der Wasserdampfanteile von 10-20 %. Um Auskunft über die

Anteile des entfernten Wassers geben zu können bzw. die gemessenen Konzentrationen auf „nasses“ Gas umrechnen zu können, ist es durchaus üblich, die Annahme zu treffen, dass das Mol-Verhältnis c von H_2O zu CO_2 bei jedem Äquivalenzverhältnis das gleiche ist wie bei stöchiometrischen Bedingungen [GOTTUK 1992], [EWENS 1994], [LATTIMER 1996/1], [MCKAY 2002]. Bei der stöchiometrischen Verbrennung von Propan, die nach der Reaktionsgleichung



abläuft, ergibt sich das Mol-Verhältnis c von H_2O zu CO_2 gemäß Gleichung 14.

$$c = \frac{X_{H_2O}}{X_{CO_2}} = \frac{4}{3} \quad (14)$$

Demzufolge kann die Umrechnung der Messwerte nach Gleichung 15 erfolgen.

$$X_{i,wet} = \frac{X_{i,dry}}{1 + c (X_{CO_2,dry})} \quad (15)$$

Weniger zuverlässig wird diese Methode erst für Bedingungen in sehr brennstoffreicher Umgebung mit GER größer als 3,0 [LATTIMER 1996/1]. Geringe Konzentrationen an CO sind laut [WIECZOREK 2003] vernachlässigbar, für höhere schlägt [FLOYD 2003] das Einbeziehen in die Umrechnung mit Gleichung 16 vor. Hierfür wurde die Annahme getroffen, dass der gesamte Wasserstoff aus dem Brennstoff entweder in den unverbrannten Kohlenwasserstoffen oder im Wasserdampf gebunden ist.

$$X_{i,wet} = \frac{X_{i,dry}}{1 + c (X_{CO,dry} + X_{CO_2,dry})} \quad (16)$$

Bei der Auswertung der Versuche wurden die Messwerte generell auf wet-Bedingungen umgerechnet. Zusätzlich erfolgte eine Korrektur der zeitlichen Zuordnung der Messwerte um die Durchflusszeit der Probesonden und Schlauchleitungen.

Die an der Messstelle im hinteren Teil des Brandraumes 0,1 m unter der Decke gemessenen Gaskonzentrationen sind in den Abbildungen 53-60 zu sehen. Es wurden jeweils die Ergebnisse von unterschiedlichen Energiefreisetzungsraten bei einer Türweite zusammengefasst und für eine Gasart dargestellt. Die Wiedergabe der Messwerte beschränkt sich auf den Teil, der bis zum Abschalten bzw. Verlöschen des Hauptbrenners aufgezeichnet wurde.

Die Entwicklung der Gaszusammensetzung über die Versuchszeit bei weiter Türöffnung wurde stark von der Energiefreisetzungsrate bestimmt. Mit Start des Zündbrenners begann sich eine Rauchgasschicht unter der Decke auszubilden, deren Zusammensetzung sich mit Start des Hauptbrenners innerhalb von ca. 30 s deutlich veränderte. Die zeitliche Abweichung beim zweiten Versuch mit 83 kW Energiefreisetzungsrate (Farbe margenda in der Grafik) wurde durch einen verzögerten Start des Hauptbrenners hervorgerufen. Je höher die Energiefreisetzungsrate war, desto tiefer sank die Sauerstoffkonzentration ab. Das Absinken selber erfolgte in Korrelation dazu in einem jeweils kürzeren Zeitabschnitt. Entsprechend entwickelten sich die Konzentrationen der Kohlenstoffoxide sowie der Kohlenwasserstoffe. Zur Konzentration der letztgenannten ist anzumerken, dass bei dem Versuch mit 275 kW HRR schnell die Messbereichsgrenze des Analysators erreicht war und höhere Konzentrationen kein für die Messwertaufzeichnung verwertbares Signal erzeugten. Gut erkennbar ist die Zunahme des Kohlenmonoxidgehaltes im Rauchgas zu Lasten des Kohlendioxids bei höheren Energiefreisetzungsraten (154 kW, 275 kW). Hier war die Stärke

der Rauchgasschicht durch die höhere Rauchgasproduktionsrate so schnell angewachsen, dass die Verbrennung in dieser mit Sauerstoff bereits unterversorgten Schicht erfolgte. So kam es auch nach kurzer Zeit zum Flammenauschlag durch die Türöffnung. Zu diesem Zeitpunkt wurde dann der Versuch beendet. In Abbildung 54 sind CO-Konzentrationsprofile in der Türöffnung von zwei Versuchen (113 kW und 275 kW) dargestellt

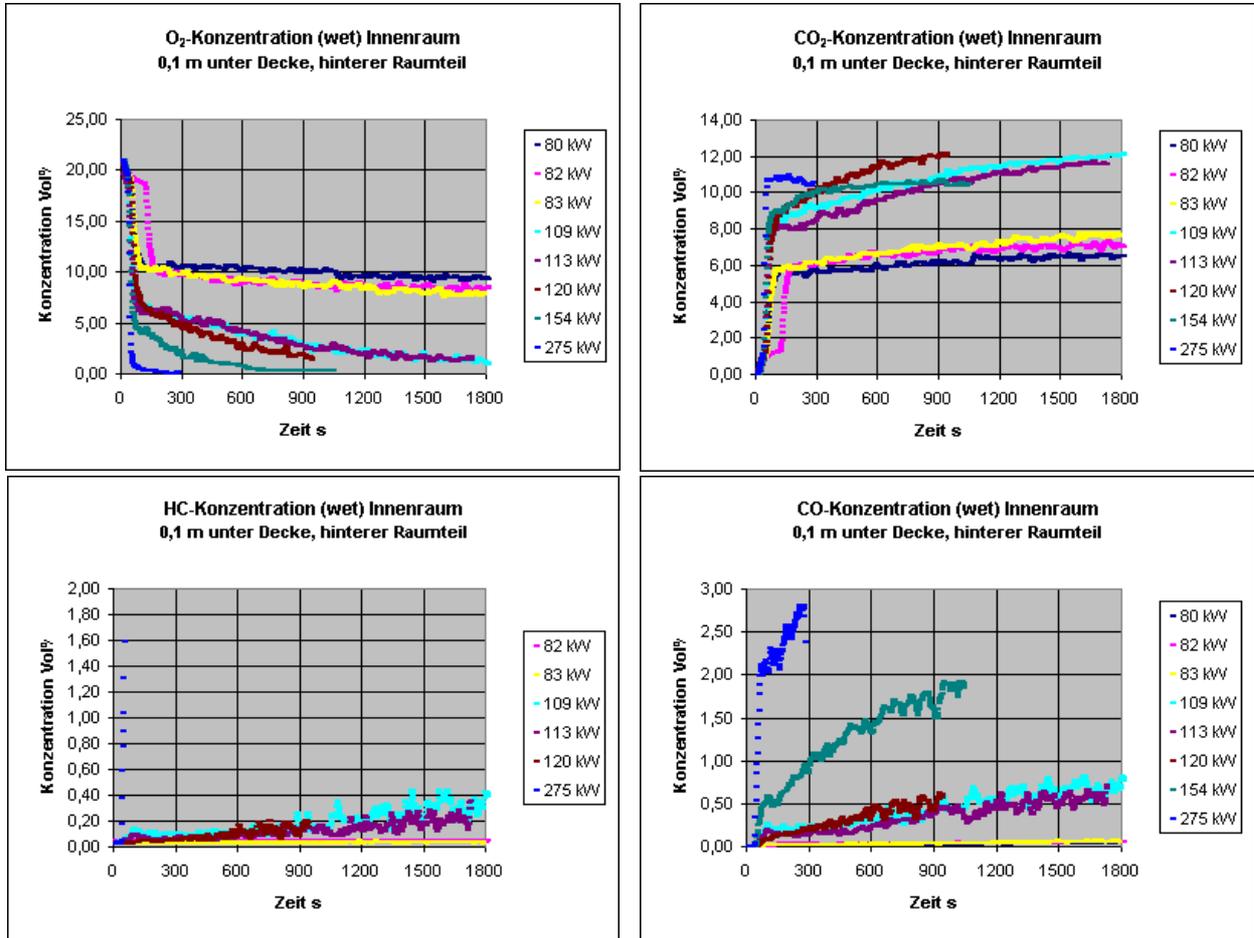


Abb. 53: Gaskonzentrationen im hinteren Teil des Brandraumes 0,1 m unter der Decke bei weiter Türöffnung (0,33 m) und unterschiedlichen Energiefreisetzungsraten

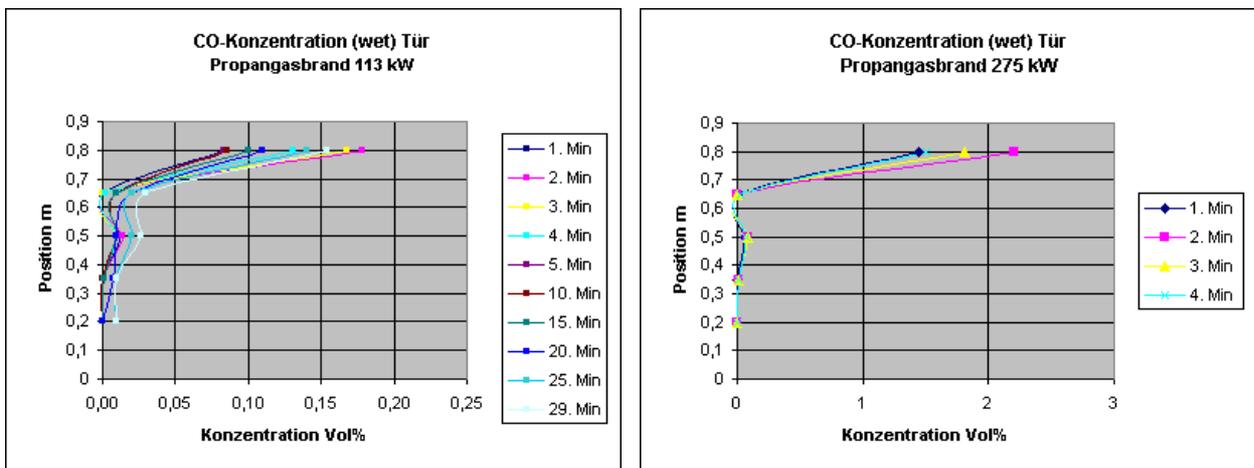


Abb. 54: CO-Konzentrationen in der weiten Türöffnung (Mittelwerte der jeweiligen Minute) bei Energiefreisetzungsraten von 113 kW (links) und 275 kW (rechts)

Die in der Türöffnung gemessenen Gaskonzentrationen erreichten nicht die Höhe der im hinteren Raumteil unter der Decke gemessenen Werte. Das ist ein erwartetes Ergebnis, da

die einströmende Luft in der Nähe der Türöffnung in den Abgasstrom eingemischt wird. Bei einigen Versuchen ist erkennbar, dass speziell die Gaskonzentrationen an der Messstelle an der oberen Türkante dem Einfluss von Strömungen unterliegen. Dieser Effekt trat, wegen der höheren Gasgeschwindigkeiten, besonders bei den geringeren Türweiten auf. Als Beispiel sollen die bei dem Versuch mit einer Energiefreisetzungsrate von 154 kW in der Türöffnung gemessenen Gaskonzentrationen detaillierter dargestellt werden (Abbildung 55), da sich in diesem Fall ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen von [WIECZOREK ET AL. 2004] anbietet (Kapitel 4).

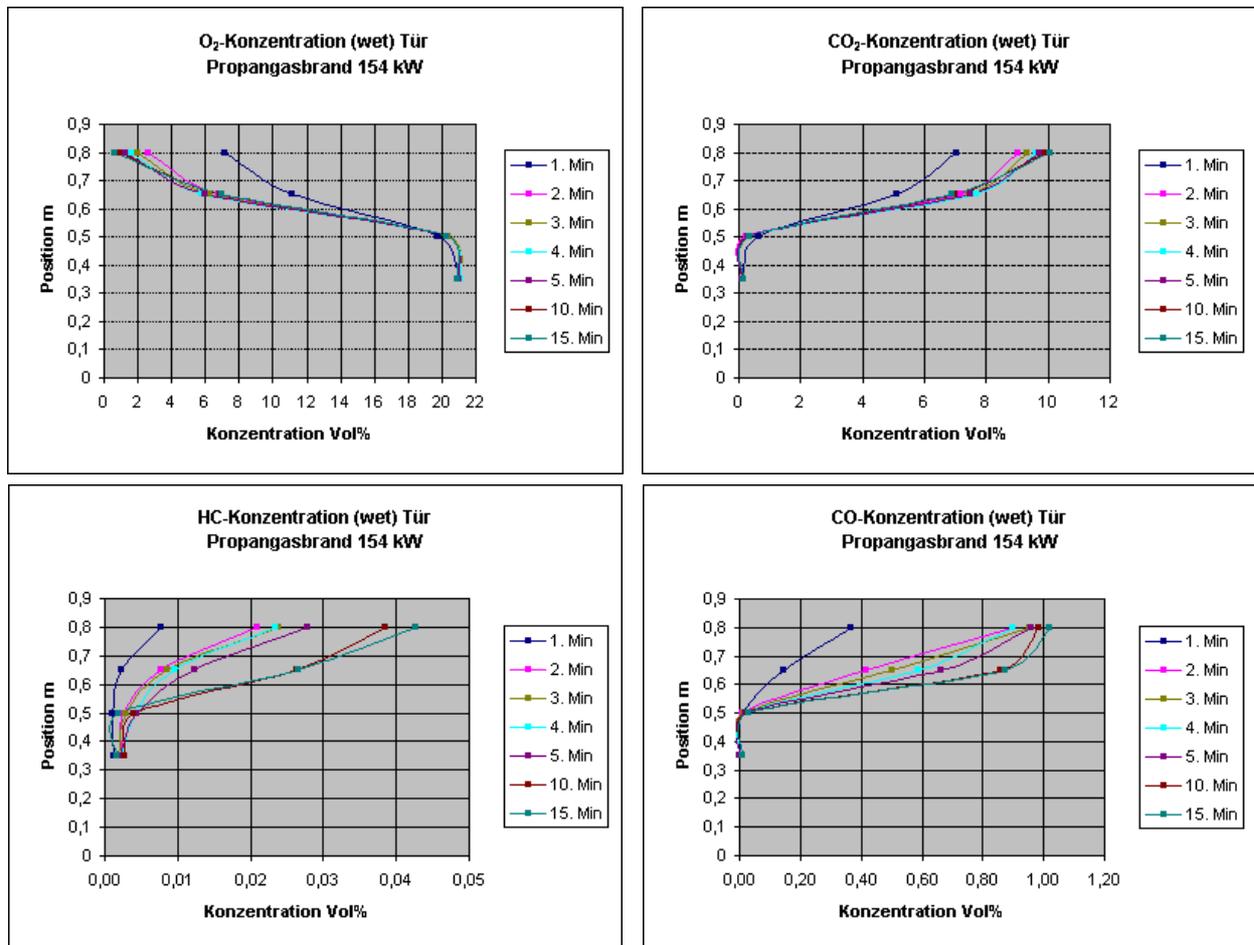


Abb. 55: Gaskonzentrationen in der Türöffnung, Versuch mit einer Energiefreisetzungsrate von 154 kW und 0,33 m Türweite

Bei schmaler Tür (0,165 m) waren die Konzentrationen an Sauerstoff und Kohlendioxid nicht mehr so stark nach der Energiefreisetzungsrate differenzierbar (Abbildung 56). Hier wurden auf Grund schlechterer Ventilationsverhältnisse niedrigere Sauerstoffgehalte und höhere Konzentrationen an CO, CO₂ und Kohlenwasserstoffen als bei der weiten Türöffnung gemessen. Eine gute Korrelation war zwischen den Konzentrationen der Produkte der unvollständigen Verbrennung CO und HC und der Brandgröße zu verzeichnen. Abbildung 57 zeigt die zeitliche Entwicklung der CO-Konzentrationsprofile in der Türöffnung bei unterschiedlichen Energiefreisetzungsraten.

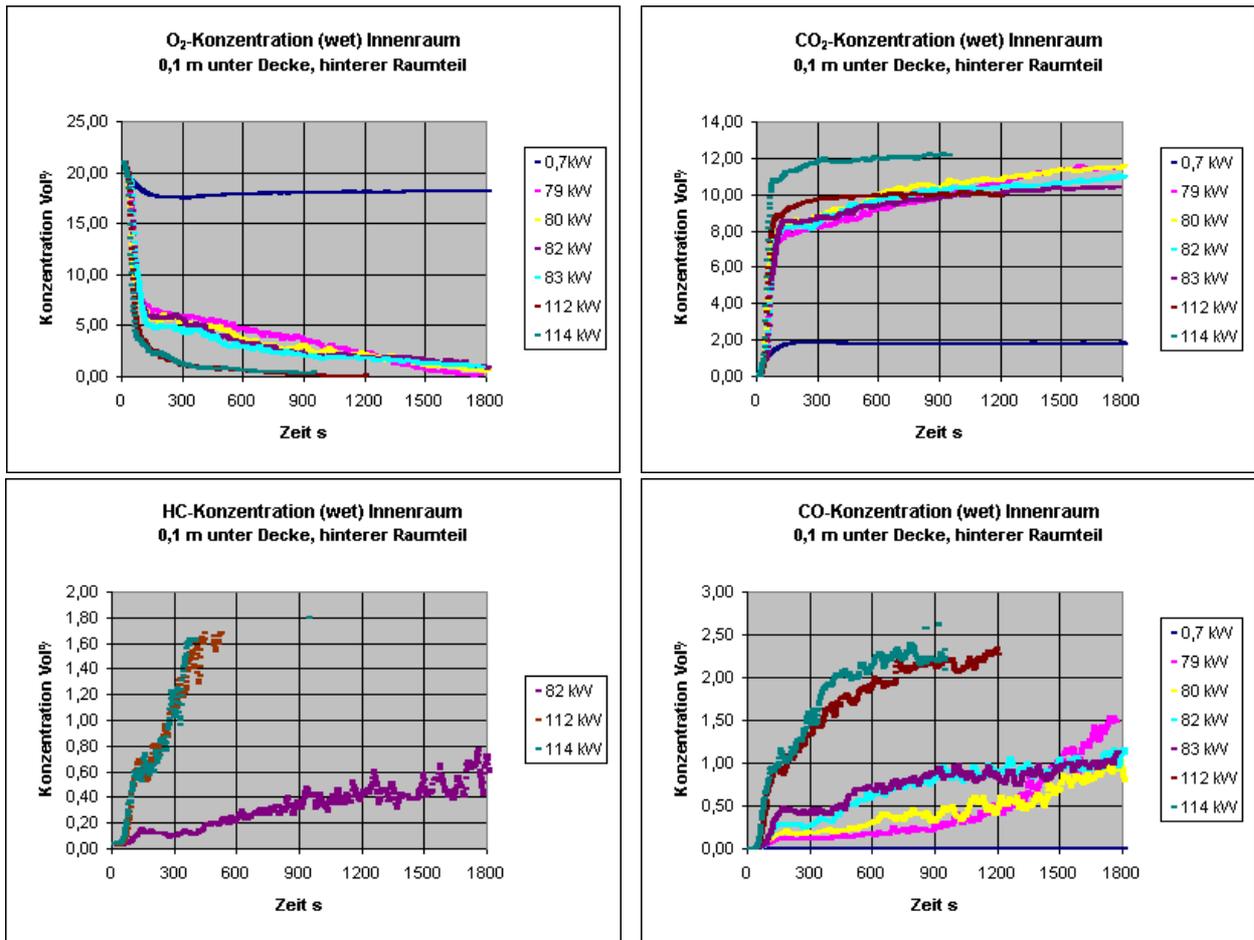


Abb. 56: Gaskonzentrationen im hinteren Teil des Brandraumes 0,1 m unter der Decke bei schmaler Tür (0,165 m) und unterschiedlichen Energiefreisetzungsraten

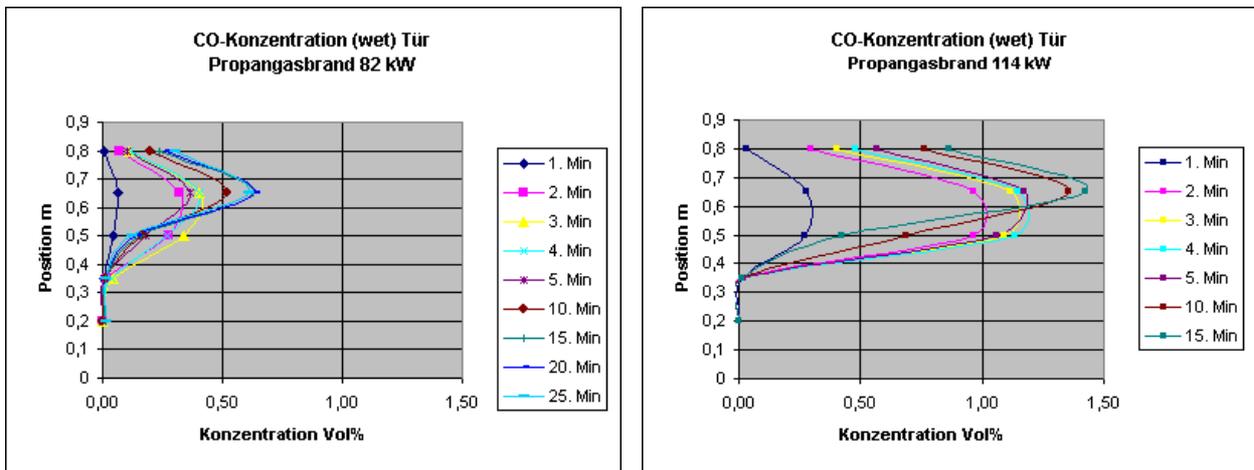


Abb. 57: CO-Konzentrationen in der Tür (schmal) 82 kW (links) und 114 kW (rechts)

Ist die Ventilation des Brandraumes nur noch über einen Türschlitz möglich (Abbildung 58), sinkt der Sauerstoffgehalt in der Oberschicht schnell auf Werte unter 2,5 Vol%, spürbar sofort auch in den niedrigeren Werten der CO₂-Konzentrationen im Vergleich zu den Versuchen mit besserer Ventilation. Die Produkte der unvollständigen Verbrennung CO und HC steigen dementsprechend auf höhere Niveaus, wobei Werte ab 2 Vol% HC bei der Aufzeichnung nicht mehr erfasst werden konnten wegen der Überschreitung des Messbereiches vom Analysator. In Abbildung 59 sind die CO-Konzentrationen in der Türöffnung für Energiefreisetzungsraten von 80 kW und 120 kW dargestellt.

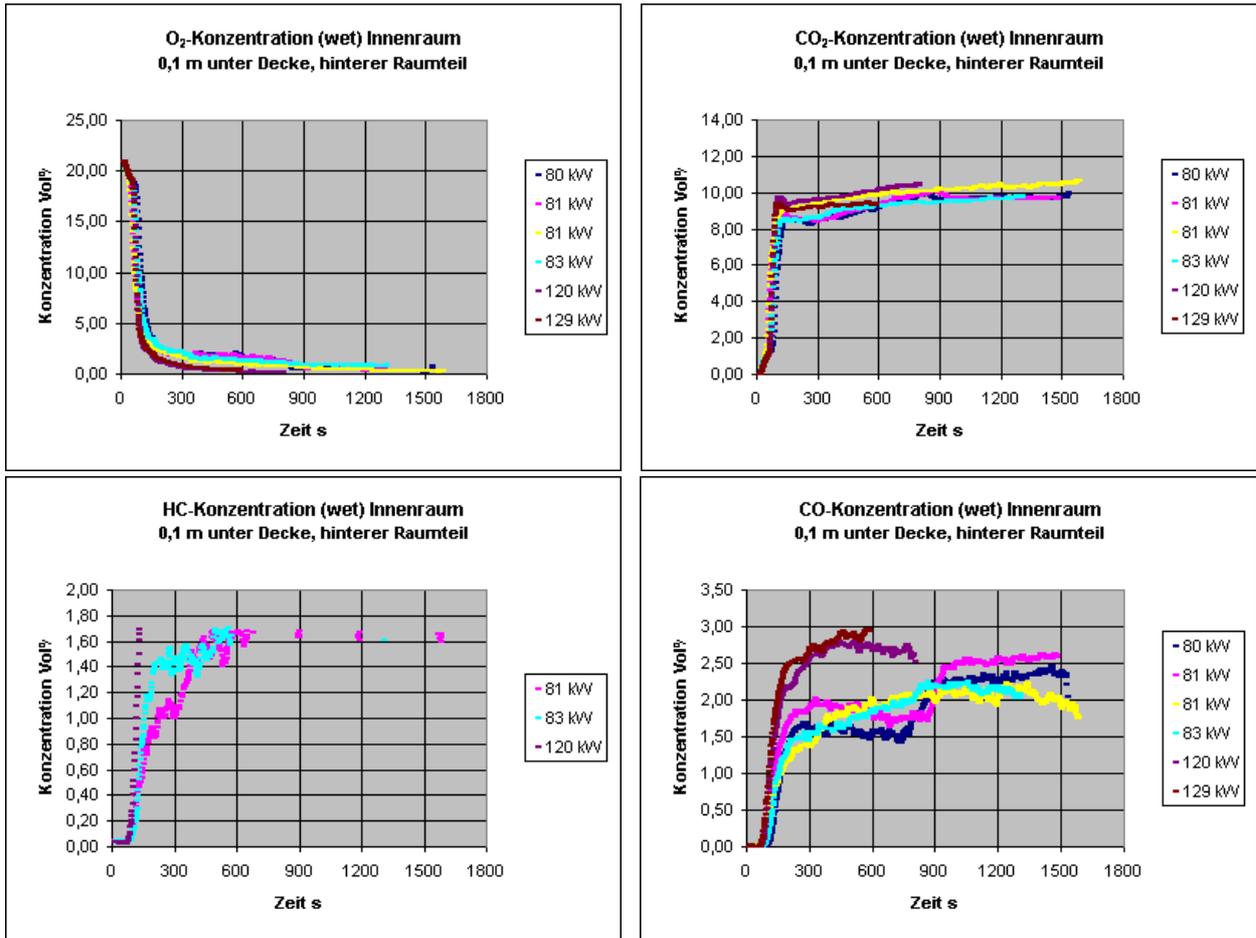


Abb. 58: Gaskonzentrationen im hinteren Teil des Brandraumes 0,1 m unter der Decke bei Türschlitz (0,1 m) und unterschiedlichen Energiefreisetzungsraten

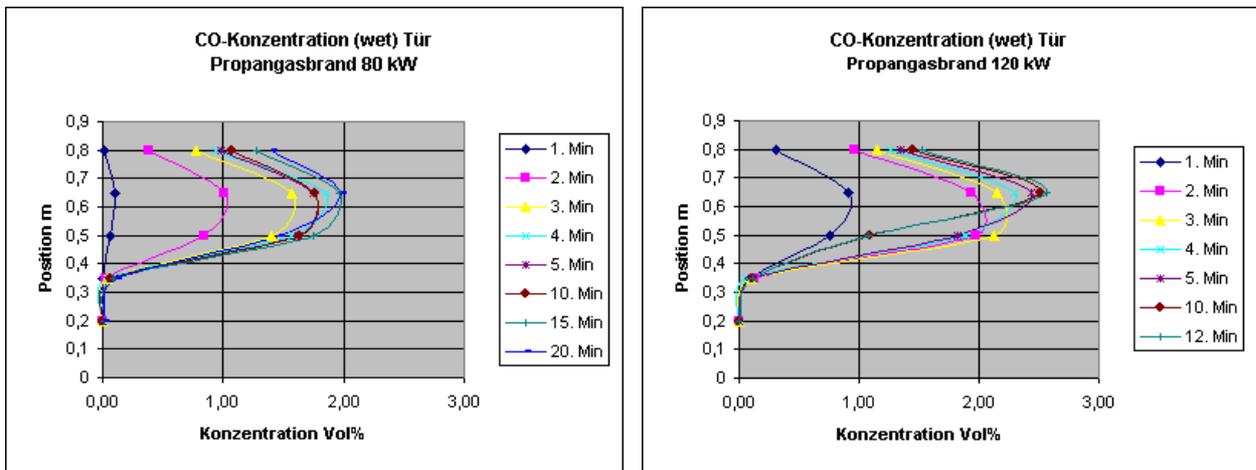


Abb. 59: CO-Konzentrationen in der Tür (Schlitz) bei Energiefreisetzungsraten von 80 kW (links) und 120 kW (rechts)

Es ist allgemein üblich zur Charakterisierung von Bränden, die während des Ablaufs gebildete CO-Konzentration zur gleichzeitig gebildeten CO₂-Konzentration ins Verhältnis zu setzen. Auch die Angabe des inversen Verhältnisses ist möglich. Gemäß [ISO TR 9122-1 1990] erfolgt mit dessen Hilfe die Abschätzung des Brandstadiums, wobei folgende Bereiche gelten:

Brandstadium	CO ₂ /CO-Verhältnis
Brandentwicklung	100 - 200
Brand voll entwickelt, hohe Ventilation	< 100
Brand voll entwickelt, geringe Ventilation	< 10

Aus Abbildung 60 ist ersichtlich, dass bei Anwendung dieser Abschätzung alle Versuche, bei denen die Türöffnung als Schlitz eingestellt war, unabhängig von der HRR bei geringer Ventilation durchgeführt wurden. Das Verhältnis der Kohlenoxide veränderte sich während der Branddauer nur wenig. Versuche mit schmaler Türöffnung liefen oberhalb 100 kW bei geringer Ventilation ab. Bei HRRs unterhalb 100 kW stellte sich eine hohe Ventilation ein, die sich über die Versuchszeit verschlechterte und nach etwa 25 – 30 min in den Bereich der geringen Ventilation gelangte. Bei weiter Türöffnung blieb die Ventilation bis etwa 120 kW hoch, Brände mit höheren HRRs wurden bereits nach kurzer Zeit gering ventiliert. [BABRAUSKAS 1995] schätzte ein, dass die Anwendung dieser Bewertung von Bränden für eine Gefahrenanalyse nicht nur nicht hilfreich ist, sondern völlig irreführend sein kann. Die Versuche mit weiter Türöffnung und einer HRR von ungefähr 80 kW hatten eine sehr hohe Ventilation. Es wurde kaum CO gebildet, die Sauerstoffkonzentrationen sanken dennoch unter 10 Vol% und die CO₂-Konzentrationen stiegen auf über 6 Vol%. Bei gleicher HRR und schmaler Türöffnung erfolgte immer noch eine hohe Ventilation, die CO-Konzentrationen erreichten aber schon Werte bis 1,5 Vol%. Als weiteres Beispiel können auch die Versuche mit 112 kW und 114 kW bei schmaler Türöffnung diskutiert werden. Wie aus Abbildung 56 ersichtlich ist, differieren die Konzentrationen der Kohlenoxide, während das CO₂/CO-Verhältnis fast gleich ist und somit gleiche Ventilation vorgibt. Nicht ableitbar hieraus ist der höhere Gehalt an Kohlenmonoxid im Abgas bei dem Versuch mit 114 kW.

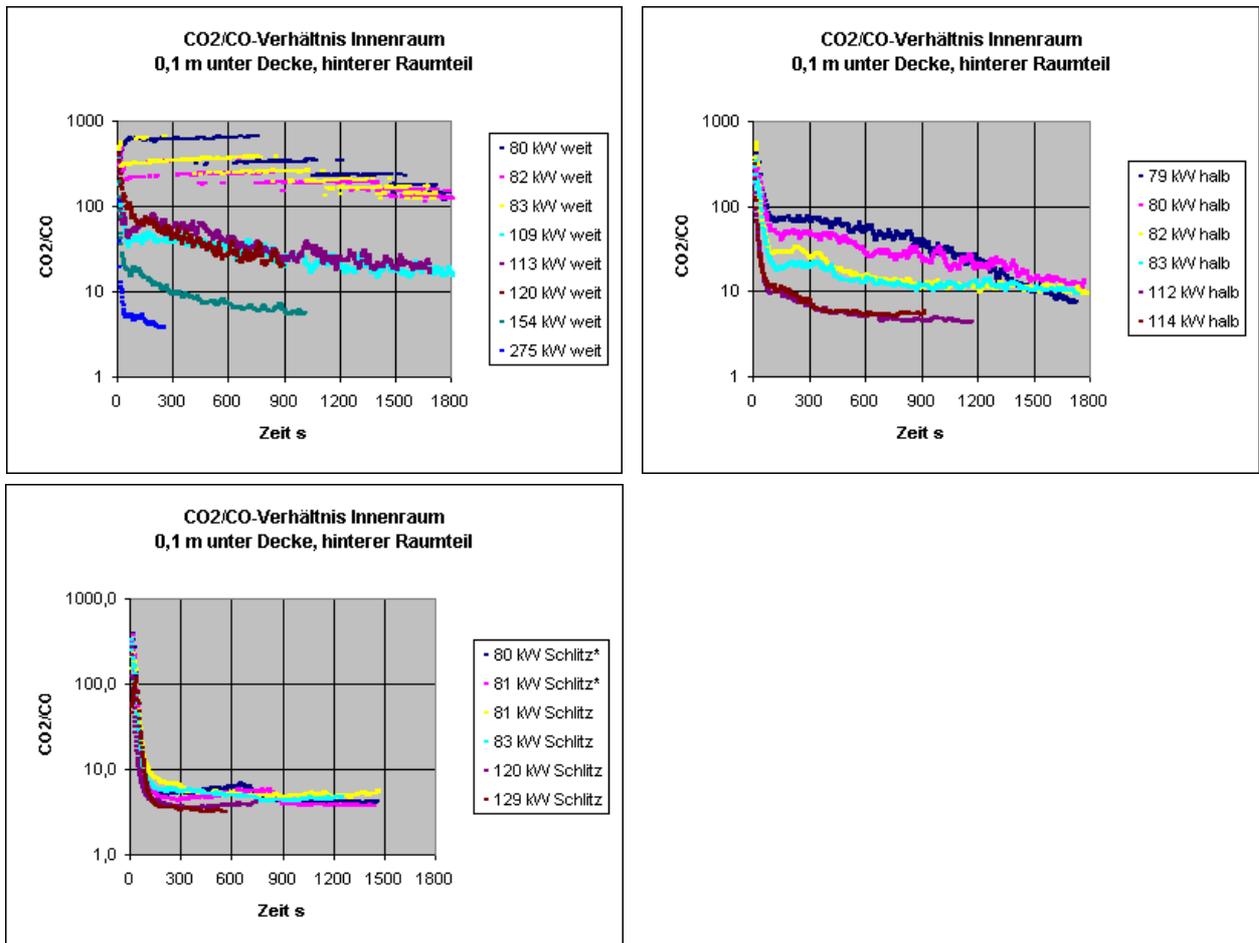


Abb. 60: CO₂/CO-Verhältnis aus der Gaszusammensetzung der Oberschicht im Innenraum des Versuchsobjektes

3.4.4 Gasgeschwindigkeiten

Die Gasgeschwindigkeiten wurden nach Gleichung 17 aus den Differenzdrücken berechnet, wobei das Vorzeichen die Strömungsrichtung anzeigt. Auf Grund der starken Abhängigkeit von der Gastemperatur ist eine Korrektur der Messergebnisse unerlässlich [INGASON ET AL. 1994].

$$v_g = \frac{1}{f(\text{Re})} \sqrt{\frac{2\Delta p T}{\rho_0 T_0}} \quad (17)$$

Als Beispiele sind in den Abbildungen 61 und 62 die berechneten Gasgeschwindigkeiten für die Türöffnung der Versuche mit Energiefreisetzungsraten von 112 kW und 114 kW dargestellt. Trotz eines nur geringen Unterschiedes in der HRR zeigten sich für den Versuch mit 114 kW geringfügig höhere Geschwindigkeiten sowohl bei Ein- als auch Ausströmung.

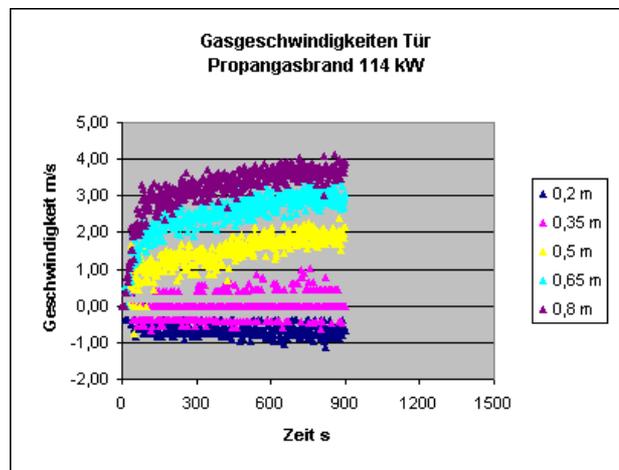
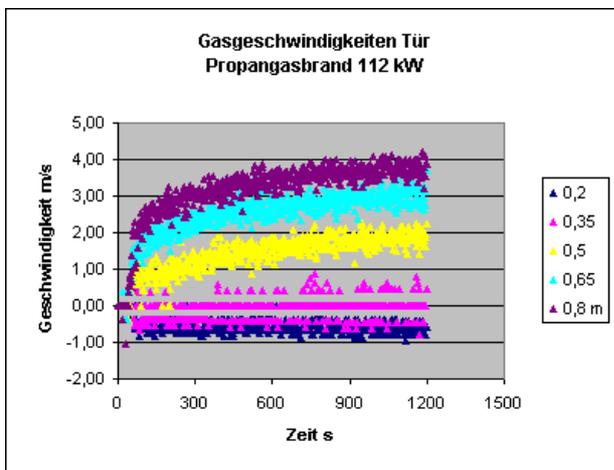


Abb. 61: Gasgeschwindigkeiten in der Tür (schmal) bei Energiefreisetzungsraten von 112 kW (links) und 114 kW (rechts)

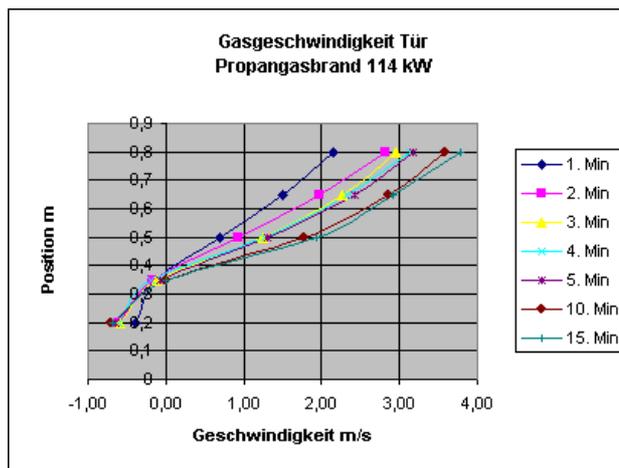
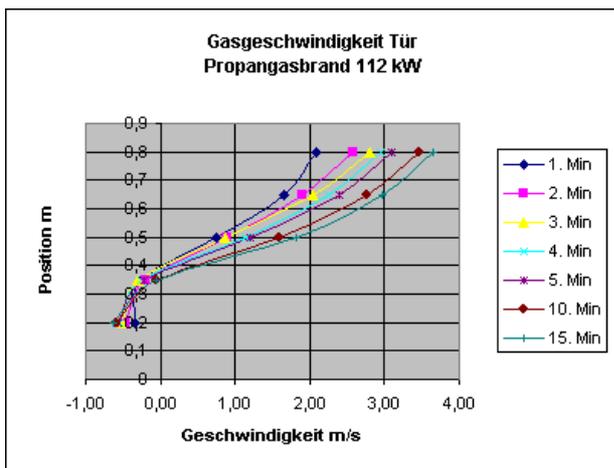


Abb. 62: Gasgeschwindigkeiten in der Tür (schmal) bei 112 kW (links) und 114 kW (rechts) Mittelwerte der jeweiligen Minute

Wurde ein geringerer Gasmassefluss für die Verbrennung eingesetzt, stellten sich in der Türöffnung auch geringere Gasgeschwindigkeiten ein, wie aus Abbildung 63 ersichtlich ist.

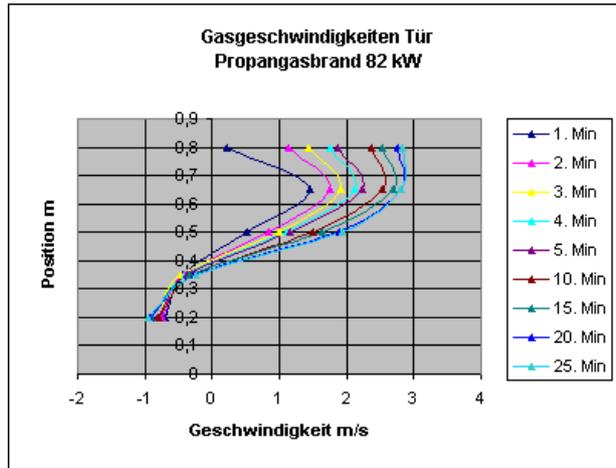


Abb. 63: Gasgeschwindigkeiten in der Tür (schmal) bei einer Energiefreisetzung von 82 kW, Mittelwerte der jeweiligen Minute

4 VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE

Für die Ausführung der Versuche wurde ein so genanntes half-scale Objekt nach [ISO 9705] aufgebaut, dessen Nutzung für Branduntersuchungen international üblich ist. Für die Aufnahme der Messdaten zur Bestimmung der Temperaturen, Gasgeschwindigkeiten und Gaskonzentrationen im Brandraum sowie angrenzenden Raum wurden entsprechende Messsysteme aufgebaut und in der ersten Versuchsserie erfolgreich erprobt.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit denen aus den zitierten Publikationen aufgeführten Untersuchungen zum Mechanismus der Kohlenmonoxidbildung, z. B. von [WIECZOREK 2003] ist nicht direkt möglich, da in der vorliegenden Arbeit ein anderes Versuchsregime angewandt wurde. Während [WIECZOREK 2003] bei seinen Untersuchungen konstante Randbedingungen geschaffen hatte, war hier das Ziel, die Entwicklung der Gaszusammensetzung, speziell die Konzentration an Kohlenmonoxid unter den sich verändernden Bedingungen im Brandraum zu untersuchen. Vergleichbare Versuche hinsichtlich der Versuchsdurchführung wurden von [BRYNER ET AL. 1994/1] in einem 2/5 skalierten Brandraum durchgeführt.

Die höchsten Temperaturen wurden bei allen Türweiten an der Decke erreicht, wobei über die Versuchszeit eine Abnahme des Temperaturunterschiedes zu der Messstelle in Bodennähe deutlich wurde. Das ist erklärbar durch das Anwachsen der Oberschicht bzw. Absinken der sogenannten neutralen Zone sowie der Wärmestrahlung aus der Oberschicht auf den Boden. Bei weiter Türöffnung und steigendem Gasmassefluss nahmen die Temperaturen bei Energiefreisetzungsraten oberhalb 120 kW nach etwa 5 min einen geringeren Anstieg. Die höchsten Temperaturen wurden bei Versuchen mit gleichem Gasmassefluss jeweils mit der halboffenen Tür erreicht. Die sich einstellenden Raumtemperaturen sind das Ergebnis aus dem ventilationsbedingten Reaktionsvermögen des Gasmasseflusses sowie des Wärmeverlustes durch die Türöffnung. Bei weiter Türöffnung ging offensichtlich ein Teil der Wärme durch Strahlungsverlust durch die Türöffnung verloren (wie von [BRYNER ET AL. 1995] berichtet), beim Türschlitz führte die Unterversorgung mit Sauerstoff zu geringerem Umsatz und folglich zu geringerer Energiefreisetzung.

[WIECZOREK 2003] begann mit der Aufzeichnung von Messwerten bei ihren Versuchen, wenn die Temperaturänderung im Versuchsraum ungefähr bei 1 K/min lag. Sie führten u. a. einen Versuch mit einer Energiefreisetzungsrate von 153 kW bei schmaler Türöffnung (0,165 m)

durch. Bei dem in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuch mit einer vergleichbaren Energiefreisetzungsrate von 154 kW, aber weiter Türöffnung (0,33 m), betrug die Temperaturänderung in den letzten Minuten der Versuchsdauer 4-7 K/min. [WIECZOREK 2003] hatte die in Abbildung 64 dargestellten Gaskonzentrationen in der Türöffnung gemessen.

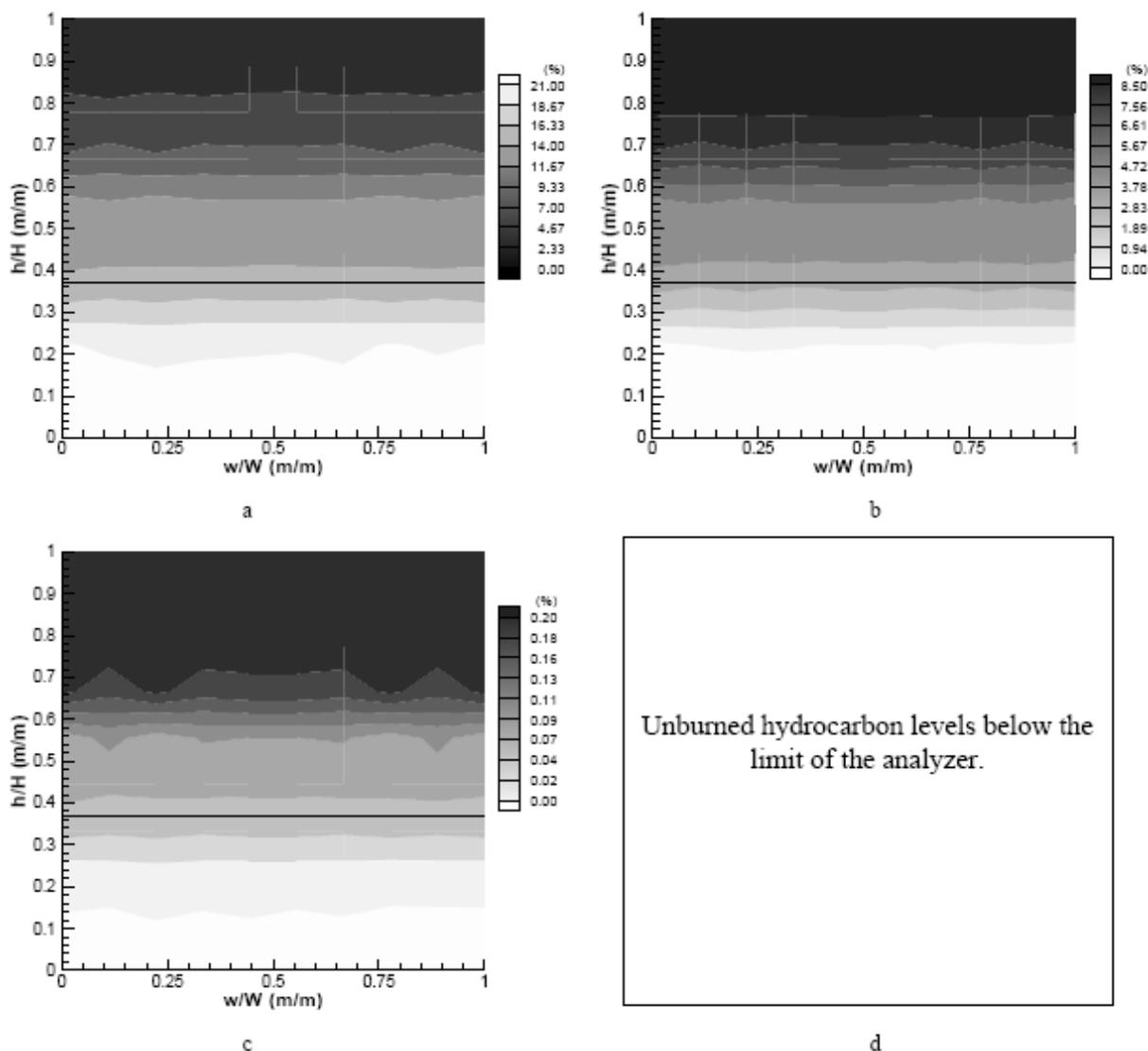


Abb. 64: Gaskonzentrationen in der Tür bei einem Versuch mit einer Energiefreisetzungsrate von 153 kW und einer Türweite von 0,165 m, [WIECZOREK ET AL. 2004/1] (O₂ in a, CO₂ in b, CO in c, HC in d)

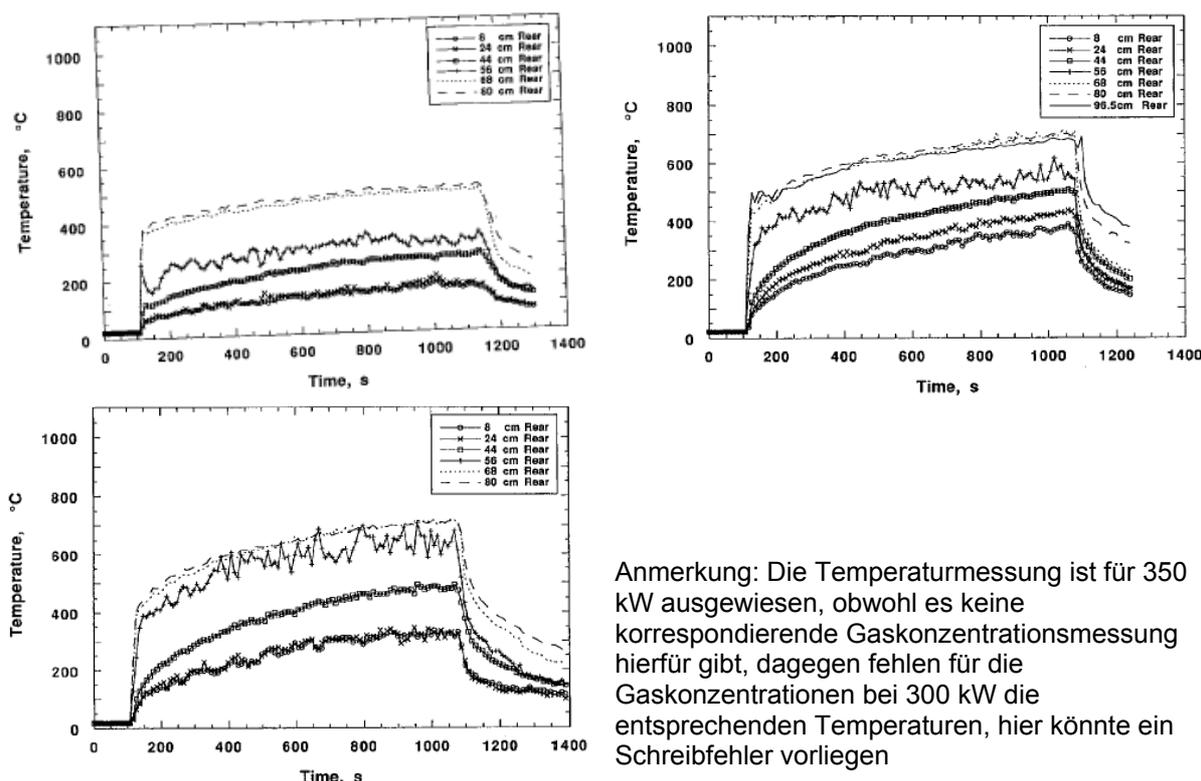
Die Werte, welche von [WIECZOREK 2003] an der oberen Türkante gemessen wurden, weichen im Vergleich zu denen aus Versuch Nr. 21 deutlich ab, wie aus Tabelle 20 ersichtlich ist. Auf Grund besserer Belüftung des Brandraumes bei Versuch Nr. 21 könnten die höheren Konzentrationen an Kohlenoxiden mit einem besseren Umsatz des Brandstoffes begründet werden, zumal im Abgas auch noch ein geringer Sauerstoffanteil gemessen wurde. Es treten aber bereits geringe Konzentrationen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen auf, was ein Anzeichen für unzureichende Luftversorgung ist. Bei dem Versuch von [WIECZOREK 2003] wären nun wegen der schlechteren Belüftung deutlich höhere Konzentrationen an CO und messbare Konzentrationen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen zu erwarten. Letztere lagen im Gegenteil unter der Nachweisgrenze des Analysators. Die Abweichung in den Messwerten kann in der von [WIECZOREK 2003] diskutierten Flammenausdehnung liegen. Gemäß seiner Beobachtungen und Berechnungen führten die

Randbedingungen des hier zum Vergleich herangezogenen Brandes zu einem Flammenauschlag aus der Türöffnung, so dass die Messungen nicht nur im Gas sondern auch oder ganz in der Flamme erfolgten. Bei Versuch Nr. 21 trat ein Flammenauschlag erst nach der 17. Minute der Versuchsdauer auf, die zum Vergleich herangezogenen Messwerte wurden in der 15. Minute und damit nur im Abgas gemessen.

Tabelle 20: Vergleich der Gaskonzentrationen an der oberen Türkante aus Versuch Nr. 21 mit dem Versuch 153 kW, schmale Türöffnung von [WIECZOREK 2003]

Versuch	min. O ₂	max. CO ₂	max. HC	max. CO
[Wieczorek et al. 2004/1] 153 kW, Türweite 0,165 m	0,00	8,50	n.n.	0,20
Versuch Nr. 21 154 kW, Türweite 0,33 m	0,67	10,09	0,04	1,02

[BRYNER ET AL. 1994/1] hatten in einem 2/5 skalierten Raum mit Erdgas als Brennstoff bei annähernd vergleichbaren Energiefreisetzungsraten und einer Türweite von 0,48 m ihre Untersuchungen ausgeführt, so dass sich hier ein Vergleich der Ergebnisse anbietet. Von [BRYNER ET AL. 1994/1] wurden die in Abbildung 65 gezeigten Temperaturen im hinteren Raumbereich gemessen. Die in der vorliegenden Arbeit gemessenen Temperaturen (siehe Abbildung 49) stimmen recht gut überein. Beachtet werden muss, dass der Versuch 13 mit 275 kW nur 4 Minuten dauerte.



Anmerkung: Die Temperaturmessung ist für 350 kW ausgewiesen, obwohl es keine korrespondierende Gaskonzentrationsmessung hierfür gibt, dagegen fehlen für die Gaskonzentrationen bei 300 kW die entsprechenden Temperaturen, hier könnte ein Schreibfehler vorliegen

Abb. 65: Temperaturen im hinteren Raumteil bei Ergasbränden mit Energiefreisetzungsraten von 100 kW (oben links), 250 kW (oben rechts), 350 kW (unten links) von [BRYNER ET AL. 1994/1]

Die von [BRYNER ET AL. 1994/1] gemessenen Gaskonzentrationen bei vergleichbaren Energiefreisetzungsraten sind aus Abbildung 66 ersichtlich und in Tabelle 21 den vergleichbaren Versuchen aus der vorliegenden Arbeit gegenübergestellt. Bei annähernd gleichen Raumtemperaturen ergaben sich zu den in der vorliegenden Arbeit gemessenen Gaskonzentrationen in der Oberschicht im hinteren Raumabschnitt nur zum Teil deutliche Unterschiede, wie aus Abbildung 52 ersichtlich ist. Die größten Abweichungen treten bei den

Versuchen mit 100 kW und 109 kW auf. Während die Gaskonzentrationen im Versuch der hier publizierten Arbeiten über die Versuchszeit anstiegen bzw. beim Sauerstoff fielen, erreichten die Gaskonzentrationen bei [BRYNER ET AL. 1994/1] schon nach kurzer Zeit Plateau-Werte, eine Erscheinung, die bei höheren Energiefreisetzungsraten schwindet. Bei Versuch Nr. 16 mit 109 kW wurde zum Ende der Versuchszeit eine CO-Konzentration von 0,8 Vol% gemessen und eine im Vergleich zum Versuch von [BRYNER ET AL. 1994/1] doppelt so hohe CO₂-Konzentration von 12 Vol%, während die O₂-Konzentration auf 1 Vol% sank. Versuch Nr. 21 liegt hinsichtlich der Energiefreisetzungsrate zwischen den von [BRYNER ET AL. 1994/1] hier aufgeführten Bränden, für die Gasmessungen im hinteren Raumteil erfolgten. Für eine vergleichbare HRR von 150 kW wurden von den Autoren lediglich im Frontbereich Gasmessungen ausgeführt. Da die Werte der Gaskonzentrationen zwischen Rück- und Frontbereich nur bis zu etwa 1 Vol% differierten, wurde der Vergleich der Ergebnisse gewagt.

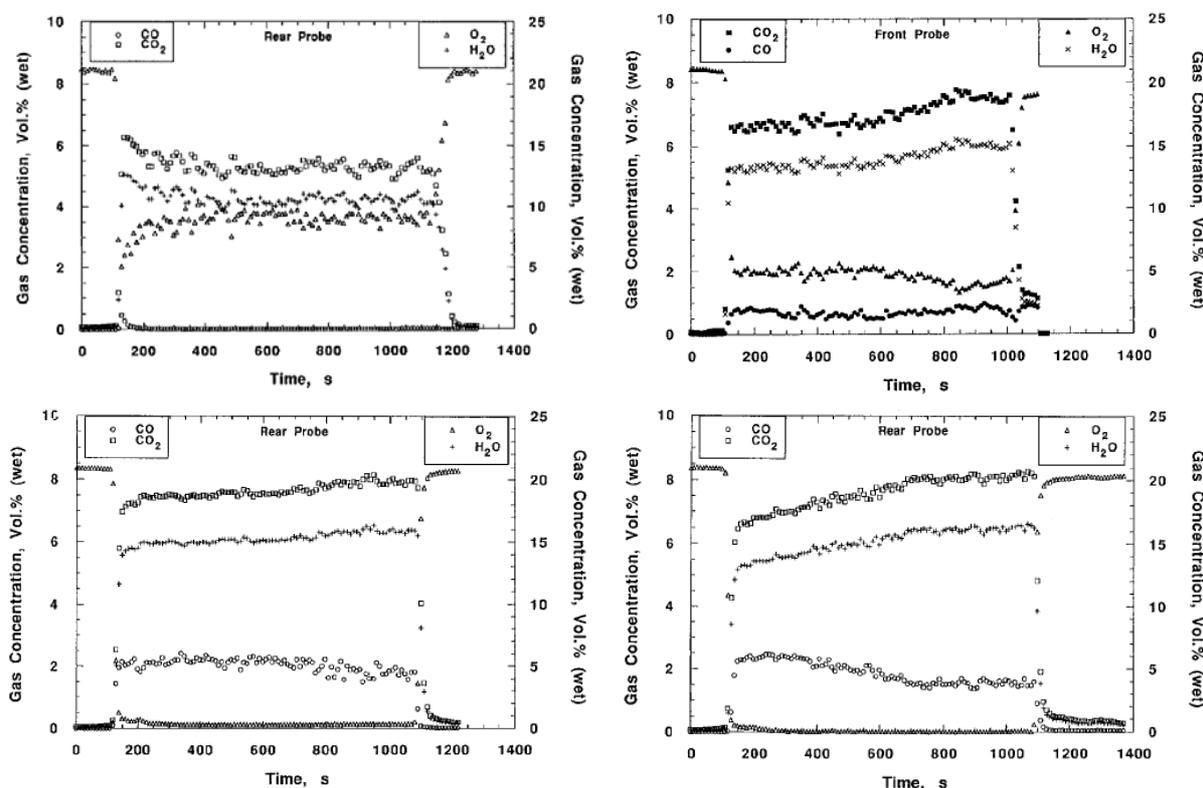


Abb. 66: Gaskonzentrationen in der Oberschicht im hinteren Raumteil bei 100 kW (oben links), 250 kW (unten links), 300 kW (unten rechts) sowie Frontbereich 150 kW (oben rechts) Ergasbrand von [BRYNER ET AL. 1994/1]

Tabelle 21: Vergleich der Gaskonzentrationen in der Oberschicht im hinteren Raumteil aus Versuch Nr. 16 mit dem Versuch 100 kW, weite Türöffnung von [BRYNER ET AL. 1994/1]

Versuch	min. O ₂	max. CO ₂	max. CO
[Bryner et al. 1994/1] 100 kW, Türweite 0,48 m	3,5-4	5,5	nahe 0
Versuch Nr. 16 109 kW, Türweite 0,33 m	1	12	0,8
[Bryner et al. 1994/1] 150 kW, Türweite 0,48 m	1,5-2	7,5	1
Versuch Nr. 21 154 kW, Türweite 0,33 m	0,3	12,5	2,3
[Bryner et al. 1994/1] 250 kW, Türweite 0,48 m	nahe 0	7,5	2
[Bryner et al. 1994/1] 300 kW, Türweite 0,48 m	nahe 0	7	2,5
Versuch Nr. 13 275 kW, Türweite 0,33 m	0,05	10,5	2,8

Die Unterschiede in den Ergebnissen können in der etwas abweichenden Geometrie des Brandobjektes und damit anderen Ventilationsverhältnissen begründet sein. [BRYNER ET AL. 1994/1] skalierten die Höhe der Türöffnung linear zum Originalraum und kamen deshalb zu einer etwas geringeren Höhe (0,81 m), dafür aber erheblich größeren Weite (0,48 m) im Vergleich zu den Maßen des in dieser Arbeit errichteten Versuchsobjektes.

Bei jedem Versuch der hier vorliegenden Arbeit wurde über die Versuchsdauer mit jeweils konstantem Gasmassefluss gearbeitet. War eine gute Ventilation gewährleistet, z. B. bei weiter Tür und geringem Gasmassefluss, erreichten die Gaskonzentrationen an der Messstelle im Innenraum unter der Decke relativ schnell ein Niveau, das mit Fortschreiten der Versuchsdauer keine großen Veränderungen zeigte. Mit Verringerung der Ventilation durch Verkleinerung der Ventilationsöffnung oder höherem Gasmassefluss stellten sich erwartungsgemäß höhere Konzentrationen an Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen ein. Diese Konzentrationen waren teilweise so hoch, dass eine Exposition beim Menschen fast sofort zum Eintritt der Handlungsunfähigkeit bzw. Tod führen würde.

Aus den Profilen der Gaskonzentrationen und Gasgeschwindigkeiten in der Türöffnung lässt sich der Austrag an Kohlenmonoxid in den angrenzenden Raum berechnen, was mit der nächsten Berichterstattung erfolgen wird. Diese Ergebnisse werden hinsichtlich der Bewertung von Gefährdungen durch Exposition in Räumen, die in Nachbarschaft zum Brandraum liegen, von Interesse sein. Aber die Abschätzung von aus der Gaszusammensetzung resultierenden Expositionen hat auch hierfür, genauso wie für die Situation im Brandraum, keinen zeitlichen Bezug zu einem realen Brandgeschehen, da von Versuchsbeginn an mit konstanter Energiefreisetzungsrate gearbeitet wurde und somit keine Brandentwicklungsphase repräsentiert wird. Um zukünftig die Modellbrände einem realen Brandgeschehen anzunähern, wurde in die Gasversorgung des Brandraumes eine programmierbare Steuerung des Gasmasseflusses eingebaut. So wird bei den folgenden Untersuchungen ein Ansteigen der Energiefreisetzungsrate, ähnlich einer Brandentwicklung, möglich sein.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

- ◆ Die vorliegenden Ergebnisse und Auswertungen von Publikationen belegen die Aussage, dass sich bei Raumbränden innerhalb weniger Minuten eine hinsichtlich thermischer und toxischer Exposition kritische Situation entwickeln kann. Somit werden die Überlebenschancen von im Brandraum befindlichen Personen bei Wohnungsbränden innerhalb weniger Minuten rapide sinken. Die für die Rettung aus dem Brandraum zur Verfügung stehende Zeitspanne unterschreitet die mögliche Eintreffzeit der Hilfskräfte der Feuerwehr im Normalfall.
- ◆ Vor dem Hintergrund der Veränderungen durch generelle Energiesparmaßnahmen wird die Entwicklung unterventilierter Brände im Wohnbereich unterstützt. Es kommt deutlich schneller zu kritischen Situationen für die Bewohner. In Brandräumen, in denen das Feuer seinen Ausgangspunkt hat, können die Bewohner diesen Situationen ausschließlich durch Selbstrettung entgehen.
- ◆ Zeitlich gestaffelt dazu entwickeln sich die Verhältnisse in den zum Brandraum benachbart gelegenen Räumen, wobei das Hauptaugenmerk der zukünftigen Untersuchungen gerade hierauf gerichtet werden sollte.
- ◆ Lösungswege, die Selbstrettung der Personen zu unterstützen bzw. zu ermöglichen liegen in der Früherkennung der Brände durch Brandmelder, aber auch in einer Installation von automatischen Löschanlagen im Bereich des Wohnungsbaues.

- ◆ Im Interesse der Sicherheit der Bevölkerung im Wohnbereich sollte auch darüber zu entscheiden sein, dass zukünftig in modernen Wohnbauten Brandschutzeinrichtungen installiert werden.
- ◆ Ein unbedingtes Erfordernis besteht darin, die Bevölkerung darüber aufzuklären, dass ein Brand im Anfangsstadium entdeckt werden muss und sich somit zwingend der Einsatz von Brandmeldern ergibt. Entsprechende gesetzliche Vorgaben zur Installation von Brandmeldern sind bereits in einigen Bundesländern in Bauordnungen umgesetzt.
- ◆ Die Aufklärung der Bevölkerung muss auch umfassen, dass sich in Nachbarschaft zum Brandraum kritische Verhältnisse entwickeln können und die Überlebenschancen in diesen Räumen ebenfalls schneller sinken können, als die Feuerwehr einzutreffen vermag und daraus die Verpflichtung zur Selbsthilfe erwächst.

6 LITERATUR

[ALARM-TEC 2006]

Alarm-Tec: Rauchwarnmelder Pflicht in den Landesbauordnungen der Bundesländer, <http://www.alarm-tec.de>, 2006

[ANDERSON ET AL. 1982]

Anderson, R. A.; Willetts, P.; Cheng, K. N.; Harland, W. A.: Fire death in the United Kingdom 1976-82, Fire and Materials, Vol. 7, No. 2, 1983

[ARBEITSMEDIZIN 2004]

Institut für Arbeitsmedizin: Merkblatt zur BK Nr. 1201: Erkrankungen durch Kohlenmonoxid, Merkblatt zu BK Nr. 11 der Anl. 1 zur 7. BKVO, Universität Rostock, Medizinische Fakultät, <http://arbmed.med.uni-rostock.de/bkvo/m1201.htm>

[ARBEITSSICHERHEIT 1999]

Abteilung Arbeitssicherheit: Kohlenmonoxid, Informationen für den Umgang, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 1999, <http://www.verwaltung.uni-freiburg.de>

[ASTM E603]

ASTM E603: Standard Guide for Room Fire Experiments, American Society of Testing Materials (ASTM) Standards, Book of Standards Volume: 04.07

[ASTM E603-98a]

ASTM E603-98a: Standard Guide for Room Fire Experiments, Annual Book of American Society of Testing Materials (ASTM) Standards, Vol. 04.07.5, historical Standard

[AUSSCHUSS KRANKENHAUS 2003]

Ausschuss Krankenhaus nach § 137c SGB V: Abschlussbericht Methode Hyperbare Sauerstofftherapie (HBO), Indikation Kohlenmonoxidintoxikation, Bundesanzeiger Nr. 72, Seite 7583, 12.04.2003

[BABRAUSKAS 1995]

Babrauskas, V.: The Generation of CO in Bench-scale Fire Tests and the Prediction for Real-scale Fires, Fire and Materials, Vol 19, 205-213 (1995)

[BABRAUSKAS ET AL. 1991]

Babrauskas, V.; Levin, B. C.; Gann, R. G.; Paabo, M.; Harris, R. H.; Peacock Jr., R. D.; Yusa, S.: Toxic Potency Measurement for Fire Hazard Analysis, Special Publication 827, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1991

[BERATERHANDBUCH]

Beraterhandbuch: Informationen über Brandrauch und lebensrettende Rauchmelder, herausgegeben von Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Deutscher Feuerwehrverband e. V. (DFV), Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks Zentralinnungsverband (ZIV), Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI), Fachverband Sicherheitssysteme, Bundesverband der Hersteller- und Errichterfirmen von Sicherheitssystemen e. V. (BHE), GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Zentralverband der Deutschen Elektrohandwerke (ZVEH), Erscheinungsdatum unbekannt,

[BEYLER 1983]

Beyler, C. L.: Development and Burning of a Layer of Products of Incomplete Combustion Generated by a Buoyant Diffusion Flame, Ph.D. Thesis, Harvard University (1983), zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[BEYLER 1984]

Beyler, C. L.: Combust. Sci. Tech., 39, 287 (1984), zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[BEYLER 1986/1]

Beyler, C. L.: Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-layer Compartment Fire Environment, Fire Safety J., 10 (1986), 47-56, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[BEYLER 1986/2]

Beyler, C. L.: Fire Safty Science – Proceedings of the First International Symposium, S. 431-440, E. Grant and P. J. Pagni (Eds), Hemisphere, New York, (1986), zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[BHE 2004]

Bundesverband der Hersteller- und Errichterfirmen von Sicherheitssystemen e. V.: Rauchwarnmelder in LBO Rheinland-Pfalz gefordert, <http://www2.bhe.de>, 2004

[BENIGNUS ET AL. 1994]

Benignus, V. A. ; Hazucha, M. J.; Smith, M. V.; Bromberg, P. A.: Prediction of carboxyhemoglobin formation due to transient exposure to carbon monoxide, J. Appl. Physiol. 1994, 76, 1739-1745

[BREIN 1997]

Brein, D.: Evakuierungskonzepte – Anforderungen, Komponenten, Bewertungen, vfdb-Jahresfachtagung, Hamburg 1997, zitiert in [vfdb-Referat 4 2005]
vfdb-Referat 4: vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Entwurf Juni 2005, Hrsg. Hosser, D.

[BREIN, HEGGER 2002]

Brein, D.; Hegger, T. Fr.: Gefahrenpotentiale summieren sich, Brand Aktuell, 13/02

[BRYNER ET AL. 1994/1]

Bryner, N. P. ; Johnsson, E. L. and Pitts, W. M.: Carbon Monoxide Production in Compartment Fires - Reduced-Scale Enclosure Test Facility, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5568, 1994

[BRYNER ET AL. 1994/2]

Bryner, N. P. ; Johnsson, E. L. and Pitts, W. M.: Carbon Monoxide Production in Compartment Fires: Full-Scale Enclosure Burns, NISTIR 5499, September 1994, National Institute of Standards and Technology, Annual Conference on Fire Research, Book of Abstracts, 1994, 53-54 pp.

[BRYNER ET AL. 1995]

Bryner, N. P. ; Johnsson, E. L.; Pitts, W. M.: Scaling Compartment Fires – Reduced- and Full-Scale Enclosure Burns, National Institute of Standards and Technology (NIST) and Society of Fire Protection Engineers (SFPE), International Conference on Fire Research and engineering (ICFRE), Proceedings, September 1995, Orlando, FL

[CETEGEN 1982]

Cetegen, B. M.: Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1982, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[CHEVALIER ET AL. 1966]

Chevalier, R. B.; Krumholz, R. A.; Ross, J. C.: Reaction of Nonsmokers to Carbon Monoxide Inhalation: Cardiopulmonary response at Rest and during Exercise, J. Am. Med. Assoc. 198, 1061-1064

[CoGDEM 2006]

CoGDEM : The Council of Gas Detection and Environmental Monitoring: Carbon Monoxide Poisoning, Public Housing Booklet, UK

[COOPER 1990]

Cooper, L. Y.: NISTIR 4403, National Institute of Standards and Technology, September 1990, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[COOPER 1991/1]

Cooper, L. Y.: NISTIR 4590, National Institute of Standards and Technology, Juni 1991, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[COOPER 1991/2]

Cooper, L. Y.: Proceedings of the Meeting on Heat and Mass Transfer in Fires and Combustion Systems, 1991, HTD-Vol. 176, pp. 9-22, S. C. Yao and J. N. Chung (Eds.), The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1991, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[COWAN ET AL. 2002]

Cowan, D. N. ; Lange, J. L.; Heller, J.; Krikpatrick, J.; DeBakey, S.: A Case-control Study of Asthma among U.S. Army Gulf War Veterans and modeled Exposure to Oil well Fire Smoke, Mil Med. 2002 Sep;167(9):777-82

[CTIF 2003]

Comite Technique International de Prevention et d'Extinction du Feu, Center of fire Statistics : Brushlinsky, N. N.; Hall, J. R.; Sokolov, S. V.; Wagner, P. : Feuerwehrstatistik, Bericht Nr. 9, Moskau 2003

[CTIF 2005]

Comite Technique International de Prevention et d'Extinction du Feu, Center of fire Statistics, Feuerwehrstatistik CTIF Deutschland, veröffentlicht in : Deutscher Feuerwehrverband e. V. Berlin: Feuerwehr-Jahrbuch 2005/2006 – Das Feuerwehrwesen in der Bundesrepublik Deutschland, DFV Medien GmbH Berlin

[DFV 2006]

DFV: Deutscher Feuerwehrverband e. V. Berlin: Feuerwehr-Jahrbuch 2005/2006 – Das Feuerwehrwesen in der Bundesrepublik Deutschland, DFV Medien GmbH Berlin

[EWENS 1994]

Ewens, D.: The Transport and Remote Oxidation of Compartment fire Exhaust Gases, Master of Science Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 1994

[EPA 1999]

Environmental Protection Agency: Air Quality Criteria for Carbon Monoxide, Office of research and Development, EPA 600/P-99/001 B, Washington 1999

[FALTBLATT]

Faltblatt: Rauchmelder retten Leben, herausgegeben von: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V., Fachverband Sicherheitssysteme, Bundesverband der Hersteller- und Errichterfirmen von Sicherheitssystemen (BHE) e. V., GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Erscheinungsdatum unbekannt, <http://www.Rauchmelder-Lebensretter.de>

[FEUERWEHR VERSBACH 2006]

Feuerwehr Versbach: Vorbeugender Brandschutz: Rauchmelder retten Leben!, <http://feuerwehr-versbach.de>, 2006

[FIERRO 2000]

Fierro, M.: Carbon Monoxide, University of Arizona, College of Pharmacy, Center of Toxicology, 2000

[FISHER ET AL. 1969]

Fisher, A. B.; Hyde, R. W.; Baue, A. E.; Reif, J. S.; Kelly, D. F.: Effect of carbon monoxide on function and structure of the lung. J. Appl. Physiol. 26, 4–12 (1969)

[FLOYD 2003]

Floyd, J.: Hughes Associates Inc., unpublished data, 2003, zitiert in: Wieczorek, C.: Carbon Monoxide Generation and Transport from Compartment Fires, Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Mining and Minerals Engineering, 2003

[FORBES ET AL. 1945]

Forbes, W. H. ; Sargent, F. ; Roughton ; F. J. W. : The rate of carbon monoxide uptake by normal men, Am. J. Physiol., 143, (594-608), 1945, zitiert in Penney, D. G.: Carbon Monoxide Headquarters, <http://www.coheadquarters.com/CO1.htm>, 2006

[GENEVA ASSOCIATION 2005]

International Association for the Study of Insurance Economics: Geneva Association Information Newsletter: World Fire Statistics, 2005, <http://www.genevaassociation.org>

[GERLING ET AL. 2001]

Gerling, I. ; Meissner, C. ; Reiter, A.; Oehmichen, M.: Death from thermal effects and burns, Forensic Science International 115 (2001), 33-41

[GILL ET AL. 2003]

Gill, J.R. ; Goldfeder, L.B.; Stajic, M.: The Happy Land Homicides: 87 Death due to Smoke Inhalation, J Forensic Sci. 2003 Jan;48(1):161-3

[GOTTUK 1992]

Gottuk, D. T.: The Generation of Carbon Monoxide in Compartment Fires, Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1992

[GOTTUK ET AL. 1992]

Gottuk, D. T. ; Roby, R. J.; Peatross, M.; Beyler, C. L.: Carbon Monoxide Production in Compartment Fires, Journal of Fire protection Engineering, 4, 133 (1992), zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[GOTTUK ET AL. 1995]

Gottuk, D. T.; Roby, R. J.; Beyler, C. L.: The Role of Temperature on Carbon Monoxide Production in Compartment Fires, Fire Safety Journal 24 (1995), 315-331

[GOTTUK, LATTIMER 2002]

Gottuk, G.; Lattimer, B.: Effect of Combustion Conditions on Species Production, Society of Fire Protection Engineering Handbook, 3rd edition, Section 2, Chapter 5, (2002)

[GROSS, ROBERTSON 1963]

Gross, D.; Robertson, A. F.: Report 8147, National Bureau of Standards (December, 1963), zitiert in [PITTS 1995]

[GROSS, ROBERTSON 1965]

Gross, D.; Robertson, A. F.: Experimental Fires in Enclosures, 10th Symp. (int.) Combust., pp 931-942, The Combustion Institute, Pittsburgh (1965), zitiert in [PITTS 1995]

[HAKKARAINEN 1999]

Hakkarainen, T.: Smoke gas analysis by Fourier transform infrared spectroscopy – The SAFIR project, VTT Building Technology, Technical Research Centre of Finland, 1999

[HALL 1997]

Hall, J.R.: Burns, Toxic Gases, and Other Hazards Associated with Fires: Deaths and Injuries in Fire and Non-Fire Situations, National Fire Protection Association, November (1997), zitiert in [WIECZOREK 2003]

[HARTMANN ET AL. 1997]

Hartman, H.; Mutmansky, J.; Ramani, R.; Wang, Y.: Mine Ventilation and Air Conditioning, 3rd edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, (1997), zitiert in [WIECZOREK 2003]

[HOFMANN 2006]

Hofmann, A.: Computerberechnungen von Wohnungsbränden unter Berücksichtigung von Rauchmeldern und dem Einsatz von flammenhemmenden Materialien in Einrichtungen, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Kolloquium am IdF LSA 2006

[IDF LSA 2005]

IdF LSA: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt: Ereignisbericht der Feuerwehr für das Land Sachsen-Anhalt, Jahrgänge 1994-2005, Herausgeber Innenministerium LSA

[INGASON ET AL. 1994]

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

[INGENIEURBÜRO BRANDSCHUTZ GMBH 2004]

Ingenieurbüro Brandschutz GmbH: Wie kann man sich schützen?, <http://www.sw-ibb.de/home/>, 2004

[ISO 9705]

ISO 9705: 1993: Fire tests – Full-Scale Room Test for Surface Products, International Organization for Standardization (ISO), 1993

[ISO TR 9122-1 1990]

ISO TR 9122-1: Toxicity Testing of Fire Effluents – Part 1: The State of the Art, International Organization for Standardization (ISO), 1990

[ISO TS13571 2002]

ISO TS13571 2002: Life threatening components of fires – Guidelines on the estimation of time available for escape using fire data, International Organization for Standardization (ISO), 2002

[KARLSSON, QUINTIERE 2001]

Karlsson, B.; Quintiere, J.: Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 2001

[KARTER 2000]

Karter Jr., M.J.: Fire Loss in the United States During 1999, National Fire Protection Association, September (2000)

[KÖNNECKE 2000]

Könnecke, R.: Computersimulation der Brandentwicklung in Räumen: Auswirkungen auf Personen und ihr Umfeld, in: Research in Legal Medicine - Rechtsmedizinische Forschungsergebnisse Bd. 21: Hyperthermie, Brand und Kohlenmonoxid, Hrsg. Oehmichen, 2000

[KOHL ET AL. 2003]

Kohl, K.-J.; Kutz, M.; Seliger, U.; Starke, H.; Wienecke, F.: Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden – Teil 1, Arbeitsgemeinschaft der Innenminister der Bundesländer, Forschungsauftrag Nr. 35(2/2001)H, Forschungsbericht Nr. 131 AGF, Heyrothsberge, 2003

[KUNKELMANN 1996]

Kunkelmann, J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung, Teil 1, Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V – Unterausschuss „Feuerwehrangelegenheiten“, Forschungsbereich Nr. 100, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 1996

[KUNKELMANN 1997]

Kunkelmann, J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung, Teil 2, Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V – Unterausschuss „Feuerwehrangelegenheiten“, Forschungsbereich Nr. 105, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 1997

[KUNKELMANN 2001]

Kunkelmann, J.: Entwicklung und Erprobung neuartiger Löschanlagen für den mehrgeschossigen Holzbau zur Brandbekämpfung und Fluchtwegsicherung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen Nr. 0339852/9, Karlsruhe 2001

[KUNKELMANN 2002]

Kunkelmann, J.: Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe(n) und/oder Holzverkleidung in die darüber liegenden Wohnungen insbesondere bei Altbauten, Forschungsbericht Nr. 129, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe, 2002

[LATTIMER ET AL. 1994]

Lattimer, B. Y.; Vandsburger, U.; Roby, R. J.: Transport and Oxidation of Compartment Fire exhaust Gases in an adjacent Corridor, J. of Fire Prot. Engr., 6 (4), 1994, 163-181

[LATTIMER 1996/1]

Lattimer, B., "The Transport of High Concentrations of Carbon Monoxide to Locations Remote from the Burning Compartment," Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Mechanical Engineering, Blacksburg, VA (1996), zitiert in [WIECZOREK 2003]

[LATTIMER ET AL. 1995]

Lattimer, B. Y.; Vandsburger, U.; Roby, R. J.: Effects of a combustible Ceiling in a burning Compartment on the Carbon Monoxide Levels in an adjacent Corridor, National Institute of Standard and Technology (NIST) and Society of Fire Protection Engineers (SFPE), International Conference on Fire Research and Engineering (ICFRE), Proceedings, Sept. 10-15, 1995, Orlando, FL

[LATTIMER ET AL. 1996/2]

Lattimer, B. Y.; Vandsburger, U.; Roby, R. J.: The Transport of Carbon Monoxide from a burning Compartment located on the Side of a Hallway, 26th. Symposium (International) on Combustion, Proceedings, Vol. 1, July 28 – Aug. 2 1996, Napoli, Italy, Combustion Institute, Pittsburg, PA, 1541-1547 pp. 1996

[LEVINE, NELSON 1990]

Levine, R. S.; Nelson, H. E.: Full Scale Simulation of a Fatal Fire and Comparison of Results with Two Multiroom Models, U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Center for Fire Research, Gaithersburg, MD, 1990

[LÖNNERMARK ET AL. 1996]

Lönnermark, A. ; Blomquist, P. ; Mansson, M.; Persson, H.: „TOXFIRE – Fire Characteristics and Smoke Gas Analysis in Under-Ventilated Large-Scale Combustion Experiments: Tests in the ISO 9705 Room“, Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 1996:45, 1996

[MCCAFFREY, HESKESTAD 1976]

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

[MCKAY 2002]

McKay, C.: Carbon Monoxide Generation in a Compartment with a Doorway during a Fire, Virginia Polytechnic Institute and State University, Masterarbeit, Blacksburg, Virginia, 2002

[MEDIZIN-NETZ 2004]

Deutsches Medizin-Netz: Vergiftungen mit Kohlenmonoxid, 2004, <http://www.medizin-netz.de>

[MILLER 2005]

Miller, I.: Human Behaviour Contributing to Unintentional Residential Fire Deaths 1997 – 2003, Heimdall Consulting Ltd, New Zealand Fire Service Commission Research Report Number 47, ISBN Number 1-877349-12-7

[MOREHART 1990]

Morehart, J. H.: Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1009, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[MOREHART ET AL. 1990]

Morehart, J. D. ; Zukoski, E. E.; Kubota, T.: Species Produced in Fires Burning in Two-Layered and Homogeneous Vitiated Environments, Government Contractor's Report GCR-90585, National Institute of Standards and Technology (December 1990)

[MORIKAWA, YANAI 1986]

Morikawa, T.; Yanai, E.: Toxic gases evolution from air-controlled fires in a semi-full scale room J. Fire Sciences 4, 299-314 (1986)

[MORITZ, HENRIQUES 1947]

Moritz, A. R.; Henriques, F. C.: Studies of thermal injury. II. The relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns. Am. J. Pathol. 23, 695–720 (1947). zitiert in: Madea, B.; Schmidt, P.: Vitale – supravitale – postmortale Befunde bei Verbrennungen, in: Research in Legal Medicine - Rechtsmedizinische Forschungsergebnisse Bd. 21: Hyperthermie, Brand und Kohlenmonoxid, Hrsg. Oehmichen, 2000

[MULHOLLAND 1988]

Mulholland, G. W.: Letter Report to Richard G. Gann, Chief, Fire Measurement and Research Division, Center for Fire Research, National Bureau of Standards, unpublished 1988, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[MULHOLLAND 1990/1]

Mulholland, G. W.: Position Paper Regarding CO Yield, Appendix C in Neldon, H. E.: FPETool: Fire Protection Engineering Tools for Hazard Estimation, National Institute of Standards and Technology, Internal Report 4380, 93-100, Gaithersburg, MD, 1990

[MULHOLLAND 1990/2]

Mulholland, G. W.: Comparison of Predicted CO Yield with Results from Fire Reconstruction of Sharon, PA Fire, Appendix C in Neldon, H. E.: FPETool: Fire Protection Engineering Tools for Hazard Estimation, National Institute of Standards and Technology Internal Report 4380, 101-105, Gaithersburg, MD, 1990

[NFPA 2000]

NFPA, Carbon Monoxide Risks at Home, Fact Sheet, National Fire Protection Association, (2000).

[NIOSH 1996]

NIOSH ALERT: 1996: Preventing Carbon Monoxide Poisoning from Small Gasoline-Powered Engines and Tools, DHHS (NIOSH) Publication No. 96-118

[NOTFALLMEDIZIN 2006]

Notfallmanagement: Praxisleitfaden Allgemeinmedizin – CO-Vergiftung,
<http://www2.medizin-online.de>

[PACE ET AL. 1950]

Pace, N. ; strajman, E. ; Walker, E.L. : Acceleration of Carbon Monoxide Elimination in Man by high Pressure Oxygen, Science 111, 652-654

[PARVING 1972]

Parving, H-H. : The effect of hypoxia and carbon monoxide exposure on plasma volume and capillary permeability to albumin, scand. J. Clin. Lab. Invest. 30, 49-56, 1972

[PENNEY 2006]

Penney, D. G.: Carbon Monoxide Headquarters, <http://www.coheadquarters.com/CO1.htm>, 2006

[PETERSON, STEWARD 1970]

Peterson, J.E.; Steward, R.D.: Absorption and Elimination of Carbon Monoxide by inactive young Man, Arch. Environ. Health 11, 165-171

[PETERSON, STEWART 1975]

Peterson, J. E.; Stewart, R. D.: Predicting the carboxyhemoglobin levels resulting from carbon monoxide exposures, J. Appl. Physiol., 39, 633-638), 1975, zitiert in Penney, D. G.: Carbon Monoxide Headquarters, <http://www.coheadquarters.com/CO1.htm>, 2006

[PITTS 1995]

Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[PLEß, SELIGER 1993]

Pleß, G.; Seliger, U.: Optimierung der Erzeugung von Wasser-Abgasstrahlen zur Absorption von Schadstoffen bei Bränden und Havarien, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Bericht Nr. 309, Heyrothsberge 1993

[RASBASH, STARK 1966]

Rasbash, D. J.; Stark, B. W. V.: The Generation of Carbon Monoxide by Fires in Compartments, Fire Research Note No. 614, Fire Research Station, Borehamwood 1966, zitiert in [PITTS 1995]

[ROCHE 2006]

Roche Lexikon Medizin (4. Auflage): Sauerstoffmangelkrankheit, <http://grips.dimdi.de/rochelexikon/ro32500/r34347.html>

[ROSSEL 2001]

Rossel, V.: 600 Brandtote im Jahr, GDV-Presseforum der Schaden- und Unfallversicherer, www.gdv.de/presseservice/13419.htm

[SHEPPARD ET AL. 1986]

Sheppard, D.; Distefano, S.; Morse, L.; Becker, C.: Acute effects of routine firefighting on lung function, American Journal of Industrial Medicine, Vol. 9, Issue 4, 1986, Pages: 333-340

[SHIMAZU 2001]

Shimazu, T.: Half-life of Blood Carboxyhemoglobin, Chest. 2001, 119, 661-663

[SHOCHAT, LUCCHESI 2004]

Shochat, G.; Lucchesi, M: Toxicity, Carbon Monoxide, emedicine, August 2004, <http://www.emedicine.com>

[SMITH ET AL. 2002]

Smith, T. C.; Heller, J. M.; Hooper, T. I.; Gackstetter, G. D.; Gray, G. C.: Are Gulf War Veterans experiencing illness due to Exposure to Smoke from Kuwaiti Oil well Fires? Examination of Department of Defense hospitalization Data, Am J Epidemiol. 2002 May 15;155(10):908-17

[STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND 2006]

Statistisches Bundesamt Deutschland: Todesursachen in Deutschland – Fachserie, internes Material, 2006

[STEINAU 2002]

Steinau, H.-U.: Der Tod kommt mit dem Rauch, Brand Aktuell, 13/02

[STEWART 1975]

Steward, R.D.: The Effect of Carbon Monoxide on Humans, annu. Rev. Pharmacol. 1975, 15, 409-423

[SÜMMERER 2004]

Sümmerer, H.: Im Blickpunkt: CO-Intoxikation, Rauchgasvergiftung, Druckkammerzentrum Freiburg GmbH, <http://www.hbo-freiburg.de/rauchgas/rauchgasverg.html>

[TAMANINI 1981]

Tamanini, F.: Radiative Emission, CO-Yield and Heat Release in Propane Pool Fires, Paper presented at the Workshop on Mathematical Modeling of Fire Growth, C.S.T.B., Paris, 27-29 July 1981

[TEWARSON 1972]

Tewarson, A.: Some Observations on Experimental Fires in Enclosures, Part I — Cellulosic Materials, Combustion and Flame, Vol. 19 (1972), pp. 101–111, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[TEWARSON 1984]

Tewarson, A.: Fully Developed Enclosure Fires of Wood Cribs, in *20th Symposium (International) on Combustion*, Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1984, pp.1555–1566, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[TIKUISIS ET AL. 1992]

Tikuisis, P.; Kane, D. M.; McLellan, T. M.; Buick, F.; Fairburn, S. M.: Rate of formation of carboxyhemoglobin in exercising humans exposed to carbon monoxide, J. Applied Physiology, (1992), Vol 72, Issue 4, 1311-1319

[TOMASZEWSKI 1999]

Tomaszewski, C.: Carbon monoxide poisoning, Postgraduate Medicine, Vol 105 / No 1 / January 1999

[TONER 1986]

Toner, S. J.: Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1986, zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[TONER ET AL. 1987]

Toner, S. J., Zukoski, E. E., and Kubota, T.: Entrainment, Chemistry and Structure of Fire Plumes, National Bureau of Standards, GCR-87-528 (April, 1987), zitiert aus: Pitts, W. M.: The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, S. 197-237, 1995

[UK 2004]

Großbritannien: Fire deaths: 40-year record low, Fire and Rescue Service Newsletter 4 – May 2004, Office of the Deputy Prime Minister UK

[VFDB-REFERAT 4 2005]

vfdb-Referat 4: vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Entwurf Juni 2005, Hrsg. Hosser, D.

[WHO 2000]

WHO: Carbon Monoxide, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2000

[WHO 2006]

WHO: World Health Organisation Mortality Data base documentation, update 17.11.2006, <http://www.who.int/whosis/mort/download/en/index.html>

[WIECZOREK 2003]

Wieczorek, C.: Carbon Monoxide Generation and Transport from Compartment Fires, Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Mining and Minerals Engineering, 2003

[WIECZOREK ET AL. 2004/1]

Wieczorek, C. J.; Vandsburger, U.; Floyd, J.: An Evaluation of the Global Equivalence Ratio Concept for Compartment Fires: Data Analysis Methods, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 14, Februar 2004, S. 9-31

[WIECZOREK ET AL. 2004/2]

Wieczorek, C. J.; Vandsburger, U.; Floyd, J.: An Evaluation of the Global Equivalence Ratio Concept for Compartment Fires: Part II – Limitations for Correlating Species Yields, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 14, August 2004, S. 175-197

[WIENECKE 1999]

Wienecke, F.: Untersuchungen zum Einsatz der Endoskop-Spezialkamera in Flammen, unveröffentlichtes Material, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1999

[WIKIPEDIA 2006]

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie: Kohlenstoffdioxid, <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid>