

Anja Hofmann-Böllinghaus, Nils Monreal

Quantifizierung von Brandrauch als Grundlage für simulations- basierte Brandschutz- und Entrauchungskonzepte

F 2821

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2012

ISBN 978-3-8167-8734-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Endbericht zum Forschungsprojekt

Quantifizierung von Brandrauch als Grundlage für simulationsbasierte Brandschutz- und Entrauchungskonzepte

im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“

Aktenzeichen	VII.39 / VH 7340
Ausfertigung	1/4 BBR
Auftraggeber	Deichmanns Aue 31-37 53179 Bonn
Zuwendungsbescheid vom	10.09.2009
Zeichen	SF – 10.08.18.7-09.20 / 3 – F20-09-1-002
Projektleiter	Dr. -Ing. Anja Hofmann
Bearbeiter	Nils Monreal, M. Eng.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt-, und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	2
2	Einleitung	3
3	Arbeitspakete	5
4	Bearbeitung der Arbeitspakete	6
4.1	AP1: Identifikation repräsentativer Brandszenarien	6
4.2	AP2: Brandversuche	7
4.2.1	Versuchsaufbau: SDC, SBI, DIN-Rohr	8
4.2.2	Ergebnisse der Versuche	20
4.2.3	Auswertung der Versuche	41
4.3	AP3: Modellbildung	43
4.3.1	Grundlagen	43
4.3.2	Zonenmodelle	44
4.3.3	Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelle	44
4.3.4	Verwendete CFD Programme	50
4.3.5	Vergleich der Rußmodell von CFX und FDS	51
4.3.6	Implementierung eines erweiterter Rußmodells	54
4.3.7	Entwickelte Reaktionsgleichungen	55
4.4	AP4: Numerische Simulation von ausgewählten Brandszenarien	57
5	Zusammenfassung und Ausblick	62
	Literatur	63

1 Abstract

Dieses Forschungsprojekt hatte das Ziel durch quantitative Untersuchung der Rauchmenge und -zusammensetzung verschiedener Materialien ein numerisches Modell zur Rauchenstehung zu entwickeln, das in CFD (Computational Fluid Dynamics) Programmen eingesetzt werden kann, die als Basis für Brandschutz- und Entrauchungskonzepte verwendet werden. Die quantitative Untersuchung von Brandrauch ist besonders schwierig, da die Rauchgasmenge und -zusammensetzung nicht nur von den Materialien abhängen, sondern auch in starkem Maße von den Umgebungs- und Zündbedingungen. Daher wurden Experimente in verschiedenen Prüfeinrichtungen durchgeführt, die so modifiziert wurden, dass sowohl der Wärmeeintrag als auch die Belüftungsbedingungen in den Experimenten variiert werden konnten. Anhand der Versuchsdaten wurde ein Rauchmodell entwickelt, bei dem sowohl die Reaktionsgleichungen materialabhängig angepasst werden können als auch die Abhängigkeit der Rauchgasmenge und -zusammensetzung vom Sauerstoffangebot berücksichtigt wird. Bei den standardmäßig in den Berechnungsprogrammen vorhandenen Modellen blieb der Einfluss des Sauerstoffangebots auf die Rauchgasmenge und -zusammensetzung bisher unberücksichtigt. Mit dem neu-entwickelten Modell ist es nun möglich, die Bedeutung dieses Einflusses auf den zu untersuchenden Fall abzuschätzen und wenn nötig zu berücksichtigen. Neben der Einschränkung der Sichtweite durch Rauch behindert auch besonders die Giftigkeit der Rauchgase die Flucht von Personen aus brennenden Gebäuden. Gerade in der Anfangsphase von Bränden ist es oft der Rauch, der die Selbstrettung von Personen in Gebäuden mehr behindert als die Hitze. Dies gilt ganz besonders für Brände, bei denen wenig Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht, z.B. bei Bränden, die in Verkleidungen oder in Dämmschichten entstehen. Das neu-entwickelte numerische Modell wurde in das Programm CFX (Ansys) implementiert und durch Vergleich mit den Brandversuchen im kleineren Maßstab validiert. Danach wurde das Modell auf ein Brandszenario im Großmaßstab angewendet. Zur Verdeutlichung der Unterschiede zu dem standardmäßig in FDS angebotenen Modell wurden zwei Brandszenarien im Großmaßstab mit FDS berechnet.

2 Einleitung

Dieser Abschlussbericht stellt die Ergebnisse, die im Rahmen des Forschungsprojekts „Quantifizierung von Brandrauch als Grundlage für simulationsbasierte Brandschutz- und Entrauchungskonzepte“ erarbeitet wurden, zusammen.

Ziel dieses Projekts war es, die Zusammensetzung von Brandrauch, der bei der Verbrennung von Baustoffen und Einrichtungsgegenständen entsteht, unter Berücksichtigung der Ventilationsbedingungen chemisch-analytisch zu untersuchen. In der Literatur zu findende Angaben sind zumeist nur qualitativ und beschränken sich entweder auf toxische Bestandteile des Brandrauchs oder die Rauchdichte. Die Schwierigkeit bei der quantitativen Untersuchung des Brandrauchs besteht darin, dass Menge und Zusammensetzung des Rauchs nicht nur von den Materialien abhängen, sondern auch in sehr starkem Maße von den Belüftungsbedingungen (Sauerstoffangebot), dem Wärmeeintrag und der Art der Zündquelle. Die Untersuchungsergebnisse hängen damit sehr stark von der verwendeten Prüfeinrichtung ab. Daher ist es notwendig, die Untersuchungen in verschiedenen Prüfeinrichtungen durchzuführen, in denen es möglich ist, sowohl verschiedene Materialien zu untersuchen als auch den Wärmeeintrag und das Sauerstoffangebot zu variieren. Die Verwendung verschiedener Prüfeinrichtungen hatte außerdem den Vorteil, dass verschiedene Zündquellen zum Einsatz kamen. Es wurden im Forschungsprojekt Brandversuche unter Verschwelungsbedingungen in der Rauchdichtekammer (SDC) und im DIN-Rohr sowie mit offener Flamme (jeweils bei kontrollierter Luftzufuhr) durchgeführt. Die Prüfeinrichtungen mussten so umgebaut werden, dass zusätzlich zu der standardmäßig vorgesehenen Versuchsdurchführung eine definierte Sauerstoffzufuhr möglich wurde und die Rauchgasmenge und -zusammensetzung unter verschiedenen Prüfbedingungen erfasst werden konnte. Danach konnten die zeitlichen Raten der Freisetzung von Rauch und von einzelnen Bestandteilen der zur Verfügung stehenden Menge an (Luft-)Sauerstoff genau zugeordnet werden. Die Versuche wurden mit unterschiedlichem Wärmeeintrag unter Verwendung unterschiedlicher Zündquellen wiederholt, um beide Einflüsse qualitativ und quantitativ zu erfassen.

Die Gesamtmenge des entstehenden Rauches wurde durch Messung des in die Versuchsanlage eintretenden Luftvolumenstromes sowie des abzuführenden Rauchgasvolumenstromes gemessen. Zusätzlich wurde der Massenverlust der brennbaren Feststoffe durch Messungen mit einer Abbrandwaage quantifiziert.

Mittels Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie wurden die Volumenkonzentrationen der im Brandrauch enthaltenen gasförmigen Bestandteile online gemessen. Zu-

sätzlich wurde die optische Dichte des Brandrauches mittel Infrarotlicht-Abschwächung sowie die Partikelbeladung mittels eines gravimetrischen Verfahrens ermittelt.

Die aus den Messungen erhaltenen Daten wurden verwendet, um den empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen zur Verfügung stehendem Sauerstoff und Rauchproduktion in das numerische Modell einzubringen.

Es wurde mit den Programmen ANSYS-CFX und FDS gearbeitet. Mit diesen Programmen wurden drei ausgewählte typische Szenarien der Rauchausbreitung in Wohn- und öffentlichen Gebäuden (Eingangshalle) untersucht. Besonderer Wert wurde auf die Entwicklung eines Sub-Modells gelegt, dass die Zusammensetzung der Rauchgase (z.B. Partikelbeladung, Anteil an Kohlenmonoxid) mit der optischen Dichte des Rauches korreliert. Dadurch kann ein qualitativer Sprung in der Anwendung von Rechenprogrammen zur Vorhersage der Rauchfreihaltung (Erhalt der Sichtbarkeit) von Flucht- und Rettungswegen bzw. Angriffswegen der Feuerwehr erreicht werden und die Wirkung des hochtoxischen Kohlenmonoxids findet Berücksichtigung. Bisherige Modelle, z. B. in FDS, bieten diese Möglichkeit nicht. Um diesen Unterschied zu verdeutlichen, wurden zwei der drei Szenarien mit dem standardmäßig angebotenen Modell mit FDS berechnet und ein Szenario mit dem neu-entwickelten Modell mit CFX.

Im nächsten Abschnitt sind zunächst die einzelnen Arbeitspakete aufgeführt. Die Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete ist in den danach folgenden Abschnitten detaillierter dargestellt.

3 Arbeitspakete

AP1 Identifikation repräsentativer Brandszenarien

AP2 Brandversuche

AP2.1 Versuche im DIN-Rohr (schwelende Verbrennung)

AP2.2 Versuche in der NBS Smoke Chamber (Rauchkammer)

AP2.3 Versuche im halbtechnischen Maßstab (SBI-Apparatur)

AP2.4 Versuchsauswertung

AP3 Modellbildung

AP3.1 Entwicklung eines generalisierten stöchiometrischen Modells für die Verbrennung von Baustoffen und anderen heterogenen Materialgemischen mit organischen Bestandteilen

AP3.2 Entwicklung eines mathematischen Modells für die Volumenquellichte (Zeitgesetz) von Brandrauch aus AP 3.1

AP4 Numerische Simulation von ausgewählten Brandszenarien

AP4.1 Implementierung der in AP 3 entwickelten Modelle in ANSYS-CFX und FDS

AP4.2 Vorhersage der Rauchausbreitung in drei ausgewählten Szenarien

- Brand in einem mehrgeschossigen Wohngebäude bei Vorhandensein/Fehlen einer RWA,
- Brand in einer Eingangshalle

4 Bearbeitung der Arbeitspakete

Die Arbeitspakete 1 und 2 wurden parallel bearbeitet, da die Versuchsergebnisse auch die Bestimmung der repräsentativen Brandszenarien und der Materialien beeinflusst haben. Es wurde eine Materialauswahl getroffen und Versuche unter verschiedenen Belüftungsbedingungen und unterschiedlichem Wärmeeintrag in die Proben durchgeführt. Es wurde sowohl die Rauchdichte als auch die Rauchgaszusammensetzung bestimmt. Erste Messungen, um Partikelgröße und Partikelanzahl im Rauch zu bestimmen wurden ebenfalls durchgeführt. Zusätzlich wurde bereits parallel mit der Bearbeitung des Arbeitspaketes 3 begonnen, um den Stand der Technik bei den Rauchmodellen in den numerischen Programmen CFX (ANSYS) und FDS (NIST) zu bestimmen und damit die Implementierung eines neuen Rauchmodells vorzubereiten. Die Versuchsdaten, die einen empirischen Zusammenhang zwischen dem im Brandraum vorhandenen Sauerstoff und der Rauchproduktion ergeben, waren die Grundlage für ein erstes Rauchmodell, bei dem die Rauchproduktion nicht mehr fest voreingestellt ist, sondern abhängig vom zur Verfügung stehenden Sauerstoff variabel ist. Damit wurde ein neues Rauchmodell entwickelt und eingesetzt, das deutlich über die bisher zur Verfügung stehenden Rauchmodelle hinausgeht, indem es berücksichtigt, dass die Rauchproduktion nicht nur von den brennenden Materialien abhängt, sondern auch in starkem Maß vom Sauerstoffangebot. Der empirische Zusammenhang wurde für die ausgewählten Materialien ermittelt und die Übertragbarkeit auf andere Materialien abgeschätzt.

4.1 AP1: Identifikation repräsentativer Brandszenarien

Bei der Identifikation von repräsentativen Brandszenarien war es wichtig, eine Auswahl von Brandszenarien zusammenzustellen, die die Einflussgrößen Material, Wärmeeintrag bzw. Art der Zündquelle und Sauerstoffangebot berücksichtigen und Variationen dieser Einflussgrößen erlauben. Es sollte die Rauchproduktion in Abhängigkeit von den ausgewählten Materialien, der Größe des Wärmeeintrags bzw. der Art der Zündquelle und vom Sauerstoffangebot untersucht werden können. Dabei sollte die Rauchproduktion zum Einen über die Extinktion bestimmt werden können, aber zum Anderen auch die Partikelanzahl und -größe untersucht werden können. Daher wurden die Rauchkammer, das DIN-Rohr und das Kalorimeter ausgewählt. Rauchkammer, DIN-Rohr und Kalorimeter mussten so umgebaut werden, dass die Daten, die für die Entwicklung des numerischen Modells notwendig waren, gewonnen werden konnten. Die Rauchkammer bildet in der Standardanwendung den Übergang von der flammenden Verbrennung in die verschwelende Verbrennung ab, da die Kammer luftdicht verschlossen ist und während der Verbrennung normalerweise kein Sauerstoff nachgeführt wird.

Die Rauchkammer wurde genutzt, um die Bedingungen für die Rauchproduktion von ausgewählten Materialien gezielt anzupassen. Als repräsentative Materialien wurden ausgewählt:

- Material A: PUR (repräsentativ für Gebrauchsgegenstände: Matratze Polstermöbel)
- Material B: PUR (schwer entflammbar; Bauprodukt)

In der Rauchkammer wurden bereits verschiedene Strahlungsstärken verwendet. Zusätzlich wurde die Rauchkammer so umgebaut, dass Zuluft definiert zugeführt werden kann. Die Einflüsse der Einstrahlung und der Zuluft-Bedingungen bei den verschiedenen Materialien wurde untersucht. Es ist bereits eine zusätzliche Rauchentnahmestelle eingebaut worden, um die Menge und Größe der während des Versuchs entstehenden Rauchpartikel zu messen. Da diese Umbauten aufwändig waren, konnten nicht alle geplanten Versuche in der Projektzeit durchgeführt werden. Da die umgebaute Rauchkammer jetzt aber zur Verfügung steht, können im Nachgang des Projekts im Rahmen der noch laufenden Promotion weitere Versuche durchgeführt werden, die dann mit der Dissertation veröffentlicht werden. Zusätzlich wurden Versuche im DIN-Rohr durchgeführt, das aber ebenfalls zunächst umgebaut werden musste. Es stellte sich heraus, dass das Variieren der Belüftungsbedingungen (Sauerstoffangebot) im DIN-Rohr experimentell einfacher zu realisieren war als in der Rauchkammer, so dass für diese Daten gut für die Entwicklung des numerischen Modells verwendet werden konnten. Der Einfluss größere Probengeometrien unter gut ventilerten Bedingungen wurde im Kalorimeter untersucht (umgebaute Single Burning Item Test-Apparatur). Sowohl das DIN-Rohr als auch das Kalorimeter wurden so umgebaut, dass auch die Rauchgaszusammensetzung gemessen werden konnte. Die zunächst geplante Messung des Massenverlustes auch im DIN-Rohr, wie sie in der Rauchkammer und im Kalorimeter realisiert wurde, ließ sich experimentell nicht realisieren, da das Probengewicht sehr gering ist und die Versuchsapparatur in sich geschlossen und sehr schwer ist, so dass weder eine Waage in die Apparatur eingebracht werden konnte noch ein sinnvolles Messen von Gewichtsunterschieden der gesamten Apparatur möglich war.

4.2 AP2: Brandversuche

Es wurden Versuche in der Rauchkammer, in der Single Burning Item Test-Apparatur (standardmäßig nach DIN EN 13823) und im Kalorimeter (umgebaute Single Burning Item Test-Apparatur) (AP 2.1, AP 2.2, AP 2.3) und im DIN-Rohr durchgeführt. Die Daten der durchgeführten Versuche sind im AP 2.4 dargestellt, Daten einer Auswahl der durchgeführten Versuche sind im Abschnitt „Ergebnisse der Versuche“ aufgelistet. Die

unterschiedlichen verwendeten Versuchsaufbauten werden im nächsten Abschnitt beschrieben und exemplarisch einige der Versuchsdaten näher erläutert.

4.2.1 Versuchsaufbau: SDC, SBI, DIN-Rohr

Smoke Density Chamber (SDC)

In Abbildung 1 ist zunächst die Rauchkammer mit angeschlossenem FTIR-Spektrometer - für die Bestimmung der Rauchgaszusammensetzung - dargestellt. In Abbildung 2 ist das in der Rauchkammer verwendete Cone-Heizelement dargestellt, dessen Leistung variiert werden kann (25 kW/m^2 und 50 kW/m^2).



Abbildung 1: Rauchkammer mit angeschlossenem FTIR-Spektrometer



Abbildung 2: Cone-Heizelement mit regelbarer Wärmestromdichte

In den Abbildungen 3 sind Ergebnisse für das Material B in der Rauchkammer exemplarisch dargestellt - einmal mit Zündflamme (siehe auch Abbildung 2) und einmal ohne Zündflamme für CO_2 , CO und SO_2 .

Das Material B wurde in der Rauchkammer (unterventilierte Verhältnisse) untersucht. Dabei wurde standardmäßig einmal mit Zündflamme und einmal ohne Zündflamme untersucht. Die Zündflamme dient dazu, Pyrolysegase, die aus der Probe durch die aufgebrachte Strahlung (Cone-Heizelement) austreten, zu entzünden. Wird der Versuch ohne Zündflamme durchgeführt, entzünden sich die Pyrolysegase erst sobald die Bedingungen für Selbstentzündung erreicht werden. Das angeschlossene FTIR-Spektrometer nimmt die Spektren der Gase im Rauchgas auf (Abbildung 3). Aus den Spektren lässt sich qualitativ und quantitativ die Rauchgaszusammensetzung bestimmen. In Abbildung 3 sind die Verläufe der Volumenanteile von CO , CO_2 und SO_2 exemplarisch dargestellt. Bei den Versuchen mit Zündflamme entstanden wesentlich mehr CO und CO_2 als bei dem Versuch ohne Zündflamme, da sich die aus der Probe austretenden Pyrolysegase durch die Zündflamme schneller entzündeten als ohne.

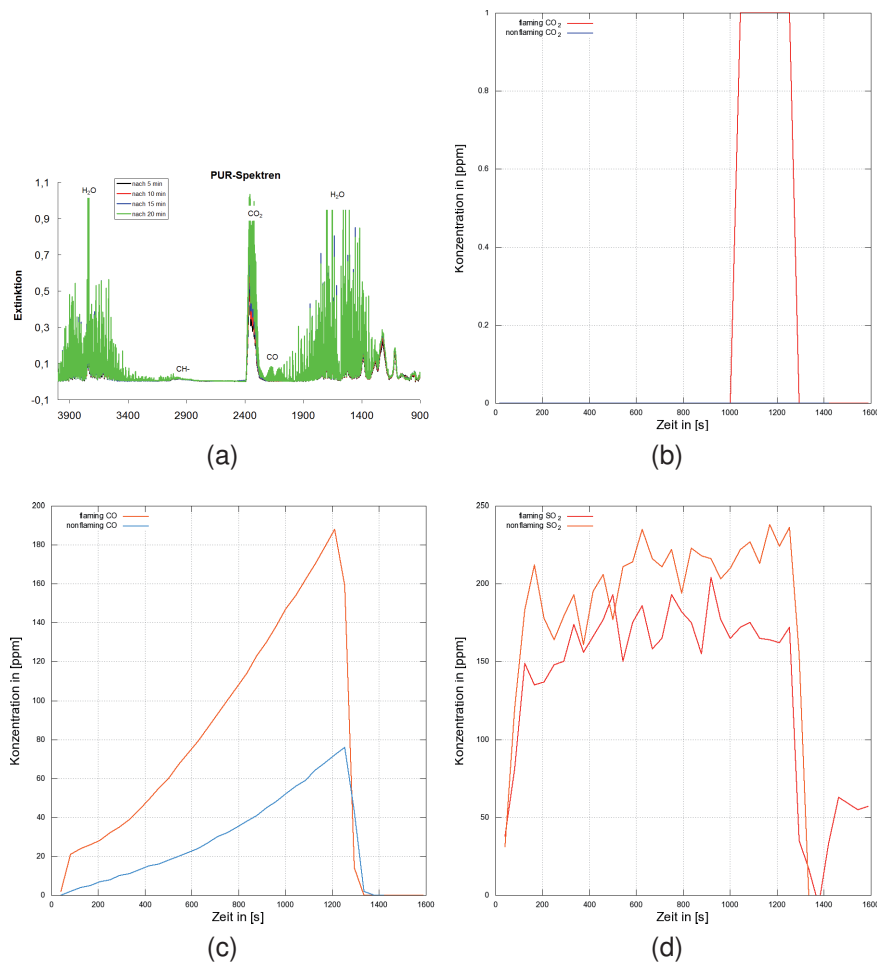


Abbildung 3: Extinktionsspektrum und Volumenanteile von CO_2 , CO und SO_2 von Material B in der Rauchkammer: (a) Extinktionskurve; (b) Kohlenstoffdioxidkonzentration; (c) Kohlenstoffmonoxidkonzentration und (d) Schwefeldioxidkonzentration.

Umbau der Rauchkammer

Die Rauchkammer wurde so umgebaut, dass Anfangsbedingungen mit reduziertem Sauerstoff-Volumenanteil eingestellt werden können. Dazu wurde ein zusätzlicher Einlass für Stickstoff montiert, der bereits die Reduktion des Sauerstoff-Volumenanteils in der Kammer auf 10% erlaubt. Weitere Versuche mit höherem Spüldruck sind geplant, um den Sauerstoffgehalt der Kammer weiter abzusenken. Der Umbau der Rauchkammer wird von der Strömungsmodellierung der Rauchkammer begleitet, um eine möglichst homogene Verteilung des Stickstoff/ Sauerstoff-Gemisches in der Kammer zu erreichen. In der Abbildung 4 ist der Umbau der Rauchkammer mit zusätzlichem Stickstoffeinlass, zusätzlichem Ein- und Auslass für die Sauerstoffmessung in der Kammer und steuerbarem Auslass gezeigt. Standardmäßig wird der Versuch mit dem in der Kammer vorhandenen Sauerstoff durchgeführt, der dann während des Versuchs verbraucht wird – allerdings wird dieser Verbrauch im Standardversuch nicht gemessen.

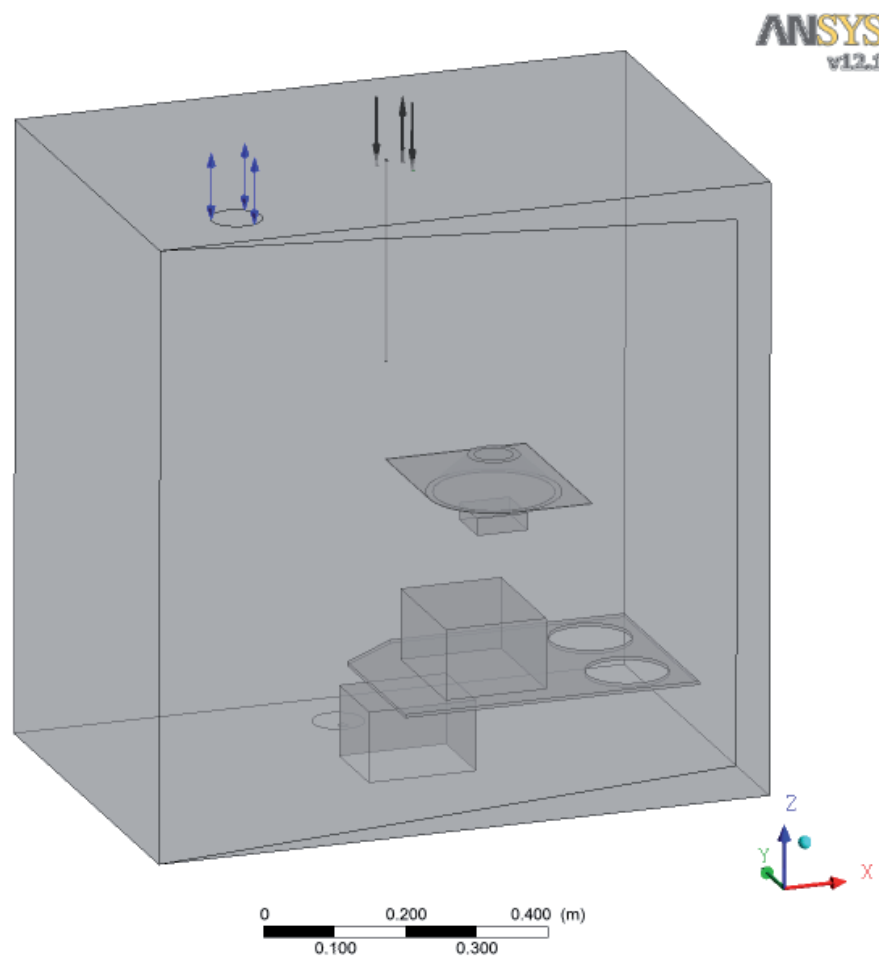


Abbildung 4: Umbau der Rauchkammer mit zusätzlichem Einlass für Stickstoff (linker schwarzer Pfeil); Oberer steuerbarer Auslass - Vent (blau); Sauerstoffmessung (rechten schwarze Pfeile)

Um den Umbau nicht zu kostenintensiv zu gestalten wurden vorab Simulationen mit verschiedenen Stickstoffeinlässen berechnet. In der Abbildung 6 sind vier untersuchte Modelle dargestellt. Das erste zeigt am unteren Vent einen Stickstoffeinlass mit 1/2 Zoll Durchmesser und einer 'Halbkugel' über dem Einlass um die Strömungsgeschwindigkeiten zu verringern. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Einströmung nicht optimal ist, da ein großer Teil des Stickstoffs sofort durch das obere Vent die Kammer verlässt. Die nächste Variante um die Geschwindigkeiten am Einlass zu verringern war eine Platte über dem Einlass. Hier zeigt sich eine schnelle Strömung am Boden der Kammer von über 10m/s und große Wirbel im oberen Teil der Kammer.

Die dritte und vierte Variante zeigen ein Rohr am Boden der Kammer mit kleinen Löchern (alle 15cm) aus denen der Stickstoff nach unten in die Kammer gespült wird. Außerdem sind ein bzw. beide Rohrenden offen. Hier strömt der Stickstoff sehr schnell an der rechten Kammerseite entlang nach oben. Dies hat den Vorteil, dass kaum Stickstoff durch das obere Vent rausgespült wird. Dieser Aufbau ist zwar effektiv aber auch

sehr aufwendig und teuer.

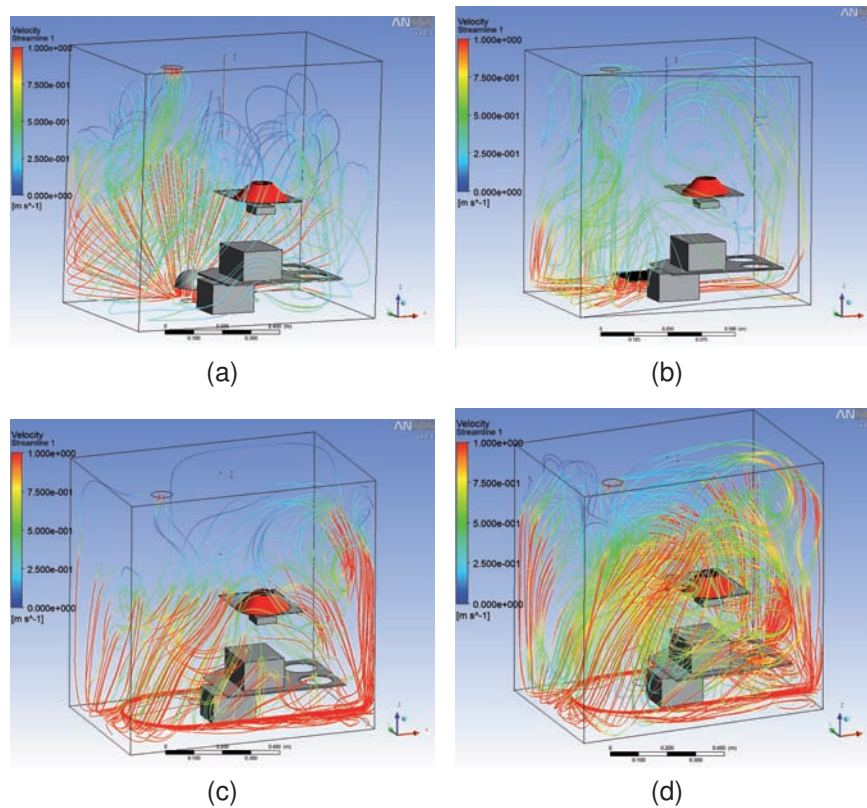


Abbildung 5: Modellerte Umbaumöglichkeiten der SDC zur Stickstoffflutung: (a) halb Kugel, (b) Platte über dem Einlass; (c) Rohr mit Löchern und auf einer Seite offen und (d) Rohr mit Löchern auf beiden Seiten offen.

Die Wahl fiel im Endeffekt auf die Variante mit der Stickstoffeinspülung von oben. Diese ist sehr effektiv, da kaum reiner Stickstoff oben durch das Vent austritt und sich die Kammer so gleichmäßig füllt. Die Simulationsergebnisse einer transienten Berechnung sind auf Abbildung 6 dargestellt. Nach 600s sinkt der Sauerstoffgehalt in der Kammer bis auf 8,8%. Diese Werte wurden im Versuch bestätigt. Das zeigt, dass die Strömungsverhältnisse in der Kammer gut sehr modelliert sind.

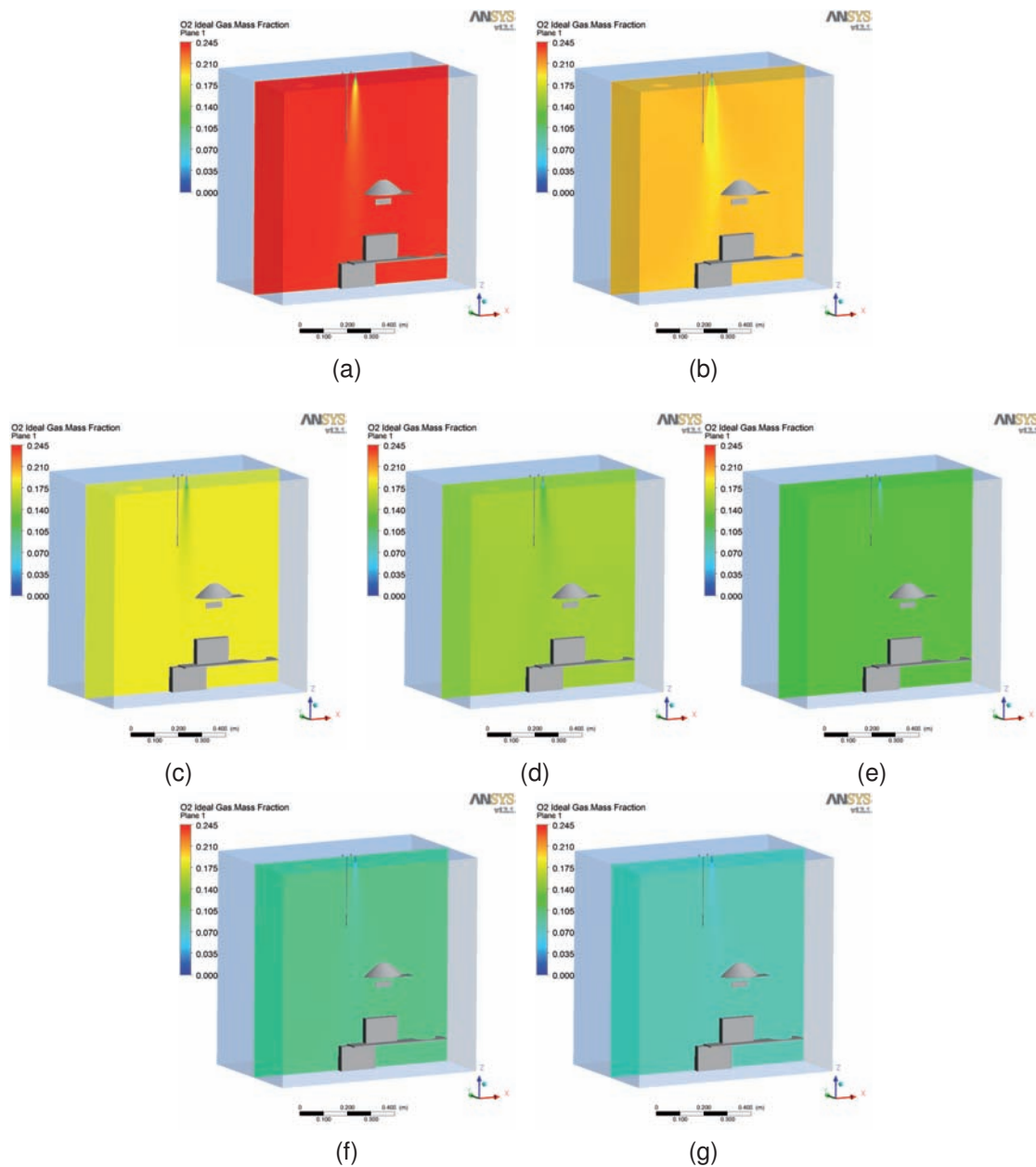


Abbildung 6: SDC Flutung mit 0,9g/s Stickstoff:

- (a) nach 5s: $\varnothing O_2 = 24,5m\%$
- (b) nach 100s: $\varnothing O_2 = 20,8m\%$
- (c) nach 200s: $\varnothing O_2 = 17,5m\%$
- (d) nach 300s: $\varnothing O_2 = 14,8m\%$
- (e) nach 400s: $\varnothing O_2 = 12,5m\%$
- (f) nach 500s: $\varnothing O_2 = 10,5m\%$
- (g) nach 600s: $\varnothing O_2 = 8,8m\%$.

Damit die Kammer möglichst genau in der Modellierung den Versuchen entspricht, wurde eine Parameterstudie durchgeführt mit unterschiedlichen Temperaturen des 'Cone-Heater'. Es wurde auch die gleiche Größe der Messzelle zur Kalibrierung in der Simulation nachgestellt um die gewollten 25 und 50 kW/m^2 zu erreichen. In der Tabelle 1

sind die Werte der Parameterstudie dargestellt. Auf der Abbildung 7 sind die Wandtemperaturen bei 25 und 50 kW/m^2 dargestellt. Zum Vergleich sind in Abbildung 8 für diese Zahlen auch IR-Bilder abgebildet. Außerdem wurden die Temperaturen mit Thermoelementen in der Kammer an neun Stellen bei 25 und 50 kW/m^2 gemessen. Diese sind auf Abbildung 9 dargestellt.

Temp. Cone Heater in $^{\circ}C$	Strahlung Messfläche in W/m^2	Temp. Wand in $^{\circ}C$
590	27430	31,9
570	23553	30,9
580	25507	31,4
585	25655	31,6
750	50942	37,0
760	61766	37,6
765	62548	37,7
770	61509	38,1
773	66315	38,4
780	56407	38,7
785	66231	38,8
790	64463	39,0

Tabelle 1: Parameterstudie um die Temperatur des Cone-Strahlers für 25 und 50kW herauszufinden. Die passenden Werte sind rot eingefärbt.

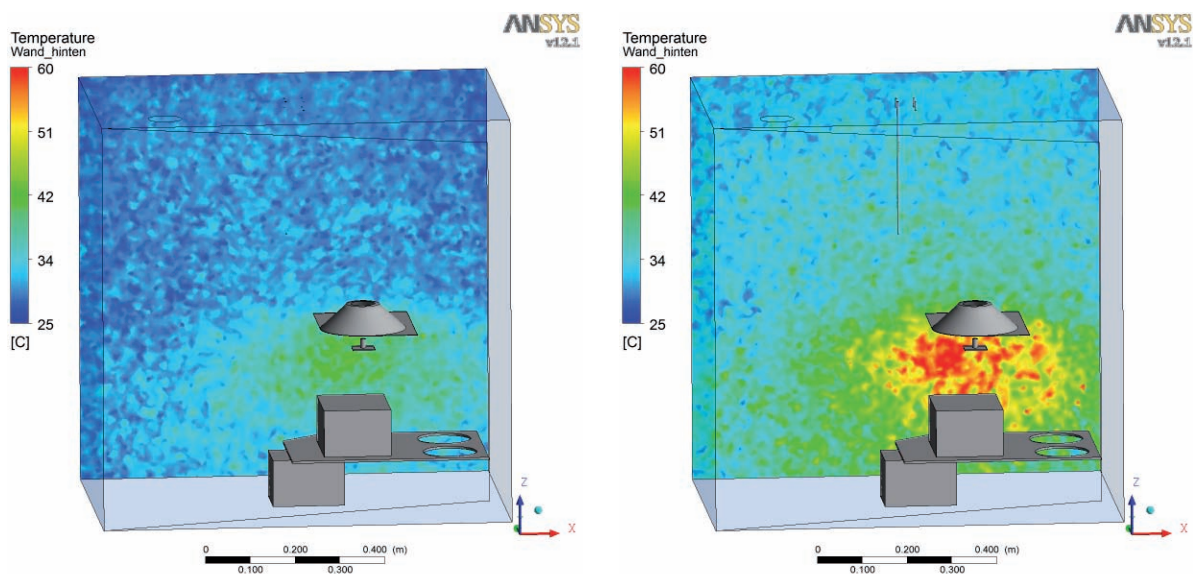


Abbildung 7: Bilder der Temperaturverteilung auf der Rückwand in der SDC bei 25 (links) und 50 (rechts) kW

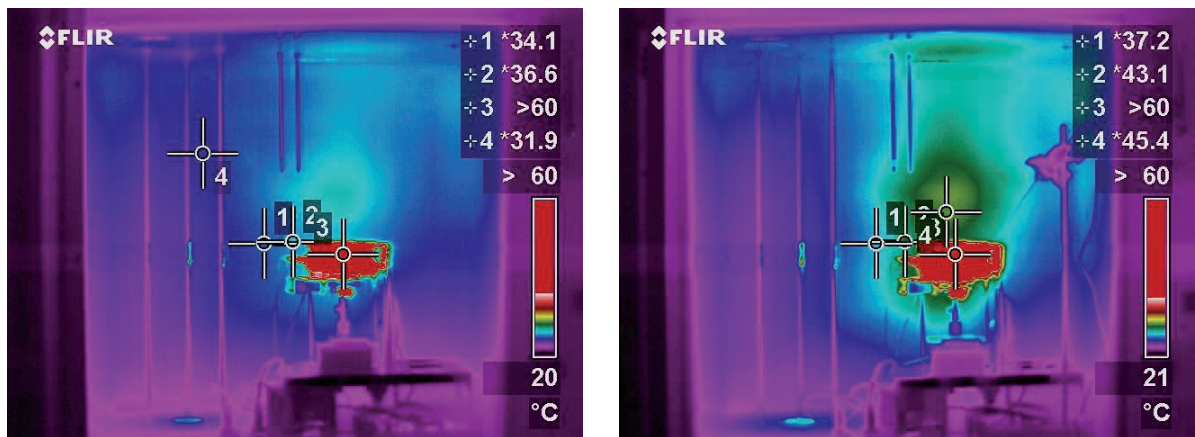


Abbildung 8: Bilder des SDC bei 25 (links) und 50 (rechts) kW mit einer Thermokamera

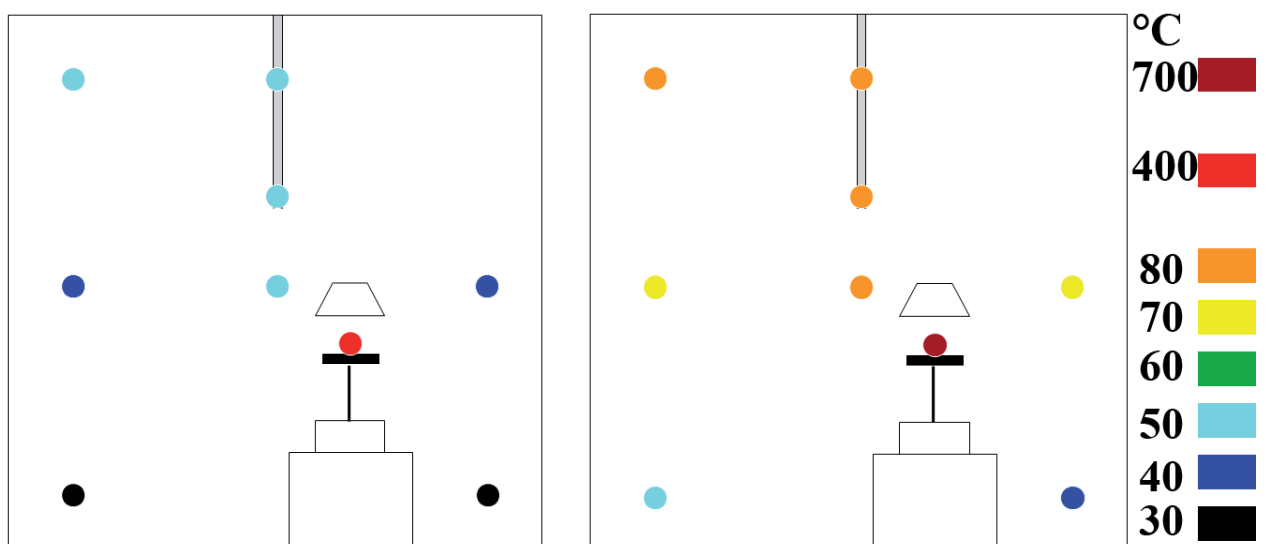


Abbildung 9: Temperaturverteilung in der SDC gemessen mit Thermoelementen

Die Thermobildaufnahmen von Abbildung 8 und mit CFX berechneten Wandtemperaturen von Abbildung 7 zeigen noch einen Unterschied. Es ist erkennbar, dass die höchsten Wandtemperaturen etwa 20cm über dem Cone liegen im Versuch. In der Simulation liegen die höchsten Wandtemperaturen unter dem Cone. Dies liegt daran, dass sich der Cone in der Rückwand der SDC reflektiert und dadurch die IR-Kamera zu hohe Temperaturen anzeigt. Versuch und Modell stimmen sehr gut überein.

Single Buring Item (SBI) Test

Abbildung 10 zeigt die zum Kalorimeter umgebaute Single Burning Item Test-Apparatur. In beiden Versuchsapparaturen werden der Masseverlust der Probe und die Rauchdichte während des Versuchs aufgezeichnet. Zusätzlich wird mit dem FTIR-Spektrometer die Rauchgaszusammensetzung bestimmt.



Abbildung 10: Kalorimeter (umgebaute Single Burning Item Test-Apparatur)

Im Standard-SBI-Test wird nach 180 s Vorlaufzeit der Hilfsbrenner gezündet, der zur Kalibrierung der sogenannten Nulllinie dient. 300 s nach Versuchsbeginn wird dann auf den Hauptbrenner umgeschaltet und die Probe beflammt (Abbildung 11, unten rechts). Ausgehend von der Nulllinie können nach Umschalten auf den Hauptbrenner (und damit Beflammung der Probe) anschließend die Wärmefreisetzungsrate und Rauchfreisetzungsrates (anhand der Lichtschwächung) der Probe bestimmt werden.

In den Abbildungen 11 ist das Material B im Standard-SBI-Test (DIN EN 13823) mit Ergebnissen für die Lichtschwächung, den Sauerstoff-Volumenanteil und der Kohlenstoffdioxid-Volumenanteil dargestellt. Bei diesem Material sank die Lichtschwächung nach Umschalten auf den Hauptbrenner kurzzeitig auf ca. 74% und steigt nach weiteren ca. 100 s wieder auf 95%, d.h. die Rauchentwicklung der Probe war relativ schwach. Auch die Wärmefreisetzungsrate und der Sauerstoffverbrauch (der zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate über die Sauerstoffverbrauchsmethode maßgeblich ist) waren bei diesem Material gering. Es fand kein seitlicher Flammenfortschritt auf der Probe statt.

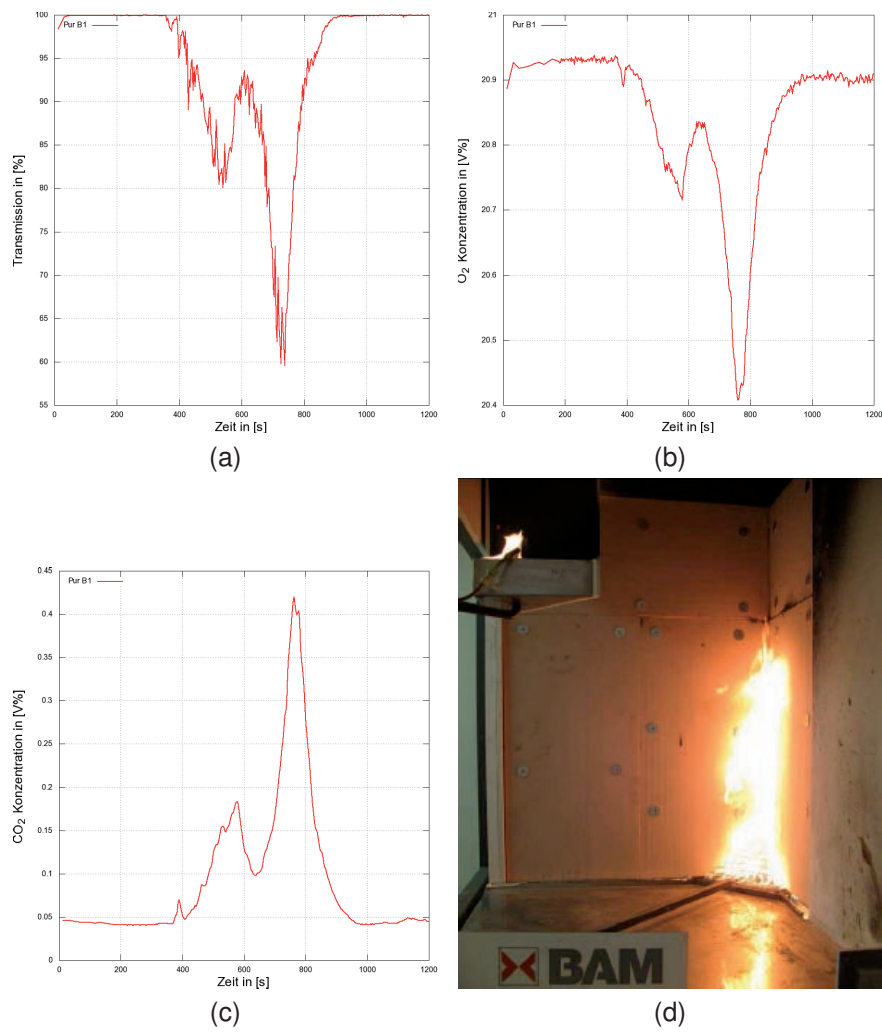


Abbildung 11: Material B (PUR B1) im Single Burning Item Test (Standardtest): (a) Lichtschwächung; (b) Sauerstoffkonzentration; (c) Kohlenstoffdioxidkonzentration und (d) Bild vom Brandtest.

DIN-Rohr

In der Abbildung 12 ist der Versuchsaufbau des DIN-Rohres dargestellt. Für die Versuche im DIN-Rohr wurden einige Vorversuche durchgeführt, um eine ideale Probengröße zu ermitteln. Bei der Standardprobengröße lag die Konzentration einiger gemessener Gase sehr niedrig, so dass eine quantitative Bestimmung dieser Gase kaum möglich war. Deswegen wurde die Probengröße abweichend von der Norm etwas vergrößert von $2 \times 5 \times 270 \text{ mm}^3$ auf $10 \times 10 \times 270 \text{ mm}^3$. Durch diese Anpassung liessen sich die FTIR-Daten besser auch quantitativ auswerten. Die quantitative Auswertung war für die Erstellung des numerischen Modells notwendig, da nur mit den quantitativen Ergebnissen das numerische Modell an die jeweiligen Materialien und Versuchsbedingungen angepasst werden konnte. Eine rein qualitative Auswertung für die Gaszusammensetzung reicht dafür nicht aus, da ja gerade die quantitative Veränderung in der Gaszusammensetzung auf Grund der veränderten Versuchsbedingungen (Wärmeeintrag und Luftzufuhr) in das Modell integriert wurde. Die weiteren Abbildungen 13 zeigen einen exemplarisch ausgewerteten Versuch von Polyurethan bei 400°C und einer Sauerstoffkonzentration von 21Vol%.

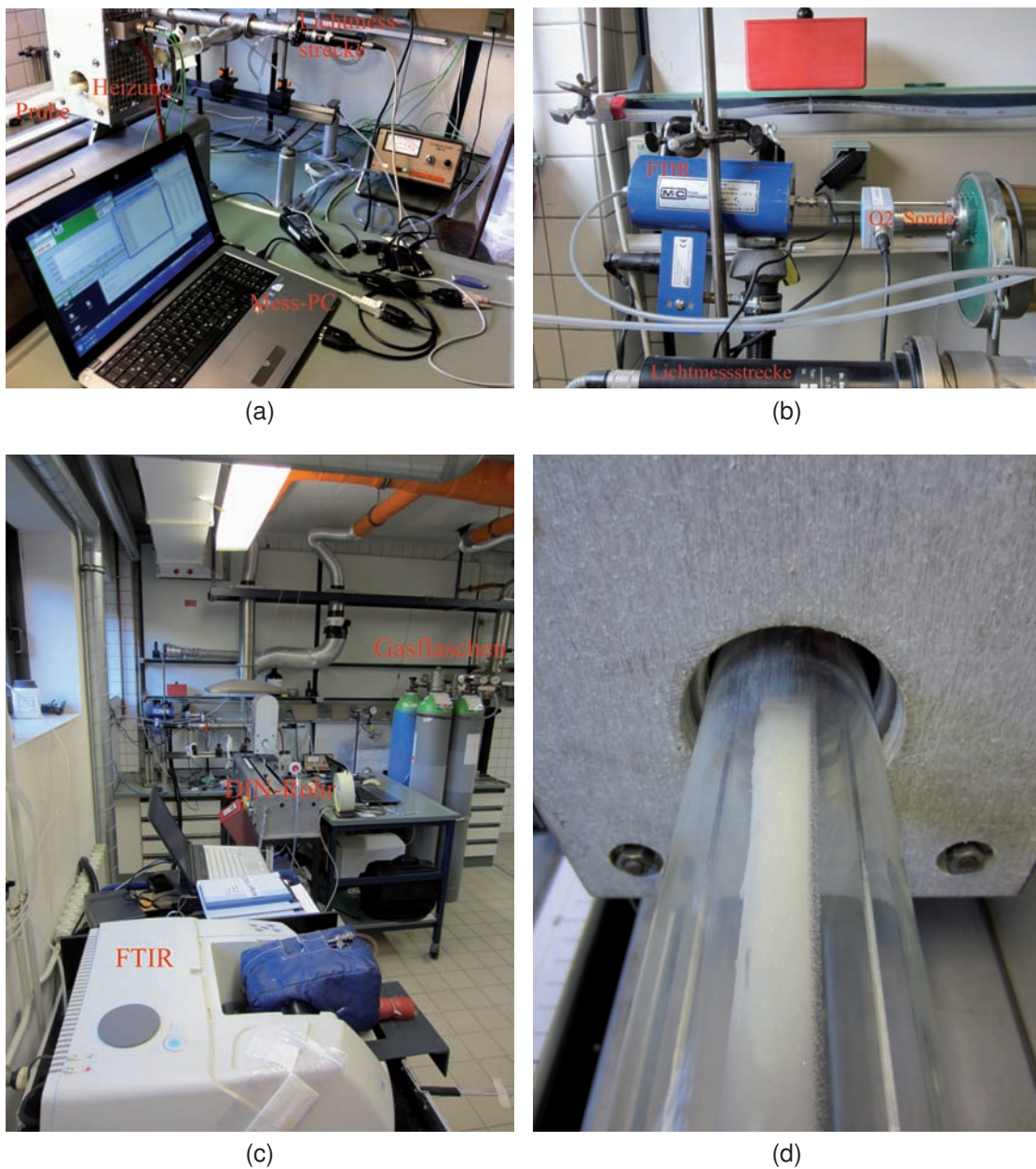


Abbildung 12: Versuchsaufbau DIN-Rohr: (a) Probe im DIN-Rohr, Heizung, Lichtmessstrecke, Mess-PC; (b) Anschlüsse vom FTIR, Sauerstoffsonde, Lichtmessstrecke; (c) FTIR, Gasflaschen und DIN-Rohr und (d) DIN-Rohr mit Probe (PUR) vor Versuchsbeginn

Das Material A wurde im DIN-Rohr bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen und Temperaturen getestet, um den quantitativen Zusammenhang zwischen Rauchgaszusammensetzung und Sauerstoffkonzentration und Temperatur untersuchen zu können. In den Abbildungen 13 ist die Ausgangsform der Probe, sowie nach Versuchsende, die CO_2 Gaskonzentration und Lichtschwächung bei 400°C und einer Sauerstoffkonzentration von 21 Vol% exemplarisch dargestellt.

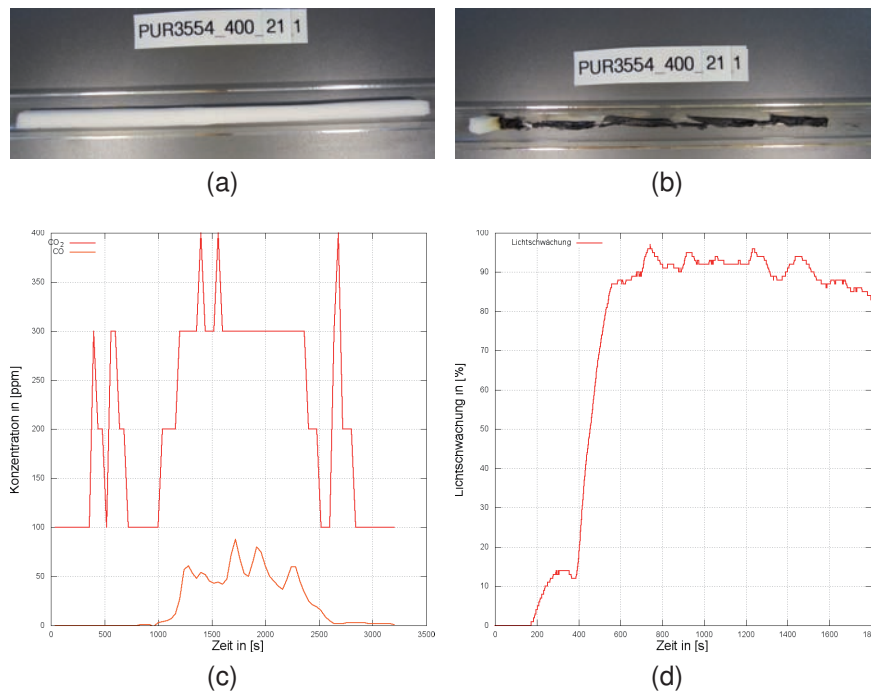
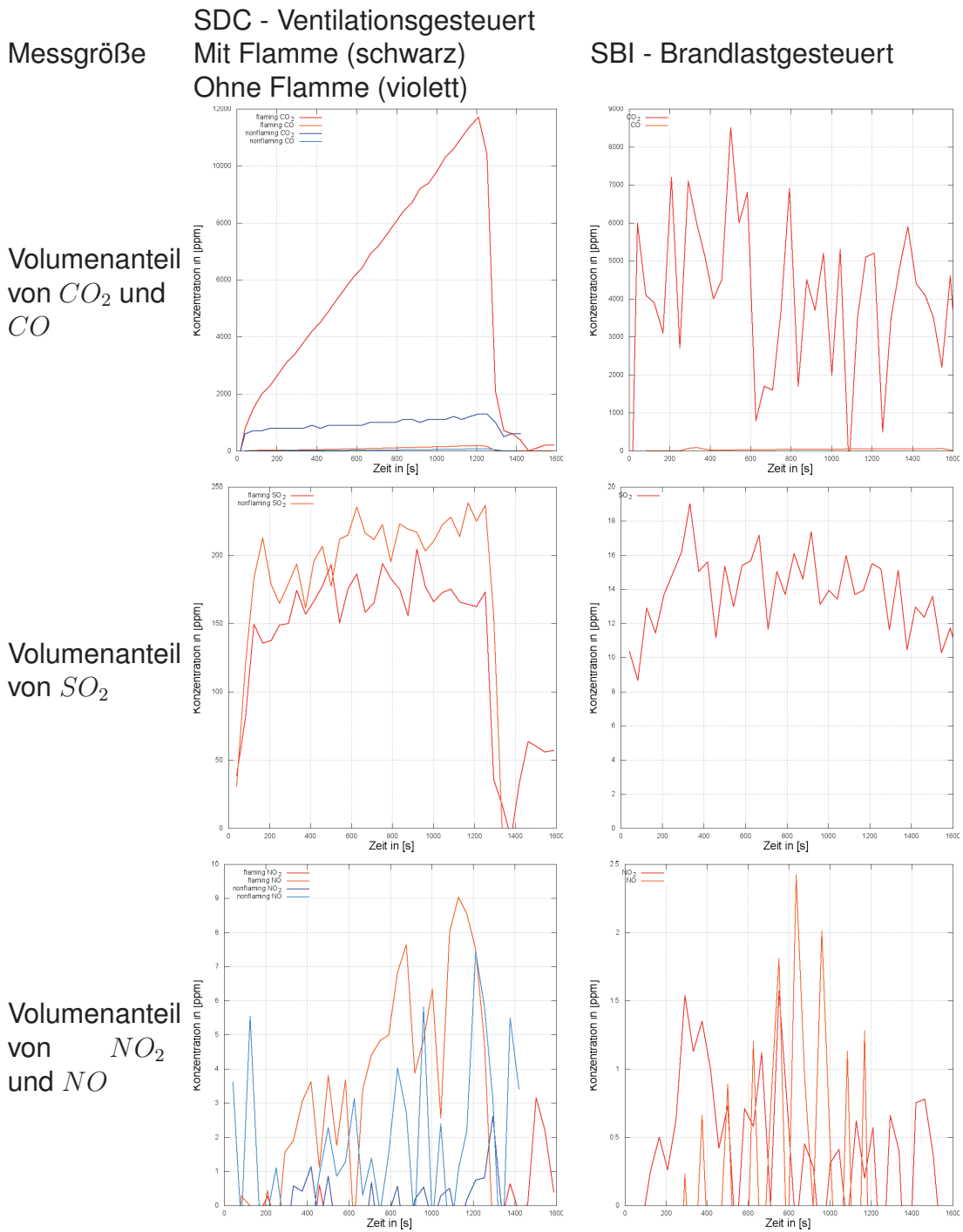


Abbildung 13: Material A (PUR) im DIN-Rohr: (a) Ausgangsmaterial; (b) nach dem Versuch mit 400°C und 21% Sauerstoff; (c) Gaskonzentrationen und (d) Lichtschwächung.

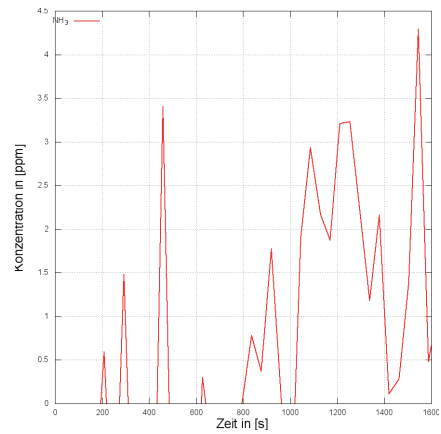
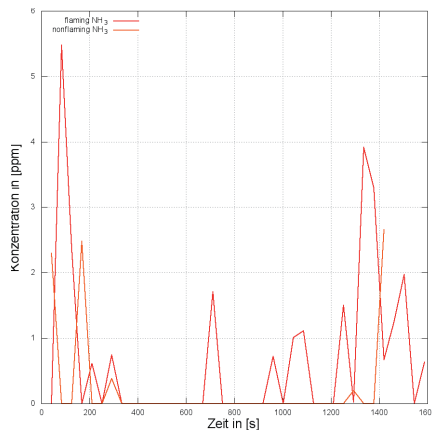
4.2.2 Ergebnisse der Versuche

Im Folgenden sind weitere Versuchsdaten zusammengestellt. Es wurden Versuchsreihen im SBI, der SDC und dem DIN-Rohr für die zwei ausgewählten Materialien durchgeführt. Die Auswertungen sind in den folgenden Diagrammen dargestellt für Material A (PUR für Gebrauchsgegenstände) und für Material B (PUR für Bauprodukte). Der deutlichste Unterschied zeigte sich zwischen den gemessenen Volumenanteilen der Pyrolyse- und Rauchgase und in den Masseverlusten für die Materialien. Das Bauprodukt Material B brannte weniger und setzte somit auch insgesamt geringere Mengen an Gasen frei. Dies gilt zum Beispiel für CO_2 , NO , NO_2 , NH_3 , H_2O . Für einige Stoffe gab es keinen signifikanten Unterschied wie zum Beispiel für HCl oder HCN . Die SBI-Versuche zeigten für das Bauprodukt eine geringere Wärmefreisetzung und einen geringeren Sauerstoffverbrauch. Sowohl beim SDC-Versuch als auch beim SBI-Versuch rief der Rauch des Bauprodukts (Material B) eine geringere Lichtschwächung hervor als der des Materials A.

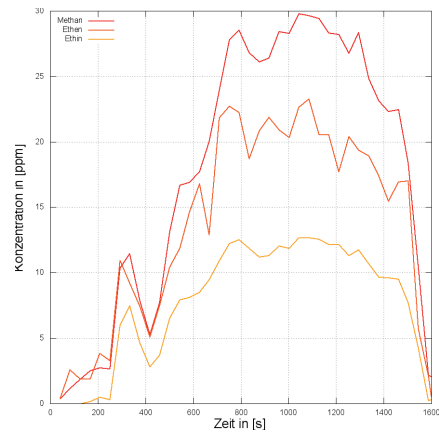
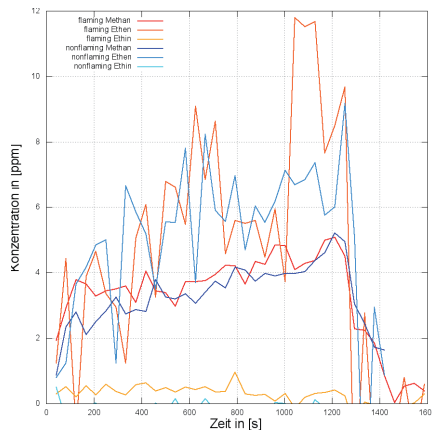
Material B: PUR SCHAUM B1 (schwerentflammbar)



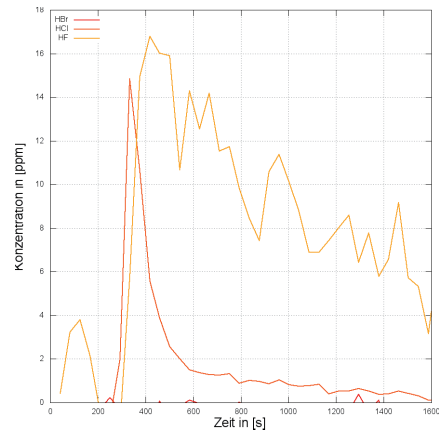
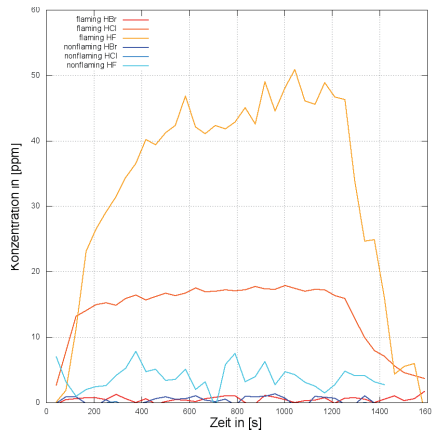
Volumenanteil von NH_3



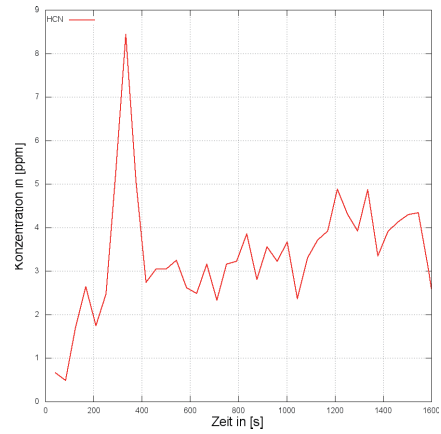
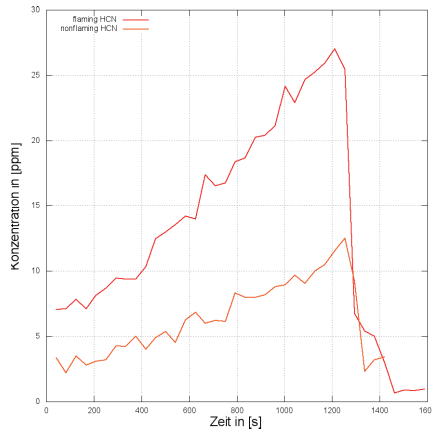
Volumenanteil von Methan, Ethen, Ethin



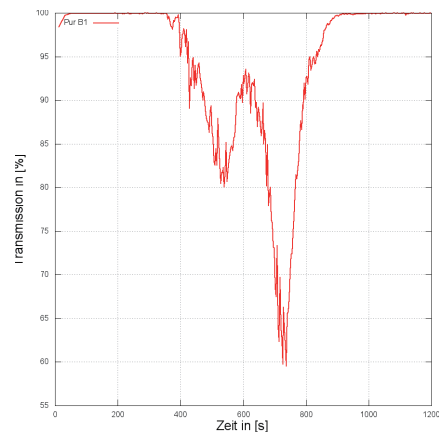
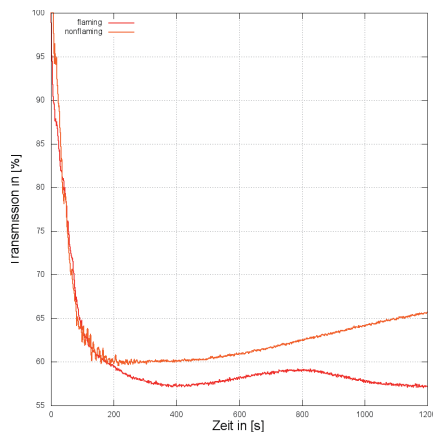
Volumenanteil von HF , HCl und HBr



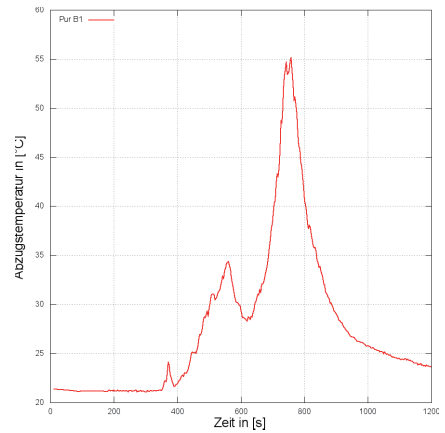
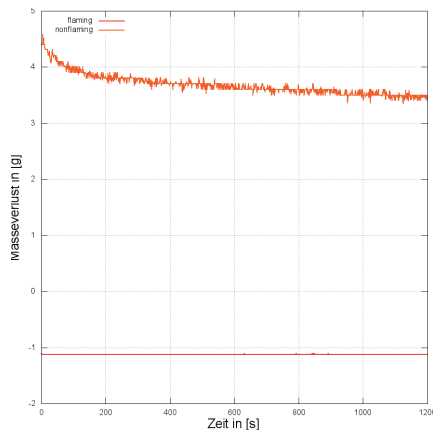
Volumenanteil von HCN



Lichtschwächung

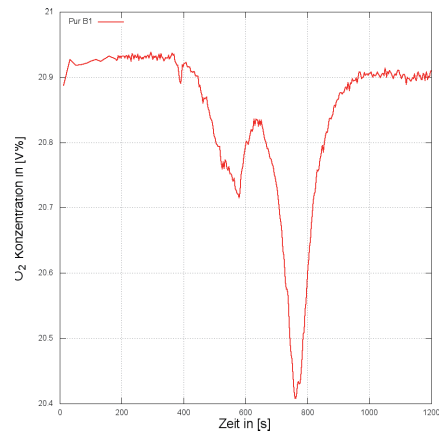


Masseverlust

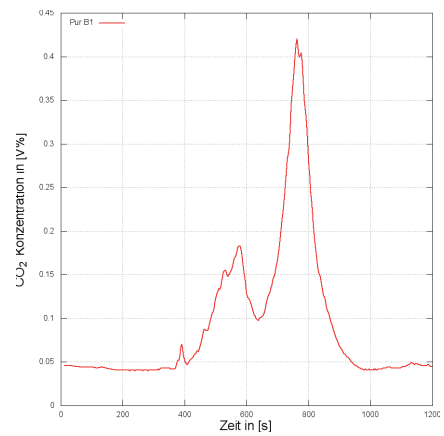


Temp (Abzug SBI)

Volumenanteil von O₂ (SBI)



Volumenanteil
von CO_2



Optische
Dichte

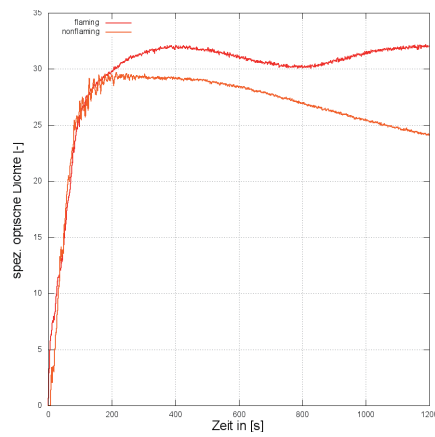
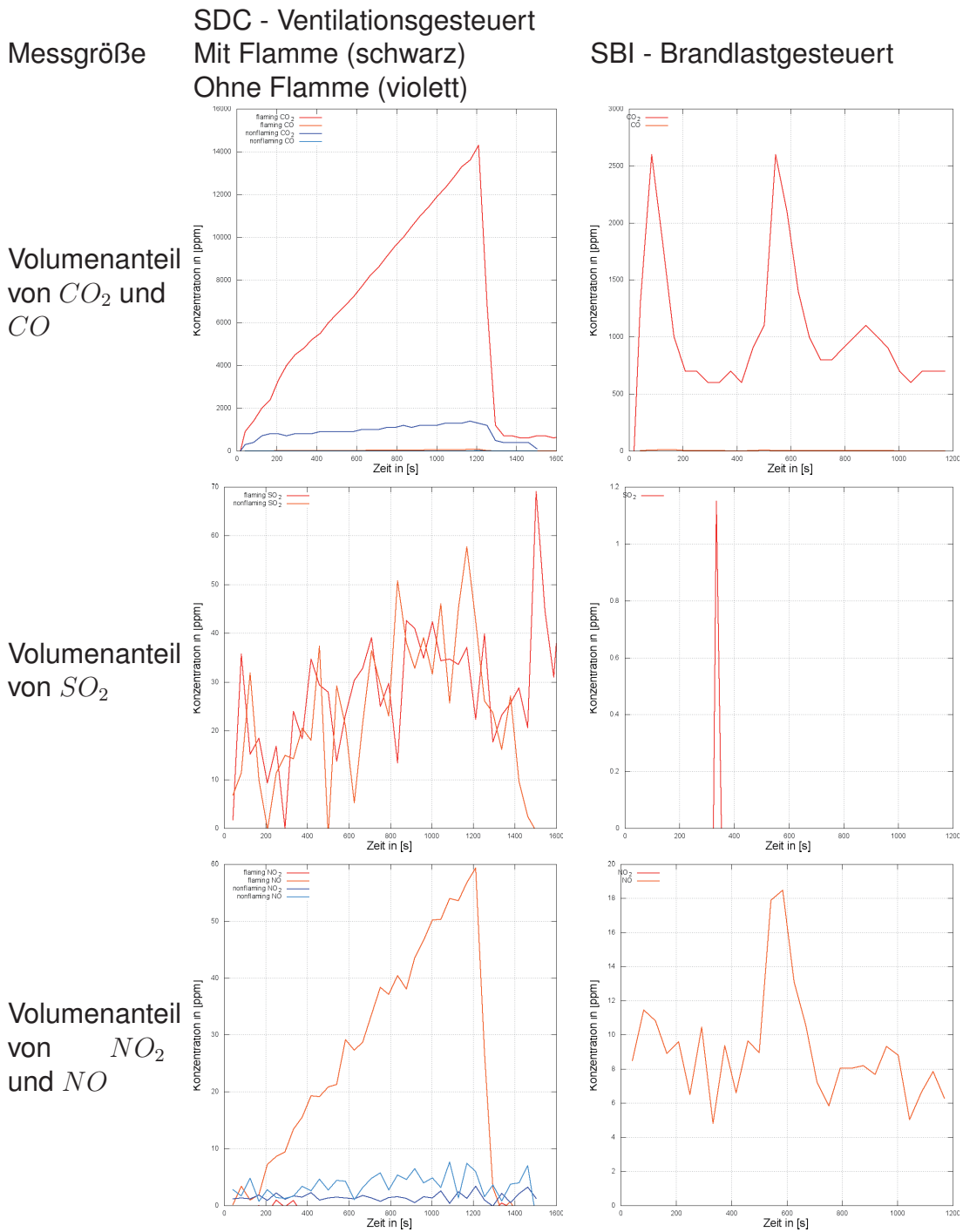
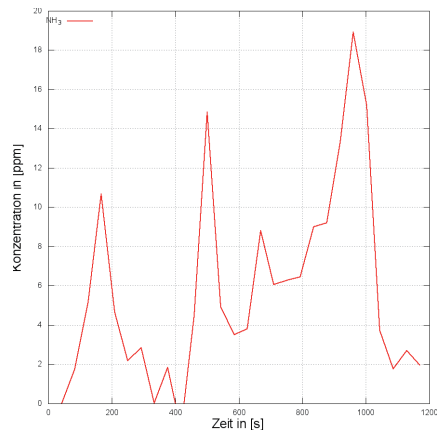
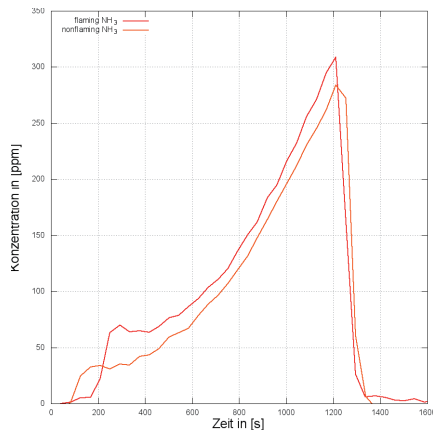


Tabelle 2: Zusammenstellung der Messwerte für Material A (PUR, nicht flammgeschützt) für unterschiedliche Ventilationsbedingungen und Zündquellen

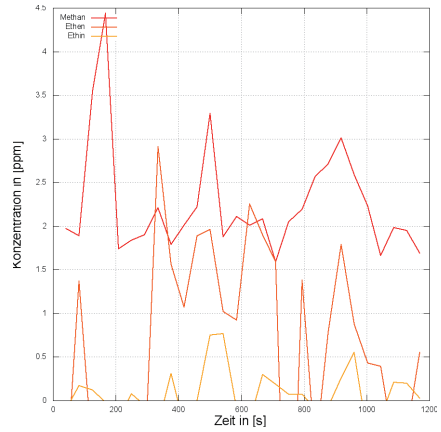
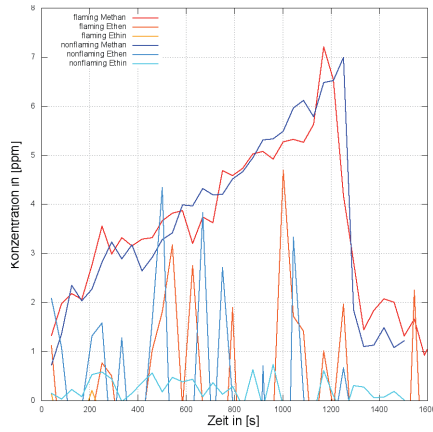
Material A: PUR (ohne Flammschutz)



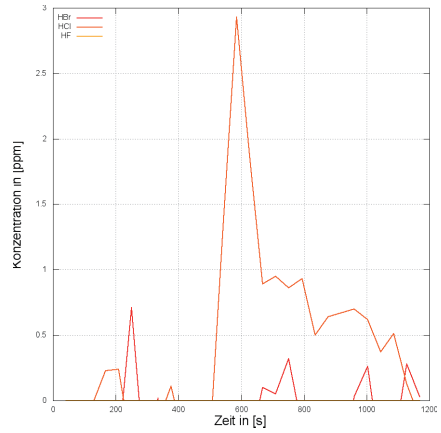
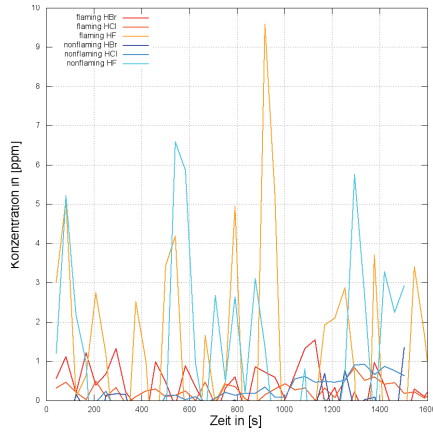
Volumenanteil von NH_3



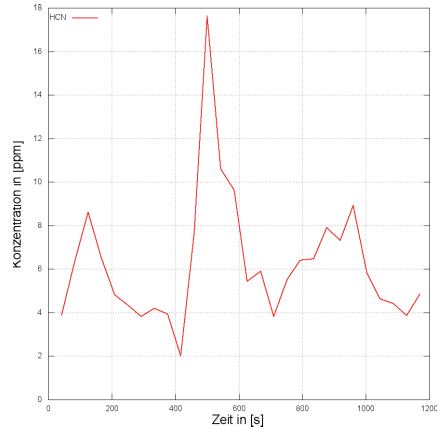
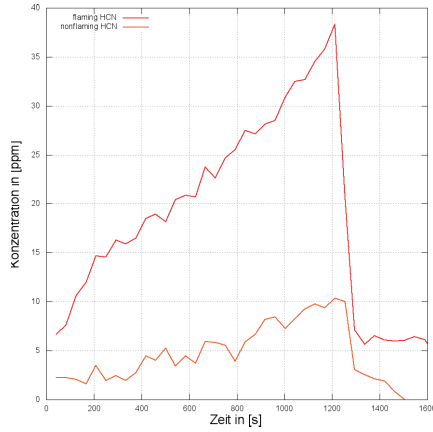
Volumenanteil von Methan, Ethen, Ethin



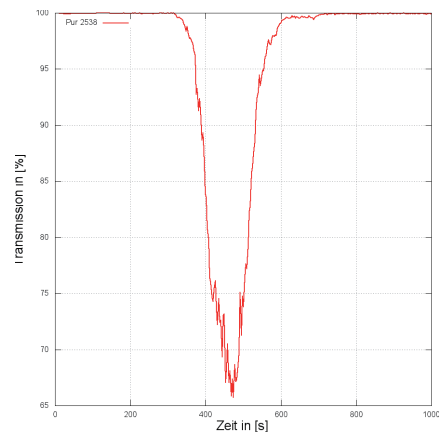
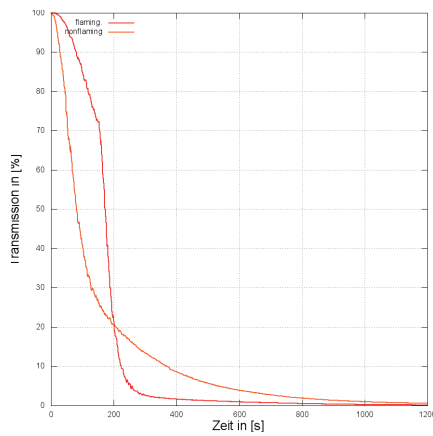
Volumenanteil von HF , HCl und HBr



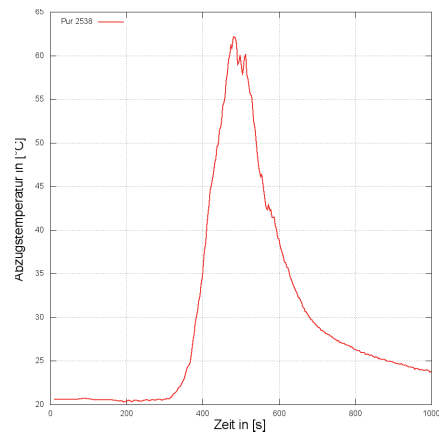
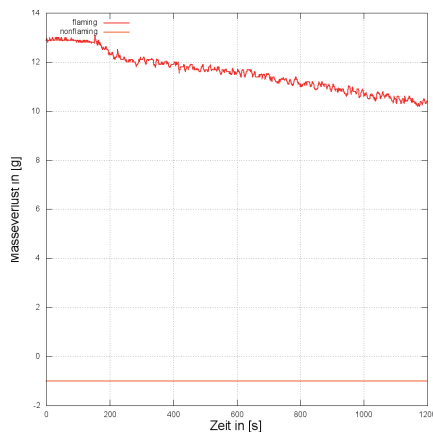
Volumenanteil von HCN



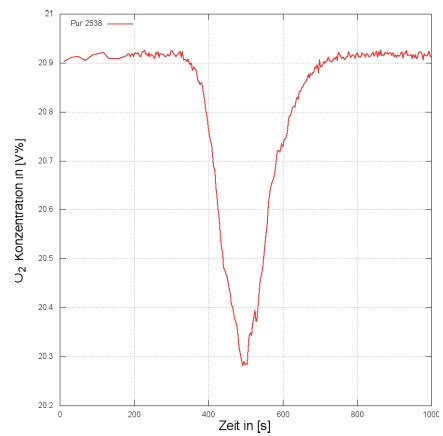
Lichtschwächung



Masseverlust

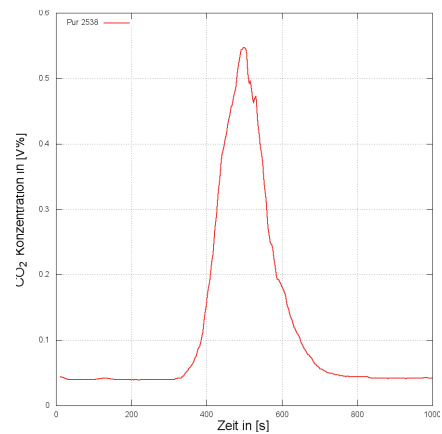


Temp (Abzug SBI)



Volumenanteil von O₂ (SBI)

Volumenanteil
von CO₂



Optische
Dichte

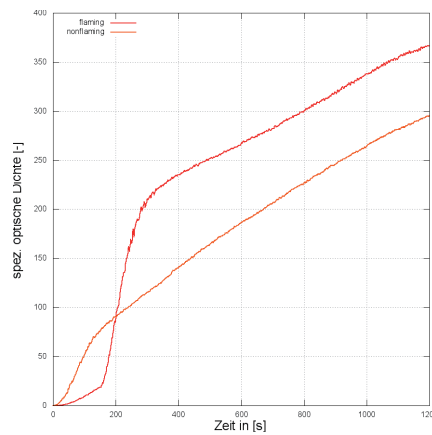


Tabelle 3: Zusammenstellung der Messwerte für Material A (PUR, nicht flammgeschützt) für unterschiedliche Ventilationsbedingungen und Zündquellen

Die im DIN-Rohr durchgeführten Versuche sind in den folgenden Tabellen für die Versuchsreihen bei 21Vol%, 18Vol%, 15Vol% und 0Vol% Sauerstoff dargestellt. Zusätzlich wurde die Temperatur variiert auf 400 und 700°C. Abgebildet sind die Lichtschwächung und gemessenen Konzentrationen von den Rauchgasen CO₂, CO, SO₂, NO₂, NO, NH₃, Methan, Ethen, Ethin, HF, HCl, HBr, HCN.

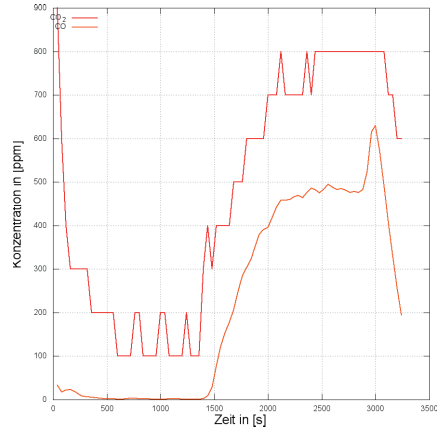
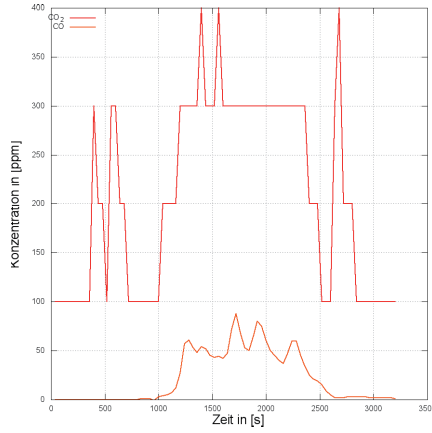
Material A: PUR (ohne Flammschutz) im DIN-Rohr bei 21Vol% Sauerstoff

Messgröße

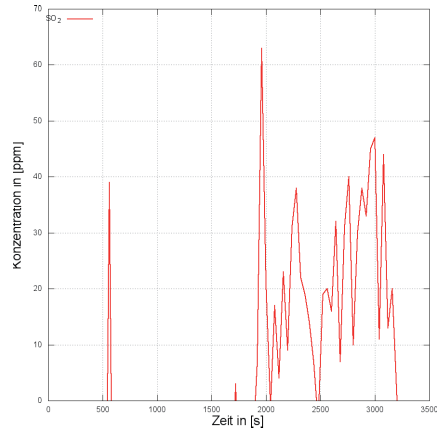
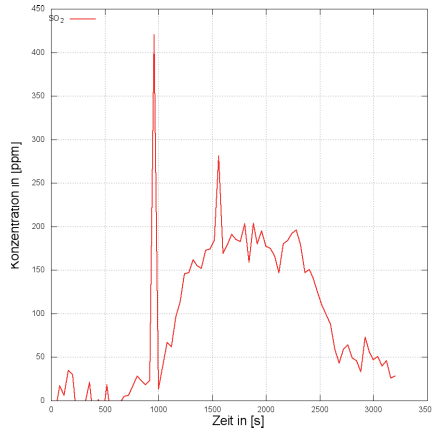
400°C

700°C

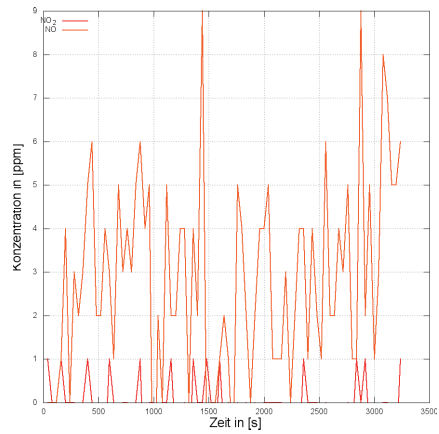
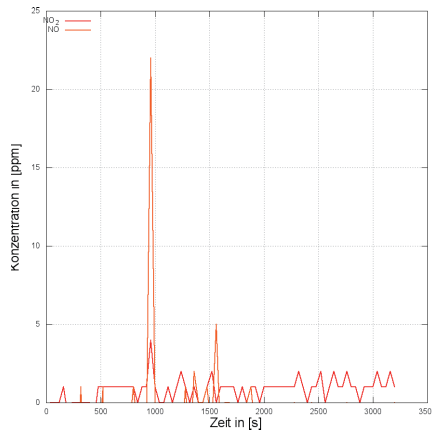
Volumenanteil
von CO_2 und
 CO



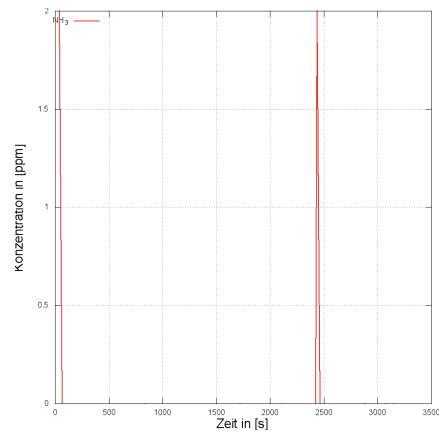
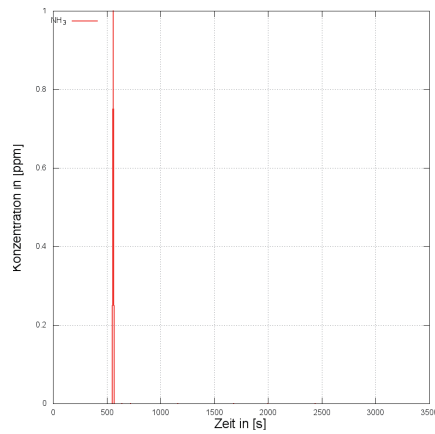
Volumenanteil
von SO_2



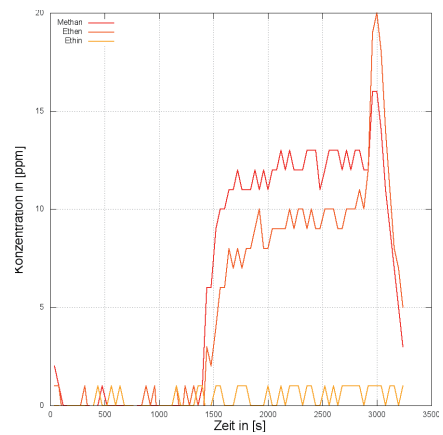
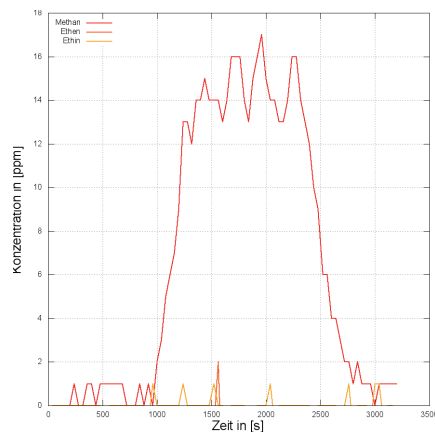
Volumenanteil
von NO_2
und NO



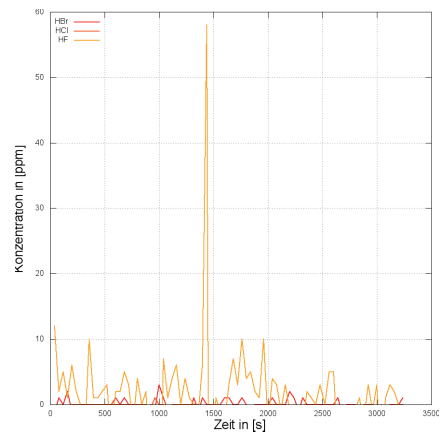
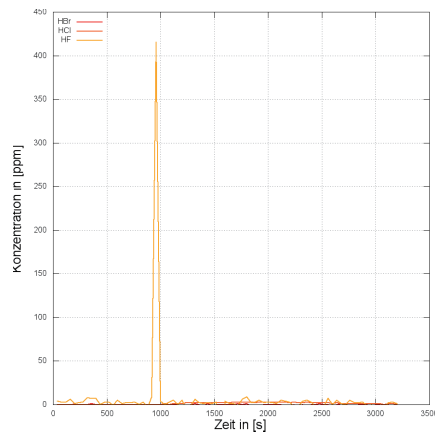
Volumenanteil
von NH_3



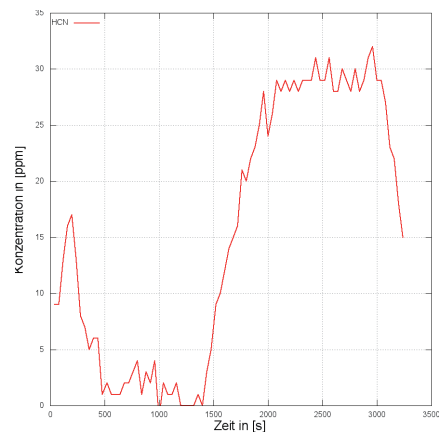
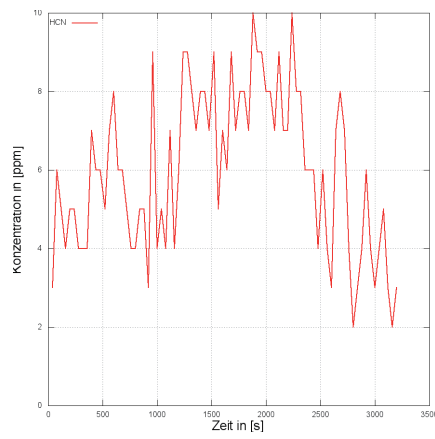
Volumenanteil
von Methan,
Ethen, Ethin



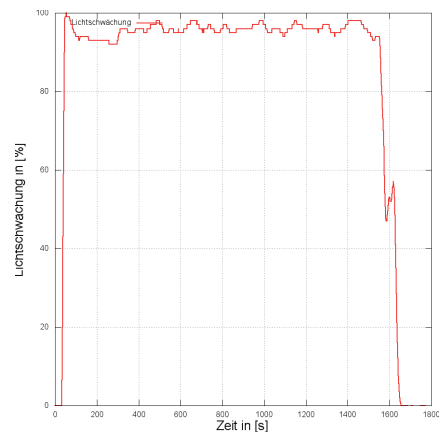
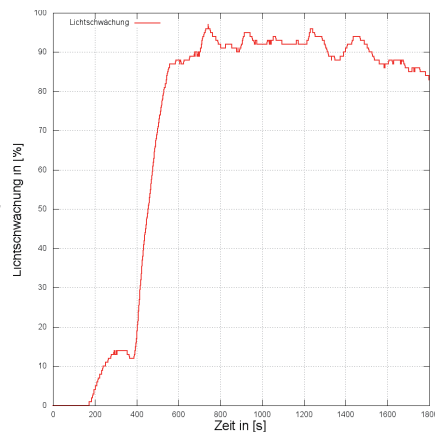
Volumenanteil
von HF ,
 HCl und
 HBr



Volumenanteil
von *HCN*



Lichtschwächung

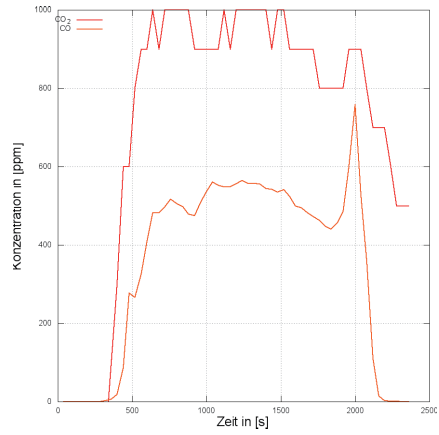
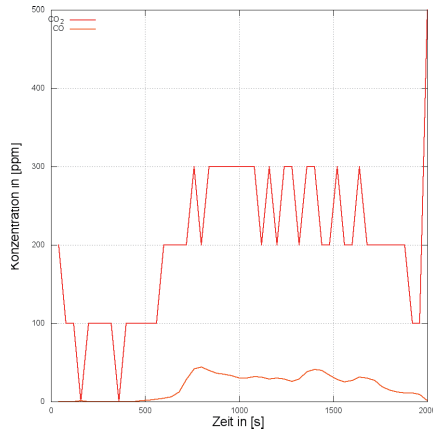


Material A: PUR (ohne Flammschutz) im DIN-Rohr bei 18Vol% Sauerstoff

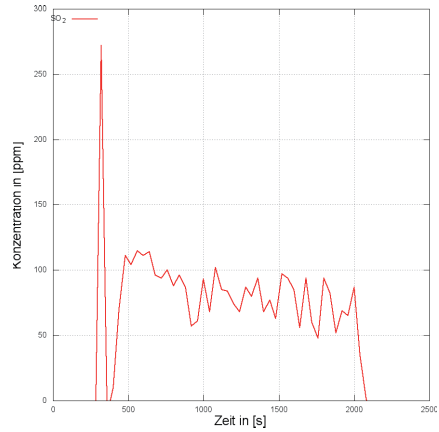
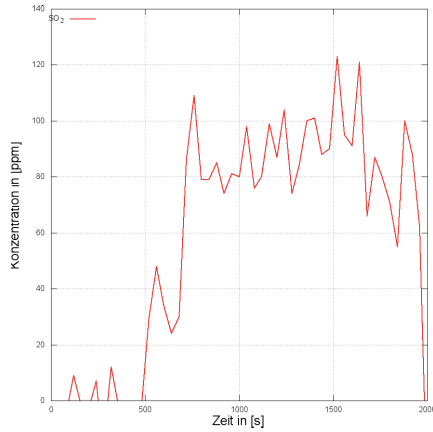
Messgröße $400^{\circ}C$

$700^{\circ}C$

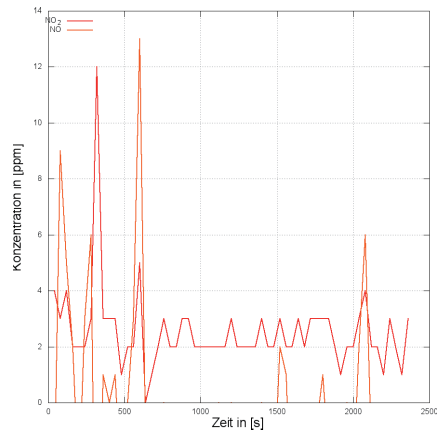
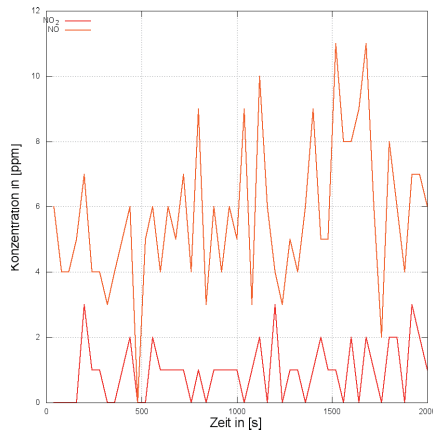
Volumenanteil von CO_2 und CO



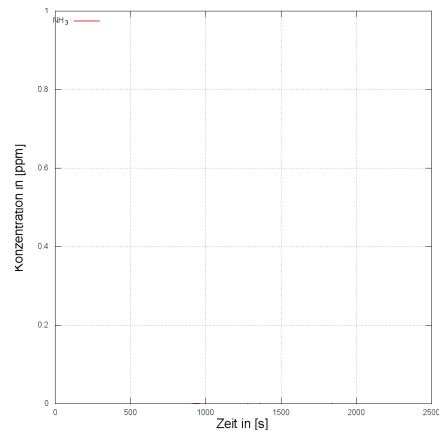
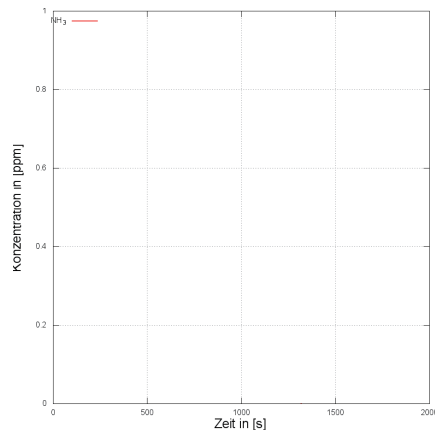
Volumenanteil von SO_2



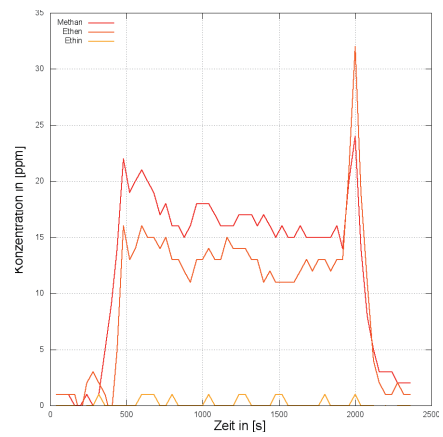
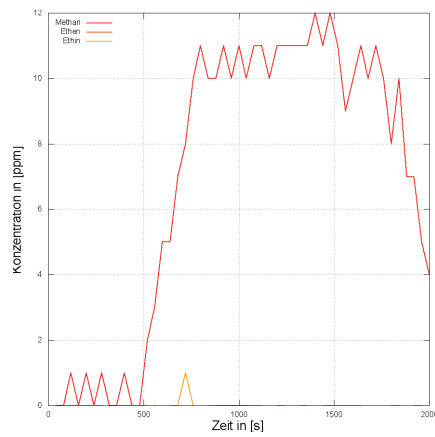
Volumenanteil von NO_2 und NO



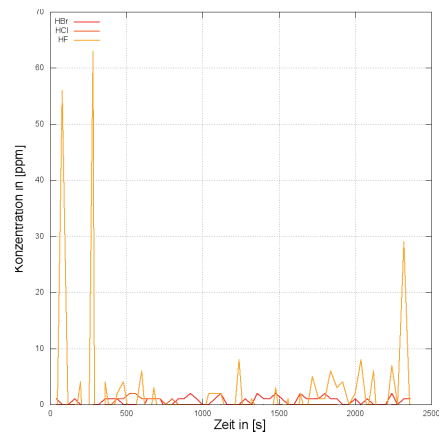
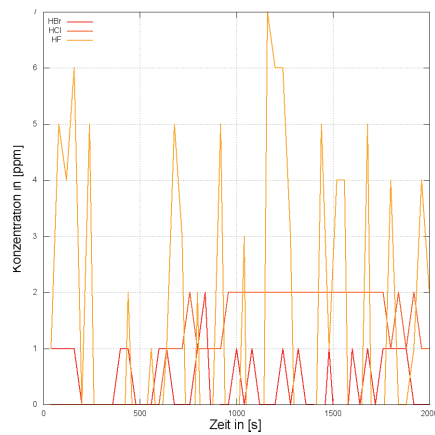
Volumenanteil
von NH_3



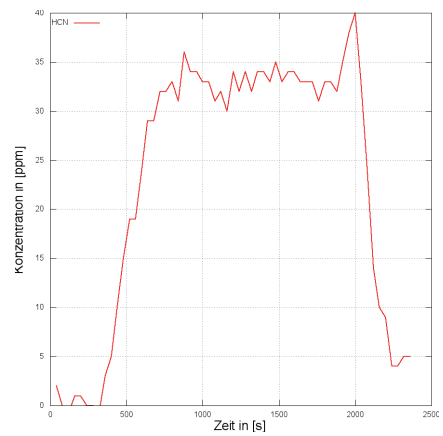
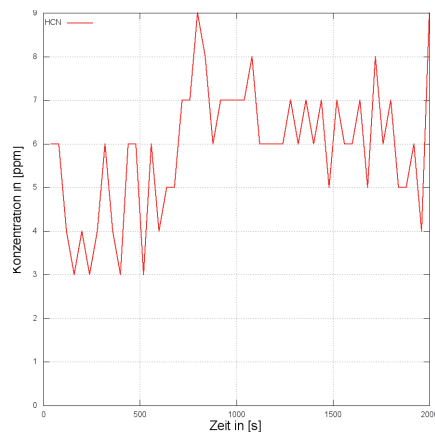
Volumenanteil
von Methan,
Ethen, Ethin



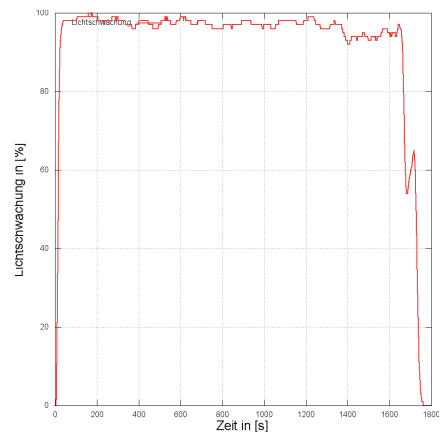
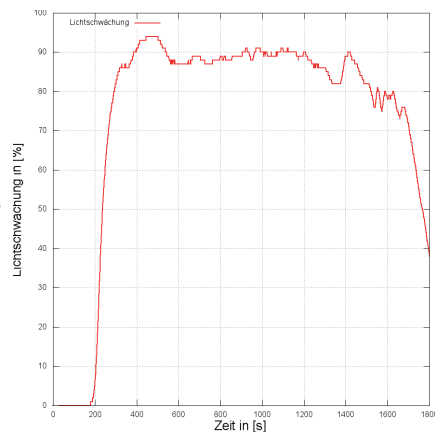
Volumenanteil
von HF ,
 HCl und
 HBr



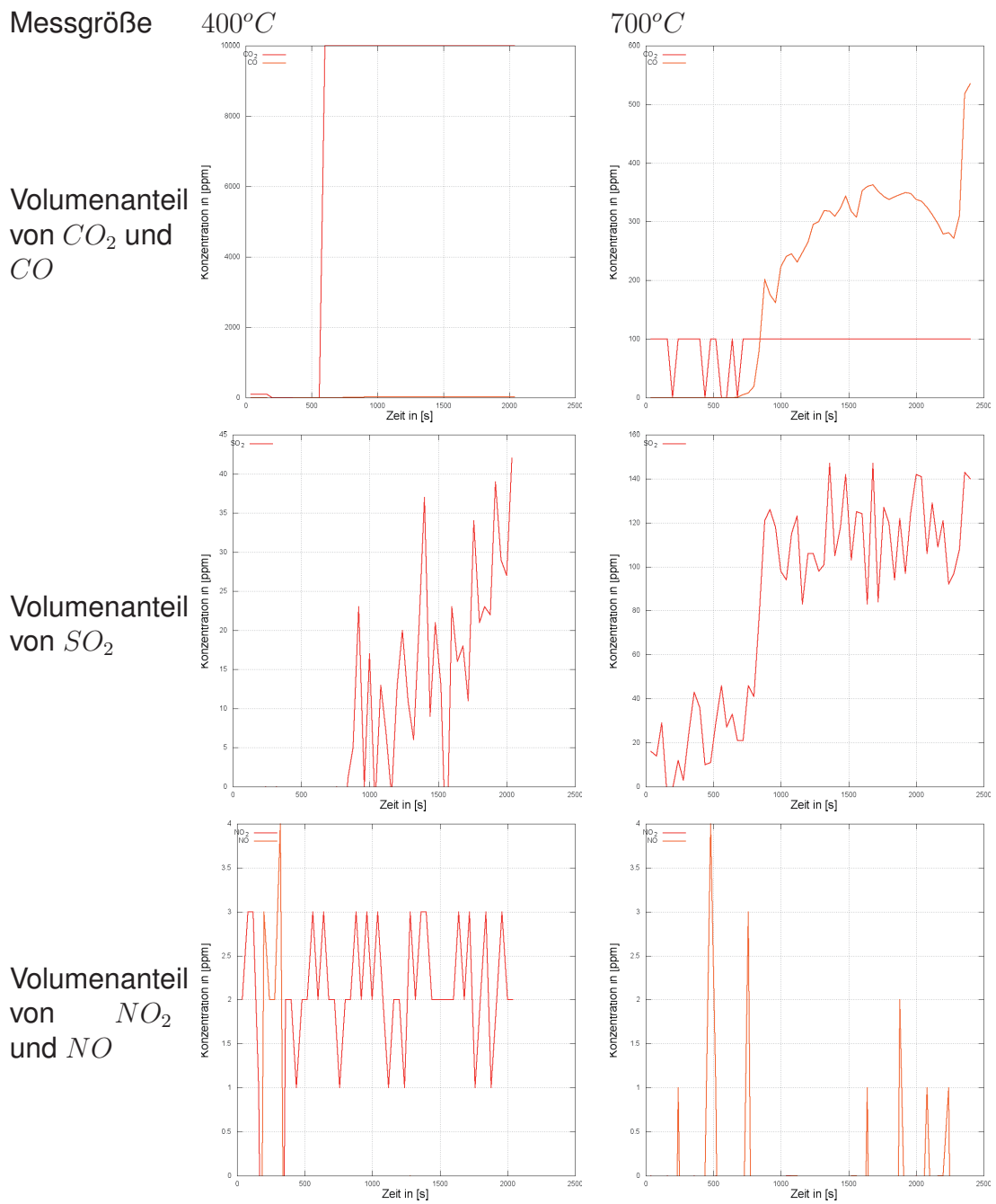
Volumenanteil
von *HCN*



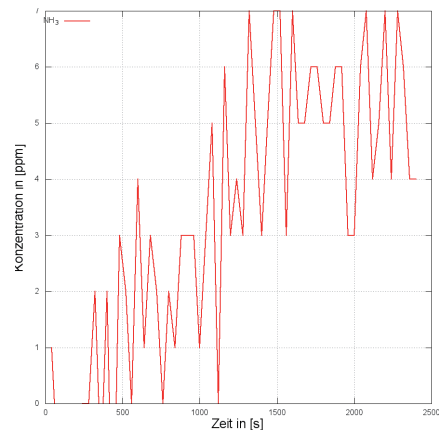
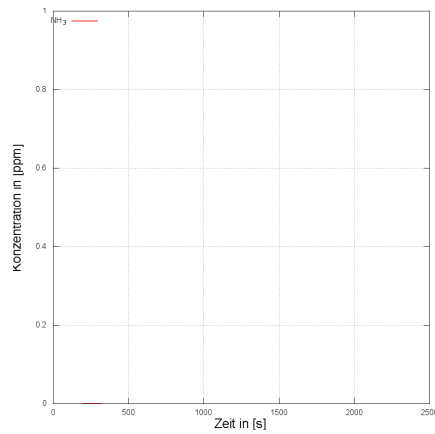
Lichtschwächung



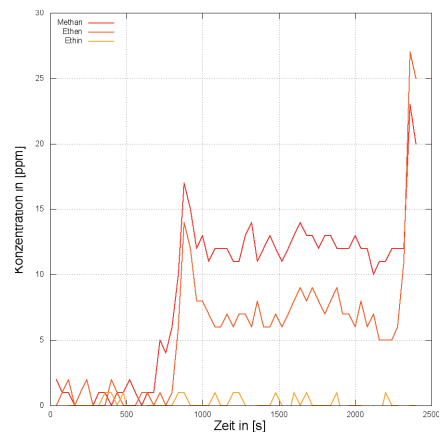
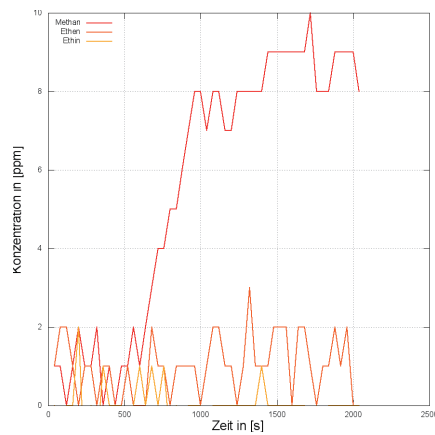
Material A: PUR (ohne Flammschutz) im DIN-Rohr bei 15Vol% Sauerstoff



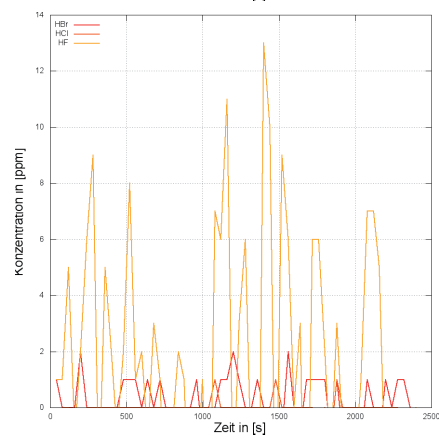
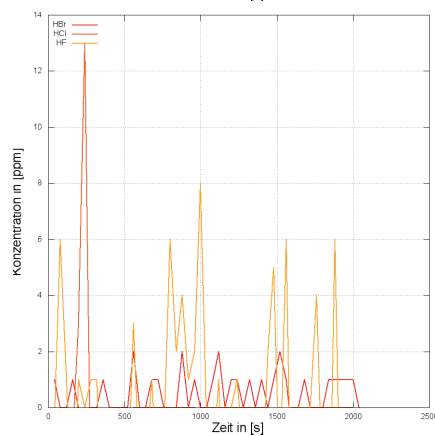
Volumenanteil
von NH_3



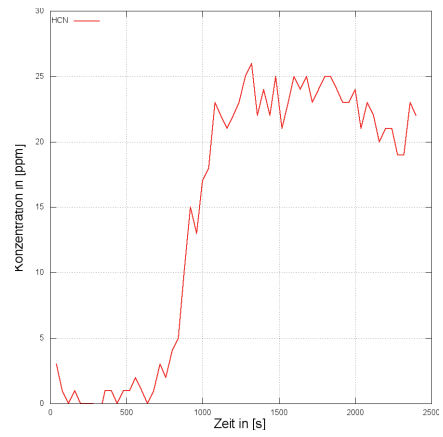
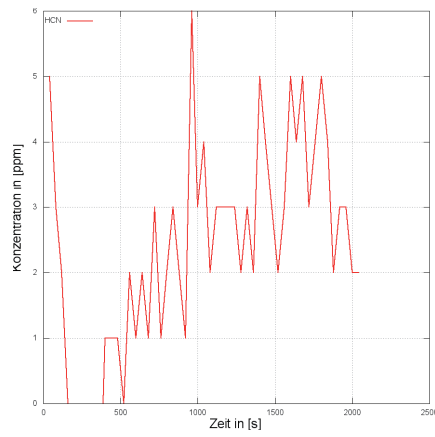
Volumenanteil
von Methan,
Ethen, Ethin



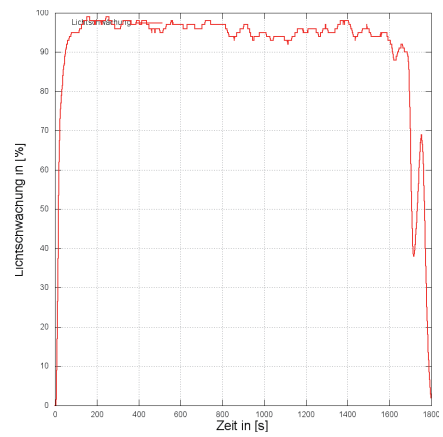
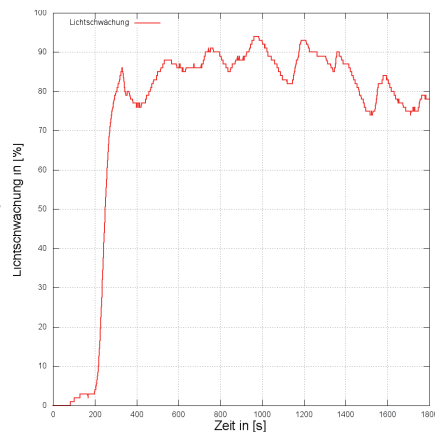
Volumenanteil
von HF ,
 HCl und
 HBr



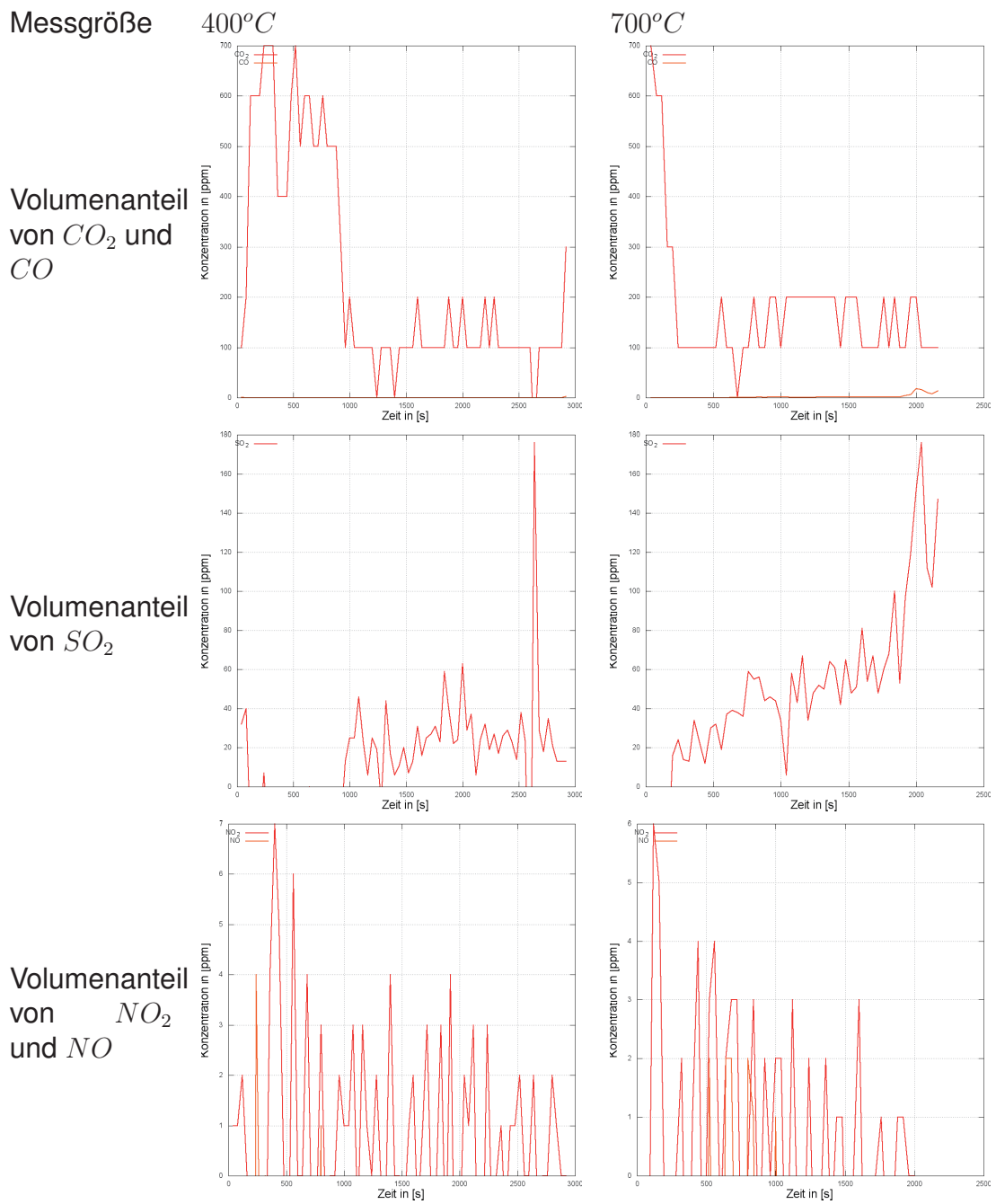
Volumenanteil
von *HCN*



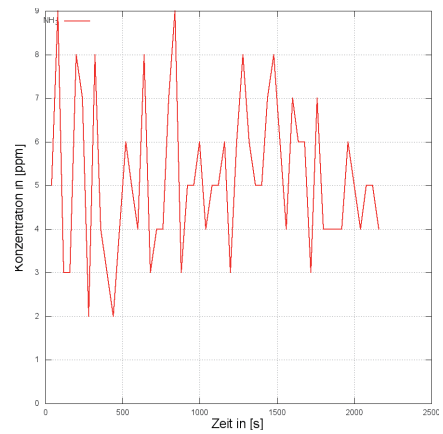
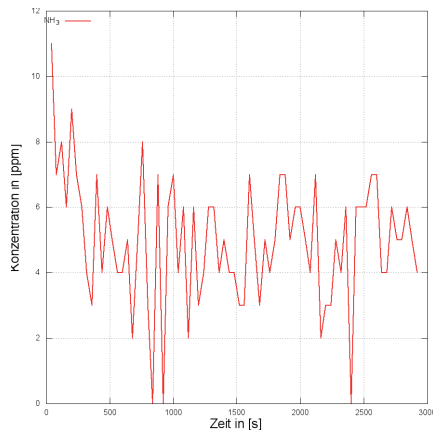
Lichtschwächung



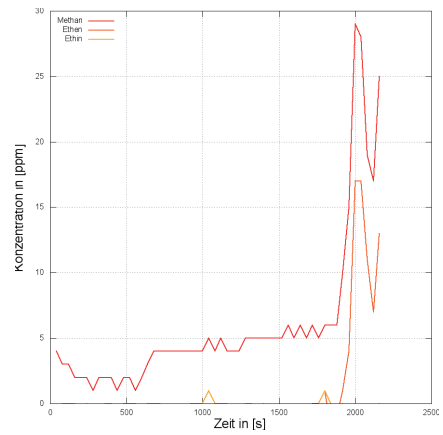
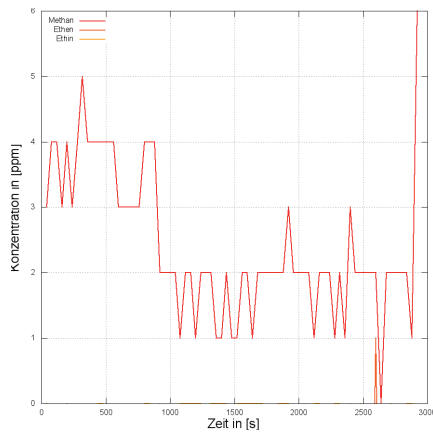
Material A: PUR (ohne Flammschutz) im DIN-Rohr bei 0Vol% Sauerstoff



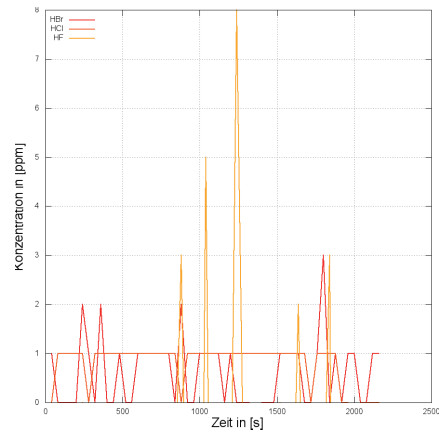
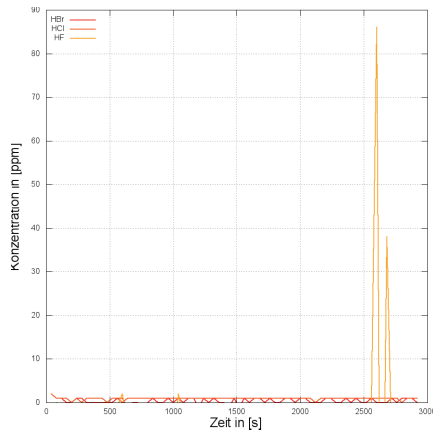
Volumenanteil
von NH_3



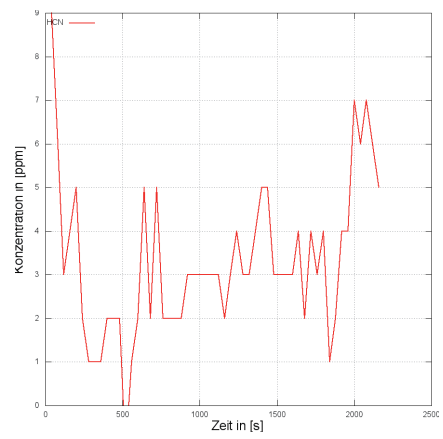
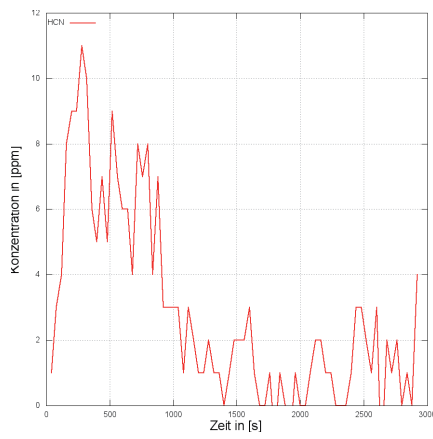
Volumenanteil
von Methan,
Ethen, Ethin



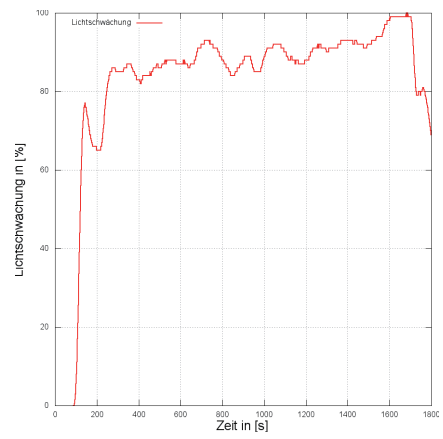
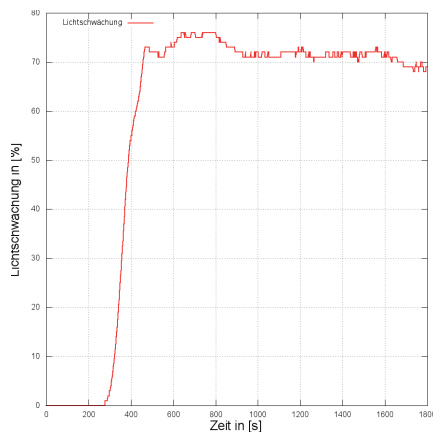
Volumenanteil
von HF ,
 HCl und
 HBr



Volumenanteil
von *HCN*



Lichtschwächung



4.2.3 Auswertung der Versuche

Es ist deutlich erkennbar, dass bei höheren Temperaturen im DIN-Rohr höhere Konzentrationen von CO_2 , CO , SO_2 entstehen. Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine Reduzierung der Sauerstoffkonzentration die CO_2 und CO Bildung stark reduziert. Dafür entstehen Pyrolysegase wie Methan oder Formaldehyd. Die Lichtschwächung wird ebenfalls geringer mit der Reduzierung des Sauerstoffgehaltes in der Luft. Es wurden noch zusätzliche Versuche mit 18 und 15Vol% Sauerstoff durchgeführt. Aus den gewonnenen Messdaten wurden für zukünftige Simulationen die Reaktionsgleichungen sauerstoff- und temperaturabhängig gemacht, damit mit den Simulationen noch präzisere Vorhersagen getroffen werden können.

In folgenden Abbildungen 14 sind die CO/CO_2 -Verhältnisse abgebildet.

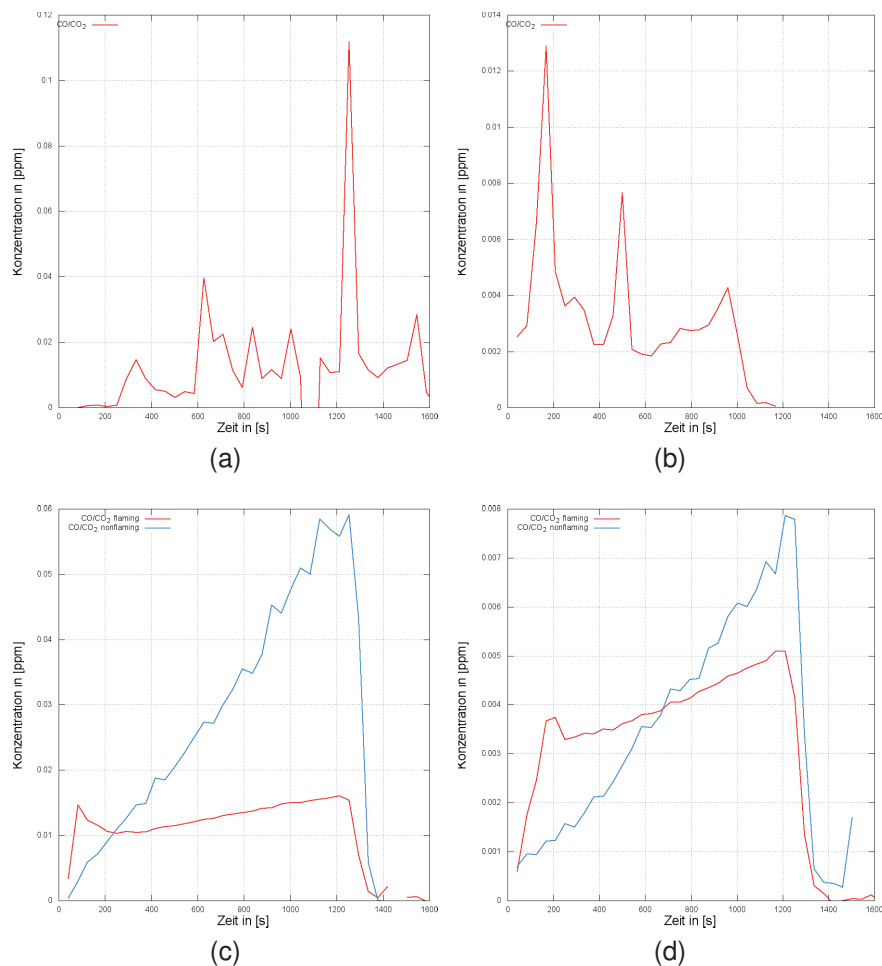


Abbildung 14: CO/CO_2 -Verhältnis von den Versuchen: (a) PUR B1 im SBI, (b) PUR im SBI, (c) PUR B1 in der SDC, (d) PUR in der SDC.

Des Weiteren kann über eine Kohlenstoffbilanz die Rußkonzentration ermittelt werden. Diese wird wie folgt über den konstanten Masseverlust der Probe sowie den Massenstrom der Zuluft berechnet. Der Versuch dauert 30 Minuten. Der Zuluftstrom beträgt

6 Liter/Minute. Es lässt sich ein mittlerer Masseverlust der Probe annehmen (Gewicht vorher - Gewicht nachher / 30 Minuten). Auf Grund der festen Summenformel hier von PUR lässt sich die Rußbeladung des Rauchgases berechnen.

$$\dot{C}_{Soot} = \dot{C}_{Probe} - \dot{C}_{CO_2} - \dot{C}_{CO}$$

Durch diese Werte werden Simulation immer realitätsnäher und es lassen sich präzisere Vorhersagen über die Sichtweiten, Rauchgaszusammensetzungen sowie Toxizitäten machen.

4.3 AP3: Modellbildung

4.3.1 Grundlagen

Für die Berechnung der örtlichen Verteilung der Rauchsicht stehen unterschiedliche Modelle zu Verfügung:

- Analytische Rechenverfahren
- Zonenmodelle
- Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modelle.

Die beiden letztgenannten erlauben auch die Vorhersage der Rauchausbreitung als zeitliche Entwicklung der lokalen Verteilungen der den Rauch charakterisierenden Stoffkonzentrationen. In der Praxis am häufigsten verwendete Modelle sind die Vollbrand- und Mehrraum- Zonenmodelle. Die Feldmodelle (CFD-Modelle) finden aber auch immer mehr Verbreitung, insbesondere in Form der frei am NIST (USA) herunterladbaren Software Fire Dynamics Simulator (FDS). Nur diese Modelle sind auch in der Lage, Brand- und Rauchausbreitungsszenarien in komplexen Geometrien vorherzuberechnen.

Analytische Rechenverfahren - Idealer Plume

Für die analytische Berechnung von Temperaturen, Massenströmen, Geschwindigkeiten usw. stehen verschiedene Rechenverfahren zur Verfügung. Die analytischen Rechenverfahren im Sinne der Ingenieurmethoden im Brandschutz dienen abschätzenden Betrachtungen und können zur Bestimmung z. B. der:

- Temperaturen über dem Brandherd und
- Heißgasschicht unter der Decke oder
- Rauchsicht Höhen im Brandraum

herangezogen werden. Zur Beschreibung eines einfachen Brandes wurden für den idealen Plume folgende Annahmen getroffen:

- der Brandherd des idealen Plume wird als Punktquelle betrachtet
- die Auftriebskräfte entstehen infolge der Dichtedifferenz zwischen der heißen Luft über dem Plume und der kalten umgebenden Luft
- die Dichteänderung innerhalb des Plume über die Höhe ist klein und wird vernachlässigt (Boussinesq Approximation), der ideale Plume wird oft als schwacher Plume („weak plume“) bezeichnet

Eigenschaften des idealen Plume sind in Abb. 7 dargestellt. [Kna09, S. 28f]

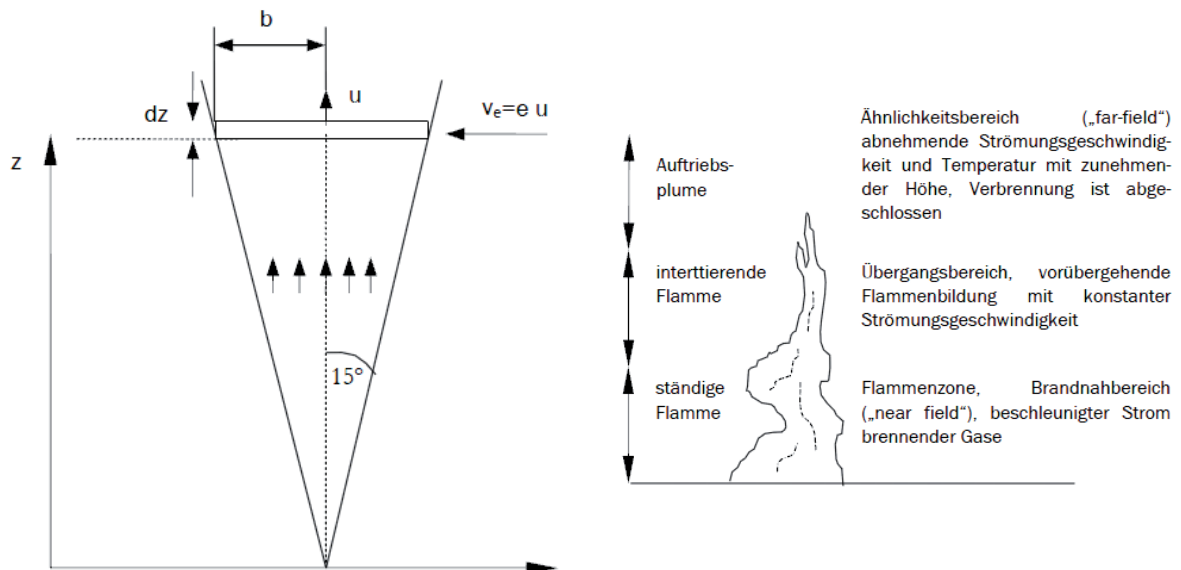


Abbildung 15: Eigenschaften des idealen Plume: Geometrische Darstellung des idealisierten Plume (links) und Bereiche im Plume (rechts)

4.3.2 Zonenmodelle

Zonenmodelle sind Berechnungsmodelle mit denen zeitlich abhängige Kenngrößen wie Temperaturen, Rauchschichthöhe, Sichtweiten in Umschließungen infolge eines Brandes in einem Gebäude berechnet werden können. In Zonenmodellen werden gewöhnliche Differentialgleichungen für die Masse- und Energieerhaltung numerisch gelöst. Dazu wird das zu untersuchende Gebiet in Kontrollvolumen (Zonen) unterteilt. In Zwei-Zonen Modellen sind das jeweils ein Kontrollvolumen für die obere Schicht („Heißgasschicht“) und ein Kontrollvolumen für die untere Schicht („Kaltgasschicht“). Zur Verbesserung der Genauigkeit wurden zusätzliche Kontrollvolumen wie für den Plume oder den Ceiling Jet mit integriert. Für jedes Kontrollvolumen werden die Gleichungen für die Masse und Energieerhaltung gelöst. Im Bereich des Plume findet die Impulserhaltungsgleichung Berücksichtigung. Für jedes Kontrollvolumen können dann die zeitlich abhängigen Kenngrößen wie Druck, Schichthöhe und Temperatur berechnet werden. Innerhalb des Kontrollvolumens werden homogene physikalische Bedingungen vorausgesetzt.

4.3.3 Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelle

Die Gleichungen zur Beschreibung von Strömungsvorgängen bei Bränden sind wesentlich komplexer als die den Zonenmodellen zugrundeliegenden Bilanzgleichungen.

Die Numerische Strömungsmechanik (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) umfasst die

- detailliertere Beschreibung des Strömungsprozesses als bei analytischen Verfahren und Zonenmodellen (Geometrie, Thermodynamik, Strömungsphysik, Strömungsgebiet, Randbedingungen)
- Differentialquotienten werden numerisch approximiert
- Aufteilung des Strömungsgebiets in endlich große Zellen (Volumenelemente),
- Annahme ortsgemittelter Zustandsgrößen (u , T , p usw.) innerhalb einer Zelle
- Vorgabe der zugehörigen Rand- und Anfangsbedingungen
- Lösung des Gleichungssystems mit einer numerischen Methode
- Auswertung der Ergebnisse

Rußmodell in CFX

Wenn man das Verbrennungsmodell 'Eddy Dissipation' und oder 'Finite Rate Chemistry' aktiviert, kann optional das Magnussen Rußmodell dazugeschalten werden. Das Rußmodell kann sowohl für Einphasen- als auch Mehrphasenströmung eingesetzt werden. Bei der Mehrphasenströmung muss das Modell für jedes Gas mit dem Verbrennung gerechnet werden soll aktiviert werden. Es ist ein Brennstoff und Ruß als Material notwendig. Außerdem können folgende optionale Parameter eingestellt werden [ANS06b, S. 259]:

- Brennstoffverbrauch der Reaktion
- Kohlenstoffmassenanteil
- Dichte des Rußes
- Absorptionskoeffizient
- durchschnittlicher Durchmesser des Rußes (Standardmäßig: $178,5e-10\text{m}$)

Die Modellierung besteht aus drei voneinander unabhängigen Vorgängen:

1. Umwandlung der Nuklide und Rußpartikel unter Verwendung des Modells von [Tes92]
2. Verbrennung der Nuklide und Rußpartikel

3. Anwendung des Magnussen's Eddy Dissipation Konzepts (EDC) für die Modellierung der Turbulenz unter Berücksichtigung der Reaktionsrate

Die Transportgleichungen werden für die spezifische Konzentration der Nuklide X_N [mol/kg], und für den Massenanteil des Soots Y_s [kg/kg] gelöst:

$$\frac{\delta(\bar{\rho}\tilde{X}_N)}{\delta t} + \frac{\delta(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{X}_N)}{\delta x_j} = \left\{ \left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\delta\tilde{X}_N}{\delta x_j} \right\} + \tilde{S}_{nuclei,f} + \tilde{S}_{nuclei,c}$$

$$\frac{\delta(\bar{\rho}\tilde{Y}_s)}{\delta t} + \frac{\delta(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{Y}_s)}{\delta x_j} = \left\{ \left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\delta\tilde{Y}_s}{\delta x_j} \right\} + \tilde{S}_{soot,f} + \tilde{S}_{soot,c}$$

Umwandlung des Rußes

Die Umwandlung der Nuklide und der Soot-Partikel wird mit dem folgenden Ansatz von [Tes92] berechnet. Die Quellterme werden mit den Konzentrationen des Soots und der Nuklide berechnet:

$$C_N = \rho \cdot A \cdot X_N \text{ [part/m}^3\text{]}$$

für die Partikel gilt:

$$C_s = \rho \frac{Y_s}{m_p} \text{ [part/m}^3\text{]}$$

$$\text{mit } A = 6.02214199 \cdot 10^{23} \text{ [part/mol]}$$

$$m_p = \rho_{Soot} \pi d^3 / 6$$

Die Quellterme für den Soot und die Nuklide berechnen sich nach [Tes92]:

$$\tilde{S}_{nuclei,f} = n_0 + (f - g)C_N - g_0C_N C_S$$

$$\tilde{S}_{soot,f} = m_p(a - bC_S)C_N$$

mit:

$$n_0 = a_0 f_c \rho Y_{fuel} \exp(-T_{A,0}/T)$$

wobei f_c der Massenanteil des Kohlenstoffs im Brennstoff ist. f ist somit ein linearer Koeffizient, g ist ein linearer Abbruch-Koeffizient, und g_0 ist ebenfalls ein linearer Abbruch-Koeffizient der Nuklide in den Soot Partikeln. In den Soot-Gleichungen sind a und b Konstanten. Die Standardparameter sind in folgender Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Standardparameter des CFX Soot-Models [ANS06b, S. 260]

Parameter	Default value by [part]	Default value by [mol]
ρ_{Soot}	2000 [kg/m ³]	2000 [kg/m ³]
d	$1,785 \cdot 10^{-8}$ [m]	$1,785 \cdot 10^{-8}$ [m]
a_0	$1,35 \cdot 10^{37}$ [part/(kg · s)]	$2,24 \cdot 10^{13}$ [mol/(kg · s)]
f_c	Fuel dependent (methan 12/16, acetylene 24/26)	
$T_{A,0}$	90000 [K]	90000 [K]
$f - g$	100 [1/s]	100 [1/s]
g_0	$1,0 \cdot 10^{-15}$ [m ³ /(s · part)]	$6,02 \cdot 10^8$ [m ³ /(s · mol)]
a	$1,0 \cdot 10^5$ [1/s]	$1,0 \cdot 10^5$ [1/s]
b	$8,0 \cdot 10^{-14}$ [m ³ /(s · part)]	$4,82 \cdot 10^{10}$ [m ³ /(s · mol)]

Rußmodell in FDS

Die Sichtweite wird in FDS nach $\frac{C}{K_m p Y_s}$ berechnet mit der maximaler Sichtweite: 30 in [m],

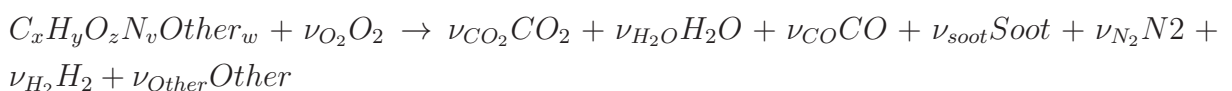
Sichtweiten Faktor (C): 3,0 in [-] und dem

Massenabsorptionskoeffizient (K_m): 8700,0 in [m²/kg].

Validierung

Zwei unterschiedliche Brennstoffe wurden für die Tests verwendet. Die Stoffeigenschaften wurden aus Messreihen gewonnen und sind im Prüfbericht zu finden. Der erste Brennstoff war ein Heptanisomer C_7H_{16} . Die Ruß-Ausbeute lag bei 1,5%. Bei dem zweiten Brennstoff handelte es sich um einen Mix aus (40%-60%) Volumenprozent Tuoluol und Heptan. Da bei FDS nur ein Brennstoff in der Reaktionsgleichung eingegeben wird, wurde C_7H_{12} als Durchschnittsmischungen angenommen. Die Rußausbeute lag bei 11,2%. Der Strahlungsanteil lag bei Heptan bei 0,44 und bei dem Heptan/Toluol-Gemisch bei 0,39. Die Wärmefreisetzungen wurde nach den gewonnenen Daten aus den Experimenten auf FDS übertragen.[MHFM10b, S. 26]

Verbrennungsreaktion



Es müssen nur die Angaben zur chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes gemacht werden. Außerdem müssen die Anteile für CO , H_2 und Ruß als Verbrennungsprodukte gemacht werden. Vollständigkeitshalber können noch N_2 und weitere Inhaltsstoffe des Brennstoffes angegeben werden. FDS nutzt diese Eingaben um die Mengen der Verbrennungsprodukte zu bestimmen:

$$\begin{aligned} \nu_{O_2} &= \nu_{CO_2} + \frac{\nu_{CO}}{2} + \frac{\nu_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2} \\ \nu_{CO_2} &= x - \nu_{CO} - (1 - H_{frac})\nu_{soot} \\ \nu_{H_2O} &= \frac{y}{2} - \frac{H_{frac}}{2}\nu_{soot} - \nu_{H_2} \\ \nu_{CO} &= \frac{W_f}{W_{CO}}y_{CO} \\ \nu_{H_2} &= \frac{W_f}{W_{H_2}}y_{H_2} \\ \nu_{soot} &= \frac{W_f}{W_s}y_s \\ \nu_{N_2} &= \frac{v}{2} \\ \nu_{other} &= w \\ W_s &= H_{frac}W_H + (1 - H_{frac})W_C \end{aligned}$$

Der $SOOT_{YIELD}$ gibt an welcher Massenanteil des Brennstoffes in Rauch-Partikel umgewandelt wird. Wichtig ist, dass dieser Parameter keinen Einfluss auf den Rußwachstum und die Oxidation sondern auf die Netto-Produktion des Rauches aus dem Brand hat. (Standardwert: 0,01) [MHF10a, S. 108f] [MHF+10b, S. 46ff]

Rauchdefinition

Standardmäßig geht FDS davon aus, dass der Rauch eines Brandes immer im direkten Zusammenhang mit der Wärmefreisetzung steht. Der Standardwert liegt bei $SOOT_{YIELD} = 0.01$, d.h., dass die Rauchfreisetzungsrates bei 0,01 der Abbrandgeschwindigkeit liegt. Der 'Rauch' wird nicht explizit von FDS berechnet, sondern aus dem Mischungsbruch. Man kann auch seinen 'eigenen Rauch' erzeugen, der nicht an die Wärmefreisetzung gekoppelt ist, zum Beispiel für einen Schwelbrand anstatt eines Feuers. Es ist auch möglich einen Absorptionskoeffizienten und auch ein vermutliches Molekulargewicht für den Rauch zu definieren (wie es für ein Fluid möglich ist um es zu verfolgen). Um diesen Rauch mit Smokeview und dem 'SMOKE 3D'-Feature visualisieren zu können benötigt man folgende Zeilen:

Listing 1: FDS Quellcode zur Visualisierung von erweiterten Rauch

```
&SPEC ID= 'MY_SMOKE' , MW=29. , MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT=8700. /
&SURF ID= 'SMOULDER' , TMP_FRONT=1000. , MASS_FLUX(1)=0.0001 , COLOR= 'RED' /
&VENT XB=0.6 , 1.0 , 0.3 , 0.7 , 0.0 , 0.0 , SURF_ID= 'SMOULDER' / \ \
&PROP ID= 'Acme_Smoke' , QUANTITY= 'CHAMBER_OBSCURATION' , SPEC_ID= 'MY_SMOKE' /
&DEVC XYZ=1.00 , 0.50 , 0.95 , PROP_ID= 'Acme_Smoke' , ID= 'smoke_1' /
&DUMP SMOKE3D_QUANTITY= 'MY_SMOKE' , DT_PL3D=30. /
```

Das oben stehende Modell wird für die Rauchmelder verwendet. An diesem Punkt wird der Massenanteil des 'eigenen Rauches' für den Algorithmus verwendet. Der eigene Rauch geht nicht in der Strahlungsrechnung mit ein. Dieser ist lediglich ein Raucher-

satz. Wenn man mit einem eigenen Rauch rechnet, ist es wichtig den $SOOT_{YIELD} = 0$ zu setzen, damit der normale Rauch nicht im Mixture-Faction-Modell als Stoff mit eingeht.[MHF10a, S. 135f]

GIFTIGKEIT nach ISO 13571

Kohlenmonoxid

Die toxischen Wirkungen von Kohlenmonoxid kommt durch die Anlagerung an die roten Blutkörperchen, wodurch die Sauerstoffaufnahme verhindert wird. Es bleiben der arterielle Sauerstoffpartialdruck und die Geschwindigkeit des Blutflusses normal. Die Affinität des Hämoglobins für Kohlenmonoxid ist etwa 250 mal größer als für Sauerstoff. Die Kohlenstoffmonoxidvergiftung führt spätestens zum Tod, wenn eine vollständige Sättigung eingetreten ist. Wenn rechtzeitig eine reine Sauerstoffbeatmung durchgeführt wird, steigt der Sauerstoffpartialdruck höher als der des Kohlenmonoxids und die Person kann gerettet werden.

Bestimmte Personengruppen sind anfälliger auf Kohlenmonoxid als andere. Wenn die Aufnahme von Kohlenmonoxid noch nicht zum Tode oder zur Bewusstlosigkeit führt, können Beeinträchtigungen im Urteilsvermögen, Orientierung, Verwirrung oder Koordinationsstörungen auftreten. Es kann auch zu Langzeitschäden wie Enzephalopathie und daraus resultierenden Gedächtnisverlust oder neurologische Schäden führen. Das Auftreten von neurologischen Schäden nimmt mit dem 23. Lebensjahr zu.

Blausäure

Blausäure ist etwa 25 mal giftiger als Kohlenmonoxid. Sie verdankt ihre toxische Wirkung des Cyanid-Ions, das durch Hydrolyse im Blut gebildet wird. Im Gegensatz zum Kohlenmonoxid, welcher sich vor allem im Blut ablagert, sind die Cyanid-Ionen im Körperwasser verteilt und dadurch im Kontakt mit den Zellen, Gewebe und Organen. Das Cyanid-Ion reagiert leicht mit einem Enzym, welches eine zentrale Rolle bei der Sauerstoffaufnahme der Zellen hat. Diese Hemmung blockiert schnell die zentralen Funktionen der Zellen - bis zum Zelltod. Im Gegensatz zum Kohlenmonoxid verringert das Zyanid nicht die Verfügbarkeit von Sauerstoff, sondern die Nutzbarkeit des Sauerstoff wofür die Zellen des Herzen und Gehirns besonders anfällig sind. Ein weiterer Unterschied zum Kohlenmonoxid ist, dass eine kurze Erhöhung der Blausäurekonzentration sehr viel gefährlicher ist als eine längere geringe Dosis.

4.3.4 Verwendete CFD Programme

ANSYS CFX

ANSYS CFX ist ein Finite-Volumen-Programmsystem zur Lösung von Problemen aus dem Computational Fluid Dynamics (CFD) bzw. numerischen Strömungssimulation-Anwendungsbereich. Mit Hilfe dieses Programms können quantitative Vorhersagen des Strömungsverhaltens von Fluiden getroffen werden. Grundlage sind Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie (Navier-Stokes-Gleichungen). CFD Berechnungen liefern beispielsweise detaillierte Informationen zu Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und Konzentrationen für jede Zelle des Gitters im Strömungsfeld.

CFX-Pre

CFX-Pre bietet eine grafische Benutzerschnittstelle zur Definition von CFD Simulationen. CFX-Pre kann mehrere Rechengitter in verschiedenen Formaten einlesen und zu einem Gesamtgitter zusammenfassen. Sowohl strukturierte (mit kubischen Volumenelementen) als auch unstrukturierte (mit Tetraederelementen) sind möglich und kombinierbar. Damit können im Prinzip beliebig geformte Rechengebiete mit hoher Genauigkeit abgebildet werden. Die anschließende Definition von Stoffdaten, Randbedingungen, Solverparametern etc. kann schrittweise mit Hilfe einer Arbeitsablaufleiste erfolgen oder von früheren Simulationen übernommen werden. Fehler und inkonsistente Eingaben werden von CFX-Pre erkannt.

CFX-Solver

Der ANSYS CFX Solvermanager ermöglicht die Verwaltung von seriellen und parallelen Rechenläufen. Die grafische Benutzeroberfläche erlaubt nicht nur die visuelle Kontrolle des Konvergenzverlaufs der Residuen, sondern bietet darüber hinaus die Möglichkeit, benutzerdefinierte Größen an Monitorpunkten darzustellen, was ein zusätzlicher Indikator für die Konvergenz sein kann. Es können unter anderem alle Bilanzen (Energie, Masse, Strahlung, etc) über das System ausgegeben werden. Dies dient zur Kontrolle der Ergebnisse.

CFX-Post

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse ist ein wesentlicher Schritt bei der Strömungssimulation. Die riesigen Datenmengen müssen übersichtlich präsentiert und quantitativ aufbereitet werden, um Aussagen über die Strömungs- und Temperaturverhältnisse treffen zu können. CFX-Post bietet Möglichkeiten zur qualitativen und quantitativen Auswertung der Berechnungsergebnisse. Hierfür können Ebenen, Punkte oder Linien definiert werden, auf denen grafisch die gewünschten Größen aufgetragen werden.

Fire Dynamics Simulator (FDS)

Bei diesem Programm handelt es sich um eine freie Software des National Institute for Standards and Technology, USA (NIST). Dies ist ein Programm, welches für die Anwendung auf Raumbrände optimiert wurde. Im Unterschied zu CFX wird das System der partiellen Differentialgleichungen durch ein explizites Differenzenverfahren gelöst. Aus diesem Grund darf das Berechnungsnetz nur aus würfelförmigen Volumenelementen bestehen. Nicht-rechteckige Geometrien können mit FDS deshalb nur mit großen Ungenauigkeiten verarbeitet werden. Die Auswahl an Untermodellen, z.B. von Turbulenzmodellen oder Strahlungsmodellen und die Erstellung von komplexen Geometrien ist ebenfalls eingeschränkt. Man kann zum Beispiel Zimmerbrände mit verschiedenen Brandlasten modellieren. Diese Software berechnet aus der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Gegenstände die Brandausbreitung und die entstehenden Temperaturen. Es lassen sich auch viele weitere Begebenheiten wie Löschprozesse (interessant z.B. für die Feuerwehr) simulieren. Außerdem kann man das Ansprechen von Rauchmeldern an verschiedenen Zimmerstellen testen.

Visualisierungssystem Smokeview (SMV)

Um die mit FDS errechneten Daten für das Brennen des Brenners im SBI bzw. den Abbrand der Proben darstellen zu können, wurde das Visualisierungssystem Smokeview benutzt. Mit Smokeview lässt sich die errechnete instationäre Simulation abspielen. Es lassen sich verschiedene Messstellen ein- und ausblenden, sowie Rauch darstellen.

4.3.5 Vergleich der Rußmodell von CFX und FDS

Begleitend zu den experimentellen Untersuchungen wurden bereits numerische Berechnungen mit ANSYS-CFX und FDS erstellt, um die vorhandenen Ruß-Modelle zu betrachten und vergleichen. Hierzu wurden Berechnungen für einen Testraum mit einer einfachen Verbrennung erstellt und mit verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen am Strömungseinlass berechnet. Als nächstes folgen Simulationen mit unterschiedlicher Ventilation. Zum einem mit $\lambda > 1$ (stöchiometrischer Sauerstoffüberschuss) und zum anderem mit $\lambda < 1$ (stöchiometrischer Sauerstoffmangel). Diese Simulationen können mit Versuchen in der umgebauten Rauchkammer verglichen werden. Zusätzlich wird der Brandverlauf in der Rauchkammer für die Validierung von weiterentwickelten Rauchmodellen numerisch simuliert. In den Abbildungen 16 und 17 sind die Temperaturen und auf den Abbildungen 18 und 19 die Ruß(Soot)-Anteile der CFX-Simulationen bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalt am Inlet dargestellt.

Es wurden folgende Randbedingungen für CFX und FDS verwendet:

- Außen: Wall
- Oben: Outlet mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,2\text{m/s}$
- Unten: Inlet mit einem Referenzdruck von 0Pa und festgesetzten Sauerstoffgehalt von 10 bzw. $23\text{m}\%$.

Die FDS Simulationen wurden mit PyroSim erstellt. In Abbildung 20 ist die Geometrie mit der PyroSim-Oberfläche dargestellt. Abbildung 21 zeigt die Temperaturen bei einer Reaktion von Propangas mit Sauerstoff wie bei CFX, um die Temperaturen, Ruß-Anteile vergleichen zu können.

Da bei FDS nur fester Sootyield-Wert voreingestellt wird, ist die Rußbildung festgesetzt, sie ändert sich nicht, wenn der Sauerstoffgehalt im Raum fällt (wie es in der Realität wäre). Der voreingestellt Wert sagt aus, dass $1,5\%$ des vorhandenen Kohlenstoffs in Ruß umgesetzt werden und der restliche Anteil in CO_2 umgesetzt wird. Dieser Wert soll in das Modell nun abhängig vom Sauerstoffgehalt und eventuell Temperatur implementiert werden, um eine ventilationsgesteuerte Rußbildung zu erhalten. Der Sootyield wird damit zu einer Variable, um ein realistischeres Rauchmodell zu erhalten.

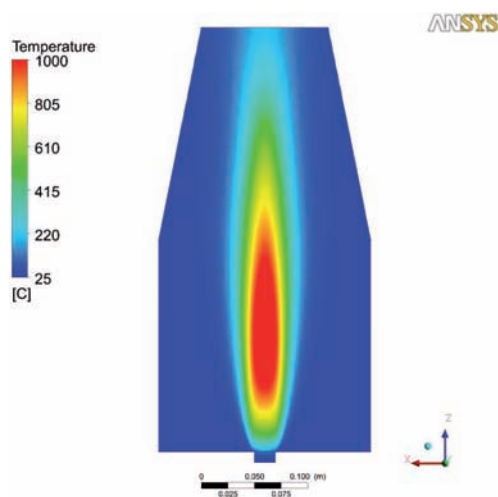


Abbildung 16: Temperaturen bei einem Sauerstoffgehalt am Inlet von $23\text{m}\%$

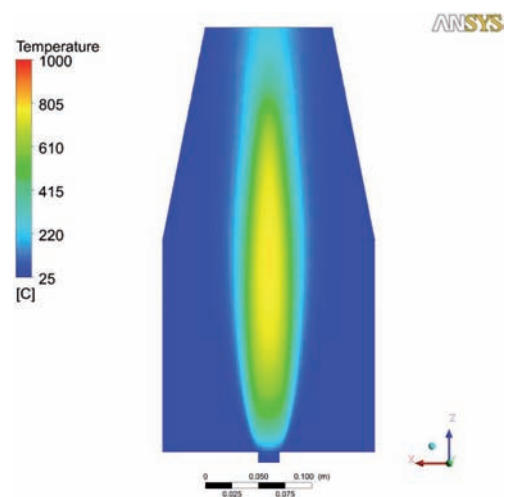


Abbildung 17: Temperaturen bei einem Sauerstoffgehalt am Inlet von $10\text{m}\%$

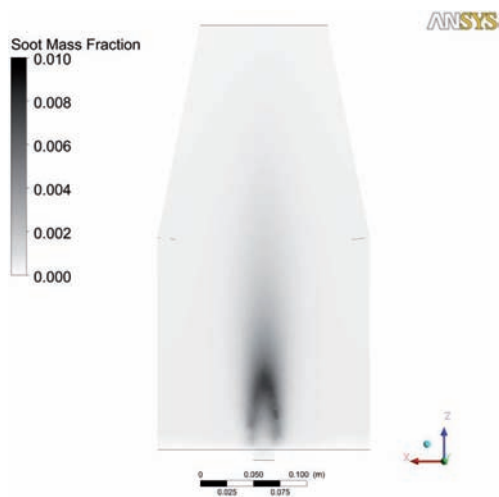


Abbildung 18: Soot-Anteil bei einem Sauerstoffgehalt am Inlet von 23m%

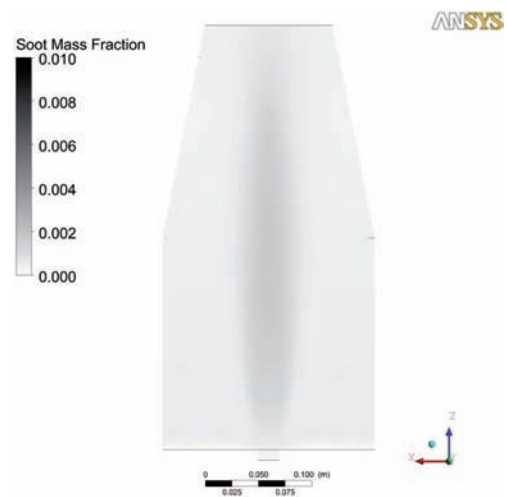


Abbildung 19: Soot-Anteil bei einem Sauerstoffgehalt am Inlet von 10m%

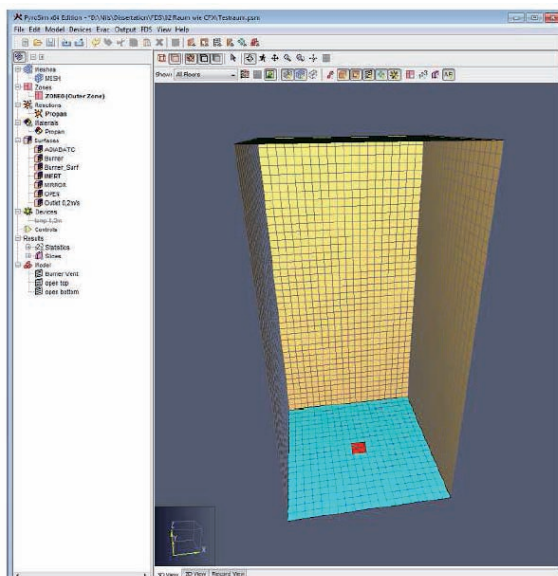


Abbildung 20: Geometrie in PyroSim

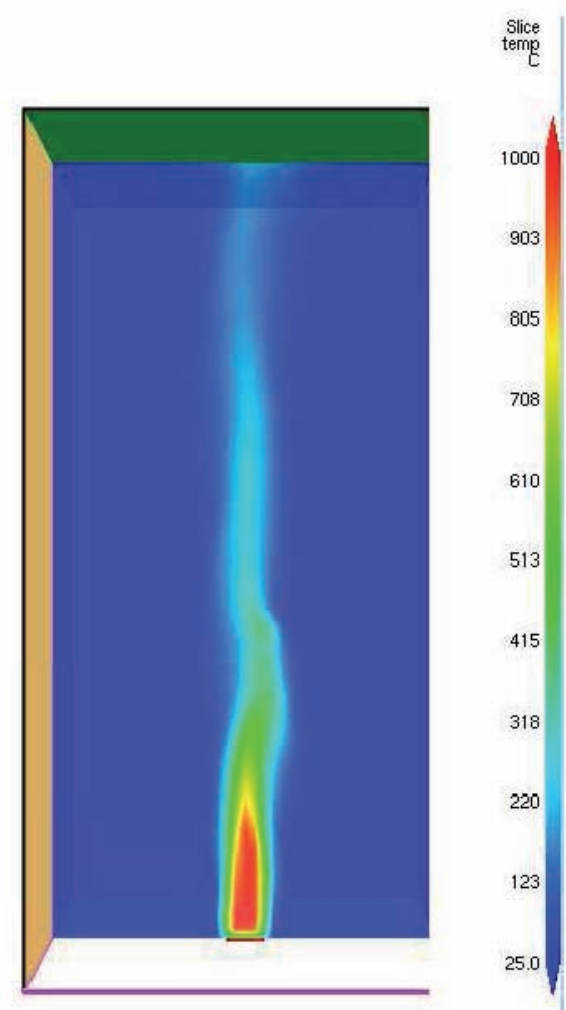


Abbildung 21: Temperaturen bei FDS

4.3.6 Implementierung eines erweiterten Rußmodells

Als Grundlage für die Implementierung eines neuen Rußmodells, dient das Mischungsbruchmodell. Das Mischungsbruchmodell rechnet mit einer Reaktionsgleichung, bei der die stöchiometrischen Koeffizienten fest gewählt werden müssen. Das heißt, dass immer ein festes CO_2/CO -Verhältnis bzw. CO_2/C (Ruß)-Verhältnis. Für eine Methan Sauerstoffreaktion könnte die Reaktionsgleichung z.B. so aussehen:

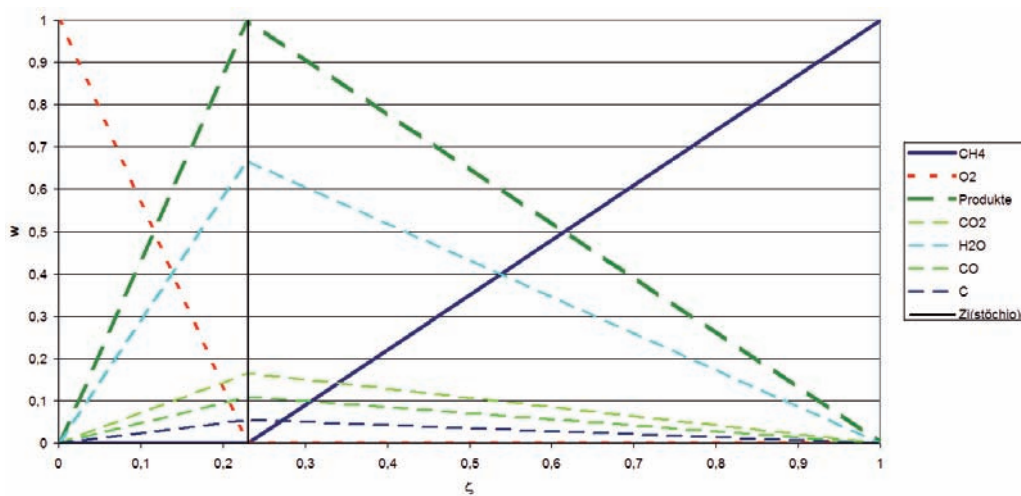
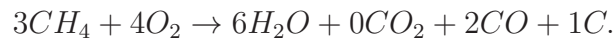


Abbildung 22: Mischungsbruch Zusammenhänge

Die Stoffanteile, lassen sich übersichtlich wie in Diagramm 22 darstellen. Die linke Seite steht für reinen Sauerstoff, die rechte Seite für reinen Brennstoff. Bei 0,23 liegt ein stöchiometrisches Gemisch vor und Sauerstoff sowie Brennstoff reagieren vollständig zu den Produkten (CO_2 , CO , C und H_2O).

Der Vorteil dieses Modells liegt darin, dass nur eine Transportgleichung für ζ in der CFD gelöst werden muss. Ohne den Mischungsbruch wären es für jeden Stoff (Methan, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Ruß) hier 5 Transportgleichungen die gelöst werden müssen. Aus diesem Wert ζ lassen sich alle Komponentenanteile mit einem linearen Zusammenhang schnell berechnen. Das Mischungsbruchmodell hat jedoch einen Nachteil. Es können keine zeitabhängigen Ereignisse abgebildet werden. Das Modell muss erweitert werden. Bisher steht noch nicht fest, ob sich der Vorteil mit nur einer Transportgleichung weiter nutzen lässt. Der Ansatz zur Erweiterung besteht darin, dass für unterschiedliche Sauerstoffkonzentrationen neue Reaktionsgleichungen mit anderen stöchiometrischen Koeffizienten erstellt werden. Außerdem könnte die Temperatur auch einen Einfluss auf die Koeffizienten ausüben. Dadurch ist das Modell in der Lage einen Schwelbrand nachzustellen oder auch bei geringen Sauerstoff eine

höhere Konzentration von Kohlenstoffmonoxid als Kohlenstoffdioxid entstehen zu lassen. Für einen stark unterventilierten Brand, bei dem kein CO_2 mehr entsteht könnte die Reaktionsgleichung wie folgt aussehen:



Der dazugehörige Mischungsbruch ist im Diagramm 23 dargestellt.

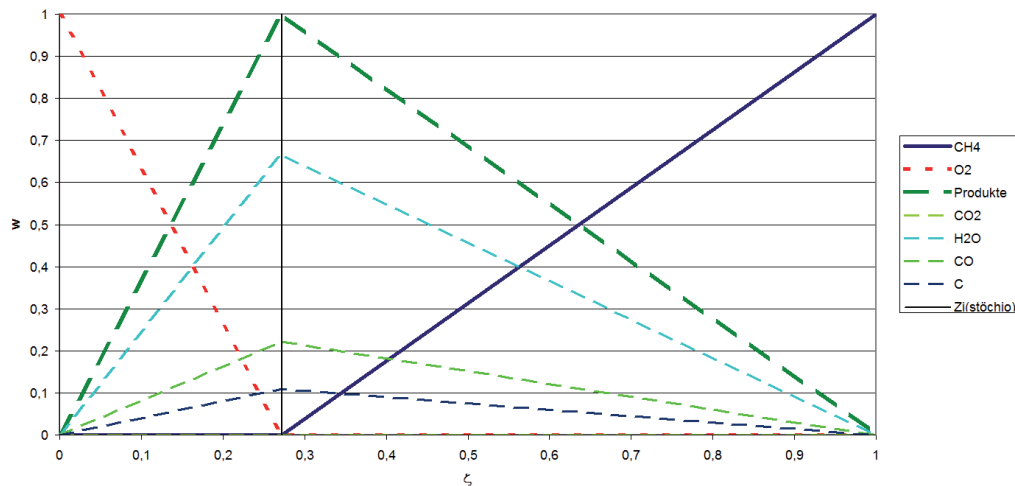
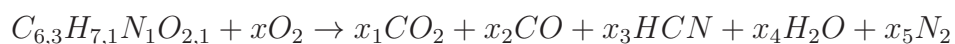


Abbildung 23: Mischungsbruch Zusammenhänge unterventiliert

4.3.7 Entwickelte Reaktionsgleichungen

Auf der Grundlage der in Abschnitt 4.2.3 vorgenommenen Auswertung der durchgeführten Brandversuche wurden Reaktionsgleichungen aufgestellt. In der Tabelle 5 sind die stöchiometrischen Koeffizienten für die folgende Reaktionsgleichung von PUR bei unterschiedlichen Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen aufgeführt. Die Temperaturen sind oben in der Tabelle genannt, danach folgt mit einem Unterstrich die jeweilige Sauerstoffkonzentration. $x_1 - x_5$ stehen für die jeweiligen Mole der Produkte. Diese Daten wurden aus den DIN-Rohr Versuchen ermittelt.



PUR-Versuche	400_21	700_21	400_18	700_18	400_15	700_15
x O_2	5,9956	4,8909	6,2533	5,0054	6,1766	5,0040
x_1 CO_2	4,8657	3,2041	5,2625	3,3742	5,1196	3,3729
x_2 CO	0,8724	1,9837	0,6003	1,8716	0,7167	1,8718
x_3 HCN	0,1256	0,1203	0,1371	0,1184	0,1053	0,1194
x_4 H_2O	3,4872	3,4899	3,4815	3,4908	3,4974	3,4903
x_5 N_2	0,4372	0,4399	0,4315	0,4408	0,4474	0,4403

Tabelle 5: ermittelte Koeffizienten für Reaktionsgleichungen von PUR bei unterschiedlichen Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen

4.4 AP4: Numerische Simulation von ausgewählten Brandszenarien

Es bietet sich an die Rauchkammer (Smoke Density Chamber - SDC) zu modellieren, um die Rauchmodelle anhand der Experimente zu validieren. Die genaue Spezifikation der größeren Gebäude für die numerischen Berechnungen der Rauchausbreitung erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

In der folgenden Abbildung 26 ist ein Brandausbruch in einem Wohnhaus dargestellt. Zum einen wird die Geometrie gezeigt, zum anderen zwei Zeitpunkte während der Brandausbreitung.

Parameter	CFX	FDS
Turbulenzmodell	SST	k- ϵ
Verbrennungsmodell	EDM	EDM
Wärmeübergang	Thermal Energy	Thermal Energy
Strahlung	Monte Carlo	DO

Tabelle 6: Benutzte Modelle in den Simulationen

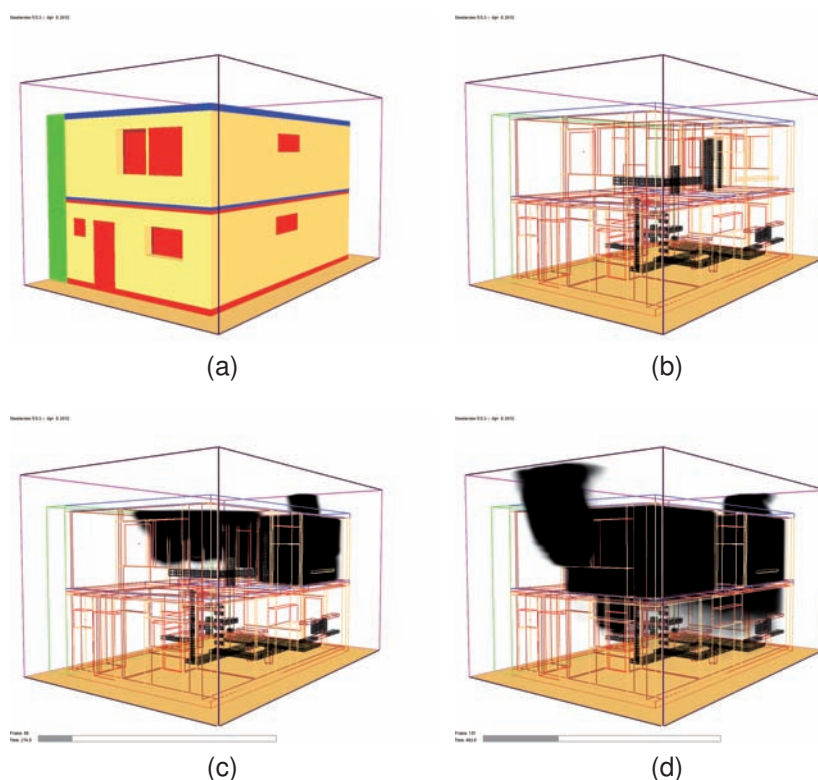


Abbildung 24: Wohnhaus: (a) Geometrie, (b) Gitterlinien; Brandausbruch nach (c) 275s und (d) 464s.

In der Abbildung 25a ist das strukturierte Netz der zweistöckigen Wohnhausgeometrie in zwei Ebenen dargestellt. In den weiteren Abbildungen 25 ist der Brandverlauf nach

5 Minuten und 48 Sekunden dargestellt. Dazu sind in der Abbildung 25b die Wärme- freisetzung und in der Abbildung 25d die Temperaturen dargestellt.

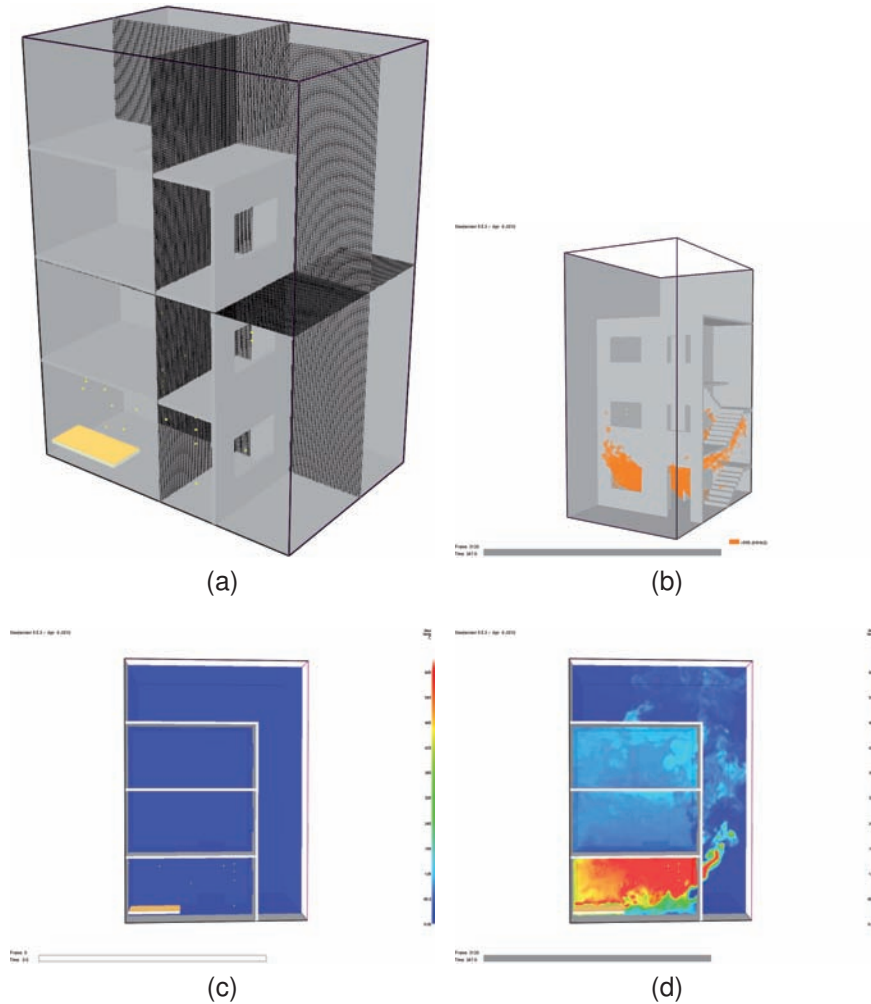


Abbildung 25: Mehrfamilienhaus mit 2 Stockwerken gerechnet mit FDS: (a) Geometrie mit strukturiertem Netz, (b) Brandverlauf nach 348 Sekunden; Temperaturen bei (c) 0s und (d) 348s.

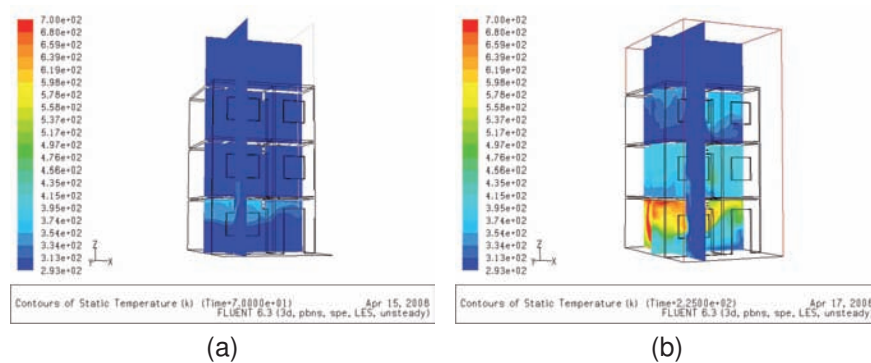


Abbildung 26: Mehrfamilienhaus mit 2 Stockwerken gerechnet mit Fluent: (a) Temperaturen nach 70s und (b) 225s.

Als größte Objekt wurde eine Eingangshalle (siehe Abbildung 28) mit einer Länge von 220m, einer Breite von 150m und einer Höhe von 20m modelliert. In der Abbildung 27 ist auf einer Ebene das unstrukturierte Netz mit Randschichten abgebildet. Kleine Gebäude in der Halle sind blau dargestellt. Openings sind gelb dargestellt. Hier wird ein Brandausbruch mit einer Polyurethan Reaktion abgebildet. Dadurch lassen sich zum einem Rauchgas und FED-Werte abbilden. Dies ist nur durch das neue Ruß- bzw. Reaktionsmodell möglich. Der FED-Wert hängt unter anderem von der Kohlenstoffmonoxid-, Kohlenstoffdioxid-, Halogenwasserstoff-, Sauerstoffkonzentration ab. Dargestellt ist in schwarz die Rauchschiicht mit einem Rauchgas von über 1Mass%. Außerdem ist der FED-Wert in rot dargestellt. Weitere Randbedingungen der Simulation sind in der Tabelle 7 aufgelistet.

Randbedingung	Parameter
Gas Inlet	500g/s
Openings	rel. Pressure 0Pa
Wall	Reibungsbehaftete Wand; ohne Wärmeleitung
Maße (L*B*H)	220m * 150m * 20m
Zellenzahl	2,1 Mio
Zeitschrittweite	0,05 Sekunden
Zeit	40 Sekunden
Rechenzeit	14 Tage (8 Kerne 2,6 GHZ, 48 GB RAM)

Tabelle 7: Benutzte Randbedingungen in den Simulation der Eingangshalle

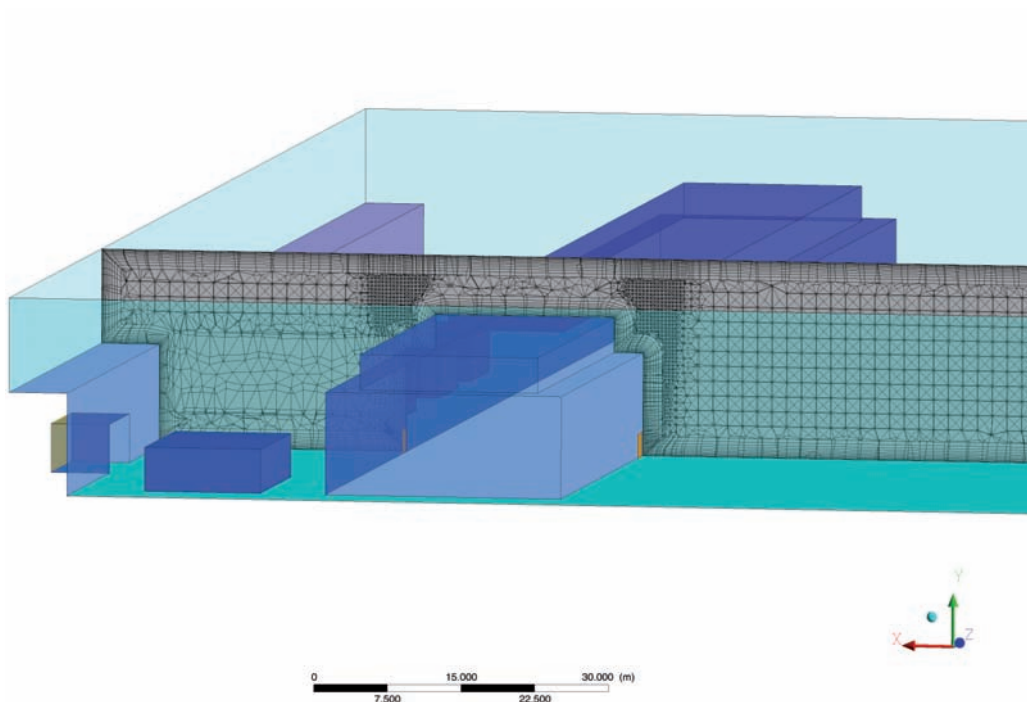


Abbildung 27: Eingangshalle: Netz mit Randschichten

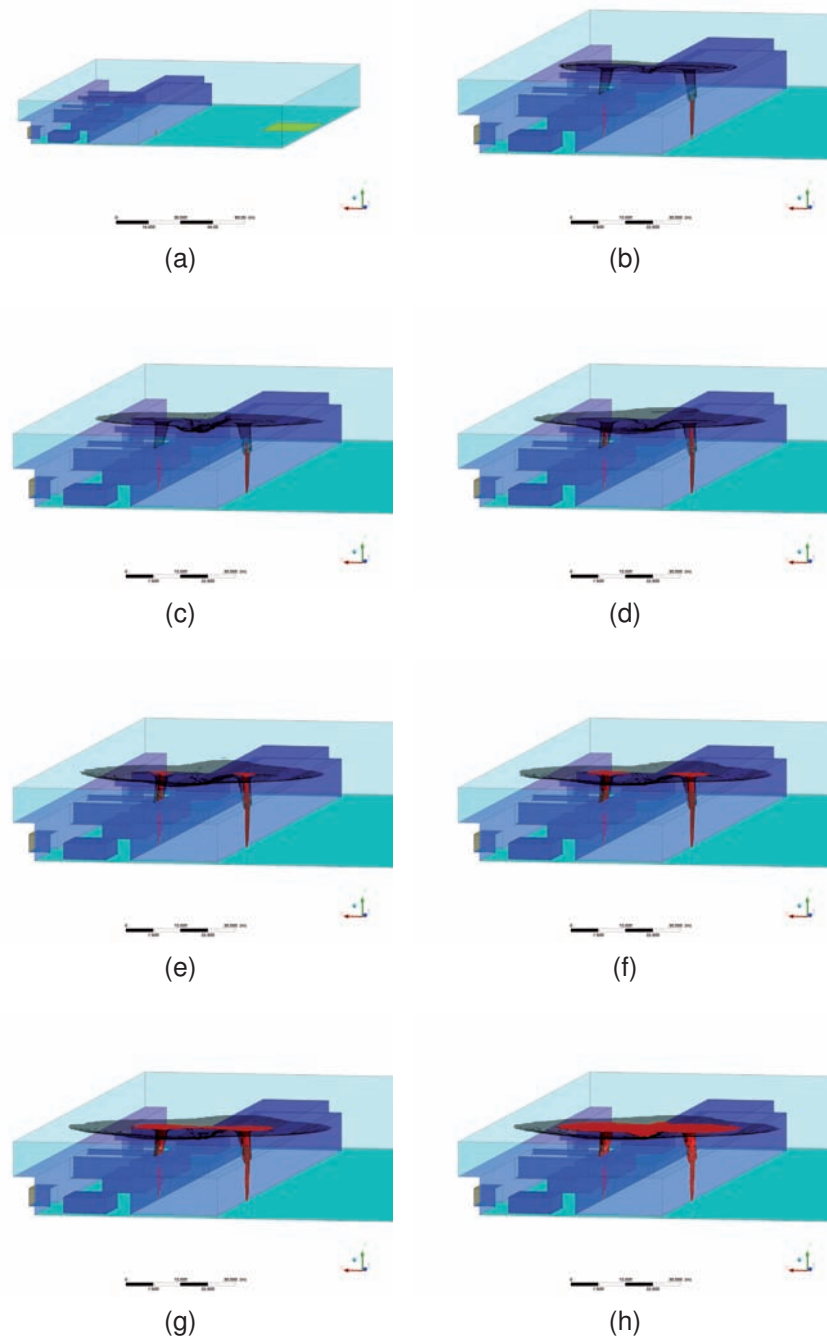


Abbildung 28: Eingangshalle: (a) Geometrie, (b) Brandverlauf nach 10 Sekunden, (c) 20 Sekunden, (d) 30 Sekunden, (e) 40 Sekunden, (f) 50 Sekunden, (g) 60 Sekunden, (h) 70 Sekunden.

In der folgenden Abbildung 29 wird der Zusammenhang zwischen Sauerstoffgehalt in der Luft und Temperatur in Verbindung mit der Wahl einer jeweils angepassten Reaktionsgleichung dargestellt. In diesem Modell wurden $2 \cdot 3 = 6$ Reaktionsgleichungen benutzt. Der Vorteil besteht darin, dass bei unterschiedlichen Bedingungen verschiedene Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid, -dioxid sowie Blausäure oder Stickoxiden entstehen können. Dadurch lassen sich mit diesem Modell auch Schwelbrände

abbilden.

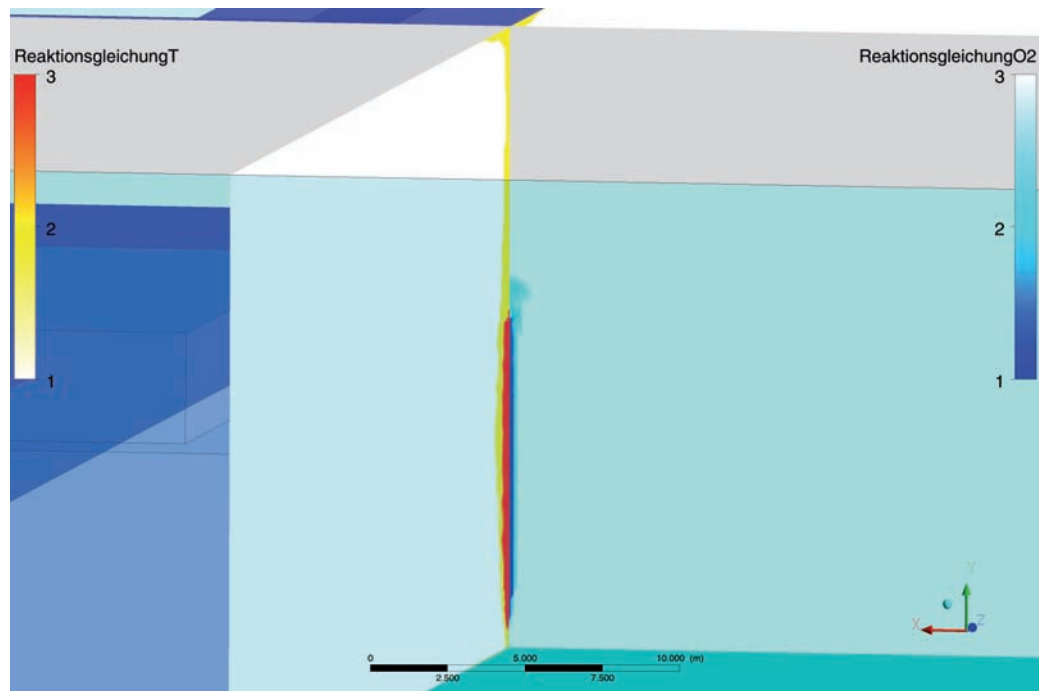


Abbildung 29: Benutzte Reaktionsgleichungen in Abhängigkeit von Sauerstoff und Temperatur

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurden Versuchsreihen für die repräsentativen Materialien, die in Kapitel 4.1 beschrieben wurden, durchgeführt. Die durchgeführten und ausgewerteten Versuche liefern die erforderliche Daten für die Simulationen. Die Versuche wurden in der modifizierten Rauchkammer, dem modifizierten DIN-Rohr und im halbtechnischen Maßstab (SBI) bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen und Bestrahlungsstärken durchgeführt. Nur dadurch lassen sich Sauerstoff- und Temperaturabhängigkeit der Rauchproduktion in das neu entwickelte numerische Modell einbringen. Mit den Versuchen im halbtechnischen Maßstab wurde die Qualität der Übertragung von Versuchsergebnissen der kleinmaßstäblichen Versuche zum Realmaßstab abgeschätzt. Um Messdaten und Reaktionsgleichungen für weitere Materialien zu gewinnen, sind die nötigen Versuchsaufbauten geschaffen worden. Dabei sind das modifizierte DIN-Rohr, die modifizierte SDC und der SBI die benötigten Versuchsstände, um im Verbund mit dem FTIR Daten für eine Erweiterung des Modells zu gewinnen. Mit den bisher gewonnen Messdaten wurden erste Reaktionsgleichungen berechnet. Diese basieren auf dem mathematischen Modell, welches den Mischungsbruchansatz berücksichtigt. Es wurden Reaktionsgleichungen für unterschiedliche Ventilationsverhältnisse und Wärmeeintrag berechnet. Für diese Berechnungen wurde ein 'Auswertetool' programmiert. Mit der Hilfe des Tools werden gemittelte Gaskonzentrationen über die Versuchszeit zu einer stöchiometrischen Reaktionsgleichung umgerechnet. Außerdem werden alle nötigen Diagramme automatisch erstellt. Dazu sind zwei weitere Programme, Gnuplot und Latex nötig. Die berechneten Reaktionsgleichungen dienen als Eingangsparameter für die Simulationen. Durch die optimierten Simulationen lassen sich Gaskonzentrationen einzelner Gase in den Geometrien verfolgen. Im nächsten Schritt sollen auch Sichtweiten berechnet werden können. Es sind weitere Forschungen geplant, für die dieses Projekt die Initialzündung war. Auch die zukünftigen Forschungsergebnisse werden veröffentlicht und dem BBR zur Verfügung gestellt.

Literatur

- [ANS06a] ANSYS: *ANSYS CFX-Pre User's Guide*. ANSYS, 2006
- [ANS06b] ANSYS: *ANSYS CFX Reference Guide*. ANSYS, 2006
- [ANS06c] ANSYS: *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. ANSYS, 2006
- [AST06] Norm August 2006. *Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter*. – ASTM E 1354a
- [BPW07] BANSEMER, Björn ; PASCHEN, Christian ; WITTBECKER, Friedrich-Wilhelm: Rauchkenndaten als Eingabeparameter für CFD basierte Sichtweitenberechnungen im Brandfall. In: *VFDB 2* (2007), S. 089–098
- [Brä00] BRÄUTIGAM, Andreas: *Einflüsse der Brandgutzusammensetzung und der Verbrennungsbedingungen auf die Entstehung mittel- und schwerflüchtiger organischer Brandrauchinhaltsstoffe*, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2000
- [Bre01] BREIN, Dieter: *Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln)*. Universität Karlsruhe (TH), 2001
- [CHGD06] CARLSSON, Jörgen ; HUSTED, Bjarne ; GÖRANSSON, Ulf ; DEDERICH, Anne S.: Anwendung von CFD-Programmen für brandtechnische Berechnungen. In: *VFDB 3* (2006), S. 127–131
- [DIN02] Norm Juni 2002. *Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. – DIN EN 13823
- [GB08] Norm 2008. *Bestimmung der optischen Rauchdichte und der Rauchgas-toxizität*
- [Hos06] HOSSER, Dietmar: *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. Dietmar Hosser, 2006
- [ISO02a] Norm Dezember 2002. *Reaction-to-fire test - Heat release, smoke production an mass loss rate Part 1: Heat release rete (cone calorimeter method)*. – ISO 5660-1
- [ISO02b] Norm Dezember 2002. *Reaction-to-fire test - Heat release, smoke production an mass loss rate Part2: Smoke production rate (dynamic measurement)*. – ISO 5660-2

- [ISO02c] Norm Dezember 2002. *Reaction-to-fire test - Heat release, smoke production an mass loss rate Part4: Measurement of heat release for determination of low levels of combustibility.* – ISO 5660-4
- [Joo06] JOOS, Franz: *Technische Verbrennung.* Springer, 2006
- [Keu03] KEUSCH, Peter: *Chemische Kinetik - Geschwindigkeitsgesetze, Arrhenius-Gleichung, Experimente.* Mai 2003
- [Kna09] KNAUST, Christian: *Modellierung von Brandszenarien in Gebäuden,* Technische Universität Wien, Dissertation, 2009
- [LJTS06] LANGEHEINECKE, Klaus ; JANY, Peter ; THIELEKE, Gerd ; SAPPER, Eugen: *Thermodynamik.* Springer, 2006
- [Luc08] LUCAS, Klaus: *Thermodynamik.* Springer, 2008
- [McG10] MCGRATTAN, Kevin: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide - Volume 4: Software Configuration Management Plan.* NIST, 2010
- [MHF10a] MCGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide.* NIST, 2010
- [MHF⁺10b] MCGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason ; BAUM, Howard ; REHM, Ronald ; MELL, William ; MCDERMOTT, Randall: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide - Volume 1: Mathematical Model.* NIST, 2010
- [MHFM10a] MCGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason ; MCDERMOTT, Randall: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide - Volume 2: Verification.* NIST, 2010
- [MHFM10b] MCGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason ; MCDERMOTT, Randall: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide - Volume 3: Validation.* NIST, 2010
- [PJDT] PHILIP J. DINENNO, Inc.) Editor-in-Chief Dougal Drysdale PhD. (University of Edinburgh) Section 1 Craig L. Beyler PhD. (Hughes Associates Inc.) Section 2 W. Douglas Walton P.E. (National Institute of S. ; TECHNOLOGY), Section 4 John R. Hall Jr. PhD. (National Fire Protection Association) Section 5 John M. Watts Jr. PhD. (The Fire Safety Institute) Section 5.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*

- [Qui06] QUINTIERE, J. G.: *Fundamentals of Fire Phenomena*. University of Maryland, USA, 2006
- [SW02] SIEGFRIED, Willi ; WILL, Jürgen: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. In: *VFDB* 3 (2002), S. 101–107
- [Tes92] TESNER, P. A.: *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 28 (1992)
- [VB92] V. BABRAUSKAS, S. J. G.: *Heat Release in Fires*. Elsevier Applied Science, 1992
- [Wil04] WILL, Jürgen: *Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden*, TU Braunschweig, Dissertation, 2004
- [WMD06] WARNATZ, Jürgen ; MAAS, Ulrich ; DIBBLE, Robert W.: *Combustion*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2006

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
12200 Berlin, 2010-05-25

VII.39 AG Brandszenarien und Brandanalytik

im Auftrag

im Auftrag

Dr. Anja Hofmann
Arbeitsgruppenleiterin

Nils Monreal

Verteiler:

1. Ausfertigung: <>

2. bis <> Ausfertigung: