



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

# Numerische und experimentelle Untersuchung von Brandrauch unter Berücksichtigung von flammenden und nicht-flammenden Verbrennungsvorgängen

---

Dissertation

im

**Fachbereich Sicherheitstechnik**

der

**Bergischen Universität Wuppertal**

– **Abteilung Methoden der Sicherheitstechnik und Unfallforschung** –

vorgelegt von

**Nils Monreal**

aus Berlin

Wuppertal 2016

1. Gutachter: Univ.- Prof. Dr.-Ing. U. Barth (Bergische Universität Wuppertal)  
2. Gutachter: Univ.- Prof. Dr.-Ing. habil. U. Krause (Otto-von-Guericke Universität Magdeburg)  
Prüfungsdatum: 18. August 2017

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20171219-115911-2

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20171219-115911-2>]



---

## Danksagung

---

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die es mir ermöglicht haben, die Arbeit zu schreiben und mich stets fachlich und persönlich unterstützten. Dabei gilt mein besonderer Dank Frau Dr.-Ing. Anja Hofman-Böllinghaus, die mir die Arbeit am Projekt und an der Dissertation ermöglicht hat. Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause danke ich für seine Unterstützung und für seine Bereitschaft, sich für diese Arbeit einzusetzen und die Arbeit mit zu betreuen. Für die Betreuung von universitärer Seite möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Univ.-Prof.-Dr.-Ing. Uli Barth bedanken. Herr Dr.-techn. Christian Knaust und Frau Dr.-Ing. Andrea Klippel waren mir fachlich durch gute Zusammenarbeit und häufige Diskussionen und auch privat eine große Hilfe. Schon lange vor der Dissertation, während der Schule und des Studiums, aber auch gerade während meiner Promotionszeit hat mir die Zusammenarbeit mit Herrn M. Eng. Frederik Rabe immer sehr geholfen und für fachliche Fragen war er stets zur Stelle. Vor allem für die Unterstützung während meiner experimentellen Untersuchungen möchte ich mich noch einmal ausdrücklich bei Frau Klippel und Herrn Rabe bedanken.

Ganz besonderer Dank für fortwährende Unterstützung gilt meinen Eltern Anne und Horst, sowie meinen Schwiegereltern Marlu und Otmar. Meine Eltern standen mir immer bei Fragen oder Problemen zu jeder Zeit zur Seite. Großer Dank gilt auch meiner Frau Sarah und meinen Töchtern Filippa und Valerie, die mir jeden Tag verschönert haben.



---

## Kurzfassung

---

In dieser Arbeit werden die Brandmodelle der computational fluid dynamics (CFD)-Programme ANSYS CFX 14.5 und FDS (NIST, Version 5.5.3) durch selbst entwickelte Gleichungen für verschiedene Materialien (Polyurethan und Polyvinylchlorid) bei verschiedenen Brandsituationen (flammende und nicht-flammende Verbrennung) verfeinert. Dazu wurden Versuche mit unterschiedlichen Brandtemperaturen und Belüftungszuständen mit der Smoke Density Chamber (SDC) und in einem modifizierten DIN-Rohr mit Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FT-IR) zur Rauchgasanalyse durchgeführt. Aus den Messwerten aus diesen Versuchen wurden neue situationsspezifische Reaktionsgleichungen für die untersuchten Materialien abgeleitet. In mit CFX durchgeführten Simulationen der SDC wurden die neu entwickelten Gleichungen eingesetzt und die Simulationsergebnisse mit den Versuchen in der SDC verglichen. Es stellte sich heraus, dass die selbst entwickelten Reaktionsgleichungen die Versuchsergebnisse sehr viel besser wiedergaben als die standardmäßig in CFX implementierten. Die neue, verbesserte Brandmodellierung wurde anschließend unter Verwendung von CFX auf eine Brandsituation in einer Hotellobby angewendet und mit Ergebnissen einer bisher üblichen Berechnung mit FDS verglichen. Die Simulation der auftretenden Rauchverhältnisse verdeutlichte zusätzlich die Wichtigkeit der neuen Ergebnisse dieser Arbeit, da sich zeigte, dass bei einer nicht-flammenden Verbrennung eine größere Menge Rauch entstehen kann, obwohl die Wärmefreisetzung nicht besonders hoch ist. Das führt bei der Verwendung eines Modells für flammende Verbrennung zu einer signifikanten Unterschätzung der Rauchmenge. Dies kann zu einer fehlerhaften Bemessung von Fluchtwegen führen.



---

## Abstract

---

Aim of this work was the enhancement of fire models of the computational fluid dynamics (CFD) programmes ANSYS CFX 14.5 and FDS (NIST, version 5.5.3) with development of new calculated reaction equations for different materials (polyurethane and polyvinylchloride) under different combustion conditions (flaming and non-flaming combustion). Experiments were performed in the Smoke Density Chamber (SDC) and a modified DIN tube with Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FT-IR) analysis for smoke gas measurements under different ventilation and temperature conditions. Results of these experiments were used to develop new situative adapted reaction equations for the investigated materials. For numerical simulations with CFX the new equations were implemented and used to compare the numerical predictions with experimental results of SDC experiments. Use of the new equations gives better results than the standard equations. The new developed fire models in CFX were used to predict a fire scenario in a hotel lobby compared to results with standard models in FDS. Comparison of both simulations show the importance of adapted reactions. In non-flaming combustion the amount of smoke can be significantly high although the heat release might be not especially high. For that reason a prediction of the same situation with a numerical model for flaming combustion can underestimate the smoke production significantly. Escape routes can be negatively affected.



---

## Inhaltsverzeichnis

---

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Aufgabenstellung . . . . .	2
1.2	Vorgehen . . . . .	2
2	Wissenschaftliche Einordnung	5
2.1	Begriffe . . . . .	5
2.2	Brandprüfstände . . . . .	6
2.2.1	Smoke Density Chamber (SDC) . . . . .	7
2.2.2	DIN-Rohr . . . . .	8
2.2.3	Fehlerabschätzung der Experimente . . . . .	9
2.3	Materialien . . . . .	10
2.4	Brandrauch . . . . .	13
2.5	CFD-Programme . . . . .	16
2.5.1	ANSYS CFX . . . . .	16
2.5.2	Fire Dynamics Simulator (FDS) . . . . .	17
2.5.3	Fehlerabschätzung bei CFD Berechnungen . . . . .	19
2.6	Submodelle . . . . .	19
2.6.1	Turbulenzmodelle . . . . .	20
2.6.2	Verbrennungsmodelle . . . . .	20
2.6.3	Strahlungsmodelle . . . . .	22
3	Experimente	23
3.1	Smoke Density Chamber (SDC) . . . . .	23
3.2	Modifiziertes DIN-Rohr . . . . .	26
3.3	Zusammenfassung der Versuchsdaten . . . . .	31
4	Bestimmung der Parameter für die numerischen Untersuchungen	39
4.1	Verwendete Modelle . . . . .	39
4.1.1	Turbulenzmodelle . . . . .	40
4.1.2	Energietransportmodelle . . . . .	41
4.1.3	Strahlungstransportmodelle . . . . .	41
4.1.4	Reaktionsmodelle . . . . .	42
4.2	Auswertetool . . . . .	44
4.2.1	Auswertetool-Diagramme . . . . .	44

---

4.2.2	Auswertetool-Reaktionsgleichungen . . . . .	47
4.3	Luft- bzw. Sauerstoffbedarf . . . . .	51
4.3.1	Sauerstoffverbrauch im DIN-Rohr . . . . .	52
4.3.2	Sauerstoffverbrauch in der SDC . . . . .	52
4.4	Stoffbilanz im DIN-Rohr . . . . .	53
4.5	Randbedingungen für die numerischen Untersuchungen . . . . .	55
4.5.1	Smoke Density Chamber . . . . .	56
4.5.2	Hotel . . . . .	60
4.6	Gebietsbedingungen . . . . .	63
4.6.1	Reaktionsgleichungen . . . . .	63
4.6.2	Auftrieb . . . . .	64
4.6.3	Initialisierung . . . . .	65
4.6.4	Sichtweiten . . . . .	65
5	Simulationen . . . . .	67
5.1	Modellierung der SDC und Validierung der Simulation . . . . .	68
5.2	Voruntersuchung des Gitters . . . . .	73
5.2.1	Gitterstudie mit FDS . . . . .	75
5.2.2	Gitterstudie mit CFX . . . . .	78
5.3	Brandsimulation in einer Hotellobby . . . . .	79
5.3.1	Untersuchung mit ANSYS CFX . . . . .	79
5.3.2	Hotellobby mit FDS . . . . .	82
5.4	Vergleich von CFX und FDS . . . . .	86
5.4.1	Temperatur . . . . .	86
5.4.2	Sichtweiten . . . . .	88
5.4.3	Rechenzeiten . . . . .	90
5.5	Diskussion . . . . .	91
6	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	93
6.1	Zusammenfassung . . . . .	93
6.2	Ausblick . . . . .	96
	Literaturverzeichnis . . . . .	98
	Symbolverzeichnis . . . . .	102
	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	104
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	105
	Tabellenverzeichnis . . . . .	108
	Anhang . . . . .	109
A	Begriffe . . . . .	109



---

B	Versuchsdaten SDC	115
B.1	PUR3554 . . . . .	115
B.2	PUR3045SE . . . . .	122
B.3	$CO/CO_2$ -Verhältnisse . . . . .	128
C	Versuchsdaten DIN-Rohr	129
C.1	PUR3554 . . . . .	129
C.2	PUR3045SE . . . . .	151
C.3	PVC . . . . .	172



# KAPITEL 1

---

## Einleitung

---

Das Phänomen Feuer erschreckt und fasziniert den Menschen seit Beginn seiner Existenz bis heute. Jedes Feuer, jeder Brand ist neu, anders als alle seine Vorgänger, was einen Teil der Faszination ausmacht. Dieses chaotische Verhalten hat es wohl mit sich gebracht, dass eine wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Thema verstärkt erst im letzten Jahrhundert einsetzte. Es begann mit der Entwicklung von Apparaturen wie Brandprüfständen, um Brände durch Kontrolle möglichst vieler Parameter wiederholbar und damit beschreib- und messbar zu machen. Seit zwei Jahrzehnten ist es generell möglich, Brände auch numerisch zu simulieren und damit in Zukunft die Anzahl von zeit- und kostenintensiven Versuchen zu reduzieren. Je nach verwendeter Hardware sind allerdings lange Simulationszeiten erforderlich, die ein Hindernis darstellen können. Aufgrund von Vereinfachungen der tatsächlich auftretenden physikalisch-chemischen Vorgänge bei Verbrennungen ermöglichen die aktuell verfügbaren Simulationsprogramme bisher nur eingeschränkt die Modellierung realer Brandszenarien.

Ein unkontrollierter Brand beginnt mit einer Entzündung. Es muss das Verhältnis zwischen Brennstoff, Oxidationsmittel und Zündenergie stimmen. Die erste Brandphase kann unterschiedlich lange andauern bis sich der Brand entweder weiterentwickelt und größer wird, oder eventuell nach der Entzündung nur kurz bestehen bleibt und wieder erlischt. Die unterschiedlichen Brandphasen (siehe Abbildung 4.11) sind unter anderem in dieser Arbeit erläutert. Sie lassen sich durch äußere Einflüsse wie zum Beispiel Ventilation durch ein offenes oder geschlossenes Fenster sehr stark beeinflussen. Des weiteren kann die Wärmequelle, die zur Entzündung beigetragen hat, den Brand ebenfalls stark beeinflussen. Die Wärmequelle kann dabei ein Funke, andauernde Strahlungswärme oder eine Flamme sein. Ein klassischer Brand verläuft mit dem Vorhandensein einer Flamme. Wenn diese erlischt und sich ein Schwelbrand entwickelt, verändert sich der Brandverlauf maßgeblich.

Die vorgelegte Arbeit soll helfen, die bisher vorhandenen Möglichkeiten zur Simulation von Bränden zu verbessern, indem sie unter Verwendung der aktuellen Simulationsprogramme ANSYS CFX und FDS neu gewonnene Brandparameter in Berechnungen für ausgewählte Brandszenarien mit differenzierten Brandphasen anwendet.

## 1.1 Motivation und Aufgabenstellung

Die Modellierung von Brandszenarien mit Strömungssimulationsprogrammen Computational Fluid Dynamics (CFD) beruht auf Modellen, die nicht immer für eine realistische Abschätzung des Brandverlaufs ausreichen. Häufig werden Verfahren verwendet, bei denen ein Brandszenario modelliert wird, das sich von der Entzündung des Materials bis zum Vollbrand entwickelt. Diese Brandentwicklung geht von einer flammenden Verbrennung aus. Dabei bleibt die vor der Entflammung häufig auftretende Schwelphase (ohne Flamme) unberücksichtigt.

Die Brandentwicklungsphase kann flammend oder nicht-flammend sein. Die nicht-flammende Verbrennung kann zu einer flammenden Verbrennung führen, wenn ausreichend Sauerstoff und hohe Temperaturen vorherrschen. Wenn kein Übergang zur flammenden Verbrennung erfolgt, liegt weiterhin ein schwelender Brand bzw. ein nicht-flammender Prozess vor. Der nicht-flammende Vorgang kann nicht grundsätzlich vernachlässigt werden.

Das Forschungsprojekt “Quantifizierung von Brandrauch als Grundlage für simulationsbasierte Brandschutz- und Entrauchungskonzepte” entstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in der Abteilung “Bauwerkssicherheit” in der Arbeitsgruppe “Raumbrände und Brandverhalten von Baustoffen” in Kooperation mit dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), finanziert durch die Forschungsinitiative ZukunftBau. Der Forschungsbericht [HBM12] wurde als Zwischenstand für des Forschungsvorhabens 2012 veröffentlicht.

Ziel der Dissertation ist die Weiterentwicklung von Simulationsrechnungen zur Brand- und Rauchausbreitung hinsichtlich unterschiedlicher Umgebungsbedingungen.

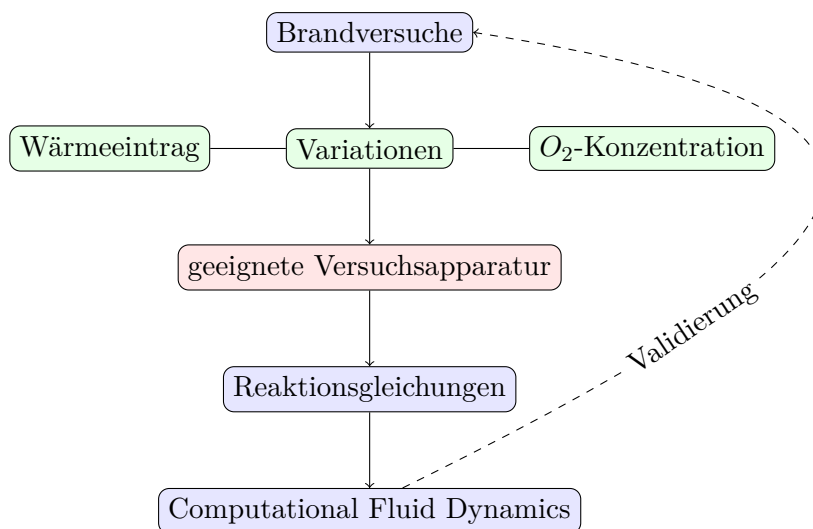
## 1.2 Vorgehen

Für die in dieser Arbeit durchgeführte Weiterentwicklung von Brandrauchsimulationen, die den Einfluss von verschiedenen Umgebungsbedingungen auf die Verbrennung berücksichtigen, waren experimentelle Eingangsdaten notwendig. Dafür wurde die Zusammensetzung der Rauchgase quantitativ und qualitativ unter verschiedenen Bestrahlungsstärken und Sauerstoffkonzentrationen mit Hilfe von FT-IR-Spektroskopie bestimmt. Aus den ermittelten Gaskonzentrationen wurden die Massenströme der Einzelkomponenten für die Versuchszeit bestimmt. Es wurde ein Versuchsaufbau im DIN-Rohr in Anlehnung an DIN 53436 [DIN 53436] verwendet. Der Versuchsaufbau wurde so modifiziert, dass Luftdurchflussmengen und Sauerstoffkonzentrationen variiert werden konnten. Aus der Bilanzierung der gemessenen Konzentrationen wurden Reaktionsgleichungen für den jeweiligen Stoff für die herrschenden Bedingungen ermittelt. Die Reaktionsgleichungen wurden in ein Modell eines Strömungssimulationsprogrammes (Computational Fluid Dynamics, kurz CFD) implementiert. Für die Implementierung und Validierung wurde die kommerzielle Software ANSYS CFX 14.5 benutzt. Für die Validierung der Modellrechnungen wurde der Prüfstand Smoke Density Chamber (SDC) [DIN EN ISO 5659-2] ausgewählt. Die

Validierung wurde anhand des Vergleichs von Versuchen und Modellrechnungen durchgeführt. Nach Validierung des Modells wurde ein Brandszenario in einer größeren Geometrie ausgewählt, um die Anwendungsmöglichkeiten des Modells zu demonstrieren. Es wurden zum einen die Standardreaktionsgleichungen verwendet, zum anderen die neu ermittelten. Da es keine experimentellen Vergleichsdaten aus Brandversuchen in dieser Geometrie gibt, wurde zusätzlich der Fire Dynamics Simulator (FDS) 5.5.3, entwickelt vom NIST, eingesetzt, der auch bei der Erstellung des Brandschutzkonzepts für die betrachtete Hotel-Lobby verwendet worden war. Es wurde soweit wie möglich dieselbe Geometrie mit gleichen Rand- und Gebietsbedingungen in beiden Programmen modelliert. Der Einfluss der unterschiedlichen Rauchproduktion und Temperaturentwicklung zwischen den vorgegebenen Reaktionsgleichungen und den neu ermittelten Reaktionsgleichungen wurde untersucht. Das Auslösen von Rauchmeldern wurde nicht weiter betrachtet. Der Hauptfokus der Ergebnisse wurde auf die Sichtweiten und Temperaturen unterhalb der Decke gelegt, da die Sichtweiten für die Möglichkeiten der Selbstrettung von Personen in diesem Szenario entscheidend sind und die Temperaturen unter den Decke den Zeitpunkt für die Auslösung der Sprinkler bestimmten, die ein wesentlicher Bestandteil des Brandschutzkonzepts für die Hotel-Lobby waren.

Das Vorgehen (blau) ist schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt. Außerdem wird die Auswahl der Parameter (grün) und die geeignete Versuchsanlage (rot) gezeigt. Eine sinnvolle Wahl der Versuchsanlage ist zwingend notwendig, um die Eingabeparameter für die Simulationen detailreicher zu gestalten.

In dieser Arbeit werden viele Begriffe aus dem Gebiet Verbrennung benutzt. Um Unklarheiten zu vermeiden, wird im Anhang A erläutert, mit welcher Bedeutung der



**Abbildung 1.1:** Struktur der Untersuchungen von den Experimenten bis zu den Simulationen (blau: Vorgehen, grün: Parameter, rot: Prüfgeräte)

jeweilige Begriff hier verwendet wird.

Alle Messwerte aus den Experimenten an den Brandprüfständen befinden sich ebenfalls im Anhang. Im Anhang B finden sich alle Diagramme der SDC-Versuche und im Anhang C alle Diagramme der DIN-Rohr-Versuche mit den gemittelten Messwerten für die drei untersuchten Materialien, die für die Berechnung der Reaktionsgleichungen im Kapitel 3 verwendet wurden.

# KAPITEL 2

---

## Wissenschaftliche Einordnung

---

In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Fachbegriffe erläutert, die in dieser Arbeit verwendet werden. Des Weiteren werden die nötigen Hilfsmittel zur Untersuchung dargestellt. Das sind einmal die Versuchsanordnungen Smoke Density Chamber (SDC) und DIN-Rohr und auf der anderen Seite die verwendeten Computational Fluid Dynamics (CFD) Programme ANSYS CFX und FDS.

### 2.1 Begriffe

In dieser Arbeit finden die international harmonisierten Fachbegriffe der DIN EN ISO 13943 [DIN EN ISO 13943] Anwendung. Die für diese Arbeit grundlegenden Fachbegriffe sind im Anhang A aufgeführt.

Da sich die chemisch-physikalischen Vorgänge bei flammender und nicht-flammender Verbrennung grundsätzlich unterscheiden, wird auf diesen Unterschied hier besonders eingegangen.

Die flammende Verbrennung beschreibt den Prozess der Oxidation in der Gasphase eines Stoffes nach Entzündung (siehe Begriffe wie **andauerndes Brennen mit Flamme, Flamme, Verbrennung oder Verbrennung mit Flammerscheinung**).

Die nicht-flammende Verbrennung hingegen beschreibt einen Prozess der unvollständigen Oxidation von Stoffen in der Gasphase, der nicht durch Sauerstoffmangel entstehen muss. Für eine Entzündung fehlt die nötige Energie. Ein **Glimmen oder Glühen** findet nicht statt. Der Prozess ist unter diesen Bedingungen **nicht entflammbar**. Es findet kein **fortschreitendes Schwelen** statt, da das fortschreitende Schwelen auch nach Entfernung der Wärmequelle weiter stattfinden würde; dieser Prozess ist hier jedoch nicht gemeint. **Pyrolyse** beschreibt den Prozess der thermischen Zersetzung eines Stoffes durch Wärmezufuhr. Laut [DiN08, 2-168] entstehen bei diesem Prozess keine Oxidationsprodukte, sondern ausschließlich thermische Zersetzungsprodukte des Materials. Das (Nicht-)Vorhandensein von Sauer-

stoff hat keine Auswirkung auf die entstehenden Zersetzungsprodukte. Pyrolyse differenziert sich hierdurch von der nicht-flammenden Verbrennung, bei der Oxidationsprodukte durch Luftsauerstoff auftreten. **Schwelen** trifft als Beschreibung der nicht-flammenden Verbrennung zu.

Der Begriff **Plume (auftriebsbehafteter Massestrom)** oder **Feuerplume** wurde im Anhang mit aufgenommen, da der Plume bei der Quantifizierung von Brandrauch in Brandszenarien eine große Bedeutung hat. Dieser aufsteigende Massenstrom mit Partikeln wird strömungstechnisch als Freistrahle bezeichnet. Es tritt eine Masse in ein umgebendes Medium ein, in der sich diese Masse frei ausbreiten kann. Die Anfangsgeschwindigkeit von Freistrahlen kann unterschiedlich sein. Beim Austritt aus einer Düse, durch Entstehung des Freistrahles bei einer Verbrennungsreaktion über den brennbaren Stoffen oder bei vorgemischten Flammen bzw. Diffusionsflammen liegen unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten vor. Der Impulserhaltungssatz beschreibt die Abflachung der Strömungs-, Temperatur- und Konzentrationsprofile mit zunehmender Entfernung des Freistrahlsprungs.[Bre01]

## 2.2 Brandprüfstände

Um ein reproduzierbares Brandszenario für eine nicht-flammende Verbrennung abzubilden, wurden Versuche in der Smoke Density Chamber (SDC) und im DIN-Rohr durchgeführt. Die Daten der durchgeführten Versuche sind im Kapitel 3 dargestellt. Die unterschiedlichen verwendeten Versuchsaufbauten werden in diesem Abschnitt beschrieben und exemplarisch einige der Versuchsdaten näher erläutert.



### 2.2.1 Smoke Density Chamber (SDC)

In der SDC werden Proben von  $75\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times \text{max. } 25\text{ mm}$  horizontal mit einer konusförmigen Wärmequelle von  $25$  und  $50\text{ kW/m}^2$  beansprucht. Während des Versuches kann optional eine Zündflamme zugeschaltet werden. Standardmäßig werden insgesamt 12 Versuche, d.h. drei Versuche pro Konfiguration durchgeführt. Die Prüfkammer ist geschlossen und umfasst ca.  $1/2\text{ m}^3$  Volumen. Es werden Druck, Temperatur und Transmission bestimmt. Aus der Transmission lässt sich die spezifische optische Dichte berechnen. Zusätzlich kann ein FT-IR Spektrometer an die Kammer angeschlossen werden, wie es in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Dabei werden die Brandgase durchgehend analysiert und wieder in die Kammer zurück gespült, um einen Druckabfall in der Prüfapparatur zu verhindern. [DIN EN ISO 5659-2]



**Abbildung 2.1:** Smoke Density Chamber (1) mit FT-IR (2)

### 2.2.2 DIN-Rohr

Bei dem DIN-Rohr handelt es sich um eine Prüfapparatur, die Baustoffe unter definierten Bedingungen zum Verschwelen bringt, um die Rauchdichte zu bestimmen. Das DIN-Rohr wird in der Norm DIN 4102-01 beschrieben, die den folgenden Angaben zugrunde liegt: Die Probe von  $5\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 270\text{ mm}$  wird auf einer Glas-Küvette in dem DIN-Rohr ( $1,0 - 1,3\text{ m}$  lang) platziert. Der Zuluftstrom beträgt  $300\text{ l/h}$ . Der Ringofen ( $100\text{ mm}$  lang) wird auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt und fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von  $10\text{ mm/min}$  über die Probe. Die Versuche werden bei  $250, 300, 350, 400, 450, 550$  und  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  jeweils viermal durchgeführt. Die aufgenommene Lichtschwächung wird über die Versuche gemittelt und ausgewertet. In den Versuchen 1 und 2 wird die  $2\text{ mm}$  breite Seite parallel zur Oberfläche angeordnet, in den Versuchen 3 und 4 hingegen die  $5\text{ mm}$  breite Seite [DIN 4102-01]. In Abbildung 2.2 ist das modifizierte DIN-Rohr mit angeschlossenem FT-IR dargestellt.

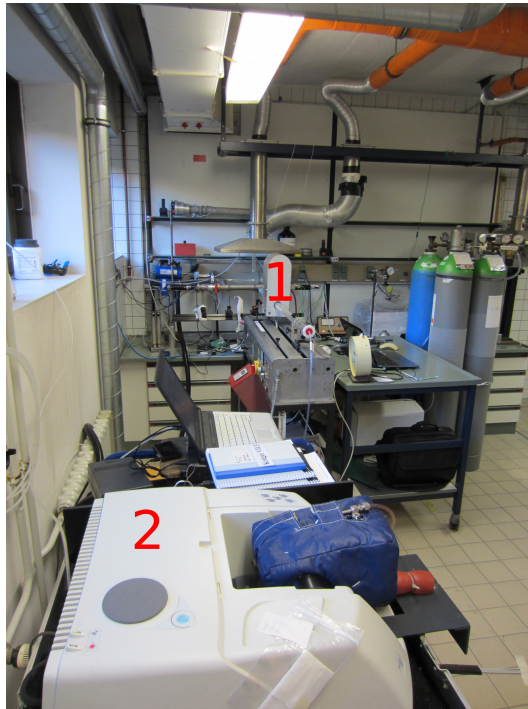


Abbildung 2.2: DIN-Rohr (1) mit FT-IR (2)

### 2.2.3 Fehlerabschätzung der Experimente

Nach [DIN EN ISO 5659-2] sind folgende Kriterien für die Fehlerabschätzung bei Smoke Density Chamber Versuchen gefordert: Für die Lichtmessstrecke darf eine maximale Abweichung der Transmission von weniger als 3% herrschen. Die Waage muss eine Ablesung auf 0,5% der Probekörpermasse ermöglichen. Für die Temperaturmessungen wird ein Thermoelement gefordert, das im Temperaturbereich von  $20 - 100^\circ\text{C}$  eine maximale Abweichung von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  hat. Das Aufzeichnungsgerät muss kontinuierlich aufzeichnen können und die Messunsicherheit darf weniger als 0,5% der Auslenkung der gesamten Skalenanzeige betragen. Der Wärmestrom muss auf  $25 \pm 1$  und  $50 \pm 1 \text{ kW/m}^2$  einstellbar sein. Das Aufzeichnungsgerät darf keine höhere Abweichung als  $1 \text{ kW/m}^2$  bei den Wärmeströmen von 25 und  $50 \text{ kW/m}^2$  haben.

Für die Versuche mit dem DIN-Rohr wurden zusätzliche Messgeräte verwendet, die nicht alle in der Norm [DIN 4102-01] beschrieben sind. Das Flowmeter TSI 4100 Series hat nach [MTK13] eine Messgenauigkeit von  $\pm 2\%$  des Messwertes oder  $0,005 \text{ l/min}$ , wobei für Luft- und Sauerstoffmessungen jeweils der höhere Wert gilt. Bei einem Durchfluss von  $5 \text{ l/min}$  beträgt die Abweichung  $\pm 0,1 \text{ l/min}$ .

Die Daten der Lichtmessstrecke im DIN-Rohr wurden nicht ausgewertet, weshalb hier auf die Fehlerabschätzung verzichtet wird.

Die eingesetzten Thermoelemente NiCr-Ni (Typ K) haben einen Einsatzbereich von  $-40$  bis  $+1000^\circ\text{C}$ . Die Abweichung bei der verwendeten Genauigkeitsklasse 1 liegt bei  $\pm 1,5^\circ\text{C}$  bzw.  $\pm 0,4\%$  vom Messwert. Das entspricht bei den Maximaltemperaturen von  $\approx 700^\circ\text{C}$  um  $\pm 2,8^\circ\text{C}$ . Es wurden zwei Arten von Thermoelementen mit unterschiedlichem Durchmesser ( $\varnothing$ ) eingesetzt. Für die Messungen im Rauchgas wurden Thermoelemente mit einem Durchmesser von  $0,5 \text{ mm}$  eingesetzt, für die Messungen der Ofentemperatur solche mit einem Durchmesser von  $1,0 \text{ mm}$ . Die Ansprechzeiten zum Erreichen von 50% der Zieltemperatur liegen für Luftmessungen des Thermoelements bei  $1,8 \text{ s}$  ( $\varnothing 0,5 \text{ mm}$ ) bzw.  $3,0 \text{ s}$  ( $\varnothing 1,0 \text{ mm}$ ). 90% der Zieltemperatur sind nach  $3,0 \text{ s}$  bzw.  $10,0 \text{ s}$  erreicht. Aufgrund der langen Versuchszeiten von  $1800 \text{ s}$  ( $30 \text{ min}$ ) beim DIN-Rohr und der nur geringen Temperaturschwankungen während der Messung nehmen diese Ansprechzeiten kaum einen Einfluss auf die Messungen.

Die Messgeräte, die sowohl für die SDC als auch für die DIN-Rohr Versuche benutzt wurden, haben folgende Messtoleranzen: Die Präzisionswaage PCE-BT 200 hat laut Hersteller [PCE] eine Ablesegenauigkeit von  $0,001 \text{ g}$  bei einem Maximalgewicht von  $210 \text{ g}$ . Die Reproduzierbarkeit liegt bei  $0,002 \text{ g}$ . Das FT-IR ist für die gemessenen Gase kalibriert. Es wurde mit einem zusätzlichen Prüfgas aus  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{C}_2\text{H}_4$  eine Ein-Punkt-Analyse für die Gase durchgeführt, um die Kalibrierung zu bestätigen. Die Messwerte sind in Tabelle 2.1 aufgelistet<sup>1</sup>. Für alle weiteren entstehenden Gase ist das FT-IR nicht kalibriert. Bei der Pyrolyse und somit unvollständigen Verbrennung

---

<sup>1</sup> Quelle: T. Raspe (BAM)

entstehen langkettige Kohlenstoffverbindungen, die nicht erfasst werden. Diese sind für diese Arbeit nicht relevant. Sie werden in der Summe als Ruß betrachtet.

**Tabelle 2.1:** Ist- und Soll-Werte sowie die prozentuale Abweichung für die Gasanalyse eines Prüfgases mit vier ausgewählten Gaskomponenten mit dem FT-IR Messgerät

Gas	Ist-Wert in ppm	Soll-Wert in ppm	Abweichung in %
$CO_2$	4500	4922	9
$CO$	720	992	27
$CH_4$	472	603	22
$C_2H_4$	376	466	19

Diese Ein-Punkt-Analyse ist nicht repräsentativ für die Messungen. Die Rauchgaszusammensetzung kann sehr unterschiedliche Gaskonzentrationen beinhalten, die vom kalibrierten Spektrum des FT-IR präziser abgedeckt werden.

## 2.3 Materialien

Hier werden die technischen Eigenschaften der untersuchten Materialien kurz dargestellt. Es wurden Polyurethan [CT 13a], Polyurethan schwer entflammbar [CT 13b] und Polyvinylchlorid [REL13] untersucht. Diese Materialien wurden ausgewählt, weil sie typisch für Wohngebäude sind. Diese Materialien haben eine homogene Zusammensetzung und lassen sich reproduzierbar in Brandversuchen untersuchen. Stühle, Sofas und andere Polstermöbel bestehen zu einem großen Teil aus den genannten Polyurethan-Schäumen. Aus PVC werden Fester, Kabelschächte, Fußböden und viele andere Gegenstände für Wohngebäude hergestellt. Alle diese Materialien lassen sich auch leicht entzünden. Holz wurde auf Grund der verschiedenartigen Strukturen und Zusammensetzungen (z.B. Sperrholz) nicht untersucht. Hier gibt es viele Arten von Zusammensetzungen welche nicht homogen wie PUR oder PVC sind.

**Material A:** Polyurethan 3554

*Einsatzbereich:* Gebrauchsgegenstände: Matratzen, Polstermöbel, Dämmstoffe, Dichtstoffe

*Typenbezeichnung:* CP 3554

*Werkstoff:* Polyurethanschaum auf Polyetherbasis

*Farbe:* weiß

*Netto-Rohdichte:* 33,5 kg/m<sup>3</sup> (ISO 845)

*Stauchhärte:* 5,4 kPa (ISO 3386)

*Eindrückhärte:* 235 N (ISO 2439)

*Zugfestigkeit:* > 120 kPa (ISO 1798)

*Bruchdehnung:* > 120 % (ISO 1798)

*Druckverformungsrest:* < 5 % (ISO 1856)

*Brennverhalten:* -

*Produktion:* Es werden keine physikalischen Treibmittel wie FCKWs, H-FCKWs oder Methylen eingesetzt.

*Anspruch:* Der Schaum entspricht den Anforderungen der Öko-TEX 100-Klasse 1.

**Material B:** Polyurethan 3045SE

*Einsatzbereich:* Gebrauchsgegenstände: Matratzen, Polstermöbel, Dämmstoffe, Dichtstoffe (wie Material A)

*Typenbezeichnung:* CP 3045 SE

*Werkstoff:* Polyurethanschaum auf Polyetherbasis

*Farbe:* Anthrazite

*Netto-Rohdichte:* 28,5 kg/m<sup>3</sup> (ISO 845)

*Stauchhärte:* 4,5 kPa (ISO 3386)

*Eindrückhärte:* 195 N (ISO 2439)

*Zugfestigkeit:* > 120 kPa (ISO 1798)

*Bruchdehnung:* > 120 % (ISO 1798)

*Druckverformungsrest:* < 7 % (ISO 1856)

*Brennverhalten:* FMVSS 302

*Produktion:* Es werden keine physikalischen Treibmittel wie FCKWs, H-FCKWs oder Methylen eingesetzt.

*Anspruch:* Der Schaum entspricht den Anforderungen der Öko-TEX 100-Klasse 4.

**Material C:** Polyvinylchlorid normal entflammbar

*Einsatzgebiet:* Fußbodenbeläge, Fensterprofile, Rohre, Kabelisolierungen

*Farbe:* rot

*Dichte:*  $1,4 \text{ g/cm}^3$  (DIN 53479)

*Wasseraufnahme:* 0,2 % (ISO 62)

*Dauergebrauchstemperatur:*  $-15$  bis  $60 \text{ }^\circ\text{C}$

*Streckspannung:* 55 MPa (ISO 527)

*Streckdehnung:* 3 % (ISO 527)

*Reißfestigkeit:* 30 MPa (ISO 527)

*Reißdehnung:*  $\geq 10 \%$  (ISO 527)

*Kerbschlagzähigkeit:*  $3 \text{ kJ/m}^2$  (ISO 179)

*Kugeldruckhärte/Rockwell:* 120 mPa (ISO 2039)

*Shore-D:* 82 (DIN 53505)

*Biegefestigkeit:* 90 MPa (ISO 178)

*Elastizitätsmodul:* 3000 MPa (ISO 527)

*Wärmeleitfähigkeit:*  $0,14 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  (DIN 52612)

*Vicat Erweichungstemperatur VST/B/50:*  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  (ISO 306)

*Längenausdehnungskoeffizient:*  $0,8 \text{ 1/K} \cdot 10^{-4}$  (DIN 53752)

*Dielektrizitätszahl bei 1 MHz:* 3 (DIN 53483)

*Diel. Verlustfaktor bei 1 MHz:* 0,01 (DIN 53483)

*spez. Durchgangswiderstand:*  $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$  (VDE 0303)

*Durchschlagfestigkeit:* 20 – 40 kV/mm (VDE 0303)

*Kriechstromfestigkeit:* KB 600 (IEC 60112)

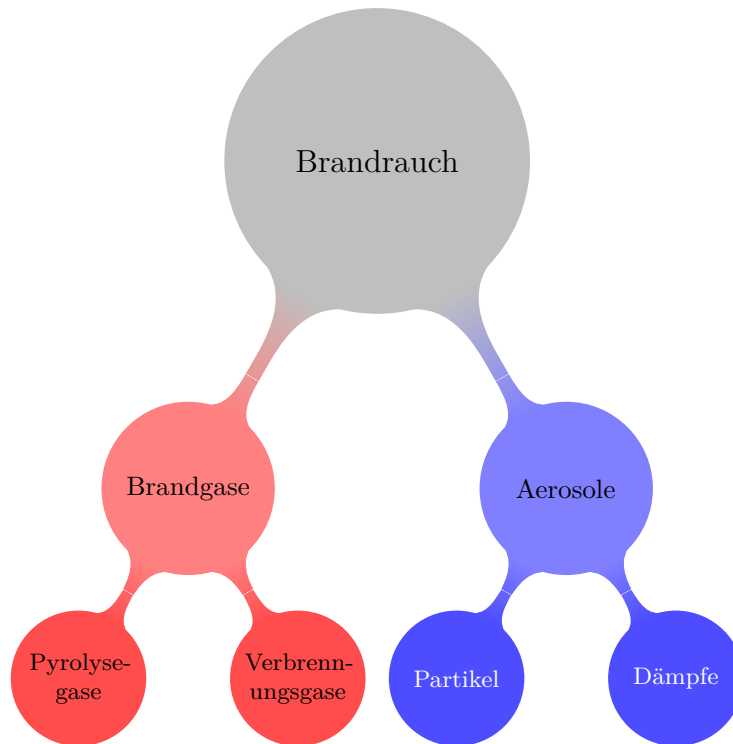
*Oberflächenwiderstand:*  $> 10^{13} \Omega$  (VDE 0303)

*Klebmöglichkeit:* +

*UV-Beständigkeit:* bedingt

## 2.4 Brandrauch

Rauch ist eine Zusammensetzung von Brandgasen und Aerosolen (siehe Abbildung 2.3). Brandgase sind die reinen Gaskomponenten, die wiederum aus Pyrolysegasen und Verbrennungsgasen bestehen. Die Aerosole lassen sich in Dämpfe (flüssige Bestandteile) und Partikel (feste Bestandteile) unterteilen.



**Abbildung 2.3:** Zusammensetzung von Brandrauch

Generell hat Rauch eine toxische Wirkung auf den Menschen und ist für die Umwelt ebenfalls schädlich. Bei einem Brand handelt es sich um einen unkontrollierten Verbrennungsprozess, wobei die entstehenden Komponenten variieren. In Öfen, Motoren und anderen Maschinen findet dagegen ein kontrollierter Verbrennungsprozess statt. Hier werden die Rauchgase kontrolliert abgeleitet und gegebenenfalls in einer Nachbehandlung gereinigt. Die Hauptbestandteile nach der Reinigung sind bei einer vollständigen Verbrennung Wasser und Kohlenstoffdioxid.

Die optischen Eigenschaften des Rauches hängen von der Konzentration der Partikel und deren chemischer und physikalischer Struktur ab. Die materialspezifische Rauchproduktion wird durch die Intensität der thermischen Beanspruchung und durch die Ventilationsbedingungen qualitativ und quantitativ beeinflusst.

Bei Verbrennungen ohne Flamme entstehen komplexere Strukturen der Partikel und Moleküle als bei Verbrennungen mit Flamme [BPW07, S.90f]. Die nicht-flammende Verbrennung setzt als Rauch Bruchstücke der ursprünglichen Polymerketten mit

partiell oxidierten Substanzen frei. In der Flamme wird hauptsächlich Ruß, der aus elementarem Kohlenstoff besteht, gebildet. Ruß wird dort gebildet, wo die Sauerstoffkonzentrationen nicht für eine vollständige Oxidation ausreichen. Zusätzlich werden teerartige Tröpfchen bei Verbrennungen produziert, deren Anteil bei nicht-flammenden Verbrennungen erheblich höher ist. Die flüssigen und festen Rauchbestandteile unterscheiden sich deutlich in ihren optischen Eigenschaften (Absorption- und Streuverhalten).

Für eine Sichtweitenanalyse ist neben den optischen Eigenschaften auch das entstehende Rauchvolumen wichtig. Aus den stöchiometrischen Verhältnissen lässt sich die molare Bildungsrate der Verbrennungsprodukte berechnen. Werden die geringen Druckdifferenzen im Brandraum vernachlässigt, ist das Rauchvolumen bei gegebener Masse direkt proportional zur Temperatur. Entscheidend für das Rauchvolumen sind die Wärmefreisetzungsrate, die Einmischung der Umgebungsluft in den Feuerplume (siehe Anhang A) an den Grenzschichten sowie die Rauchtemperatur. Die materialspezifischen Kennwerte wie u.a. Dichte und Wärmekapazität spielen für das Rauchvolumen kaum eine Rolle [BPW07].

Das Prüfverfahren kann dynamisch mit ständig wechselnden Umgebungsbedingungen (z.B.: SDC) oder auch statisch, d.h. mit einem kontinuierlich laufenden Abzugssystem und gleichbleibenden Umgebungsbedingungen (z.B.: DIN-Rohr) ablaufen. Bei dynamischen Versuchen stellt sich im Verlauf ein von der Brandintensität abhängiges Sauerstoffdefizit ein. Es können Partikelablagerungen an den Innenwänden der Prüfkammer und Nachverbrennungen auftreten. Der Einfluss dieser Effekte auf die Zusammensetzung und die optischen Eigenschaften der Rauchkomponenten ist abhängig von den Versuchsbedingungen bzw. der verwendeten Prüfmethode. Generell werden bei diesen Laborversuchen relativ kleine Proben untersucht. Es ist nicht möglich, eine sich produktspezifisch einstellende Branddynamik zu simulieren. In die Versuchsergebnisse gehen nicht nur die Brandphasen 2 und 3, sondern auch die Entzündungsphase 1 und Abklingphase 4 des Brandes ein (siehe Abbildung 4.11).

Während der dynamischen Messung werden die optischen Raucheigenschaften über die Intensitätsabnahme der Lichtstrahlen kontinuierlich gemessen. Es besteht die Möglichkeit, Ausschnitte der gesamten Versuchszeit einzeln zu betrachten, ohne dass die Entzündungsphase oder Abklingphase die Ergebnisse beeinflussen. Bekannt sind auch hier die Streckenlänge der Lichtmessstrecke und die Dicke der Rauchsicht. Die Transmission von Licht wird durch Absorption und Streuung der Rauchpartikel kontinuierlich reduziert. Das Verhältnis zwischen der Lichtintensität auf dem Detektor  $I$  und des ausgestrahlten Lichtes  $I_0$  bildet den Transmissionsgrad  $T$  (siehe Gleichung 2.1). Dieser ist abhängig von der Art, Größe und Anzahl der Partikel in der Lichtmessstrecke. Das Lambert-Beersche Gesetz beschreibt den Transmissionsgrad  $T$  mit:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\sigma_s \cdot \rho_s \cdot L}. \quad (2.1)$$

Die Transmission wird von den genutzten Brandprüfständen messtechnisch erfasst. Diese Messdaten von der SDC werden zur Validierung der CFD Simulationen benutzt.



Für die Sichtverhältnisse auf den Fluchtwegen wird die Sichtweite in Abhängigkeit der optischen Dichte  $D$  und der Raumkonstanten  $E$  nach Gleichung 2.2 berechnet:

$$D \cdot S = E. \quad (2.2)$$

Die Raumkonstante  $E$  hängt von der Beleuchtung sowie von der Reflexion ab. Abhängig von diesen Werten ergeben sich für die Raumkonstante Werte zwischen 2 und  $10^{77}$ . Bei der Raucherzeugung aus Bränden von Polymeren können je nach Messverfahren für die optische Dichte  $D$  Unterschiede von bis zu 25 % vorkommen ([Wit00, S.79]). Die Dichte  $\rho_s$  des Rauchgases hängt von der Zusammensetzung und der Temperatur ab [Wit00, S.84f]. Der Fehler ist kleiner als 1 %, wenn statt der tatsächlichen Dichte des Rauchgases die Dichte von Luft angenommen wird ([SW02]). Die Partikel im Rauchgas absorbieren das Licht, wodurch die Sichtweite reduziert wird. Dies drücken der Extinktionskoeffizient  $k [m^{-1}]$  bzw. die optische Dichte  $D$  aus. Somit ist dieser geeignet, kritische Bedingungen für die Sichtweite festzulegen. In der Literatur sind Grenzwerte zu finden, die zwischen  $0,2 - 0,5 m^{-1}$  liegen. Die Rußkonzentrationen liegen für diese Sichtweite bei  $25 - 65 mg/m^3$  [DiN08].

Daraus folgt ein spezifischer Extinktionskoeffizient, der vom Brennstoff abhängig ist. Dieser liegt in der Größenordnung von  $4400 - 7600 m^2/kg_{Ru\beta}$  (bezogen auf Ruß) [DiN08].

In den numerischen Simulationsmodellen wird oft ein Wert für den Extinktionskoeffizienten für einen Brennstoff vorgegeben. In der Literatur wird die Sichtweite dann als

$$S = \frac{E}{k} \quad (2.3)$$

beschrieben. Für die Konstante  $E$  ist anzusetzen: [VDI 6019 Blatt 2, S. 7]

$E = 3$  für lichtreflektierende Schilder und

$E = 8$  für lichtemittierende Schilder.

Für eine ausreichende Sichtweite für die Selbstrettung von Personen aus Gebäuden ergibt sich in den meisten Fällen ein maximaler Extinktionskoeffizient von  $0,2 - 0,53 m^{-1}$ . [DiN08]

## 2.5 CFD-Programme

Die Modellierung von Brandszenarien kann nur mit aufwendigen numerischen Verfahren erfolgen, da die physikalisch-chemisch-thermodynamischen Prozesse sehr komplex sind. In vielen Szenarien müssen sowohl die Turbulenz der Strömung, die Pyrolyse des Feststoffes, die Verbrennung in der Gasphase sowie die Rauchbildung und die Strahlung der Flammen berücksichtigt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass sich Turbulenz und chemische Reaktion gegenseitig beeinflussen. In der Folge entsteht ein komplexes Differentialgleichungssystem, das nur noch numerisch gelöst werden kann. Für die Lösung des Systems werden sowohl die Materialparameter als auch Anfangs- und Randbedingungen für das jeweilige Szenario benötigt [Hof03].

Alle Simulationen in dieser Arbeit wurden mit dem kommerziellen Programm CFX von ANalysis SYStem (ANSYS)<sup>1</sup> und der Open Source Software Fire Dynamics Simulator (FDS) vom National Institute of Standards and Technology (NIST)<sup>2</sup> durchgeführt, um sie auf ihre Eignung für die ausgewählten Brandszenarien hin zu untersuchen und zu vergleichen. Aus diesem Grund werden hier auch nur diese beiden Systeme kurz vorgestellt.

### 2.5.1 ANSYS CFX

Die umfangreiche Strömungssimulationssoftware CFX beinhaltet viele verschiedene Modelle, um Zustände von laminaren Strömungen bis zu Überschallströmungen, mehrphasige Strömungen, Strömungsakustik, Strahlung, chemische Reaktionen, bewegte Gegenstände, Netzverformung oder Elektromagnetik zu untersuchen. Die Abbildung 2.4 zeigt einen Teil der wichtigsten implementierten Modelle. Es wurde die Version 14.5 verwendet.

Zur Hilfestellung und Erklärung des Programms stehen Userguides für das Preprocessing, das Solving und das Postprocessing zur Verfügung ([ANS06a], [ANS06c], [ANS06b], [ANS06d]).

---

<sup>1</sup> [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

<sup>2</sup> [www.fire.nist.gov/fds](http://www.fire.nist.gov/fds)



**Abbildung 2.4:** Übersicht der Modelle für Wärmetransport, Turbulenz, Verbrennung, Strahlung und Elektromagnetik in ANSYS CFX (nach [ANS06c])

### 2.5.2 Fire Dynamics Simulator (FDS)

Das freie CFD-Programm FDS des NIST ist für Brandsimulationen optimiert. Es beinhaltet weniger Submodelle als CFX. Diese sind in der Abbildung 2.5 dargestellt. Es wurde die Version 5.5.3 verwendet.



**Abbildung 2.5:** Übersicht der Modelle für Wärmetransport, Turbulenz, Verbrennung, Strahlung und Festphasen in FDS (nach [MHF<sup>+</sup>10])

### Sichtweiten in FDS

Die Sichtweite wird einerseits durch die Bildung der Brandgase und Rußpartikel beeinflusst und hängt zum anderen von der Position der Person im Raum und von der jeweiligen Blickrichtung ab. FDS kann die Sichtweite in Teilräumen als lokalen Parameter *Visibilität* darstellen. Dieser ist jedoch nicht im Gesamtraum gültig und somit für die Brandanalyse des Gesamtraumes nicht geeignet. Die Transparenz der Brandgase ist vom lokalen Anteil der Rußmasse abhängig. Eine wichtige Größe für die Berechnung von Sichtweiten im Brandrauch ist die Wegstrecke des Lichtstrahles. Hierzu muss die Entfernung vom betrachteten Objekt, z.B. einem beleuchteten Notausgangsschild, bis zum Betrachter bekannt sein.

### 2.5.3 Fehlerabschätzung bei CFD Berechnungen

Nach [FP08] wird zwischen vier Fehlertypen in der numerischen Strömungssimulation unterschieden. Einerseits muss der **Modellfehler** betrachtet werden. Dieser tritt auf, wenn die Realität durch gewählte Modelle für die Verbrennung, Strahlung oder Turbulenz abgebildet werden soll. Um diesen Fehler zu minimieren, muss eine Validierung durchgeführt werden (siehe Kapitel 5.1). Der **Diskretisierungsfehler** tritt als Folge der Einführung von räumlich und zeitlich approximierten Gleichungen auf. Durch eine Gitterstudie und Kontrolle der Zeitschrittweite kann dieser Fehler abgeschätzt und minimiert werden (siehe Kapitel 5.2). Der **Iterationsfehler** entsteht durch den gezielten Abbruch der jeweiligen Iteration (es handelt sich bei den numerischen Lösungen um Näherungslösungen, die während der Berechnung eine endliche Anzahl von Iterationen durchlaufen). Der gezielte Abbruch wird durch ein festgelegtes Abbruchkriterium gesteuert. Dieses kann eine maximale Anzahl von Iterationen oder eine Genauigkeitsgrenze sein. Mit dem letzten berechneten Wert vor dem Abbruch wird der nächste Zeitschritt berechnet. Ein kleiner Fehler kann sich durch die vollständige Simulation ausbreiten und vervielfachen. Das Abbruchkriterium muss daher sorgfältig gewählt werden. Der **Programmier- und Anwenderfehler** bezieht sich zum einen auf die Programmierung des CFD-Programms, auf die man bei kommerzieller Software keinen Einfluss ausüben kann. Zum anderen beschreibt der Anwendungsfehler unter anderem die Eingabe von Rand- und Gebietsbedingungen, die bei sorgfältiger Arbeit vermieden werden können.

Die numerische Lösung eines Gleichungssystems muss konvergent, konsistent und stabil sein. Eine Lösung gilt als **konvergent**, wenn die Lösung bei feineren Gittern gegen die exakte Lösung strebt. Als **konsistent** gilt eine Lösung, wenn die Gleichungen gegen die diskretisierten Gleichungen bei unendlich feinen Gittern tendieren. **Stabilität** ist gegeben, wenn während des Lösungsprozesses numerische Fehler nicht angefacht werden.[Mü13]

## 2.6 Submodelle

Für die numerische Berechnung eines Brandes sind die Submodelle für die Berechnung der Turbulenz, der Verbrennung und der Strahlung entscheidend. Sie werden im Folgenden vorgestellt.

### 2.6.1 Turbulenzmodelle

In folgender Tabelle 2.2 sind die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der Turbulenzmodelle dargestellt.

**Tabelle 2.2:** Vergleich von ausgewählten Strahlungsmodellen (nach [ANS06f])

Turbulenzmodell	Anwendungsbereich	Vorteile	Nachteile
$k-\varepsilon$ (CFX)	geeignet für Turbulenz im Strömungsraum	schnell, robust	Wandeffekte werden nicht berücksichtigt
$k-\omega$ (CFX)	bildet Wandeffekte ab	robust	nicht einsetzbar im Strömungsraum
SST (CFX)	Kombination aus $k-\varepsilon$ und $k-\omega$	schnell, robust, geeignet für fast alle Strömungen	keine Radialströmungen
LES (CFX,FDS)	Wirbelberechnung mit Interpolation zwischen Gitterpunkten	detaillierte Ergebnisse	schnelle Rechenzeiten auch bei groben Gittern
DNS (CFX,FDS)	Auflösung jedes Wirbels wird berechnet	detaillierte Ergebnisse	lange Rechenzeiten, sehr feine Gitter werden benötigt

### 2.6.2 Verbrennungsmodelle

In der Tabelle 2.3 sind die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von ausgewählten Verbrennungsmodellen in ANSYS CFX aufgelistet. Diese Verbrennungsmodelle sind grundsätzlich für die Modellierung von Bränden geeignet. Auf Grund von starken Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit auf unkontrollierte Brände werden das PDF und Flamelet-Modell hier nicht weiter betrachtet. Diese Modelle sind besonders für sehr spezifische Anwendungsfälle von Standardreaktionen wie Methan- oder Propangas mit Luft geeignet. [Joo06, S. 409ff]

Tabelle 2.3: Vergleich von ausgewählten Verbrennungsmodellen [ANS06f]

Verbrennungsmodell	Grundeigenschaften		Anwendungsvoraussetzungen		Vorteile	Nachteile
	Kontrolliert	Ansatz	Reaktionsgeschw.	Anwendungsbereich		
EDM/Mischungsmodell (CFX, FDS)	mischungskontrolliert	gemischt = verbrannt	$Da \gg 1$	turbulent & vorge-mischt		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ lokal zu hohe Temperaturen</li> <li>▪ keine Berücksichtigung von Nichtgleichgewichtseffekten</li> </ul>
FRCM (CFX)	chemiekontrolliert	Arrhenius	$Da \approx 1$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ turbulent oder laminar</li> <li>▪ nicht vorge-mischt</li> </ul>	Nichtgleichgewichtseffekte werden bei FRCM berücksichtigt	tendenziell lokal zu hohe Temperaturen
FRCM/EDM (CFX)	wählt lokal zwischen chemie- und mischungs-kontrolliert	wählt lokal zwischen gemischt = verbrannt und Arrhenius	$Da \approx 1$ bis $Da \gg 1$	laminar & turbulent	ganze Zeitskala wird abgebildet	

### 2.6.3 Strahlungsmodelle

ANSYS CFX stellt vier unterschiedliche Strahlungsmodelle zur Verfügung. Diese sind *Discrete Transfer (DT)*, *Monte Carlo (MC)*, *P1* und *Rosseland*.

FDS beinhaltet das Strahlungsmodell *Radiative Transport Equation (RTE)*. Die Eigenschaften der Strahlungsmodelle nach [ANS06f], [MHF<sup>+</sup>10] sind in Tabelle 2.4 aufgelistet.

**Tabelle 2.4:** Vergleich von ausgewählten Strahlungsmodellen (nach [ANS06f])

Strahlungsmodell	Grundeigenschaften	optische Dichte	Vorteile	Nachteile
DT (CFX)	Multiple Ray Tracing in Domain	keine Einschränkung	Streuung, Reflexion, non-gray model	
MC (CFX)	Multiple Ray Tracing in Domain	keine Einschränkung	Streuung, Reflexion, Absorption, emittieren, non-gray model	
P1 (CFX)		$> 1$	sehr schnell	gilt nur für diffuse, blickdichte Wände
Rosseland (CFX)		$> 5$ nicht: $< 1$	sehr schnell, wenig Speicher	nur druckbasierte Solver, nicht dichte-basierte Solver
RTE (FDS)	basiert auf der Berechnung des Energietransports durch Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung	keine Einschränkung	optimiert für Verbrennungen	



# KAPITEL 3

---

## Experimente

---

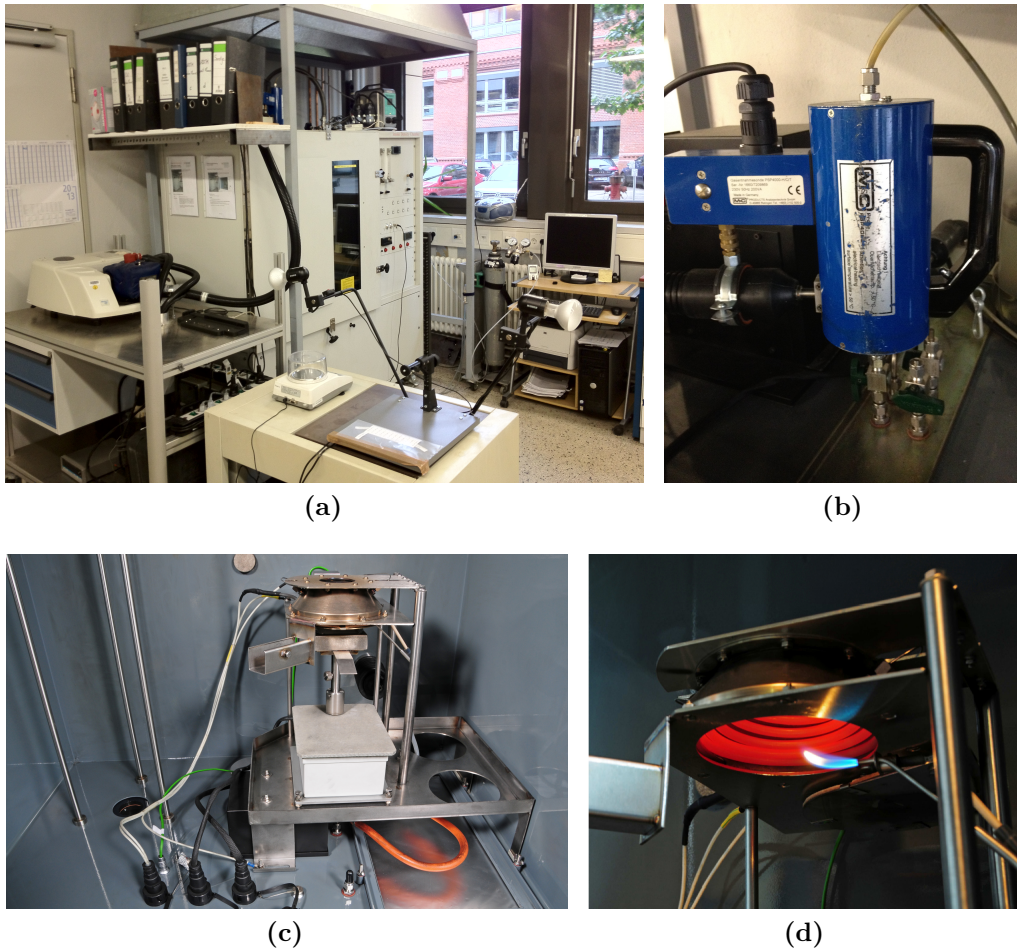
Die hier beschriebenen Experimente dienen dazu, den Brandrauch qualitativ sowie quantitativ zu analysieren. Dazu wurden Versuche im DIN-Rohr und der Smoke Density Chamber (SDC) mit den ausgewählten Kunststoffen Polyurethan und Polyvinylchlorid durchgeführt. Die Brandszenarien wurden so gewählt, dass die wichtigen Einflussgrößen Material, Wärmeeintrag bzw. Art der Zündquelle und des Sauerstoffangebotes variiert werden konnten. Die Rauchproduktion wurde über die Extinktion bestimmt.

### 3.1 Smoke Density Chamber (SDC)

Die Smoke Density Chamber bildet in der Standardanwendung den Übergang von der flammenden Verbrennung in die schwelende Verbrennung ab, da die Kammer luftdicht verschlossen ist und während der Verbrennung kein Sauerstoff nachgeführt wird. In der SDC wurden Versuche mit Strahlungsstärken von  $25 \text{ kW/m}^2$  und  $50 \text{ kW/m}^2$  durchgeführt. Die verschiedenen Materialien wurden hinsichtlich der Einflussgrößen, Bestrahlungsstärke und Zündbedingungen untersucht. Die drei verwendeten Materialien (siehe Kapitel 2.3) werden im weiteren Verlauf wie folgt bezeichnet:

- **Material A:** PUR (normal entflammbar, Gebrauchsgegenstände: z.B. Matratzen, Polstermöbel)
- **Material B:** PUR (schwer entflammbar, Bauprodukt)
- **Material C:** PVC (normal entflammbar, z.B. Fußbodenbeläge, Fensterprofile, Rohre, Kabelisolierungen)

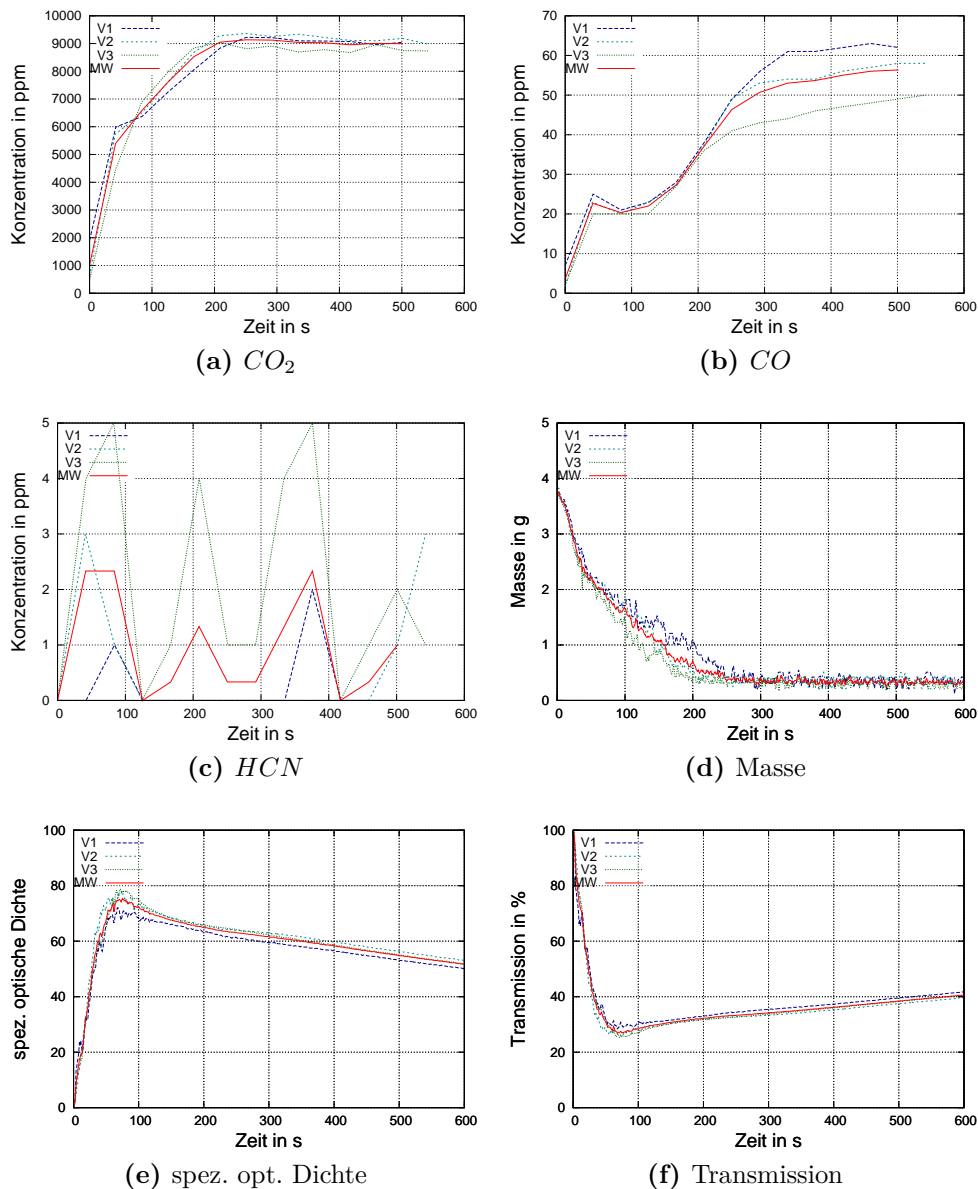
In Abbildung 3.1 sind die SDC mit angeschlossenem FT-IR-Spektrometer für die Bestimmung der Rauchgaszusammensetzung und das in der SDC verwendete Cone-Heizelement dargestellt. Die Leistung des Heizelements kann von  $25 \text{ kW/m}^2$  bis  $50 \text{ kW/m}^2$  variiert werden.



**Abbildung 3.1:** Smoke Density Chamber (a) mit angeschlossenen FT-IR-Spektrometer, Mess-PC, (b) FT-IR Gasentnahmestelle mit Filter, (c) Aufbau mit Cone, Lichtmessstrecke und (d) Cone-Heizelement mit regelbarer Wärmestromdichte und Zündflamme.

Die Materialien A und B wurden in der SDC untersucht. Die Durchführung der Versuche erfolgte mit und ohne Zündflamme bei  $25 \text{ kW/m}^2$  und zusätzlich auch bei  $50 \text{ kW/m}^2$  mit Zündflamme. Bei Versuchen ohne Zündflamme kann es zu einer Entzündung der Pyrolysegase kommen, wenn die Bedingungen für eine Selbstentzündung erreicht werden. Die Zündflamme besteht aus einem vorgemischten Propan-Luft-Gemisch. Durch die Vormischung reagieren die Gase zu einer fast vollständigen Verbrennung. Es wurde ein Leerversuch (nur Zündflamme ohne Probe) durchgeführt, um die entstehende Menge  $\text{CO}_2$  zu bestimmen, damit diese bei den Versuchen mit Probe abgezogen werden kann. Bei dem Leerversuch entsteht hauptsächlich  $\text{CO}_2$  mit geringen Anteilen von  $\text{CO}$ . Die Konzentrationen liegen nach 600 Sekunden bei ca.  $3600 \text{ ppm CO}_2$  und  $3 \text{ ppm CO}$ . Nach 1800 Sekunden ändert sich das Verhältnis kaum und die Konzentrationen liegen bei etwa  $10300 \text{ ppm CO}_2$  und  $11 \text{ ppm CO}$ . Für eine Berechnung der Kohlenstoffbilanz konnte so die  $\text{CO}_2$ -Bildung durch die

Zündflamme berücksichtigt werden. Durch die mit den FT-IR-Messungen ermittelten Werte der Gase (Abbildung 3.2a, 3.2b und 3.2c) lassen sich qualitativ und quantitativ Rauchgaszusammensetzungen bestimmen. In Abbildung 3.2 sind die Verläufe der Volumenanteile von  $CO_2$ ,  $CO$  und  $HCN$  sowie der Massenverlust, die spezifische optische Dichte und Transmission für Versuche mit Material A bei  $25\text{ kW}/\text{m}^2$  Bestrahlungsstärke und Zündflamme dargestellt.



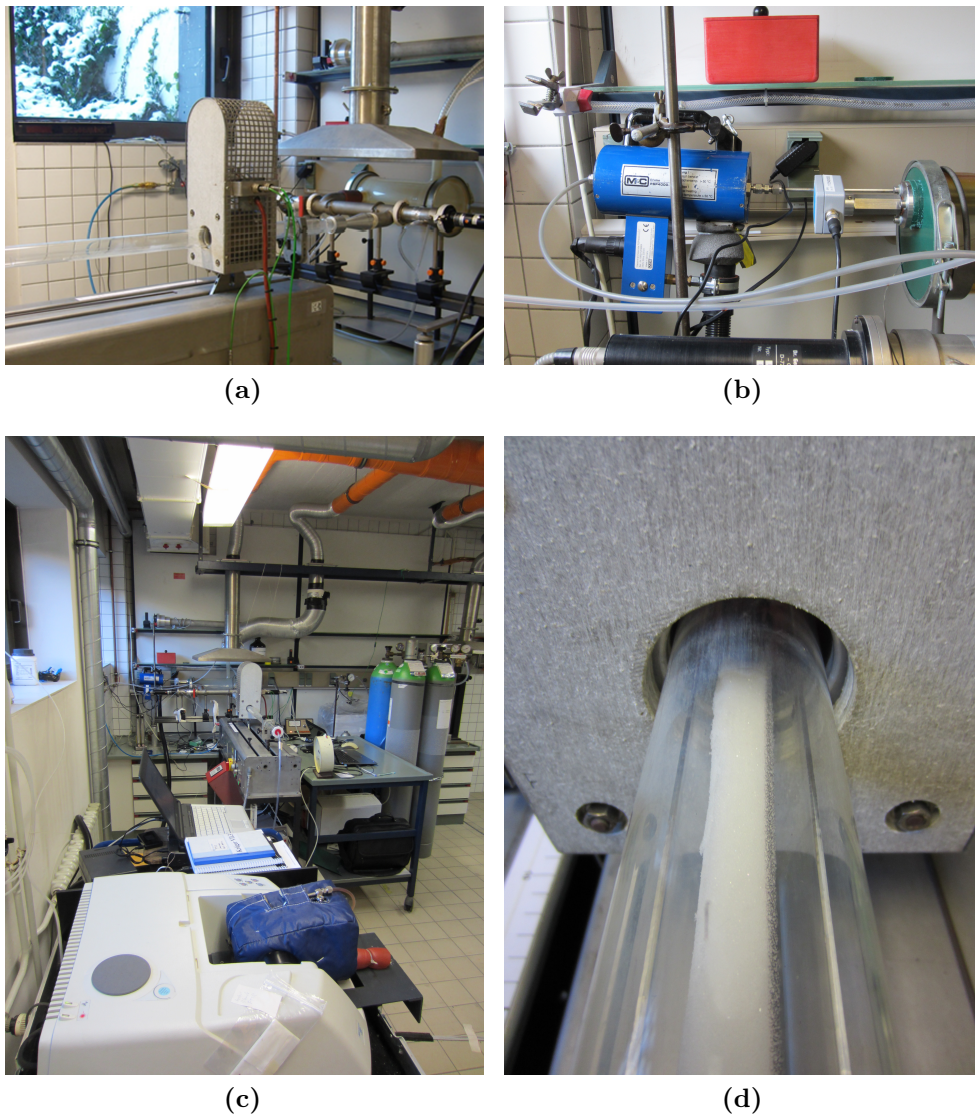
**Abbildung 3.2:** Gemessene Gaskonzentrationen (a)  $CO_2$ , (b)  $CO$  und (c)  $HCN$  sowie (d) der Massenverlust, (e) die spezifische optische Dichte und (f) die Transmission von Material A in der SDC bei  $25\text{ kW}/\text{m}^2$  mit Zündflamme.

Es wurde ein Versuch mit jeweils zwei Wiederholungsversuchen pro Konfiguration durchgeführt. Die Diagramme zeigen die drei Versuchsmessreihen und den Mittelwert (rot). Die gemittelten Versuchsdaten für die weiteren Versuchskonfigurationen befinden sich im Anhang B. Bei den Versuchen mit Zündflamme entstanden wesentlich höhere  $CO_2$  Konzentrationen als bei dem Versuch ohne Zündflamme, da in den Versuchen mit Zündflamme insgesamt mehr Material umgesetzt wurde als in den Versuchen ohne Zündflamme, siehe auch Abbildungen 3.2a und B.2a. Die Diagramme für die Versuche ohne Zündflamme folgen im nächsten Abschnitt. Die vollständige Auswertung ist in Kapitel 3.3 zu finden.

## 3.2 Modifiziertes DIN-Rohr

Für die Versuche im DIN-Rohr wurde die Apparatur modifiziert, um die Sauerstoffkonzentration zu variieren und die Gaszusammensetzung bestimmen zu können. Dafür wurden Spülgase mit unterschiedlicher Sauerstoffkonzentration eingeleitet und ein FT-IR-Spektrometer zur Gasanalyse am Ausgleichsbehälter angeschlossen.

In der Abbildung 3.3 ist der Versuchsaufbau des modifizierten DIN-Rohrs dargestellt. Für die Versuche im DIN-Rohr wurden einige Vorversuche durchgeführt, um eine geeignete Probengröße zu ermitteln. Die Probengröße wurde abweichend von der Norm  $5\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 270\text{ mm}$  [DIN 4102-01] auf  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 270\text{ mm}$  geändert, um die Rauchgaskonzentrationen so weit zu erhöhen, dass diese messtechnisch erfasst werden konnten. Durch diese Anpassung ließen sich die FT-IR-Daten auch quantitativ auswerten. Sauerstoffkonzentration und Temperaturen wurden variiert, um die Entwicklung des numerischen Modells zu ermöglichen. Der Masseverlust konnte auf Grund der geringen Probenmengen und des Aufbaus des Versuchsstandes mit der Probe im Quarzrohr nicht während des Versuchs kontinuierlich ermittelt werden. Die Masse wurde daher nur vor und nach dem Versuch bestimmt.

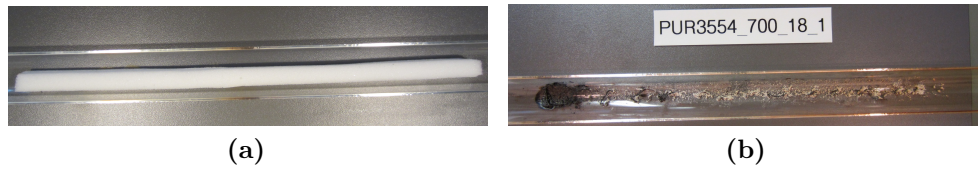


**Abbildung 3.3:** Versuchsaufbau DIN-Rohr:

- (a) DIN-Rohr (links) mit Heizung und Lichtmessstrecke unter dem Abzug
- (b) Anschlüsse vom FT-IR, Sauerstoffsonde
- (c) FT-IR, Prüfgase und DIN-Rohr
- (d) DIN-Rohr mit Probe (PUR) vor Versuchsbeginn

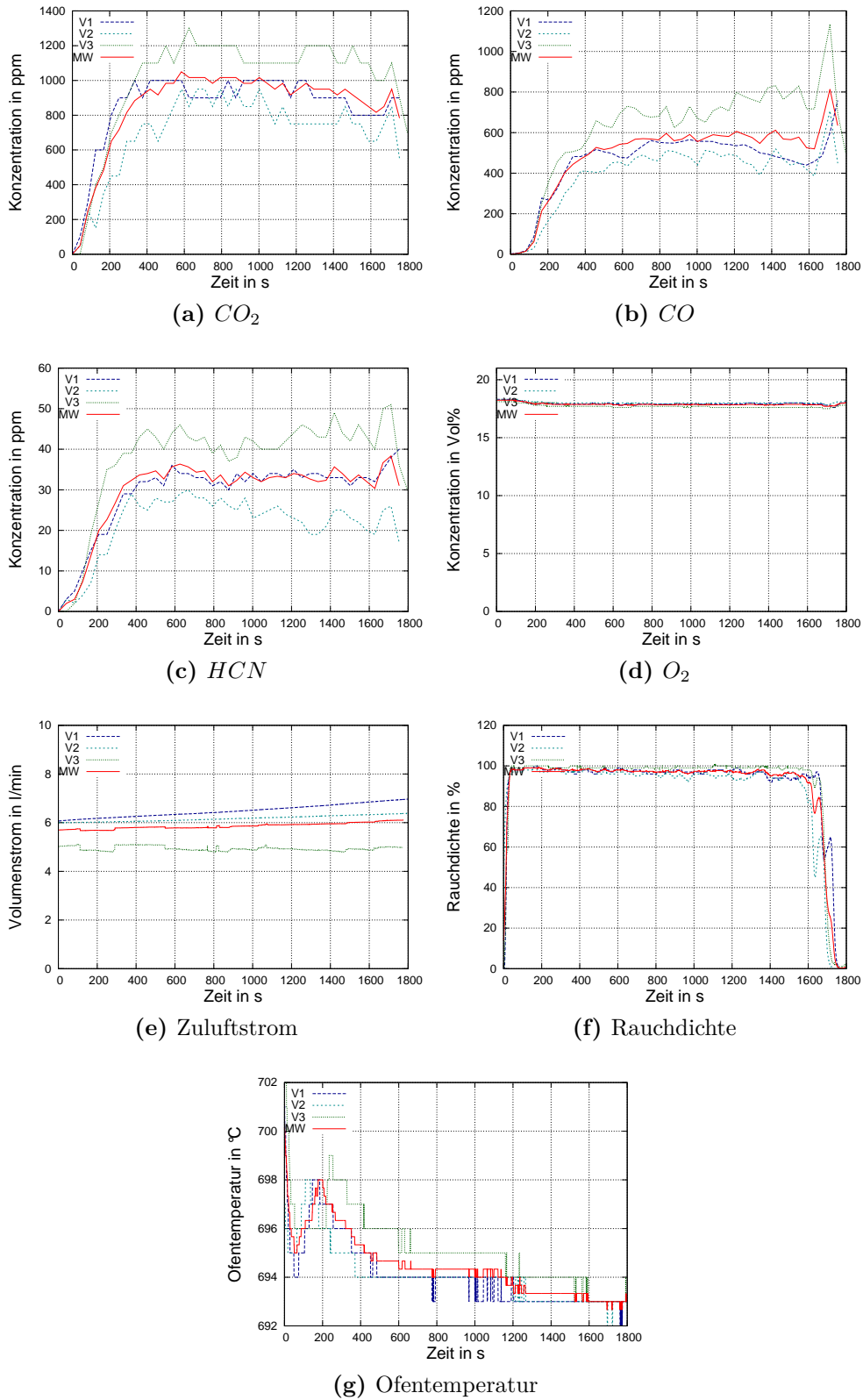
Die Materialien A, B und C wurden im DIN-Rohr bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen und Temperaturen getestet, um die Rauchgaszusammensetzung bei verschiedenen Bedingungen bestimmen zu können. In den Abbildungen 3.4 sind die Ausgangsform der Probe sowie die Probenreste nach Versuchsende dargestellt. In den Tabellen C.1, C.2 und C.3 im Anhang sind alle Proben nach dem jeweiligen Versuch im DIN-Rohr als Foto gezeigt.





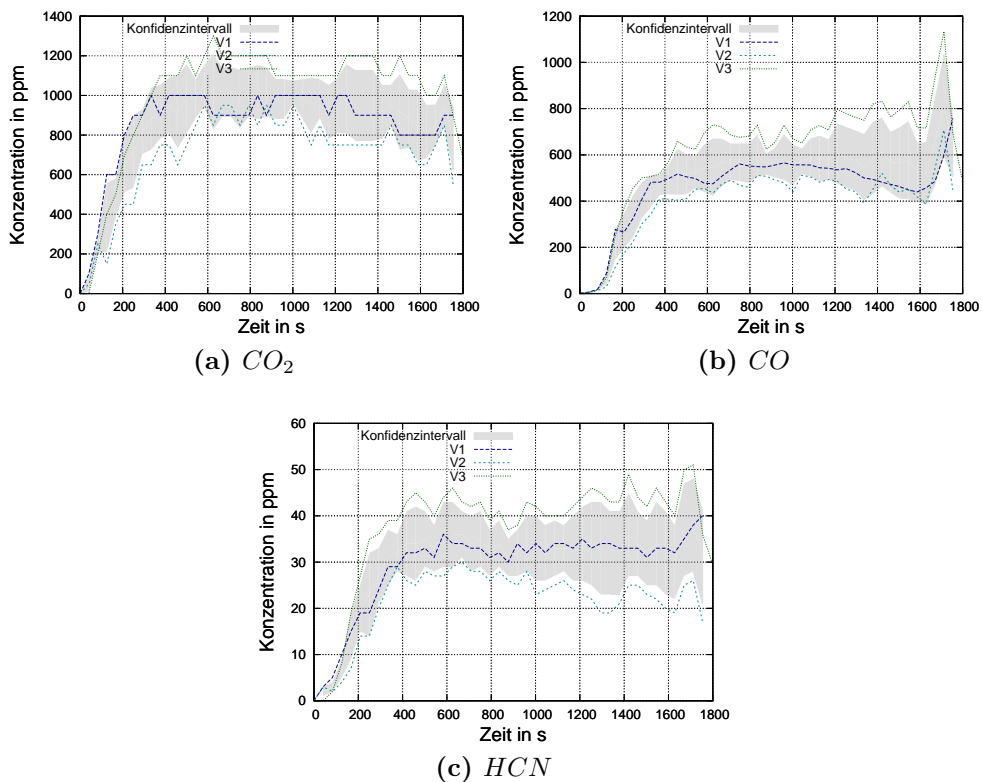
**Abbildung 3.4:** Material A für Versuche im DIN-Rohr  
(a) Ausgangsmaterial; (b) nach dem Versuch mit 700 °C und 18 vol% Sauerstoff

Für die Versuchskonfiguration 700 °C und bei einer Sauerstoffkonzentration von 18 vol% sind in Abbildung 3.5 die  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $HCN$  und  $O_2$  Gaskonzentration, der Prüfgasluftstrom, die Rauchdichte und Ofentemperatur dargestellt. Es sind drei Wiederholungsversuche und der Mittelwert (rot) für die gemessenen Größen abgebildet. Alle Abbildungen zu den weiteren Versuchskonfigurationen im DIN-Rohr sind im Anhang C dargestellt.



**Abbildung 3.5:** Gemessene Gaskonzentration: (a)  $CO_2$ , (b)  $CO$ , (c)  $HCN$  und (d)  $O_2$  sowie (e) der Prüfgas-Zuluftstrom, (f) die Rauchdichte und (g) die Ofentemperatur von Material A im DIN-Rohr bei  $700^\circ C$  und  $18\text{vol}\%$  Sauerstoff

In Abbildung 3.6 sind die Konfidenzintervalle für die gemessenen Gaskonzentrationen für die gemessenen Gaskonzentrationen von  $CO_2$ ,  $CO$  und  $HCN$  zusammen mit den Einzelversuchen dargestellt. Die Standardabweichung für die gemessenen Gaskonzentrationen der Versuche liegt für den gesamten Versuchszeitraum von 1800 Sekunden für  $CO_2$  bei 17,8%, für  $CO$  bei 21,3% und  $HCN$  bei 24,7%. Wenn man nur den Bereich zwischen 25% – 95%, also den Zeitraum 450s bis 1710s betrachtet, der später für die Koeffizientenberechnung der Reaktionsgleichungen benutzt wird, liegt die Standardabweichung für  $CO_2$  bei 15,2%,  $CO$  bei 19,6% und  $HCN$  bei 21,9%. Dieser Bereich wurde ausgewählt um die Entstehungs- und Abklingphase nicht in die Berechnung für die Brandphase mit einzubeziehen. Für Brandversuche liegt diese Abweichung in einem akzeptablen Bereich [OB06] [OT07].



**Abbildung 3.6:** Auswertung der Gaskonzentrationen mit Konfidenzintervall des Material A im DIN-Rohr: (a) Konfidenzintervall für  $CO_2$ ; (b) für  $CO$  und (c)  $HCN$ .



### 3.3 Zusammenfassung der Versuchsdaten

In der SDC wurden Versuche für die Materialien A und B bei 25 und 50  $kW/m^2$  Strahlungsstärke mit Zündflamme sowie 25  $kW/m^2$  ohne Zündflamme durchgeführt. Material A wurde auch im Cone Kalorimeter bei 35 und 50  $kW/m^2$  Strahlungsstärke von [LMKH13] getestet. Die Ergebnisse der dort durchgeführten Versuche unterstützen die Ergebnisse aus den SDC-Versuche mit Zündflamme (siehe Tabelle 3.1).

Es wurden im modifizierten DIN-Rohr Versuche bei Temperaturen von 200, 400, 700 °C und Sauerstoffkonzentrationen von 5, 15, 18 und 21 vol% für die Materialien A, B und C durchgeführt.

Die gemessenen Gaskonzentrationen wurden genutzt, um Reaktionskoeffizienten für verschiedene Umgebungsbedingungen zu ermitteln. Insgesamt wurden 72 Versuche in zwei Prüfapparaturen mit 24 verschiedenen Versuchskonfigurationen durchgeführt. Die Konfigurationen und Auswertungen sind in den nachfolgenden Tabellen 3.2, 3.3 und 3.4 dargestellt. Aus dieser breiten Basis an experimentellen Daten wurden die Koeffizienten hergeleitet. In Kapitel 4.2 wird das genaue Vorgehen für die Auswertung beschrieben. Grundsätzlich wurden die gemessenen Gase, die Kohlenstoff enthalten, berücksichtigt und bilanziert. Mit einer Summenformel der Edukte wurden Koeffizienten für die Produkte berechnet. Dies gilt auch für den entstehenden Anteil an Wasser aus der vollständigen Umsetzung des Wasserstoffs aus dem Edukt. Wie man der Tabelle 3.1 entnehmen kann, konnte angenommen werden, dass ein Mol Polyurethan und PVC aus den folgenden Stoffen nach [DiN08] besteht.

**Tabelle 3.1:** Summenformeln der Edukte (siehe [DiN08])

Atom	PUR	PVC
<i>C</i>	6,3	2,0
<i>H</i>	7,1	3,0
<i>N</i>	1,0	0,0
<i>Cl</i>	0,0	1,0
<i>O</i>	2,1	0,0

In der Tabelle 3.2 sind die berechneten Koeffizienten für die Reaktionsgleichungen von einem Mol Polyurethan mit der an der Reaktion beteiligten Menge an Sauerstoff zu den aufgelisteten Produkten dargestellt. Diese Daten wurden mit dem selbst entwickelten Auswertetool berechnet, dessen Funktionsweise in Kapitel 4.2 beschrieben ist. Der Versuchsname besteht aus den jeweiligen Bedingungen des Versuches. Für die Versuche im modifizierten DIN-Rohr setzt sich der Versuchsname aus der Temperatur des Ofens und der Sauerstoffkonzentration in der Zuluft zusammen. Für die SDC besteht der Name aus der Bestrahlungsstärke und dem Prüfgerät, um diese von den Versuchen im DIN-Rohr abzuheben. Die Bezeichnung der Versuchsname wird im Folgenden beibehalten. Für das Material B befinden sich die Ergebnisse in Tabelle 3.3 und für das Material C sind die Ergebnisse in Tabelle 3.4 mit allen Koeffizienten aufgelistet.

**Tabelle 3.2:** Berechnete stöchiometrische Koeffizienten Material A (PUR3554) für die Versuchsapparaturen: DIN-Rohr (links)  $Temperatur_{Sauerstoffkonzentration}$ , SDC (Mitte)  $Bestrahlungsstärke$  (wobei oF = ohne Zündflamme) und Cone (rechts)  $Bestrahlungsstärke$

Die Werte der letzten zwei Spalten stammen aus [LMKH13]

Versuchsname	400 <sub>15</sub>	400 <sub>18</sub>	400 <sub>21</sub>	700 <sub>15</sub>	700 <sub>18</sub>	700 <sub>21</sub>	25	50	25oF	35	50
Gerät	DIN-Rohr						SDC			Cone	
Temp. in °C	400	400	400	700	700	700					
Bestrahlung in kW/m <sup>2</sup>							25	50	25oF	35	50
O <sub>2</sub> -konz. in vol%	15	18	21	15	18	21	21	21	21	21	21
<b>Edukte</b>											
PUR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
O <sub>2</sub>	1,306	1,271	1,368	2,323	2,664	2,678	6,382	6,306	6,393	6,473	1,776
<b>Produkte</b>											
CO <sub>2</sub>	0,511	0,502	0,564	1,240	1,504	1,474	5,625	5,547	5,651	5,701	0,885
CO	0,145	0,091	0,164	0,738	0,896	0,990	0,068	0,074	0,036	0,101	0,342
C	5,632	5,699	5,558	4,278	3,847	3,775	0,598	0,668	0,727	0,485	5,053
HCl	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
HCN	0,012	0,008	0,014	0,045	0,052	0,062	0,095	0,011	0,007	0,013	0,020
H <sub>2</sub> O	3,544	3,546	3,543	3,528	3,524	3,519	3,545	3,544	3,547	3,544	3,540
N <sub>2</sub>	0,494	0,496	0,493	0,478	0,474	0,469	0,495	0,494	0,497	0,494	0,490

**Tabelle 3.3:** Berechnete stöchiometrische Koeffizienten Material B (PUR3045SE) für die Versuchsapparaturen: DIN-Rohr (links)  $Temperatur_{Sauerstoffkonzentration}$  und SDC (rechts)  $Bestrahlungsstärke$  (wobei oF = ohne Zündflamme)

Versuchsname	400 <sub>15</sub>	400 <sub>18</sub>	400 <sub>21</sub>	700 <sub>15</sub>	700 <sub>18</sub>	700 <sub>21</sub>	25	50	25oF
Gerät	DIN-Rohr						SDC		
Temp. in °C	400	400	400	700	700	700			
Bestrahlung in kW/m <sup>2</sup>							25	50	25oF
O <sub>2</sub> -konz. in vol%	15	18	21	15	18	21	21	21	21
<b>Edukte</b>									
PUR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
O <sub>2</sub>	1,684	1,704	1,820	2,630	3,483	3,561	6,291	6,352	1,956
<b>Produkte</b>									
CO <sub>2</sub>	0,907	0,911	1,010	1,662	2,467	2,533	5,456	5,540	1,081
CO	0,111	0,145	0,180	0,522	0,624	0,655	0,237	0,190	0,315
C	5,269	5,227	5,090	4,046	3,124	3,017	0,570	0,540	4,877
HCl	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
HCN	0,014	0,017	0,020	0,071	0,085	0,095	0,037	0,030	0,027
H <sub>2</sub> O	3,543	3,542	3,540	3,515	3,507	3,502	3,532	3,535	3,536
N <sub>2</sub>	0,493	0,492	0,490	0,465	0,457	0,452	0,482	0,485	0,486

**Tabelle 3.4:** Berechnete stöchiometrische Koeffizienten Material C (PVC) für das DIN-Rohr *Temperatur*/*Sauerstoffkonzentration*

Versuchsname	400 <sub>15</sub>	400 <sub>18</sub>	400 <sub>21</sub>	700 <sub>15</sub>	700 <sub>18</sub>	700 <sub>21</sub>
Gerät	DIN-Rohr					
Temp. in °C	400	400	400	700	700	700
O <sub>2</sub> -konz. in vol%	15	18	21	15	18	21
<b>Edukte</b>						
PVC	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
O <sub>2</sub>	0,564	0,549	0,611	0,990	1,061	1,106
<b>Produkte</b>						
CO <sub>2</sub>	0,061	0,047	0,109	0,400	0,457	0,495
CO	0,005	0,003	0,005	0,180	0,208	0,222
C	1,934	1,949	1,887	1,420	1,335	1,283
HCl	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
HCN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H <sub>2</sub> O	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N <sub>2</sub>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

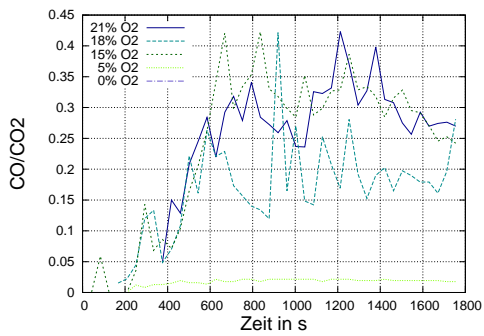
Die gemittelten Messergebnisse für die  $CO/CO_2$ -Verhältnisse sind in Abbildung 3.7 für alle Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen (400 und 700 °C) sowie allen Sauerstoffkonzentrationen (0, 5, 15, 18 und 21 vol%) dargestellt.

Das  $CO/CO_2$ -Verhältnis ändert sich kaum in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration in dem Bereich von 21 – 15 vol%. Bei einer Temperaturerhöhung von 400 °C auf 700 °C steigt das Verhältnis bei Material A von  $\approx 0,3$  auf  $\approx 0,6$  an (siehe Abbildungen 3.7a und 3.7b).

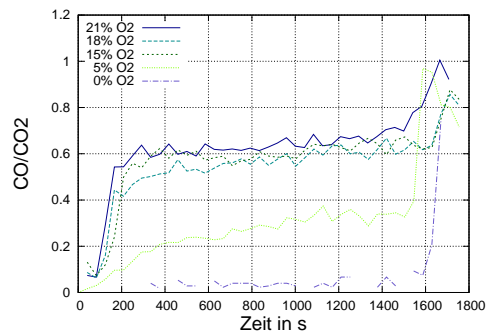
Für die Sauerstoffkonzentrationen von 0 vol% ist das  $CO/CO_2$ -Verhältnis nur teilweise zu berechnen, da die  $CO_2$  Konzentration kaum messbar war. Für den Graphen liegt an diesen Stellen kein  $CO/CO_2$ -Verhältnis vor, da hier durch 0 geteilt wird. Für 5 vol%-Sauerstoff ist das Verhältnis sowie auch die Absolutkonzentrationen deutlich niedriger als bei höheren Sauerstoffkonzentrationen von 15 – 21 vol%. Bei diesen Versuchskonfigurationen werden sehr wenig  $CO$  und  $CO_2$  freigesetzt, sodass diese Werte größere Messfehler beinhalten als in den anderen Konfigurationen, bei denen ein Vielfaches mehr an  $CO$  und  $CO_2$  freigesetzt werden. Es wurden keine Reaktionsgleichungen für die geringen (5 vol% und 0 vol% Sauerstoff) berechnet, da diese Bedingungen im Realfall nicht auftreten.

Ein annähernd konstantes  $CO/CO_2$ -Verhältnis bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen ergab sich auch für Versuche mit den Materialien B und C. Mit der Temperaturerhöhung von 400 auf 700 °C verdoppelt sich ebenfalls das  $CO/CO_2$ -Verhältnis bei Material B und C. Für die Übersicht sind die Tabellen 3.2 noch einmal als Diagramm 3.8 darstellt. Somit lassen sich alle Änderungen der Koeffizienten in Abhängigkeit der Temperatur/Wärmestrahlung und Sauerstoffkonzentration sehr gut

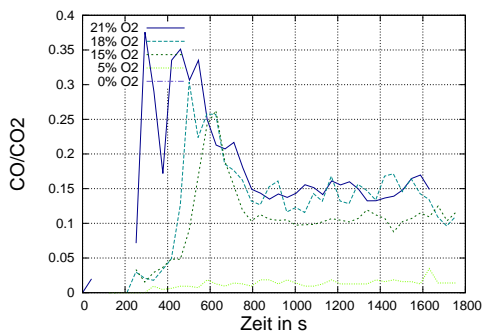
vergleichen.



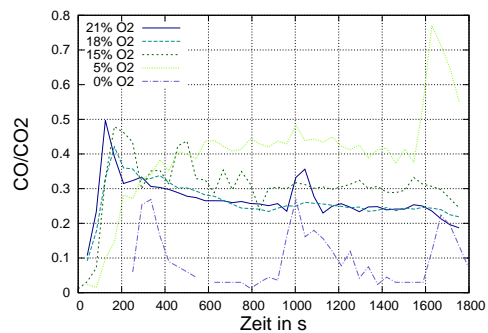
(a) PUR3554 – 400°C



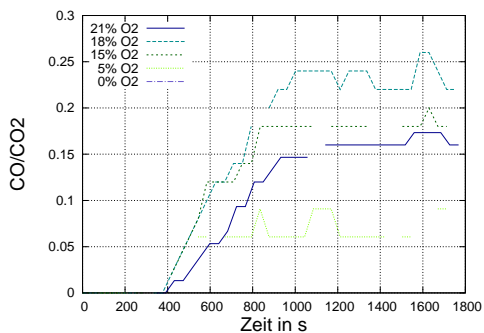
(b) PUR3554 – 700°C



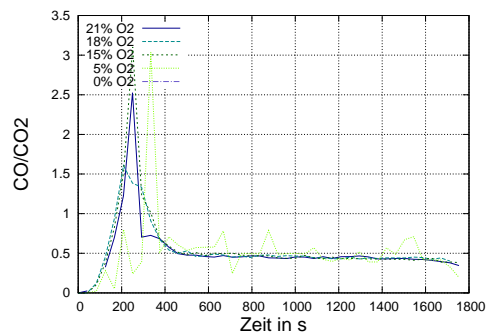
(c) PUR3045SE – 400°C



(d) PUR3045SE – 700°C



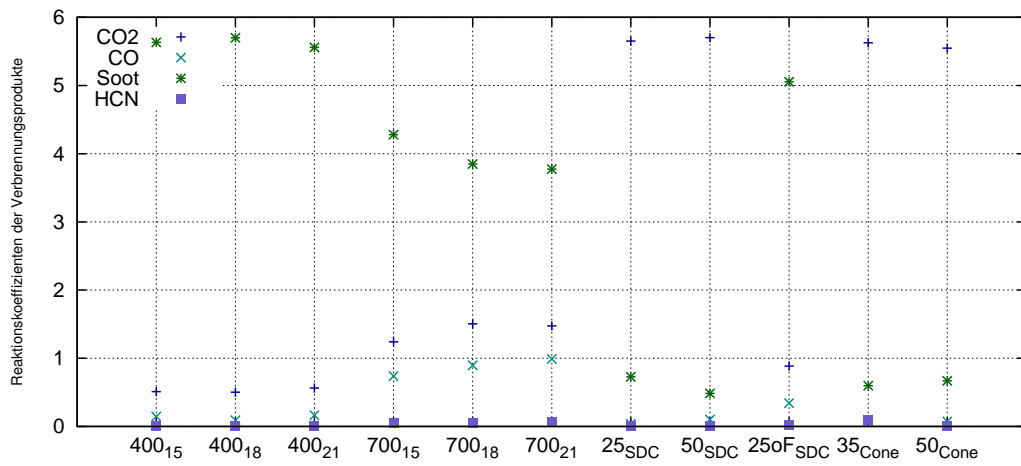
(e) PVC – 400°C



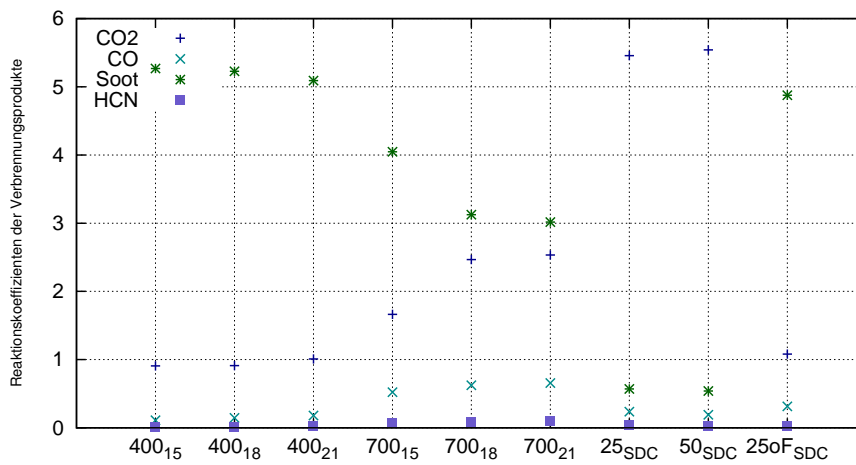
(f) PVC – 700°C

**Abbildung 3.7:**  $CO/CO_2$ -Verhältnisse der DIN-Rohrversuche für die Materialien und Temperaturen: (a) PUR3554 – 400°C; (b) PUR3554 – 700°C; (c) PUR3045SE – 400°C; (d) PUR3045SE – 700°C; (e) PVC – 400°C und (f) PVC – 700°C;

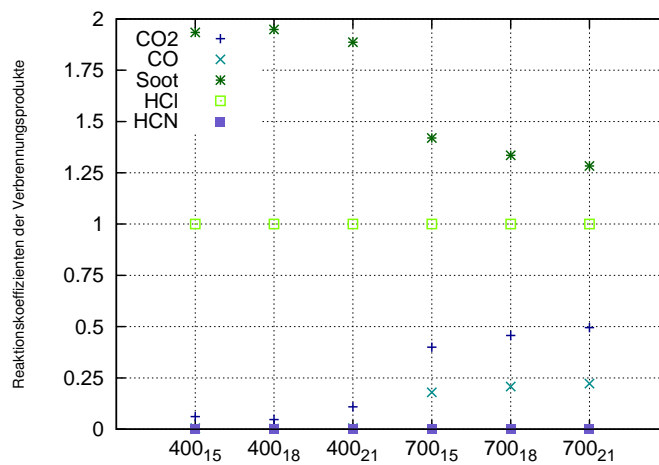
Die folgenden Diagramme 3.8 zeigen alle berechneten Koeffizienten für die jeweilige Reaktionsgleichung bei einem theoretischen Umsatz von einem Mol des jeweiligen Materials (A, B und C). Jede Spalte steht für eine Versuchskonfiguration mit einer Temperatur/Wärmestrahlung und Sauerstoffkonzentration. Jede Versuchskonfiguration wurde mindestens dreimal durchgeführt und ein Mittelwert gebildet. Insgesamt wurden 24 Versuchskonfigurationen, d.h. 72 Versuche durchgeführt. Jeder Versuch im modifizierten DIN-Rohr lief über 30 Minuten Versuchszeit. Anschließend wurde das Rohr nach jedem Versuch mit einer Heizmanschette vollständig ausgebrannt, um alle Rückstände, die sich am Rohr gesammelt hatten, zu entfernen. Diese Reinigung dauerte ebenfalls ungefähr 30 Minuten. Abgebrochene bzw. Versuche mit Problemen bei der Messtechnik wurden erneut durchgeführt. Wenn die Reproduzierbarkeit nicht gegeben war, wurde der Versuch bis zu fünf Mal wiederholt, um eine deutliche Aussage treffen zu können.



(a) PUR3554



(b) PUR3045SE



(c) PVC

**Abbildung 3.8:** Berechnete stöchiometrische Koeffizienten aus den Versuchen mit DIN-Rohr, SDC (und Cone aus [LMKH13]) für die Materialien: (a) PUR3554; (b) PUR3045SE und (c) PVC.

Die Diagramme 3.8 zeigen den Einfluss der Temperatur- und Sauerstoffkonzentrationsvariationen auf die Rauchgaszusammensetzung. Bei allen drei getesteten Materialien konnte gezeigt werden, dass bei steigenden Temperaturen der Rußanteil sinkt und die Produktion von Kohlenstoffmonoxid und -dioxid zunimmt. Eine flammende Verbrennung wie bei den SDC Versuchen mit Zündflamme und den Cone-Versuchen bei Material A<sup>1</sup> führt zu einer Steigerung der Kohlenstoffdioxidproduktion und zu einer Verminderung der Rußfreisetzung. Diese Versuche und weitere Cone-Versuche wurden mit den gleichen Materialien durchgeführt. Die Dissertation [Lö15] wertet die Toxizität dieser Materialien auf den menschlichen Organismus aus.

Die Ergebnisse der Versuche im modifizierten DIN-Rohr bei einer Ofentemperatur von  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $21\text{ vol}\%$  Sauerstoff sind vergleichbar mit den Ergebnissen aus der SDC bei  $25\text{ kW}/\text{m}^2$  ohne Zündflamme. Temperaturmessungen mit Thermoelementen ergaben, dass die Probenoberfläche in der SDC bei einer Strahlungsstärke von  $25\text{ kW}/\text{m}^2$  bei  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt. Die Messergebnisse werden von numerischen Simulationen unterstützt, bei denen nur die Strahlung ohne Verbrennung berechnet wurde (siehe Abschnitt 4.5.1). Die flammenden Verbrennungen bei unterschiedlichen Strahlungsstärken in der SDC bzw. im Cone führten zu vergleichbaren Reaktionskoeffizienten. Dieser Zusammenhang war sichtbar bei Material A an den SDC Versuchen mit Zündflamme sowie bei den Cone-Versuchen. Für Material B wurde dieser Zusammenhang bei den SDC Versuchen mit Zündflamme gezeigt. Material C wurde in der SDC nicht geprüft. Bei der flammenden Verbrennung hatten die Umgebungstemperaturen nur einen geringen Einfluss auf die Stoffumsetzung.

---

<sup>1</sup> Die Messdaten der Cone-Versuche stammen aus [LMKH13]



# KAPITEL 4

---

## Bestimmung der Parameter für die numerischen Untersuchungen

---

In diesem Kapitel werden zunächst die in den Simulationsprogrammen ANSYS CFX und FDS vorhandenen Modelle erläutert, die für die eigenen Simulationen Verwendung fanden. Die Modelle, die in ANSYS CFX und FDS zur Verfügung stehen, wurden in Kapitel 2.5 ausführlich dargestellt. Anschließend wird in diesem Kapitel beschrieben, wie mit Hilfe eines vom Autor entwickelten Auswertungsprogramms aus den Versuchsergebnissen aus Kapitel 3 die benötigten Eingabeparameter für die Simulationen berechnet wurden. Des Weiteren wird der Ventilationszustand für die Versuchsapparaturen (DIN-Rohr und SDC) charakterisiert. Diese Charakterisierung ist notwendig, um die anschließend beschriebenen Rand- und Gebietsbedingungen für die SDC- und Hotel-Geometrie bestmöglich zu wählen.

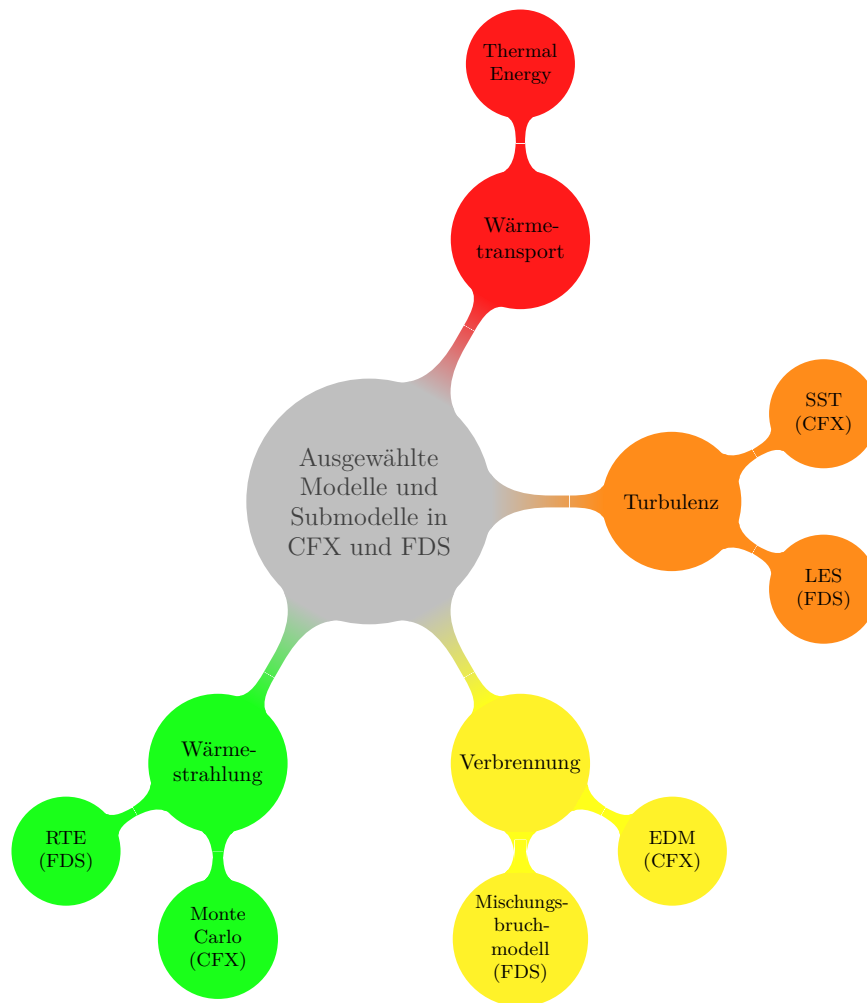
Alle Versuche und Berechnungen sind in diesem Kapitel sehr ausführlich dargestellt, damit sie besser nachvollzogen werden können.

Bei der Modellierung von Bränden spielen viele Parameter (vergleiche [BPW07]) eine Rolle. Die wichtigsten sind Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Emissionsgrad, Dichte, spezifische Wärmefreisetzung, Brennstoffmassenanteil, thermische Bedingungen, Strömungsbedingungen, Strahlungsanteil,  $CO/CO_2$ -Verhältnis sowie das  $Ruß/CO_2$ -Verhältnis. Alle diese Parameter müssen nach ihrer Relevanz auf die jeweilige Brandsituation angepasst und/oder berücksichtigt werden.

Um besser vergleichbare Ausgangsbedingungen definieren zu können, wurden für beide Simulationsprogramme strukturierte Gitter ohne Adaption verwendet.

### 4.1 Verwendete Modelle

Für eine Verbrennungsmodellierung sind Modelle für Wärmeübergang, Turbulenz, Verbrennung und Wärmestrahlung notwendig. Je nach Programm sind passende Modelle bereits vorgegeben oder sie können ausgewählt werden. Die für die Simulationen mit CFX und FDS verwendeten Modelle sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die ausgewählten Modelle werden in den folgenden Abschnitten erläutert.



**Abbildung 4.1:** In dieser Arbeit verwendete Modelle von ANSYS CFX und FDS

#### 4.1.1 Turbulenzmodelle

##### Shear Stress Transport (SST) — CFX

Das SST Modell ist ein effizientes Turbulenzmodell. Es beruht auf einer Kombination aus  $k$ - $\epsilon$ - und  $k$ - $\omega$ -Modell. Die Vorteile liegen nicht nur in der Geschwindigkeit der Berechnungen, sondern auch darin, dass Strömungsbereiche sowie Wandschichten durch diese Kombination sehr gut abgebildet werden können. Es ist sehr robust und universell einsetzbar [ANS06e, S.100].

##### Large Eddy Simulation (LES) — FDS

Die Wirbelauflösung hängt von der Gittergröße ab. Zwischen den Knotenpunkten erfolgt eine Interpolation. Es werden trotz schneller Rechenzeiten auch bei groben

Gittern detaillierte Ergebnisse berechnet. FDS ist für eine Brandsimulation in Räumen bzw. großen Geometrien optimiert. Auf Grund der üblichen Gitter im Dezimeterbereich ist FDS nicht für detaillierte Berechnungen von Verbrennungen und Strömungen, wie zum Beispiel in Verbrennungszellen, geeignet [Ma10, S.31].

#### 4.1.2 Energietransportmodelle

##### Thermal Energy — CFX/FDS

Das Thermal Energy Modell wird hier eingesetzt, da es robust ist und nur wenig Ressourcen benötigt [ANS06f, S.24] [MHF<sup>+</sup>10].

#### 4.1.3 Strahlungstransportmodelle

##### Radiation Transport Equation (RTE) — FDS

Die grundlegenden Energieerhaltungsgleichungen berücksichtigen den Energietransport durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung. Gewinne und Verluste können durch den Vektor  $\nabla \cdot \dot{q}''$  (Gleichung 4.1) dargestellt werden. Mit  $\dot{q}_r''$  (Gleichung 4.2) wird der Strahlungsanteil berücksichtigt [MHF<sup>+</sup>10, S. 8,57].

$$\dot{q}_r''(x) = \int_{4\pi} s' I(x, s') ds' \quad (4.1)$$

$$-\nabla \cdot \dot{q}_r''(x)(gas) = \kappa(x)[U(x) - 4\pi I_b(x)] ; U(x) = \int_{4\pi} I(x, s') ds' \quad (4.2)$$

Die Absorption/Emission und Streuung werden mit folgender Gleichung 4.3 beschrieben:

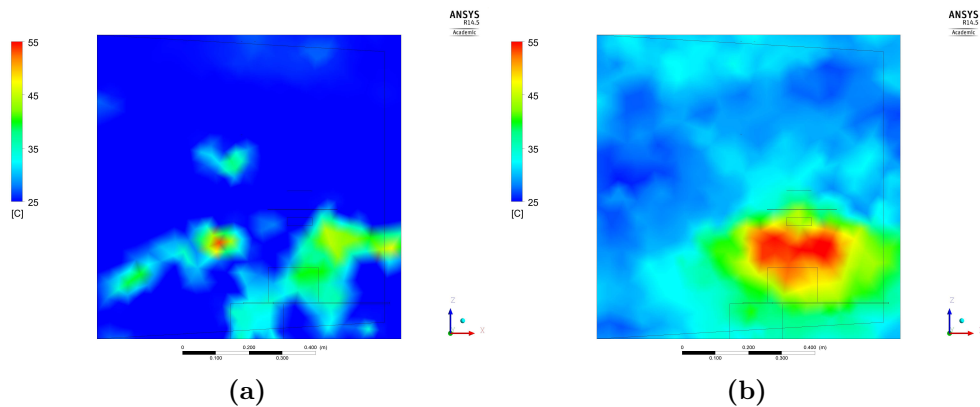
$$s \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_\lambda(x, s) + B(x, \lambda) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_\lambda(x, s') ds' \quad (4.3)$$

Dabei sind  $I_\lambda(x, s)$  der Strahlungsanteil bei der Wellenlänge  $\lambda$ ,  $s$  der Richtungsvektor der Intensität,  $\kappa(x, \lambda)$  und  $\sigma_s(x, \lambda)$  die lokale Absorption- und Streuungskoeffizienten.  $B(x, \lambda)$  ist der Quellterm der Emission. Das Integral beschreibt die hinzukommende Streuung aus den anderen Richtungen [MHF<sup>+</sup>10, S. 55].

##### Monte-Carlo-Strahlung — CFX

Das Monte-Carlo (MC) Modell berechnet die Verteilungsgrößen durch eine Abfolge einer großen Menge von Zufallszahlen. Es ist unter anderem in der Lage, die Strahlung zwischen Partikeln und Gasphase sowie Emissionsgrad und Streuung zu berücksichtigen. Für spezielle Bereiche optischer Dichten kann unter Umständen die Rechenzeit durch ein Rosseland oder P1 Modell verkürzt werden. Die nötigen Voraussetzungen

erfüllt auch das Discrete Transfer (DT) Modell. Deshalb wurden numerische Voruntersuchungen in der SDC durchgeführt. Die SDC wurde mit dem DT und MC Modell (siehe Abbildung 4.2) berechnet. Bei dem DT Modell traten auf der Rückwand der SDC Temperaturverläufe auf, die nicht der Realität entsprachen. Das MC Modell bildet den Temperaturverlauf auf der Rückwand im Vergleich mit den Aufnahmen der Wärmebildkamera (siehe Abbildung 4.9) realitätsnah ab. Aus diesem Grund wurden alle weiteren CFX-Simulationen mit dem MC Modell durchgeführt.



**Abbildung 4.2:** Mit ANSYS CFX berechnete Rückwandtemperaturen in der SDC für die Strahlungsmodelle (a) DT und (b) MC .

#### 4.1.4 Reaktionsmodelle

##### Eddy-Dissipations-Modell (EDM) — CFX

Der Ansatz des EDM basiert auf einer schnellen chemischen Reaktion. Brennstoff und Oxidator werden beim Zusammentreffen sofort zu den Verbrennungsprodukten umgesetzt. Das Modell ist reduziert auf „gemischt ist gleich verbrannt“ [ANS06e, S.264]. Das EDM ist weit verbreitet [Kna09] [Hof03] und sehr robust für die in dieser Arbeit betrachteten Reaktionsszenarien [Joo06, S. 376f].

##### Mixture-Fraction Model (Mischungsbruchmodell) — FDS

Das Mixture-Fraction Model ist für die Verbrennung von einem Brennstoff mit einem Oxidator geeignet, d.h. es basiert auf einer einzigen Reaktionsgleichung. Anhand der aktuell berechneten Eduktanteile werden die Produktanteile als Funktion der Edukte aus einem Diagramm entnommen (siehe 4.3) [Ma10, S.43]. Das Modell kann so angepasst werden, dass ein Kohlenstoffmonoxid- und/oder ein Rußanteil berücksichtigt werden [Joo06, S. 321ff].



## 4.2 Auswertetool

Um die Daten der verschiedenen Messgeräte zusammenzuführen und zu analysieren, wurde ein Auswertungsprogramm, genannt „Auswertetool“, entwickelt.

Die zusammengeführten Daten werden versuchsbezogen zentral gespeichert. Es bietet die Möglichkeit, Messwerte von Wiederholungsversuchen zu mitteln, um diese Daten separat auszuwerten. Für alle Mess- und Mittelwerte werden Wert-Zeit-Diagramme erzeugt. Außerdem werden aus den Versuchsdaten für die Simulation notwendige Parameter für Reaktionsgleichungen ermittelt.

Diese Software wurde in Visual Basic for Applications (VBA) geschrieben. Ursprünglich wurden Makros in Excel erstellt, jedoch aufgrund von vielen Erweiterungen und der Notwendigkeit einer graphischen Benutzungsoberfläche wurde das Auswertetool dann nach VBA portiert und weiterentwickelt.

Hier werden der Aufbau von Dateinamen und die Benutzungsschnittstelle beschrieben. Alle im Auswertetool verwendeten Dateinamen haben eine feste Struktur „a\_b\_c\_d\_e“, wobei

- a) Versuchsname oder Materialname
- b) Parameter 1 (Temperatur oder Bestrahlungsstärke)
- c) Parameter 2 (Sauerstoffkonzentration)
- d) Versuchs/Wiederholungsnummer
- e) Messgerät

Die Geräte für e) sind mit der entsprechenden Dateierdung in der folgenden Tabelle 4.1 aufgelistet, wobei \* für die Teile a) bis d) des Dateinamens steht.

**Tabelle 4.1:** Messgeräte und aufgezeichnete Dateien

Messgerät	Dateierdung
FT-IR	*_FTIR.xlsx oder *_FTIR.xls
Protokoll-Datei	*_Versuchszeiten_Parameter.txt
DIN-Rohr	*_DIN.txt
Cone	*_red.CSV
SDC	*.RAW
Sauerstoffmesssonde	*_O2.dat
Temperaturmessung	*_Temp.txt
Volumenstrommessung	*_Flow.txt

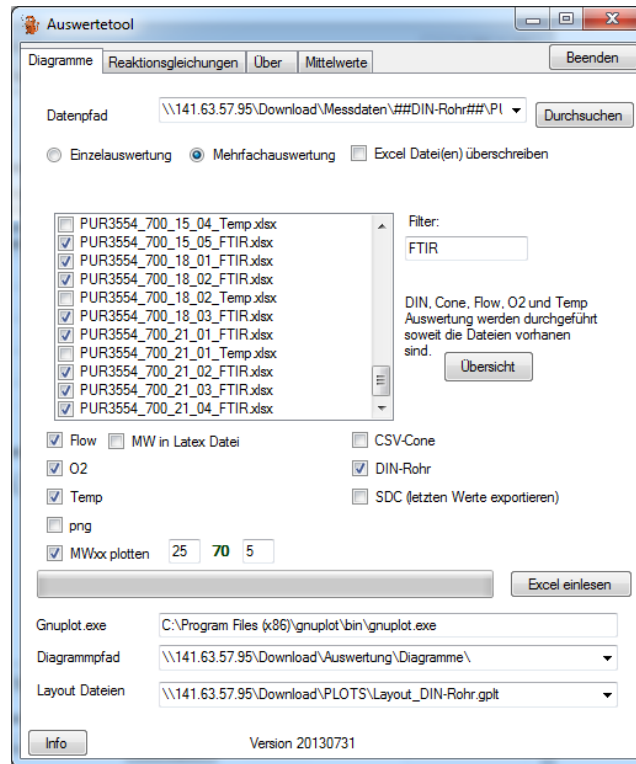
### 4.2.1 Auswertetool-Diagramme

Zwischen allen Messgeräten bzw. Versuchsdateien wurde ein Zeitabgleich durchgeführt. Dieser Zeitabgleich ist notwendig, da die Messgeräte zu unterschiedlichen

Zeitpunkten vor Versuchsbeginn gestartet wurden. Mit den Zeiten der Nullmessung wurde die FTIR-Datei abgeglichen und ein Mittelwert berechnet, der von den gemessenen Versuchswerten abgezogen wurde. Die Nullmessung wurde 5-10 Minuten vor Versuchsbeginn durchgeführt, um ein „Hintergrundrauschen“ aller gemessenen Gase aufzuzeichnen. Der Mittelwert der Nullmessung für alle Gase, die das FTIR gemessen hat, wurde von allen Messwerten des Versuches abgezogen. Die Daten wurden mit Gnuplot<sup>1</sup> eingelesen und Diagramme mit den gemessenen Stoffkonzentrationen erzeugt. Je nach Versuchsaufbau war es möglich, einen zusätzlichen Mittelwert (siehe Abbildung 4.4 – Checkbox „MWxx plotten“) über einen gewissen Versuchszeitraum mit aufzutragen. Diese Funktion wurde für die Versuche mit dem modifizierten DIN-Rohr genutzt, da es sich bei dem Aufbau um einen kontinuierlichen Versuch handelt, bei dem die Versuchsbedingungen über den Versuch nicht geändert wurden. Es lassen sich durchschnittliche Konzentrationsplateaus für den gewünschten Versuchszeitraum berechnen und auftragen. Diese Werte wurden außerdem für die Berechnung von Reaktionsgleichungen benötigt. Die Benutzungsschnittstelle des Programms Auswertetool-Diagramme ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Die meisten Diagramme (siehe z.B. Abbildung 3.2 sowie alle Diagramme im Anhang) wurden mit diesem Auswertetool erzeugt.

---

<sup>1</sup> [www.gnuplot.org](http://www.gnuplot.org)



**Abbildung 4.4:** Auswertetool — Diagramme

Dient zum Auswerten von Versuchen mit dem modifizierten DIN-Rohr, SDC oder Cone. Es werden Diagramme von Konzentrationsverläufen, Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten erzeugt.

Die Auswertung kann für alle Versuche, die im selben Ordner gespeichert sind, gleichzeitig durchgeführt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass die FTIR-Dateien mit den berechneten Mittelwerten der Nullmessung und der Versuchszeit gespeichert werden.

Die Berechnung eines Korrekturwerts  $\bar{\phi}_{g,Null}$  durch die Nullmessung für das Gas  $g$  erfolgt nach Gleichung 4.4:

$$\bar{\phi}_{g,Null} = \frac{\sum_{n=SN}^{n=EN} \phi_n}{N} \geq 0 \quad (4.4)$$

wobei SN = Start-Nullmessung, EN = End-Nullmessung und N die Anzahl der gemessenen Werte im Nullmessungszeitraum sind. Eine vom Messgerät ausgegebene negative Konzentration wird auf „0“ gesetzt.

Das gleiche gilt für die Berechnung der Volumenkonzentrationen der Summe der einzelnen Gase  $\bar{\phi}_{g,100}$  für die Messwerte während der Versuchszeit  $t$ . Hier wird jeder Wert nach Gleichung 4.5 durch den errechneten Wert der jeweiligen Nullmessung korrigiert. Am Ende wird ein durchschnittlicher Konzentrationswert  $\phi_{100}$  für das Gas



$\phi$  über die gesamte Versuchszeit gebildet.

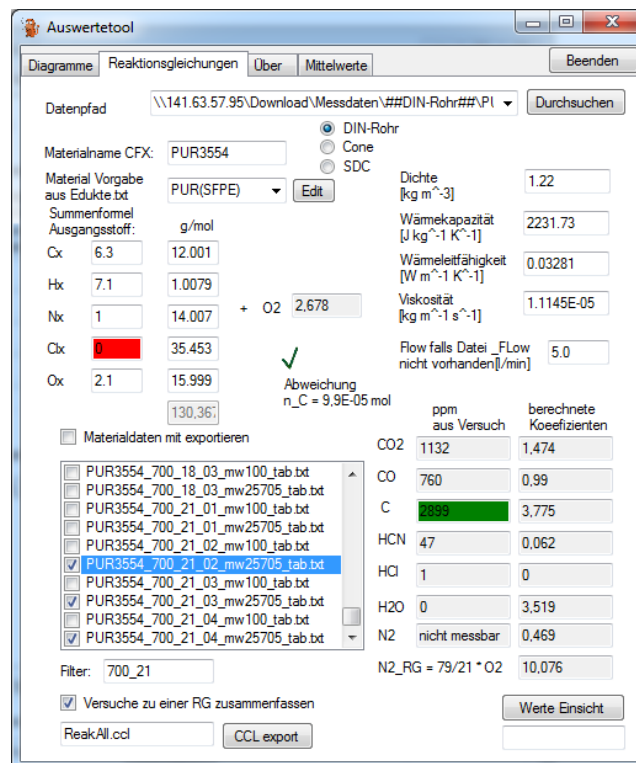
$$\bar{\phi}_{g,100} = \frac{\sum_{n=SV}^{n=EV} (\phi_n - \bar{\phi}_{g,Null})}{N} \geq 0 \quad (4.5)$$

wobei SV = Start-Versuch, EV = End-Versuch und N die Anzahl der gemessenen Werte im Versuchszeitraum sind.

#### 4.2.2 Auswertetool-Reaktionsgleichungen

Unter dem Reiter „Reaktionsgleichungen“ findet sich die wichtigste Funktionalität des Auswertetools. Mit dieser Funktion werden die Reaktionsgleichungen (Eingabeparameter) für die Simulationen berechnet. Die entwickelte Berechnungsmethode ist für Materialien gültig, die nur Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Chlor und Sauerstoff enthalten. Aus den gemessenen Gaskonzentrationen eines Versuchs und einer Summenformel für das entsprechende Edukt wurde eine Reaktionsgleichung berechnet. Es ist möglich, die Daten über mehrere Versuche zu mitteln. Mit dieser Methode wurden schon in [LRKK12] im DIN-Rohr und Cone Kalorimeter Messdaten für Material A, B und C mit einem festen Rußanteil ausgewertet. Die Annahme eines festen, unveränderlichen Sootyields ist nicht ausreichend, um die stöchiometrischen Koeffizienten für die Reaktionsgleichungen zu berechnen. In dieser Arbeit wurden deshalb die Daten mit einer Kohlenstoffbilanz ausgewertet. Der Rußanteil ändert sich abhängig von den Versuchsbedingungen. Die berechneten Reaktionsgleichungen lassen sich als \*.ccl-Datei speichern und in ANSYS CFX einlesen.

Die Benutzungsoberfläche des Auswertungsprogramms für die Reaktionsgleichungen ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Es wurden hier beispielhaft drei Versuche (DIN-Rohr) ausgewertet. Oben links wird das Edukt quantifiziert. Unten links wurden die Versuche ausgewählt, für die die Koeffizienten der Produkte (rechts unten) berechnet wurden. Weitere Angaben (oben rechts) sind für den CFX-Export relevant.



**Abbildung 4.5:** Auswertetool-Reaktionsgleichungen

Dieses Teilprogramm berechnet aus den Mittelwerten, die beim Auswertetool-Diagramme erzeugt werden, Reaktionsgleichungen für ein ausgewähltes Material aus den gemessenen Gaskonzentrationen über die gesamte Versuchszeit. Hier wird eine Reaktionsgleichung für PUR3554 mit den Materialdaten aus dem [DiN08] für die Versuchskonfiguration aus dem DIN-Rohr bei 700 °C und 21 vol% Sauerstoffgehalt für vier Wiederholungsversuche gemittelt berechnet.

In folgender Tabelle sind die Verbrennungsgase (VG) aufgeführt, die mit dem FT-IR gemessen wurden. Für die weiteren Betrachtungen wurden nur die Gase einbezogen, die hauptsächlich bei der Verbrennung der ausgewählten Polymere auftraten. Dies sind hier alle Gase, die Kohlenstoff enthalten, sowie HCl. Im folgenden wird diese Menge der Gase als VGC bezeichnet. HCl wurde auf Grund der sehr hohen zu erwartenden Konzentrationen bei der Verbrennung von PVC berücksichtigt. Außerdem wirkt dieses Gas ätzend auf den menschlichen Organismus und kann für die Wahl der Schutzausrüstung der Feuerwehr wichtig sein. Alle übrigen gemessenen Gase sind für das Erreichen der Ziele dieser Arbeit nicht von Bedeutung. Bei einer Verbrennung entstehen sehr viele unterschiedliche Gase; hier werden nur die kohlenstoffhaltigen Gase, die das FT-IR misst, sowie Gase mit hohem Volumenanteil bei diesen Verbrennungsreaktionen berücksichtigt. Es können zusätzlich kohlenstoffhaltige Gase entstehen, die nicht vom FT-IR gemessen wurden. Auf der Eduktseite ist der Kohlenstoffanteil genau definiert. Somit werden selbst diese Gase berücksichtigt, indem sie auf der Produktseite mit Ruß berechnet werden.

**Tabelle 4.2:** Vom FT-IR gemessene Gase und diejenigen Gase, die für die Bestimmung der Reaktionsgleichungen ausgewählt wurden.

Name des Gases	Summenformel	verwendet
Kohlenstoffdioxid	$CO_2$	✓
Kohlenstoffmonoxid	$CO$	✓
Blausäure	$HCN$	✓
Methan	$CH_4$	✓
Ethen	$C_2H_4$	✓
Ethin	$C_2H_2$	✓
Phenol	$C_6H_6O$	✓
Acrolein	$C_3H_4O$	✓
Benzol	$C_6H_6$	✓
Formaldehyd	$CH_2O$	✓
Schwefeldioxid	$SO_2$	
Stickstoffmonoxid	$NO$	
Stickstoffdioxid	$NO_2$	
Ammoniak	$NH_3$	
Wasser	$H_2O$	
Broman	$HBr$	
Salzsäure	$HCl$	✓
Flusssäure	$HF$	

Das Restgas, das aus den nicht gemessenen Gasen besteht, wird als Stickstoff angenommen. Der ppm-Anteil Stickstoff errechnet sich aus Formel 4.6, wobei  $\phi_i$  die zuvor bestimmten Gaskonzentrationen (in ppm) sind. Es werden von 100 % Volumenanteil (1 000 000 ppm) die Konzentrationen aller gemessenen Gase subtrahiert.

$$\phi_{N_2} = 1\,000\,000 - \sum_{i \in VG} \phi_i \quad (4.6)$$

Die folgende Berechnung wird für das Edukt Polyurethan [DiN08] durchgeführt. Das Edukt setzt sich aus Kohlenstoff, Stickstoff, Chlor und Sauerstoff zusammen. Der molare Anteil wird mit  $\nu_i$  angegeben.

$$1\,mol\,PUR = C_{6,3}H_{7,1}N_1Cl_0O_{2,1} \quad (4.7)$$

$$1\,mol\,Edukt = C_{\nu_C}H_{\nu_H}N_{\nu_N}Cl_{\nu_{Cl}}O_{\nu_O} \quad (4.8)$$

Das molare Volumen  $V_m$  für die Gasanalyse errechnet sich mit der idealen Gaskonstanten  $R$ , dem Umgebungsdruck  $p$  und der Temperatur im Abzug  $T$  nach Formel 4.9. Am Abzug vom Versuchsaufbau wurden die Gase für die Analyse im FT-IR entnommen. Das Zuluftvolumen  $V_{Zuluft}$  wurde mit 4.10 aus dem Produkt der gemittelten Zuluft und der Versuchszeit  $t$  berechnet. Das molare Gewicht der Luft  $M_{Luft}$

wurde nach Gleichung 4.11 ermittelt. Die Gaskonzentrationen  $\phi_i$  für das Gas  $i$  wurden für 70% der Versuchszeit (25%-95%) gemittelt. Der Versuchsbeginn (die ersten 25%) sowie das Ende (die letzten 5%) wurden nicht betrachtet. Mit  $\bar{\phi}_{i,100}$  wurde der mittlere ppm-Anteil des Gases  $i$  aus der Menge aller verwendeten Gase (VG) der vollständigen Versuchszeit  $t$  bezeichnet. Mit diesen Werten lässt sich die Masse jedes Gases, das Kohlenstoff enthält,  $m_{C,i}$  nach Gleichung 4.12 berechnen. Die Masse an Kohlenstoff im Abzug  $m_{C_{Abzug}}$  wurde mit Gleichung 4.13 aus der Summe der Gase, die einen Kohlenstoffanteil enthalten berechnet. Der verbrannte Anteil an Kohlenstoff aus der Probe  $m_{C_{Probe}}$ , der in die Gasphase übergegangen ist, errechnet sich nach Gleichung 4.14. Der Volumenanteil Kohlenstoff  $\phi_{C,100}$  in ppm wurde nach 4.15 berechnet.

$$V_m = R \cdot (T_{Abzug} + 273.15) / p_{Abzug} \cdot 1000 \text{ in [l/mol]} \quad (4.9)$$

$$V_{Zuluft} = \dot{V}_{mittel} \cdot t \text{ in [m}^3] \quad (4.10)$$

$$M_{Luft} = \sum_{i \in VG \cup \{O_2, N_2\}} \left( \frac{\bar{\phi}_{i,100}}{10^6} \cdot M_i \right) \text{ in [g/mol]} \quad (4.11)$$

$$m_{C,i} = \frac{\bar{\phi}_{i,100}}{10^6} \cdot \frac{M_{Luft}}{V_m / 10^3} \cdot V_{Luft} \cdot \frac{M_C}{M_i} \text{ in [g]} \quad (i \in VGC) \quad (4.12)$$

$$m_{C_{Abzug}} = \sum_{i \in VGC} m_{C,i} \quad (4.13)$$

$$m_{C_{Probe}} = (m_{ProbeAnfang} - m_{ProbeEnde}) \cdot \frac{X_{C_{Edukt}} \cdot M_C}{M_{Edukt}} \text{ in [g]} \quad (4.14)$$

$$\bar{\phi}_{C,100} = \frac{m_{C_{Probe}} - m_{C_{Abzug}}}{V_{Luft} \cdot M_{Luft}} \cdot V_m \cdot 10^3 \quad (4.15)$$

Aus der Summe aller Gase, die Kohlenstoff enthalten, konnte nach 4.16 eine Bilanz gebildet werden, womit sich die Masse an Ruß bestimmen lässt.

$$m_{C_{Ru\beta}} = m_{C_{Probe}} - m_{C_{Abzug}} \quad (4.16)$$

Die  $X_i/X_{CO_2}$ -Verhältnisse für die Gase  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $HCN$  und für  $Ru\beta$  wurden über den ppm-Anteil des jeweiligen Gases zu dem ppm-Anteil von Kohlenstoffdioxid berechnet:

$$X_{i/CO_2} = \phi_i / \phi_{CO_2}, \quad (4.17)$$

Mit der Zielwertsuche wurden die Koeffizienten  $\nu_i$  für die Reaktionsgleichung bei dem ausgewählten Edukt (PUR  $C_{6.3}H_{7.1}N_{1.0}O_{2.1}$ ) berechnet. Es wurde als Ausgangsstoff ein Mol Edukt angesetzt, welches zu Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoff, Blausäure, Salzsäure, Wasser und Stickstoff reagiert. Alle weiteren entstehenden Gase wurden für die Aufstellung der Reaktionsgleichung nicht berücksichtigt. Der Kohlenstoffanteil weiterer Gase ging als Ruß in die Berechnung ein. Zur Überprüfung des Chloranteils wurde das Gas Chlorwasserstoff durch den Anteil der gemessenen Gase  $HCl$  sowie durch den Anteil auf der Eduktseite des enthaltenen Chlors berechnet.

Verwendet für die Reaktionsgleichung wurde der im Edukt enthaltene Chloranteil. Die Koeffizienten für die Produkte wurden mit folgenden Gleichungen 4.18-4.24 bestimmt:

$$\nu_{CO} = \nu_{CO_2} \cdot X_{CO/CO_2}, \quad (4.18)$$

$$\nu_C = \nu_{CO_2} \cdot X_{C/CO_2}, \quad (4.19)$$

$$\nu_{HCN} = \nu_{CO_2} \cdot X_{HCN/CO_2}, \quad (4.20)$$

$$\nu_{HCl_{theo}} = \nu_{CO_2} \cdot X_{HCl/CO_2}, \quad (4.21)$$

$$\nu_{HCl} = \nu_{Cl}, \quad (4.22)$$

$$\nu_{H_2O} = (\nu_H - \nu_{HCN} - \nu_{HCl})/2, \quad (4.23)$$

$$\nu_{N_2} = (\nu_N - \nu_{HCN})/2, \quad (4.24)$$

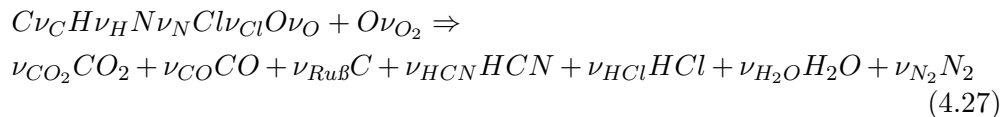
Nach der Koeffizientenbildung wurde kontrolliert, ob die Kohlenstoffbilanz korrekt ermittelt wurde (Gleichung 4.25). Außerdem wurde der für die Reaktion benötigte Sauerstoff nach Gleichung 4.26 berechnet.

$$diff_C = \nu_{RuB} + \nu_{CO} + \nu_{CO_2} + \nu_{HCN} - \nu_{C_{Gase}}, \quad (4.25)$$

$$\nu_{O_2} = \nu_{CO_2} + \nu_{CO}/2 + \nu_{H_2O}/2 - \nu_{O}/2, \quad (4.26)$$

Weitere Bedingungen in der Zielwertsuche waren, dass die Koeffizienten für  $N_2$  und HCN auf „0“ gesetzt wurden, wenn im Edukt kein Stickstoff gebunden war. Das gleiche galt für Salzsäure, wenn kein Chlor im Edukt vorhanden war. Wenn die Bedingung  $|diff_C| < 0.0001$  erfüllt war, also der Betrag der Kohlenstoffdifferenz kleiner als  $10^{-4}$  war, wurde die Zielwertsuche beendet.

Die berechnete Reaktionsgleichung für die Verbrennung der Materialien A, B und C lautet:



### 4.3 Luft- bzw. Sauerstoffbedarf

Jede Oxidationsreaktion hängt vom mitreagierenden Sauerstoff aus der Umgebung sowie Sauerstoff aus dem Edukt ab. Bei einer Verbrennungsreaktion, bei der der Anteil an Sauerstoff nicht ausreicht, um das Edukt stöchiometrisch vollständig zu den Produkten umzusetzen, spielt die Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr eine entscheidende Rolle. Dies ist praktisch bei jeder Verbrennung wie einem Brand in einem Gebäude der Fall. Der Luftbedarf einer Reaktion wird durch  $\lambda$  bzw. der Sauerstoffbedarf durch  $\Phi$  nach [Sch08] angegeben. Durch die folgenden Berechnungen wurde überprüft, in welchem Ventilationszustand sich die Reaktionen im DIN-Rohr und der SDC befanden.

Der Luft- bzw. Sauerstoffbedarf ist definiert durch:

$$\lambda = \frac{m_{Luft\,vorhanden}}{m_{Luft\,stöchiometrisch}} \quad (4.28)$$

$$\Phi = \frac{m_{O_2\,stöchiometrisch}}{m_{O_2\,vorhanden}} \quad (4.29)$$

Dabei beschreibt die Norm [ISO TS 19700], wann eine Reaktion gut bzw. weniger gut ventiliert ist<sup>1</sup>:

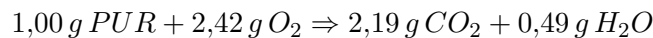
$$\Phi_{well} < 0,75 \quad (4.30)$$

$$\Phi_{less\,well} = 2,0 \pm 0,2 \quad (4.31)$$

#### 4.3.1 Sauerstoffverbrauch im DIN-Rohr

Bei einem Zuluftstrom mit 21 vol% Sauerstoffanteil von 5 l/min und einer Temperatur von 20 °C lag die zugeführte Masse an Sauerstoff bei 0,023 g/s. Über die Versuchszeit von 30 Minuten waren das 41,2 g Sauerstoff. Bei den Versuchen mit 5 vol% Sauerstoff im Zuluftstrom lag die Masse an zugeführtem Sauerstoff über die Versuchszeit bei ca. 9 g (siehe Versuchsbeschreibung 3.2).

Für eine vollständige Umsetzung von 1 g Polyurethan werden 2,4 g Sauerstoff gebraucht. Weitere Reaktionsprodukte ohne Sauerstoffanteil werden hier nicht dargestellt. Die Reaktion lautet:



Das Verhältnis der Masse von vorhandenem Sauerstoff zu benötigtem Sauerstoff lag für die Versuchsbedingungen von 21 vol% Sauerstoff bei  $\lambda = 41,2/2,4 \approx 17,6$ . Für eine Sauerstoffkonzentration von 5 vol% in der Zuluft betrug  $\lambda = 9/2,4 \approx 3,8$ . Für die Versuche mit 5 vol% Sauerstoff betrug  $\Phi = 0,26$ . Dieses Verhältnis wird nach [ISO TS 19700] mit Gleichung 4.30 als gut ventilerter Zustand beschrieben.

Die gemessenen Gaskonzentrationen der DIN-Rohr-Versuche hingegen zeigten, dass ein großer Unterschied zwischen den Ventilationszuständen von 21 vol% und 5 vol% Sauerstoff vorlag (siehe Abbildung 3.7).

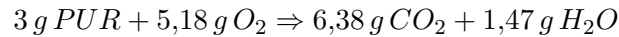
Zu beachten ist, dass die Ventilationszustände für auftriebsbehaftete Brandvorgänge ohne Zuluftstrom gelten. Diese Voraussetzung wird bei den Versuchen in der SDC im folgenden Abschnitt erfüllt.

#### 4.3.2 Sauerstoffverbrauch in der SDC

Die Smoke Density Chamber hat ein Volumen von  $V = 0,51\,m^3$ . Die Masse an Luft in der Kammer betrug somit  $m_{Luft} = 0,51\,m^3 \cdot 1,168\,kg/m^3 = 0,595\,kg$ . Bei einem Massenanteil von 23 % an Sauerstoff betrug die Masse an Sauerstoff  $m_{O_2} = 0,23 \cdot$

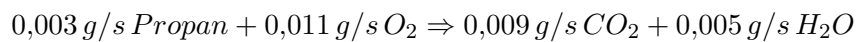
<sup>1</sup> Für andere berechnete Werte macht diese Norm keine Aussage.

0,595 = 137 g. Für die vollständige Reaktion von 3 g Polyurethan zu  $CO_2$  und  $H_2O$  in der SDC ergab sich die Reaktionsgleichung, die wiederum nur Reaktionsprodukte mit Sauerstoffanteil berücksichtigt:



Das Verhältnis der Masse von vorhandenem Sauerstoff zu benötigtem Sauerstoff lag somit bei  $\lambda = 137/5,2 \approx 26$ . Aus  $r = 5,2/3$  ergab sich für  $\Phi = 3/137 \cdot r \approx 0,038$ . Dieser Wert entsprach nach der [ISO TS 19700] einem gut ventiliertem Zustand. Während der gesamten Versuchszeit herrschten gut ventilierte Verhältnisse.

Die vorgemischte Zündflamme in der SDC besteht aus einem Propan-Luft-Gemisch. Das Gemisch setzte sich aus  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  Propangas und  $500 \text{ cm}^3/\text{min}$  Luft zusammen. Die Reaktion lautete wie folgt:

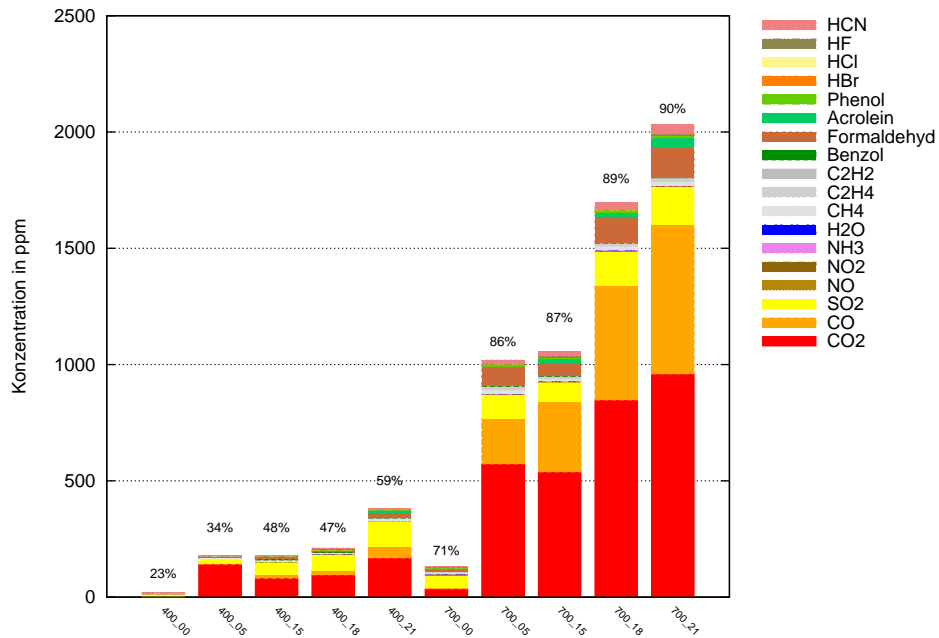


Der im Gemisch vorliegende Massestrom an Sauerstoff betrug  $0,002 \text{ g/s}$ . Für die vollständige Umsetzung des Propangases wurden  $0,011 \text{ g/s}$  Sauerstoff gebraucht. Für die vollständige Umsetzung wurde ein Massestrom von  $0,009 \text{ g/s}$  Sauerstoff aus der Kammer benötigt. Nach 600 s Versuchszeit waren das  $5,4 \text{ g}$  Sauerstoff. In diesem Fall änderte sich das Verhältnis der Masse des vorhandenen Sauerstoffes zu der des benötigten Sauerstoffes  $\lambda = 137/(5,2 + 5,4) \approx 13$ . Dadurch betrug  $\Phi = 0,08$  am Versuchsende. Auch am „Versuchsende“ war der Zustand somit nach Gleichung 4.30 noch gut ventiliert.

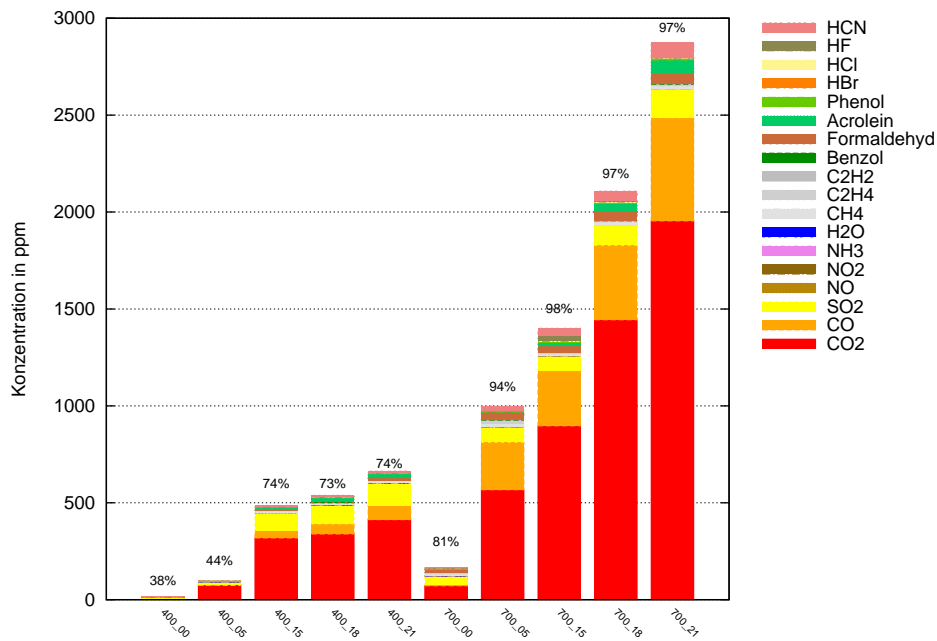
#### 4.4 Stoffbilanz im DIN-Rohr

Obwohl das neu entwickelte Modell die Reaktionsgleichungen an die Abbrandbedingungen anpasst, können auch mit diesem Modell noch nicht alle Phänomene, die bei der Rauchentstehung bedeutend sind, erfasst werden. Das zeigen die Abbildungen 4.6, die die gemittelten Gaskonzentrationen über die gesamte Versuchszeit der DIN-Rohr Versuche bei allen getesteten Bedingungen darstellen. Außerdem ist der mittlere Massenverlust in Prozent über dem jeweiligen Balken angegeben. Die Versuche wurden bei 400 und 700 °C mit jeweils 0 – 21 vol% Sauerstoff durchgeführt. Die gemessenen Gaskonzentrationen variieren bei den unterschiedlichen Bedingungen stark. Hinzu kommt, dass das angeschlossene FT-IR nur die dargestellten Gase qualitativ und quantitativ messen konnte. Bei den Versuchen mit den geringen Sauerstoffkonzentrationen von 0 und 5 vol% wurden nicht vollständig verbrannte Gase, sondern langkettige Pyrolyseprodukte freigesetzt. Diese Gase wurden nicht von dem FT-IR aufgezeichnet, weil es dafür nicht kalibriert war. Zusätzlich kondensieren diese langkettigen Gase schnell aus und erreichen nicht die beheizte Messzelle des FT-IRs. Der im Diagramm dargestellte Massenverlust gibt Auskunft über das Verhältnis der gemessenen Gase zu dem Anteil der freigesetzten Gase. Reaktionsgleichungen wurden für die Versuche mit einem Luftsauerstoffanteil von über 15 vol% berechnet. Bei einem geringeren Sauerstoffanteil liegt der Anteil der vom FT-IR gemessenen Gase unter dem Anteil

aller freigesetzten Stoffe. Die Reaktionen unter Stickstoffatmosphäre zeigen nur einen minimalen Anteil an Gasen abgesehen vom HCl bei den PVC Versuchen. Hier wurden minimale Verbrennungsprodukte bzw. Pyrolyseprodukte vom FT-IR gemessen.

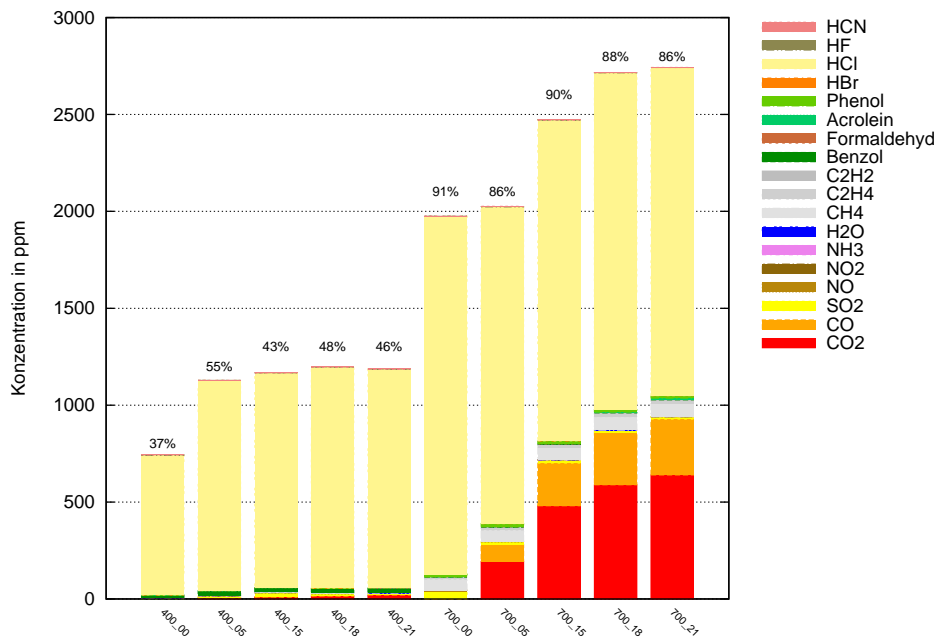


(a) PUR3554



(b) PUR3045SE





(c) PVC

**Abbildung 4.6:** Gesamte mittlere Gasfreisetzung während der DIN-Rohr Versuche für (a) PUR30554, (b) PUR3045SE und (c) PVC, wobei die Prozentzahl den Masseverlust angibt. Die Bezeichnungen an der X-Achse geben die Versuchstemperatur und die Sauerstoffkonzentration des jeweiligen Versuchs an.

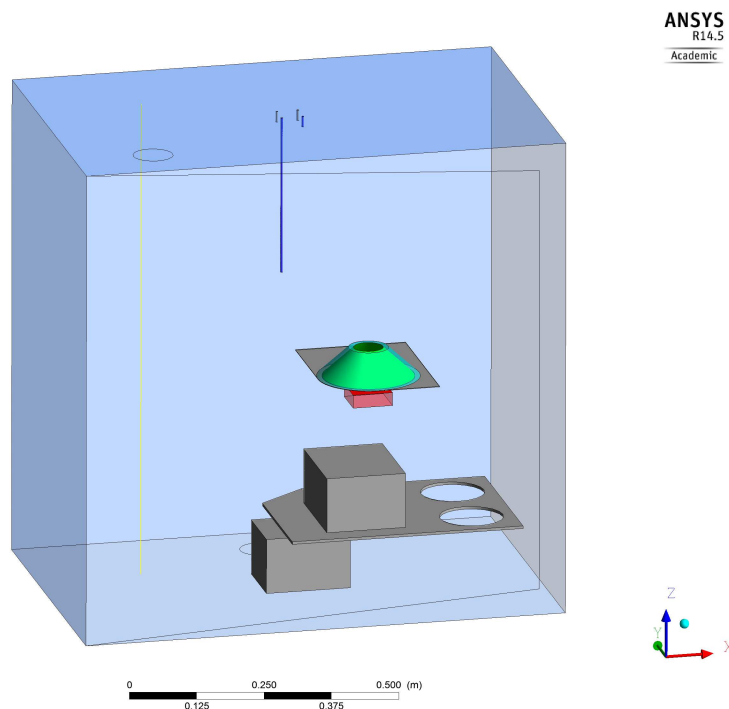
## 4.5 Randbedingungen für die numerischen Untersuchungen

Hier werden die Randbedingungen für die Validierung der SDC-Versuche und die Randbedingungen für die Brandausbreitung in der Hotel-Geometrie beschrieben. Die Hotel-Geometrie wurde ausgesucht, um die Anwendung der Modelle in einem realen Anwendungsfall zu testen. Für dieses Objekt lag das Brandschutzkonzept vor, das mit Hilfe von numerischen Berechnungen mit FDS erstellt wurde. Die Geometrie wird in Abbildung 5.10 dargestellt. Für die Validierung anhand der SDC wurden Versuche sowie Simulationen durchgeführt, um die geeigneten Submodelle in CFX zu bestimmen. Außerdem wurden im Versuch Temperaturen für das Heizelement ermittelt, um die in der Norm vorgeschriebenen Bestrahlungsstärken von 25 bzw.  $50 \text{ kW/m}^2$  zu erreichen. Die Validierung ist erforderlich um sicherzustellen, dass die Wahl der Submodelle und Eingabeparameter für diese und weitere Simulationen mit äquivalenten Brand- und Strömungsbedingungen geeignet ist.

In der Hotel-Geometrie, im folgenden auch Hotellobby genannt, wurde ein Entstehungsbrand angenommen und die entsprechenden Randbedingungen ermittelt (siehe Kapitel 5.3) [OB06] [OT07].

### 4.5.1 Smoke Density Chamber

In Abbildung 4.7 sind die Flächen mit den Randbedingungen der SDC dargestellt. Die Probenoberseite (rot) ist das Gas-Inlet für den eingehenden Massenstrom an Pyrolysegas. Der darüber liegende Cone (grün) strahlt mit der inneren beheizten Seite auf die Probe und nach Gleichung 4.32 mit der äußeren Seite in die SDC. In der Mitte oben befinden sich vier Rohre (blau). An dem langen Rohr befindet sich das FT-IR Inlet - schräg gegenüber das FT-IR Outlet. Die anderen zwei Rohre sind geschlossen und werden nicht benutzt. Im linken Teil der SDC ist die Lichtmessstrecke (gelb) dargestellt. Am unteren Ende gibt es die Lichtquelle, am anderen Ende die Fozzelle. Die weiteren Einbauten (grau) und sechs Wände (hellblau) haben einen Emissionsgrad und die Wände zusätzlich einen Wärmeübergangskoeffizienten.



**Abbildung 4.7:** SDC mit hervorgehobenen Geometrien mit Randbedingungen

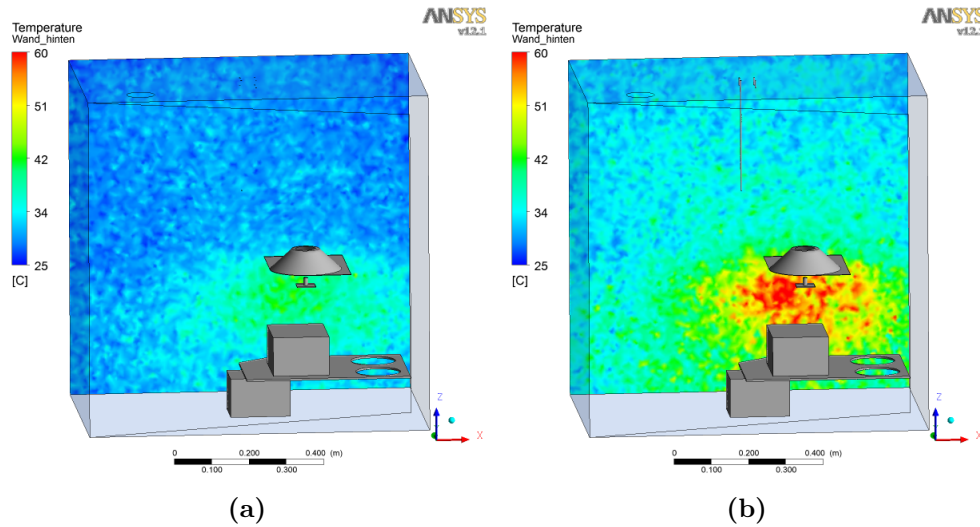
In der Versuchsanordnung ist der Cone Heater elektrisch so beheizt, dass auf der Probenoberfläche entsprechend der Norm eine Wärmestrahlung von 25 bzw. 50  $kW/m^2$  anliegt. Die Wärmestrahlung wurde im Versuch mit einem Wärmestrommeter (runder Messzylinder mit 1 cm Durchmesser) bestimmt. Der Versuchsaufbau ist in der Simulation so weit wie möglich nachgestellt worden. Durch eine Parameterstudie konnte für die Simulationen die entsprechende Temperatur an der Innenseite des Cone bestimmt werden. Die im Versuch gemessene Temperatur des Cone Heaters für eine bestimmte Bestrahlungsstärke der Probe änderte sich mit veränderter Temperatur im Labor. Mit Hilfe der Parameterstudie im numerischen Modell wurden die Temperaturen für

die Simulation der zwei Bestrahlungsstärken von 25 und  $50 \text{ kW/m}^2$  bestimmt. In der Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse der Parameterstudie dargestellt. In der linken Spalte befinden sich die für die Simulation gewählten Temperaturen des Cone Heizelements und in der rechten Spalte die berechnete Wärmestrahlung, die auf der Messzelle bzw. der Probe auftrifft. Die für weitere Simulationen gewählten Temperaturen als Randbedingung sind mit den entsprechenden Werten für die Wärmestrahlung grün eingefärbt. Zusätzlich stehen in Klammern die Temperaturen, die in den Versuchen für die geforderten 25 und  $50 \text{ kW/m}^2$  Wärmestrahlung gemessen wurden. Diese Temperaturen in Klammern sind Näherungswerte, die je nach Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit um einige Grad variieren können.

**Tabelle 4.3:** Parameterstudie zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Cone-Strahlers für 25 und  $50 \text{ kW/m}^2$ . Passende Werte sind grün eingefärbt. Die Zahl in der Klammer ist ein Mittelwert aus den SDC-Versuchen

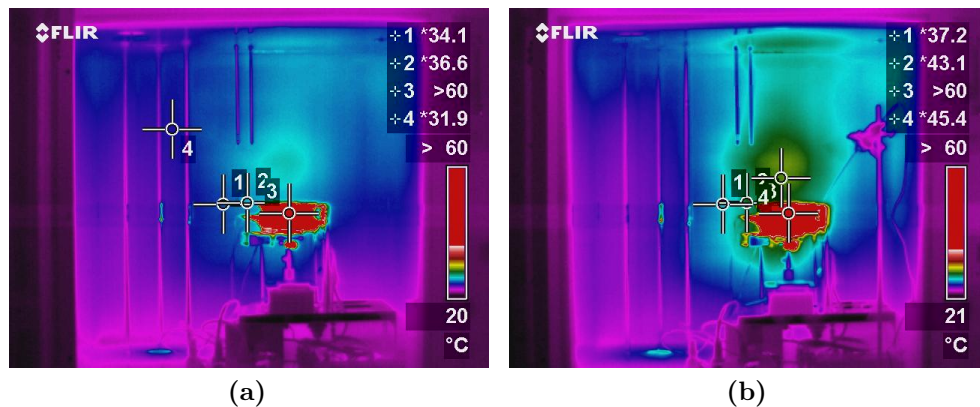
Temperatur des Heizelements in $^{\circ}\text{C}$	Strahlung auf der Messfläche in $\text{kW/m}^2$
570	23,6
580 ( $\approx 590$ )	25,5 ( $\approx 25,0$ )
585	25,7
590	27,4
750 ( $\approx 773$ )	50,9 ( $\approx 50,0$ )
760	61,8
765	62,6
770	61,5
773	66,3
780	56,4
785	66,2
790	64,5

Abbildung 4.8 zeigt berechnete Wandtemperaturen an der Rückwand in der SDC bei 25 und  $50 \text{ kW/m}^2$ .



**Abbildung 4.8:** Mit CFX berechnete Temperaturverteilung auf der Rückwand in der SDC bei (a) 25 und (b)  $50 \text{ kW/m}^2$

Zum Vergleich zu den numerischen Untersuchungen werden in Abbildung 4.9 IR-Bilder gezeigt.



**Abbildung 4.9:** Mit Thermokamera aufgenommene Wärmebilder der SDC bei (a) 25 und (b)  $50 \text{ kW/m}^2$  Heizleistung.

Die mit CFX berechneten Wandtemperaturen in Abbildung 4.8 und die Thermobildaufnahmen in Abbildung 4.9 zeigen, dass die berechneten und gemessenen Temperaturen in der gleichen Größenordnung liegen. Die numerischen Berechnungen geben die Verhältnisse in der SDC befriedigend wieder. Allerdings liegt der Bereich, in dem die höchsten Wandtemperaturen auftreten, im Versuch über dem Cone Heater und bei den numerischen Berechnungen unterhalb des Cone Heaters. Dieser Unterschied kann aber nicht allein auf Unvollständigkeiten im numerischen Modell zurückgeführt werden, da die IR Kamera auch die Spiegelung des Cones in der reflektierenden Rückwand der SDC aufnimmt und die heiße konvektive Strömung der Gase über dem Cone.

In der numerischen Berechnung hingegen sind tatsächlich die Wandtemperaturen berechnet.

Aus den Aufnahmen mit der IR Kamera wurde aber dennoch deutlich, dass der Cone Heater auch nach außen Wärme abgab. Das war in den Simulationen nicht berücksichtigt worden. Für eine Berücksichtigung dieser Abstrahlung nach außen wurde als eine weitere Randbedingung eine Außentemperatur für den Cone festgelegt. Die Cone Heiztemperatur wurde für 25 und 50  $kW/m^2$  entsprechend der Tabelle 4.3 ausgewählt. Es wurden Versuchsreihen gefahren, bei denen die Cone Temperatur in 100 K Schritten erhöht wurde, um die Außentemperatur des Cones  $\theta_a$  mit einem Thermolement zu messen. Aus diesen Versuchen ergab sich die Funktion 4.32 in Abhängigkeit der Cone Temperatur  $\theta_i$  in  $^{\circ}C$ .

$$\theta_a = 0,3184 \cdot \theta_i \quad (4.32)$$

Die ausgewählten Randbedingungen für die Smoke Density Chamber sind in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Weitere numerische Untersuchungen wurden für drei unterschiedliche Versuchsbedingungen in der SDC durchgeführt: Als erste Bedingung wurde der Cone mit einer Wärmestrahlung von 25  $kW/m^2$  ohne Zündflamme berechnet. Als zweite und dritte Bedingung wurde der Cone mit 25 bzw. 50  $kW/m^2$  mit Zündflamme modelliert.

**Tabelle 4.4:** Randbedingungen der SDC

Randbedingung	25 $kW/m^2$ oF	25 $kW/m^2$	50 $kW/m^2$
Temp. Cone	580 $^{\circ}C$	580 $^{\circ}C$	750 $^{\circ}C$
Temp. Cone Außen	185 $^{\circ}C$	185 $^{\circ}C$	239 $^{\circ}C$
Gas Inlet gesamt	2,2 g	3,2 g	3,2 g
Gas Inlet Zeit	0 – 470 s	0 – 200 s	0 – 120 s
FT-IR Outlet	4 l/min · $\rho_{Outlet}$		
FT-IR Inlet	4 l/min · $\rho_{Outlet}$		
Emissionsgrad: Rohre und Einbauten	0,1		
Emissionsgrad: Wände	0,9		
Wärmeübergangskoeffizient: Wände	23 $W/(m^2 \cdot K)$		

Der Pyrolysegas-Inletstrom wurde entsprechend der Versuchsbedingung angepasst. Er errechnet sich aus den Versuchsdaten linear aus der zugeführten Masse und der Abbrandzeit. Die Masse wurde im Versuch mit einer Abbrandwaage aufgenommen. Die Gasanalyse durch das FT-IR wurde über ein entsprechendes Inlet und Outlet im Strömungsgebiet berücksichtigt. Im Versuch wurden die entnommenen Gase wieder zurückgeführt. Das einströmende Gasgemisch am Inlet hatte die Temperatur des abgezogenen Gases vom Outlet sowie die Gaskonzentrationen für  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $HCN$  und Ruß. Die Verzugszeit zwischen Gasentnahme und Zuführung wurde in der

Simulation nicht berücksichtigt. Diese betrug im Versuch bei  $4\text{ l/min}$  Strömungsgeschwindigkeit,  $4\text{ mm}$  Schlauchdurchmesser,  $2\text{ m}$  Schlauchlänge und  $0,2\text{ l}$  Volumen der Messzelle etwa  $3,4\text{ s}$ . Diese Zeitdifferenz ließ sich bei einer Versuchszeit von  $600\text{ s}$  in der Simulation vernachlässigen.

#### 4.5.2 Hotel

Hier werden die Randbedingungen für die Simulation des Brandes im Hotel beschrieben.

In Abbildung 4.10 ist die Geometrie der Hotellobby dargestellt. Der vordere flache Teil mit einer Ausdehnung von  $26\text{ m} \times 25\text{ m}$  und einer Raumhöhe von  $3,2\text{ m}$  zeigt den Bereich, wo der Brand neben dem Kamin auf dem Boden (rotes Gas-Inlet) angenommen wurde. Der vordere flache Bereich wird durch mehrere Wände unterteilt. Es gibt eine offene Tür zum großen Atrium. Dieses Atrium hat ein Volumen von  $5\text{ m} \times 25\text{ m} \times 10\text{ m}$  (Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe). Die hintere Wand des Atriums (dunkelblau) wird als Öffnung (Opening) betrachtet. Das reale Atrium hat eine Länge von  $40\text{ m}$ . Um die Rechenzeiten der Simulationen um ein Vielfaches zu verkürzen, ohne die Ergebnisse im Brandbereich zu beeinflussen, wurde das Atrium in CFX mit einem Opening verkleinert. An allen Wänden wurde als Randbedingung ein Wärmeübergang berechnet.

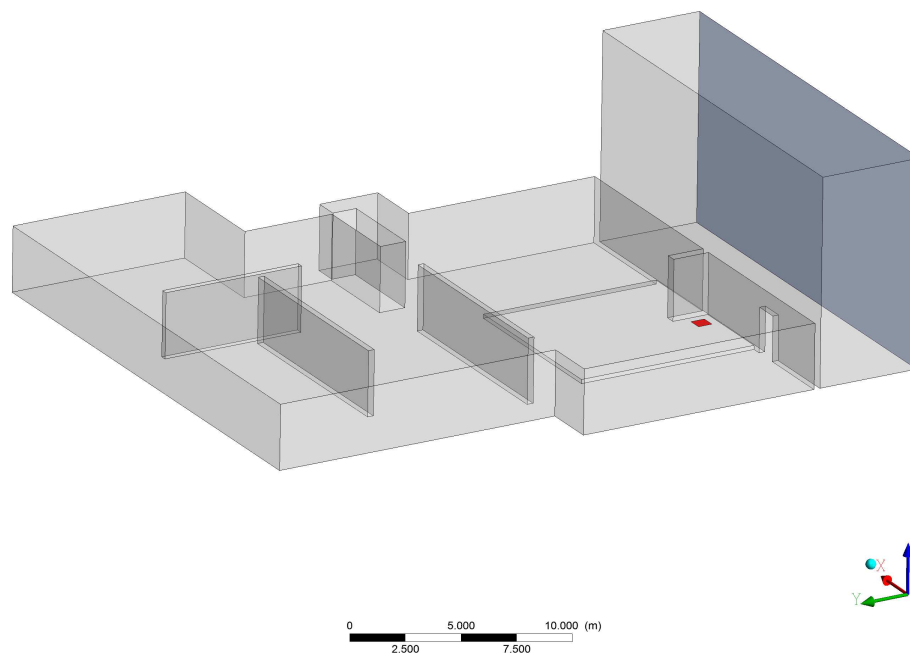


Abbildung 4.10: Geometrie des Hotels für die Brandsimulation

Nach [VDI 6019 Blatt 1, S.13] wurde ein niederenergetischer Brand angenommen und modelliert. Bei einer als konstant angenommenen Brandfläche lag die Wärmefreisetzungsrate zwischen 30 und 300  $kW$ . Die Brandphasen bei einem niederenergetischen Brand können durch die Brandphase 1 und Löschphase 4 bzw. Löschphasen 4 und 5 (siehe Abbildung 4.11) beschrieben werden [VDI 6019 Blatt 1, S.10].

*Phase 1* Brandentstehung mit niedriger Wärmefreisetzung

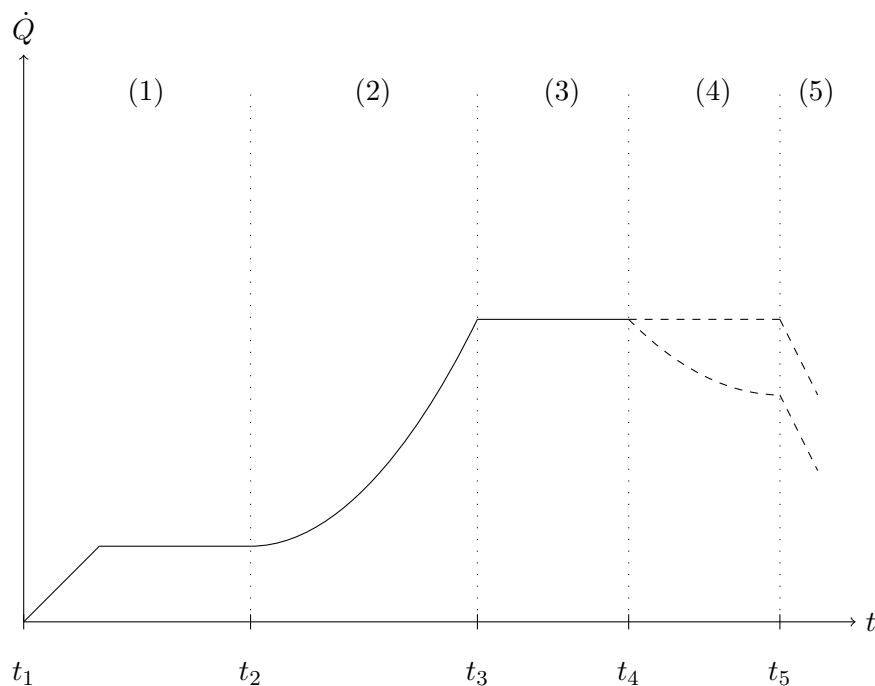
*Phase 2* Fortentwickelnder Brand mit Zunahme der Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche in Abhängigkeit von der Brandzeit zum Quadrat

*Phase 3* Stetiger Brand mit konstanter Wärmefreisetzungsrate

*Phase 4* Kontrollierter Brand bei aktivierter selbsttätiger Löschanlage (Auslösen von Sprinklern kann die Wärmefreisetzung beeinflussen)

*Phase 5* Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

Im folgenden Diagramm 4.11 sind die Brandphasen 1-5 dargestellt.



**Abbildung 4.11:** Wärmefreisetzungsrate in den Brandphasen 1-5 (nach [VDI 6019 Blatt 1, S.10ff])

In den folgenden Simulationen wurde nur Phase 1 unter der Annahme, dass die Phase 1 den für die Selbstrettung von Personen relevanten Zeitbereich darstellt, modelliert. Diese Phase beschreibt einen Anstieg der Wärmefreisetzung auf ein konstantes Niveau. Für die Simulationen wurde ein Anstieg von 0 auf 100  $kW$  in

100 Sekunden modelliert. Anschließend blieb die Wärmefreisetzung für weitere 200 Sekunden konstant. Auch die Brandfläche  $A$  blieb konstant bei  $A = 0,36 \text{ m}^2$ .

Diese Randbedingungen sollten einen nicht-flammenden Brandherd unter einem Sessel darstellen. Bei einer flammenden Verbrennung würde die Wärmefreisetzung schneller ansteigen. Es sollte gezeigt werden, was passiert, wenn die Zündenergie nicht ausreicht, um den Brandherd zu entzünden und welche Auswirkung dies für die Auslösung von Sprinklern sowie Sichtweiten von Fluchtwegen hat. Ein derartiges Brandszenario wird von den implementierten Reaktionsgleichungen in den Simulationsprogrammen nicht realistisch wiedergegeben. Es können mit FDS nur der schwelende oder flammende Zustand betrachtet werden. CFX bietet die Möglichkeit zwischen den Zuständen zu wechseln.

Um die angegebene Wärmefreisetzungsrate von  $100 \text{ kW}$  zu realisieren, wurde ein Massenstrom  $\dot{m}$  für das Verbrennungsgas von PUR (nach Gleichung 4.33) berechnet.  $\dot{Q}$  steht für die Wärmefreisetzung,  $\Delta H_{eff}$  für den Heizwert von Polyurethan, bei der Annahme, dass der Sessel aus Polyurethan besteht.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_{eff}} = \frac{100 \text{ kW}}{25200 \text{ kJ/kg}} = 3,97 \text{ g/s} \quad (4.33)$$

Der maximale Massenstrom des Pyrolysegases wurde in CFX mit

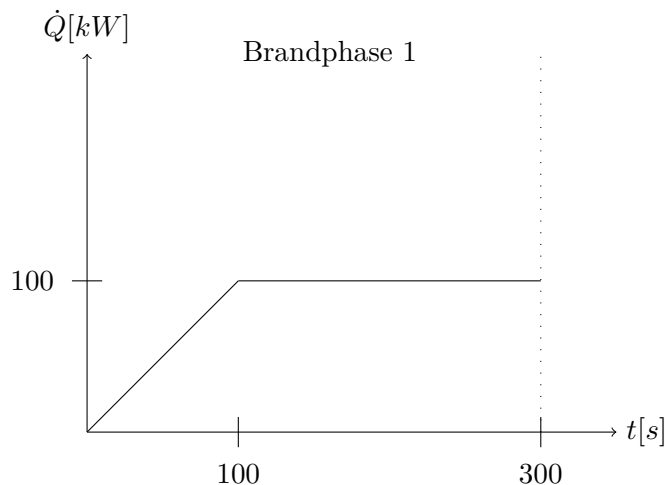
$$\dot{m} = 4,0 \text{ g/s}$$

und in FDS mit

$$\dot{m}_A = \frac{4 \text{ g/s}}{0,36 \text{ m}^2} = 0,0111 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

vorgegeben.

Auf folgender Abbildung 4.12 ist der Brandverlauf für die Modellbildung dargestellt.



**Abbildung 4.12:** Gewählte Randbedingungen für Brandphase 1



Die maximale Wärmefreisetzung von  $100\text{ kW}$  entspricht nach Gleichung 4.33 einem Pyrolysegasstrom von gerundet  $4\text{ g/s}$ . Die daraus folgende Funktion als Randbedingung für das Gas-Inlet in Abhängigkeit der Zeit steht in Gleichung 4.34.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{4\text{ g/s}}{100\text{ s}} \cdot t & \text{für } t \leq 100\text{ s} \\ 4\text{ g/s} & \text{für } t > 100\text{ s} \end{cases} \quad (4.34)$$

Die Randbedingungen für das Brandszenario in der Hotellobby sind in Tabelle 4.5 aufgelistet.

**Tabelle 4.5:** Randbedingungen des Brandszenarios in der Hotellobby

Randbedingung	
Gas Inlet	siehe Gleichung 4.34
Opening	Gegendruck $0\text{ Pa}$
Wärmeübergangskoeffizient: Wände	$40\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Umgebungstemperatur	$20\text{ }^\circ\text{C}$

## 4.6 Gebietsbedingungen

Die Gebietsbedingungen beschreiben Temperaturen, Druck, Strömungsgeschwindigkeiten, Gaskonzentrationen sowie die Reaktionsgleichungen in der betrachteten Geometrie. Zusammen mit den Randbedingungen bilden diese alle Eingabeparameter für die Simulationen ab und sind im folgenden dargestellt.

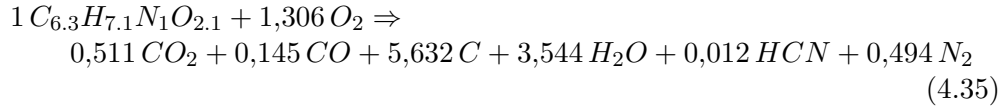
### 4.6.1 Reaktionsgleichungen

Die für die Simulation verwendete Reaktionsgleichung für die nicht-flammende Verbrennung wurde aus den Versuchsergebnissen (Kapitel 3.3) entnommen. Die durchgeführten Versuche für flammende und nicht-flammende Verbrennungen wurden verglichen, um entsprechende Versuchsbedingungen auf die folgenden Simulationen zu übertragen. Die Reaktionsgleichung für flammende Verbrennung wurde als „Standardreaktion“ von PUR angenommen.

#### Reaktionsgleichung für nicht-flammende Verbrennung

Die vom Autor neu entwickelten Reaktionsgleichungen für die unterschiedlichen Gebietsbedingungen sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Jede Spalte in dieser Tabelle steht für oben in der Tabelle beschriebene Parameter mit darunter zu findenden Koeffizienten für die Reaktionsgleichung. Im Folgenden wurde mit einer berechneten Reaktionsgleichung aus dem DIN-Rohr bei den Bedingungen  $400\text{ }^\circ\text{C}$  und  $15\%$  Sauerstoff (siehe Spalte 1 aus Tabelle 3.2 und Gleichung 4.35) gerechnet. Diese Gleichung ist vergleichbar zu den Reaktionsgleichungen aus den SDC-Versuchen bei  $25\text{ kW}/\text{m}^2$

ohne Zündflamme (Tabelle 3.2 Spalte 9). Mit dieser Reaktionsgleichung für nicht-flammende Verbrennungen soll der Vergleich zu einer Standardreaktionsgleichung für flammende Verbrennung von Polyurethan gezeigt werden.

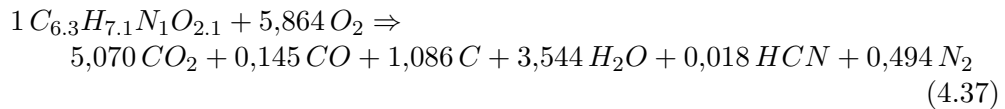


Aus dieser Reaktionsgleichung ergibt sich ein Sootyield für die nicht flammende Verbrennung durch die Umrechnung von mol zu g. Die Umrechnung folgt in Gleichung 4.36:

$$\begin{aligned}
 Sootyield_{nichtfl.} &= \frac{12 \cdot 5,632(C)[g]}{12 \cdot 6,3(C) + 1 \cdot 7,1(H) + 14 \cdot 1(N) + 16 \cdot 2,1(O)[g]} \\
 &= \frac{67,584[g]}{130,3[g]} \\
 &= 0,5187 [m\%] \quad (4.36)
 \end{aligned}$$

#### Reaktionsgleichung für flammende Verbrennung

Eine Standardreaktionsgleichung für Polyurethan konnte aus den gegebenen Werten nach [DiN08] berechnet werden. Es wurden Sootyields [ $kg_{Soot}/kg_{Fuel}$ ] und CO-Yields [ $kg_{CO}/kg_{Fuel}$ ] für dieses Edukt beim typischen Brandverhalten mit Flamme angegeben. Der Sootyield betrug  $0,1 kg_{Soot}/kg_{Fuel}$  [FI08]. Nach [DiN08, 3-112] liegt der CO-Yield bei einer flammenden Verbrennung für Polyurethan zwischen  $0,01 - 0,04 kg_{CO}/kg_{Fuel}$ . Hier wurde der CO-Yield von  $0,01332$  unverändert aus den Versuchsdaten der flammenden Verbrennung in der SDC bei  $50 kW/m^2$  übernommen. Mit dem Wert aus den Versuchsdaten ergibt sich Gleichung 4.37.



#### 4.6.2 Auftrieb

Die Schwerkraft wurde über ein Auftriebsmodell berücksichtigt. In die Höhenrichtung  $Z$  wirkt die Gravitationskraft  $-m g$ . Für die Richtungen  $X$  und  $Y$  beträgt die Beschleunigung  $0 m/s^2$ . Zusätzlich musste eine Referenzdichte angegeben werden. Diese wurde wie folgt berechnet:  $p = 1,103 bar$  und  $T = 298,15 K$  und  $R = 287,058 J/(kg \cdot K)$ . Aus der universellen Gasgleichung folgt:

$$\frac{m}{V} = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 Pa}{287,058 J/(kg \cdot K) \cdot 298,15 K} = 1,1836 kg/m^3$$

### 4.6.3 Initialisierung

Das Gebiet und die Umgebungstemperaturen wurden in der SDC mit  $25^\circ\text{C}$  initialisiert. Die Initialisierungstemperatur in der Hotelgeometrie wurde mit  $20^\circ\text{C}$  vorgegeben. Die Sauerstoffkonzentration wurde in allen Fällen auf  $23\text{ m}\%$  festgelegt. Alle Strömungsrichtungen  $XYZ$  wurden mit  $0\text{ m/s}$  initialisiert.

### 4.6.4 Sichtweiten

Die Berechnung der Sichtweite erfolgte nach [VDI 6019 Blatt 2, S.7].  $S_0$  beschreibt die vorhandene Sichtweite im Brandraum während des Brandes.  $S_{min}$  gibt die minimale Sichtweite an, die laut [VDI 6019 Blatt 2] vorhanden sein muss. Für eine sichere Evakuierung muss die vorhandene Sichtweite immer größer gleich der zulässigen (oder minimalen) Sichtweite sein (Gleichung 4.38).

$$S_0 \geq S_{min} \quad (4.38)$$

$$S_0 = \frac{E}{k} \quad (4.39)$$

Die vorhandene Sichtweite wurde nach Gleichung 4.39 berechnet, wobei  $E = 5$  der Erkennungsfaktor für beleuchtete Rettungszeichen und  $K$  (Gleichung 4.40) der Extinktionskoeffizient sind.  $\sigma_s$  beschreibt das Rußverhalten der Brennstoffe. Dieses gibt an, welche Oberfläche in  $\text{m}^2$  an Ruß bei der Umsetzung eines  $\text{kg}$  Brennstoffes entsteht. Die Werte der Gleichungen 4.41 und 4.42 sind aus [VDI 6019 Blatt 2] entnommen.  $\rho_{Soot}$  gibt die Rußdichte in der Verbrennungsluft an.

$$k = \sigma_s \text{ m}^2/\text{g} \cdot \rho_{Soot} \text{ kg}/\text{m}^3, \quad (4.40)$$

$$\sigma_s(PUR) = 7\,600 \text{ m}^2/\text{kg}, \quad (4.41)$$

$$\sigma_s(Holz, PS, PVC) = 10\,000 \text{ m}^2/\text{kg}, \quad (4.42)$$

Durch Umstellen der Gleichungen 4.40 kann man eine maximale Rußkonzentration berechnen, ab der die Erkennung von beleuchteten Rettungszeichen in  $20\text{ m}$  Entfernung nicht mehr möglich ist. Dieses wird nach [DIN 4844-1] gefordert.

$$\rho_{Soot,max(PUR)} = \frac{E}{\sigma \cdot S_{min}} = \frac{5}{7\,600 \text{ m}^2/\text{kg} \cdot 20 \text{ m}} = 3,29 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\rho_{Soot,max(Holz,PS,PVC)} = \frac{E}{\sigma \cdot S_{min}} = \frac{5}{10\,000 \text{ m}^2/\text{kg} \cdot 20 \text{ m}} = 2,50 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/\text{m}^3$$

Für Polyurethan darf die maximale Rußkonzentration im Durchschnitt an der betrachteten Sichtlinie  $32\text{ mg}/\text{m}^3$  betragen. Für Polyvinylchlorid darf der Wert  $25\text{ mg}/\text{m}^3$  nicht überschritten werden. Wenn diese Werte im Durchschnitt an der Sichtlinie überschritten werden, wird die zulässige Sichtweite nicht eingehalten und eine sichere Evakuierung kann nach [VDI 6019 Blatt 2] nicht mehr erfolgen.



# KAPITEL 5

---

## Simulationen

---

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse erläutert. Es beginnt mit den Validierungsergebnissen in der SDC. Die SDC wurde mit dem kommerziellen Strömungslöser ANSYS CFX V14.5 berechnet.

Die Open Source Software FDS V5.5.3 vom National Institute of Standards and Technology (NIST) wurde nicht zur Validierung der SDC eingesetzt. Der Grund dafür ist die geringe Größe des Strömungsraumes der SDC. FDS ist für eine Vernetzung im Dezimeterbereich ausgelegt. Die SDC muss jedoch aufgrund der Einbauten wie dem Cone und der Verrohrung der FT-IR In- und Outlets im Millimeterbereich vernetzt werden. Ein strukturiertes Gitter für die SDC in dieser Größe kann heute auf „normalen“ Arbeitsplatzcomputern noch nicht berechnet werden.

Anschließend folgen die Ergebnisse aus der Hotellobby. Diese wurde auch mit ANSYS CFX V14.5 und zusätzlich mit FDS modelliert. Dabei erfolgte die Betrachtung unterschiedlicher Gittergrößen. Anschließend folgt der Vergleich zwischen den zwei genannten Simulationsprogrammen bezogen auf die Temperatur- und Rauchgasentwicklung für die flammende und nicht-flammende Brandentwicklung.

## 5.1 Modellierung der SDC und Validierung der Simulation

Die folgende Tabelle 5.1 zeigt die wichtigsten Daten und Einstellungen, die für die Simulation der SDC mit ANSYS CFX verwendet wurden.

**Tabelle 5.1:** Geometriedaten, Rand- und Gebietsbedingungen und Solvareinstellungen

<b>Geometriedaten</b>	
Maße	$x = 914\text{ mm}$ (Länge), $y = 610\text{ mm}$ (Breite), $z = 914\text{ mm}$ (Höhe)
Volumen	$0,5035\text{ m}^3$
<b>Gitter</b>	
Knoten	190 950
Elemente	1 060 157
Kleinste Kantenlänge	$0,7\text{ mm}$
Größte Kantenlänge	$70\text{ mm}$
<b>Modelle</b>	
Wärmetransport	Thermal Energy
Turbulenz	SST
Verbrennung	EDM
Strahlung	Monte Carlo (Num. of Histories: 10 000, Transfer Model: Participating Media, Option: Gray, Scattering Model: None)
Auftrieb	Buoyant ( $x: 0\text{ m/s}^2$ , $y: 0\text{ m/s}^2$ , $z: -g$ , Ref. Density: $1,285\text{ kg/m}^3$ )
<b>Initialisierung</b>	
Temperatur	$20\text{ }^\circ\text{C}$
Sauerstoff	$23\text{ m}\%$
<b>Solver Control</b>	
Option	High Resolution
Transient Scheme	Second Order backward Euler
Turbulence Numerics	First Order
Min. Coeff. Loops	4
Max. Coeff. Loops	10
Residual Type	RMS $1.E - 4$
Conservation Target	0,01
<b>Analyse Type</b>	
Gesamte Zeit	$500\text{ s}$
Zeitschrittweite	$0,1\text{ s}$

In Abbildung 5.1 ist die unstrukturierte Vernetzung in der SDC auf drei Ebenen (Boden, Rückwand, mittlere Ebene parallel zur Rückwand) dargestellt. Auf der

mittleren (türkisen) Ebene erkennt man die adaptive Verfeinerung am Cone, an der Probe und um die Abzugsrohre, an denen das FT-IR angeschlossen war.

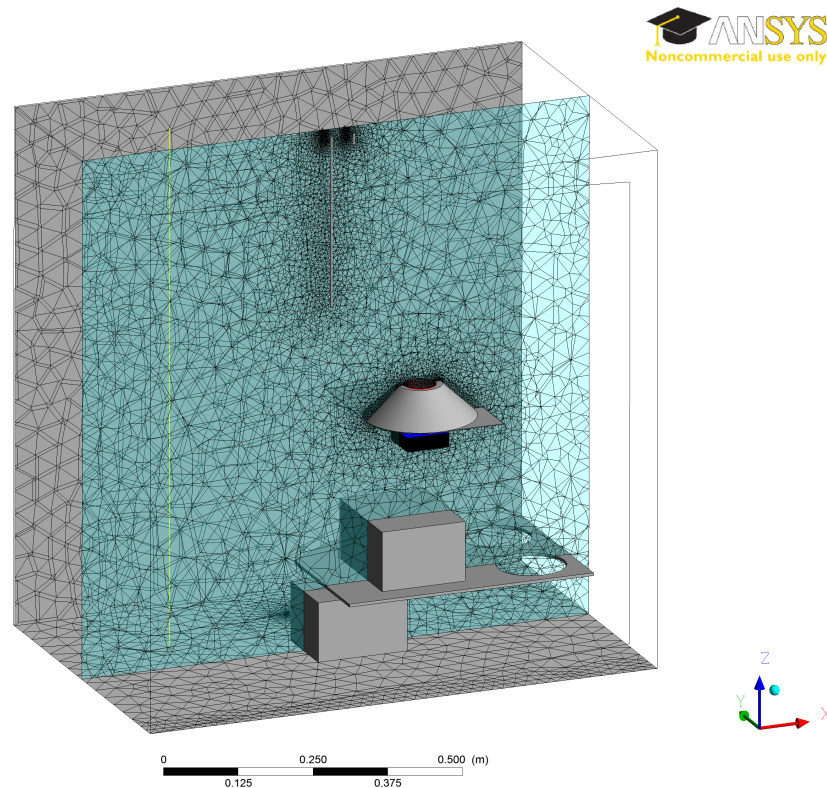


Abbildung 5.1: Darstellung des Netzes in der SDC

Um die Ergebnisse zu validieren, werden im Folgenden die Messwerte aus Kapitel 3.1 mit den Simulationsergebnissen verglichen. Abbildung 5.2 zeigt den Vergleich von Kohlenstoffdioxid- und Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen sowie Transmission im Vergleich zwischen den SDC-Versuchen und CFX-Simulationen bei  $25 \text{ kW/m}^2$  Bestrahlung mit Entzündung (links) und ohne Entzündung (rechts).

Die Versuche bei flammender Verbrennung wurden 500 Sekunden lang durchgeführt. Die Simulation bei flammender Verbrennung wurde nach 300 Sekunden beendet, da nach 200 Sekunden Simulationszeit kaum noch Veränderungen der Simulationswerte zu beobachten waren.

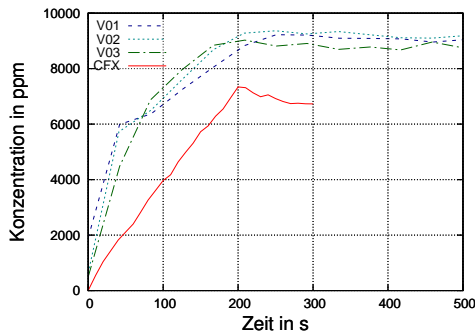
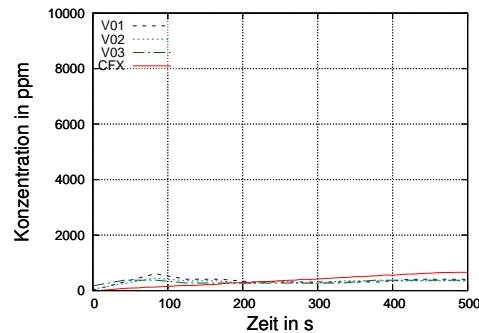
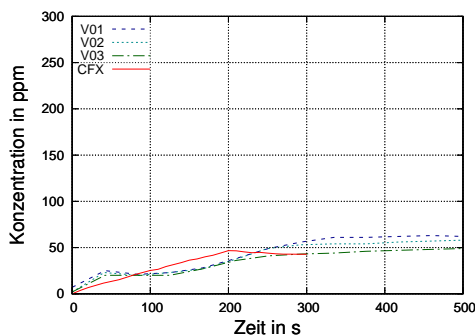
Die nicht-flammenden Versuche wurden nach 600 Sekunden bzw. einer nach 1400 Sekunden beendet. Ein Versuch lief etwas länger, um den weiteren Brandverlauf im Experiment aufzuzeichnen. Die Simulationen liefen 500 Sekunden. Um die in den Versuchen gewonnenen Meßwerte besser mit den Werten der Simulationen vergleichen zu können, wurden in den Diagrammen jeweils nur die Werte aus den ersten 500 Sekunden berücksichtigt.

In den Diagrammen für die  $\text{CO}_2$ -Konzentration erkennt man einen deutlichen Unterschied zwischen der flammenden und nicht-flammenden Verbrennung. Für den nicht-flammenden Zustand gibt die Simulation die Versuchsergebnisse gut wieder.

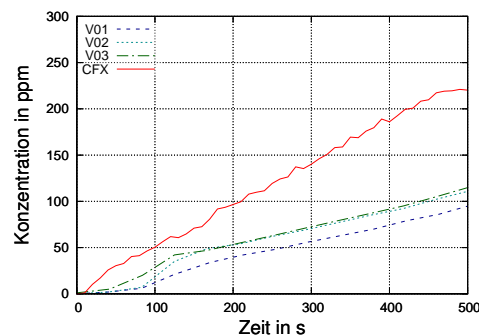
Die  $CO_2$ -Konzentration im flammenden Zustand wird in der Simulation um 20 – 30% unterschätzt. In der Simulation findet ein linearer Anstieg der Konzentrationen statt, da das Pyrolysegas konstant einströmt, während im realen Versuch die Konzentration logarithmisch ansteigt und ab 300 Sekunden nach Ende der Massefreisetzung konstant bleibt.

Bei flammender Verbrennung wird der CO-Anstieg sehr gut von der Simulation wiedergegeben, während in der nicht-flammenden Verbrennung der Anstieg in der Simulation überschätzt wird. Der Maximalwert in der Simulation nach 500 Sekunden stimmt ungefähr mit dem Maximalwert im Versuch, der nach 1 100 Sekunden erreicht wird, überein. Es wird weiterhin eine geringe Masse im Versuch aus der Probe freigesetzt, wobei sich diese Freisetzung stärker auf die CO- als  $CO_2$ -Bildung auswirkt.

Die Transmission wird in der Simulation durch zwei Eckpunkte unterschieden. Die theoretische spezifische Oberfläche von Ruß liegt laut [DiN08, 2-263] für Holz und Plastik zwischen  $7\,600 - 4\,400\,m^2/kg$ . Wenn man mit dem minimalen und dem maximalen Wert die Transmission berechnet, erhält man zwei Kurven für den Transmissionsverlauf in der Simulation. Die berechneten Transmissionen stimmen mit den Versuchen aus der nicht-flammenden Verbrennung sehr gut überein. Für die flammende Verbrennung liegt das Minimum des Transmissionswertes von  $4\,400\,m^2/kg$  nach 200 Sekunden im gleichen Bereich wie das Minimum für die Versuche nach 70 Sekunden. Die Kurvenverläufe der Versuche weichen von denen der Simulation deutlich ab.

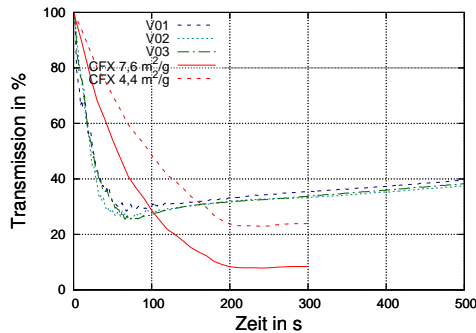
(a)  $CO_2$  mit Flamme(b)  $CO_2$  ohne Flamme

(c) CO mit Flamme

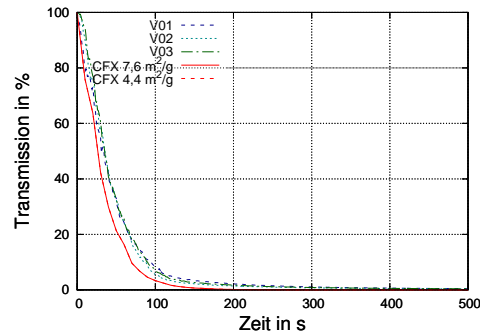


(d) CO ohne Flamme





(e) Transmission mit Flamme



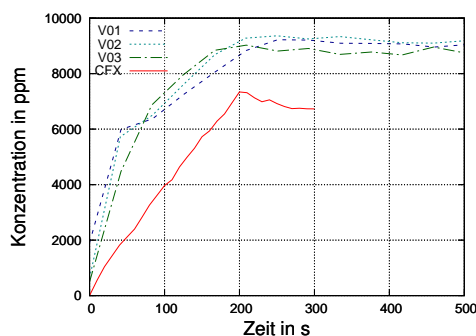
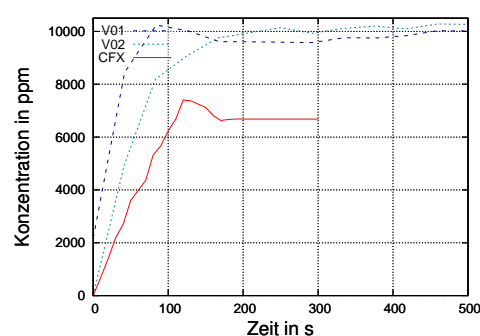
(f) Transmission ohne Flamme

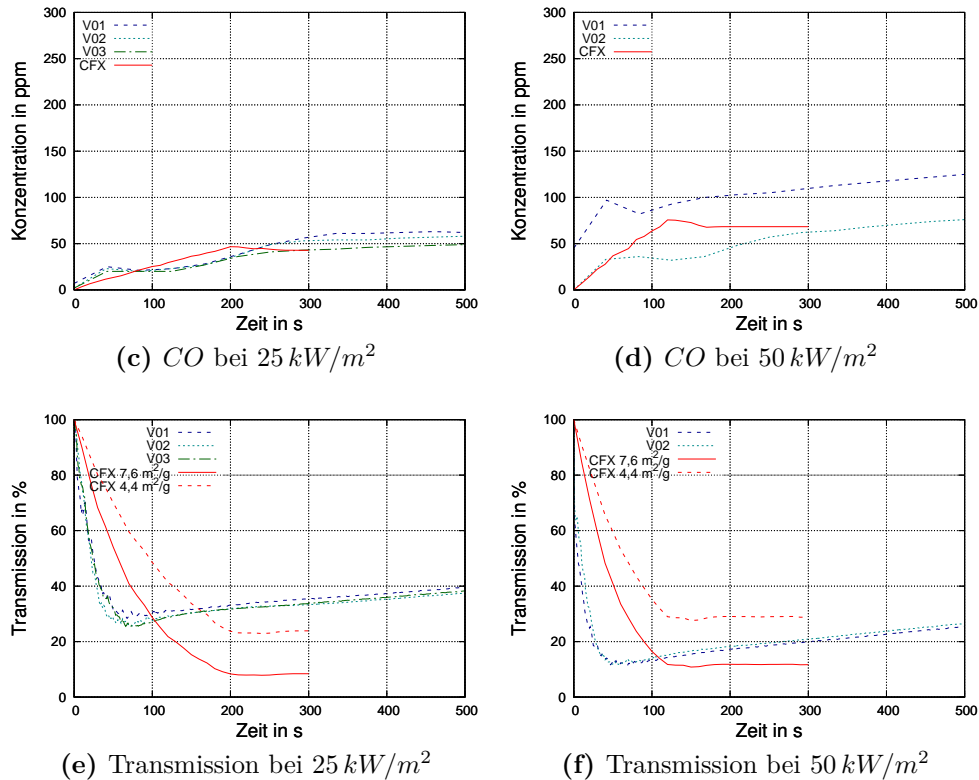
**Abbildung 5.2:**  $CO_2$ -Konzentration bei  $25\text{ kW/m}^2$  (a) mit und (b) ohne Flamme;  $CO$ -Konzentration bei  $25\text{ kW/m}^2$  (c) mit und (d) ohne Flamme; Transmission bei  $25\text{ kW/m}^2$  (e) mit und (f) ohne Flamme.

Abbildung 5.3 zeigt den Vergleich zwischen den Versuchen und den Simulationen mit Zündflamme bei  $25$  (links) und  $50\text{ kW/m}^2$  (rechts). Der dritte Versuch der  $50\text{ kW/m}^2$  Messreihe wurde auf Grund von Fehlern während des Versuches abgebrochen und wird nicht dargestellt.

Alle Versuche wurden 500 Sekunden durchgeführt. Die berechnete Simulationszeit lag bei 300 Sekunden.

Auffällig ist, dass die  $CO_2$ -Konzentrationen für die flammende Verbrennung bei  $50\text{ kW/m}^2$  ebenfalls um ca. 30% unterschätzt werden. Die  $CO$ -Konzentrationen werden für die höhere Bestrahlungsstärke ebenso wie bei der geringen Bestrahlungsstärke mit flammender Verbrennung gut wiedergegeben. Die Transmission wird nur zeitlich unterschätzt, die Minimalwerte stimmen im Versuch (40 Sekunden) und der Simulation (120 Sekunden) bei einer spezifischen Oberfläche von  $7600\text{ m}^2/\text{kg}$  gut überein.

(a)  $CO_2$  bei  $25\text{ kW/m}^2$ (b)  $CO_2$  bei  $50\text{ kW/m}^2$



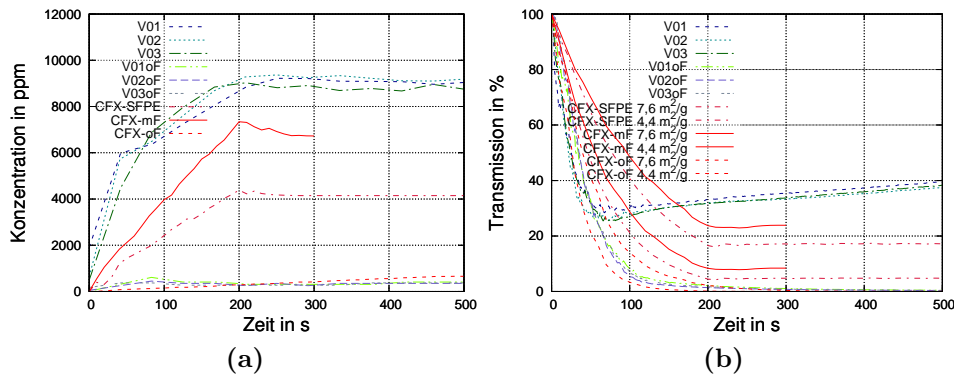
**Abbildung 5.3:**  $CO_2$ -Konzentration bei (a) 25 und (b)  $50 \text{ kW/m}^2$ ;  $CO$ -Konzentration bei (c) 25 und (d)  $50 \text{ kW/m}^2$ ; Transmission bei (e) 25 und (f)  $50 \text{ kW/m}^2$ .

In folgender Abbildung 5.4 werden die in SDC-Versuchen gemessenen Gaskonzentrationen für  $CO_2$  (blau und grün) sowie die Transmission bei  $25 \text{ kW/m}^2$  mit (mF) und ohne (oF) Zündflamme (blau und grün) dargestellt. Zusätzlich sind die berechneten Gaskonzentrationen und berechneten Transmissionswerte aus Simulationen mit CFX für die „eingebaute“ Standardreaktionsgleichung für Polyurethan (CFX-SFPE) sowie für die in dieser Arbeit selbst berechneten Reaktionsgleichungen für PUR (CFX-mF und CFX-oF) eingezeichnet. Es ist gut erkennbar, wie sich die mit der Standardreaktionsgleichung von CFX berechneten Werte für die  $CO_2$  Konzentration von beiden Versuchsreihen unterscheiden. Die durchgezogene rote Kurve, die mit der selbst entwickelten Reaktionsgleichung für flammende Verbrennung berechnet wurde, nähert sich den Versuchsergebnissen (V01, V02, V03) an. Die gepunktete rote Kurve, die mit der selbst entwickelten Reaktionsgleichung für nicht-flammende Verbrennung berechnet wurde, schmiegt sich den Kurven aus den Messwerten der Versuche (V01oF, V02oF, V03oF) gut an.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die berechneten Transmissionskurven. Wie bereits weiter oben erläutert, erfolgen hier die Berechnungen für jeweils minimale und maximale spezifische Oberflächen des Rußes. Die mit der Standardreaktionsgleichung von CFX berechneten Kurven (rote strich-punktierte Kurven) liegen zwischen den Kurven

aus den Versuchen mit flammender bzw. nicht-flammender Verbrennung. Die mit den neuen Reaktionsgleichungen berechneten Simulationskurven zeigen bessere Ergebnisse: Die Kurven für nicht-flammende Verbrennung (rote gepunktete Kurven) umschließen die entsprechenden Kurven aus den Versuchen (V01oF, V02oF, V03oF). Die berechneten Kurven für flammende Verbrennung (rote durchgezogene Kurven) sind deutlich näher an die Messwerte aus den Versuchen (V01, V02, V03) herangerückt.

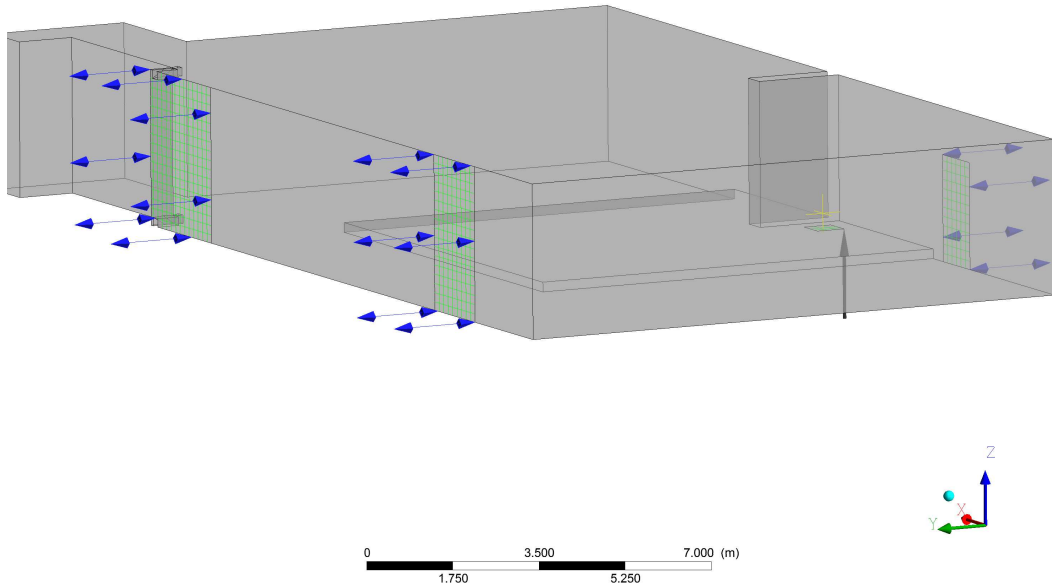
Wie man sieht, zeigt die Simulation mit den selbst entwickelten Gleichungen deutlich bessere Ergebnisse als die Simulation mit der gewöhnlich verwendeten Reaktionsgleichung für Polyurethan.



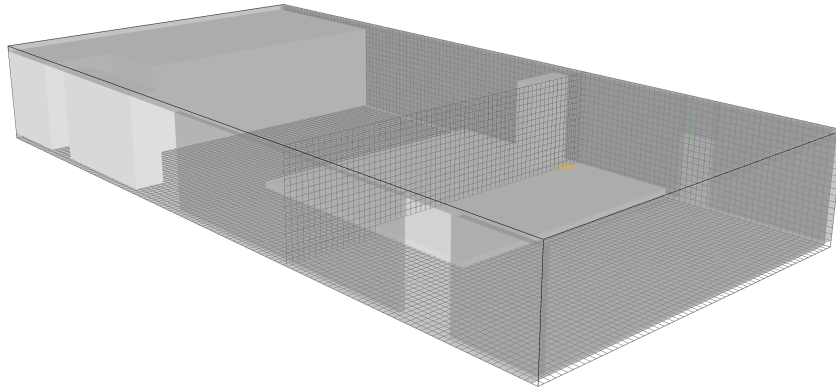
**Abbildung 5.4:** Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen. Versuche und Simulationen für  $25 \text{ kW/m}^2$  mit und ohne Flamme für (a)  $\text{CO}_2$  Konzentration und (b) Transmission.

## 5.2 Voruntersuchung des Gitters

Auf der folgenden Abbildungen 5.5 ist der Hotelausschnitt für die Gitteruntersuchung von unterschiedlichen Netzgrößen für die Simulation (CFX) dargestellt. Es wurde ebenso ein strukturiertes Gitter verwendet wie bei FDS (Abbildung 5.6). Die untersuchten Gitter hatten Zellgrößen von  $200 \text{ mm}$ ,  $100 \text{ mm}$  und  $50 \text{ mm}$  Kantenlänge. Aufgrund der Vervierfachung der Rechenzeit bei einer Halbierung der Kantenlänge wurde diese Untersuchung für den Ausschnitt der Hotellobby durchgeführt. Als Kriterien für die im Folgenden verwendete Zellengröße wurde die Höhe der rauchfreien Schicht bzw. der Heißgasschicht herangezogen. Wenn sich die Höhe mit kleinerer Zellengröße nicht signifikant ändert, können mit der größeren Zellengröße die weiteren Untersuchungen durchgeführt werden. Eine signifikante Änderung wird ab 10% Differenz angenommen.



**Abbildung 5.5:** Darstellung des Brandausschnittes mit der strukturierten Vernetzung (grün) und Randbedingungen (blau) in CFX

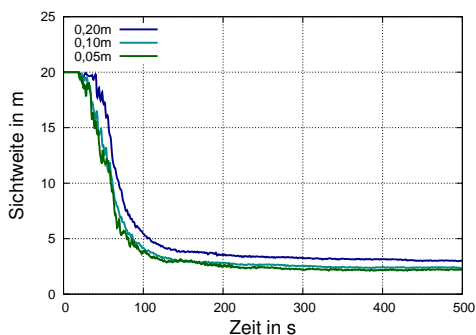


**Abbildung 5.6:** Darstellung des Brandausschnittes mit der strukturierten Vernetzung in FDS

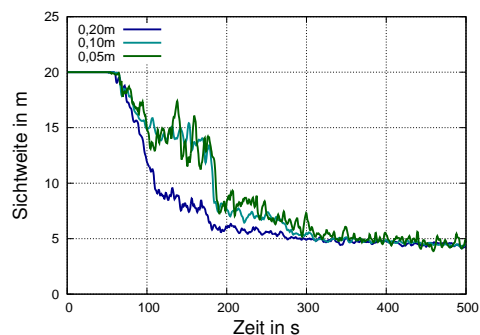
### 5.2.1 Gitterstudie mit FDS

In der folgenden Abbildung 5.7 wird die Sichtweite in verschiedenen Höhen ( $3,0\text{ m}$ ,  $2,5\text{ m}$ ,  $2,0\text{ m}$  und  $1,7\text{ m}$ ) bei Gittern mit den Kantenlängen  $200\text{ mm}$  (blaue Kurven),  $100\text{ mm}$  (grüne grob gepunktete Kurven) und  $50\text{ mm}$  (grüne fein gepunktete Kurven) verglichen.

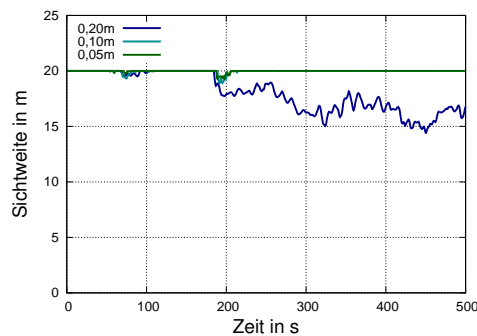
Es ist deutlich erkennbar, dass sich die berechneten Werte im kleinen und mittleren Gitter kaum unterscheiden. Die Werte im groben Gitter (blau) weichen von den Werten im feineren Gitter signifikant ab. Um die Simulationszeiten zu begrenzen, wurde für die vollständige Brandsimulation das  $100\text{ mm}$ -Gitter verwendet.



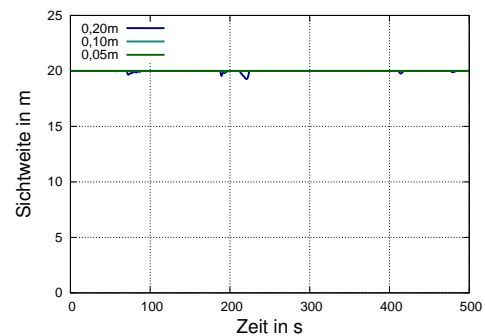
(a) Sichtweite in  $3\text{ m}$  Höhe



(b) Sichtweite in  $2,5\text{ m}$  Höhe



(c) Sichtweite in 2,0 m Höhe



(d) Sichtweite in 1,7 m Höhe

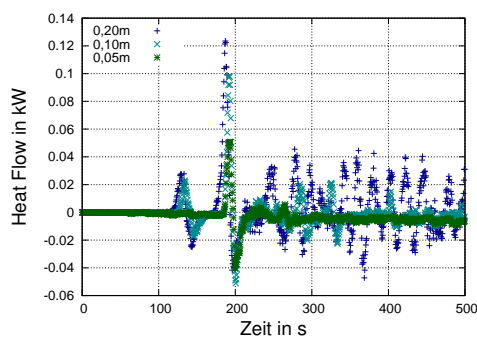
**Abbildung 5.7:** X-Achse: Simulationszeit in Sekunden,

Y-Achse: Sichtweite in Meter

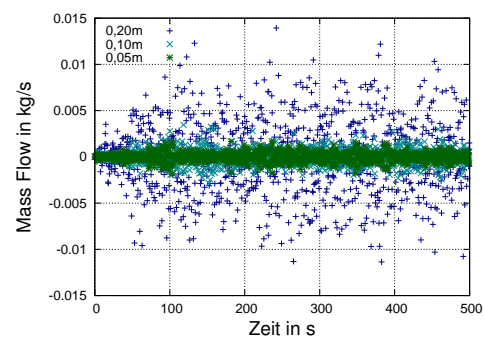
(a) Sichtweite in 3,0 m Höhe; (b) Sichtweite in 2,5 m Höhe;

(c) Sichtweite in 2,0 m Höhe; (d) Sichtweite in 1,7 m Höhe .

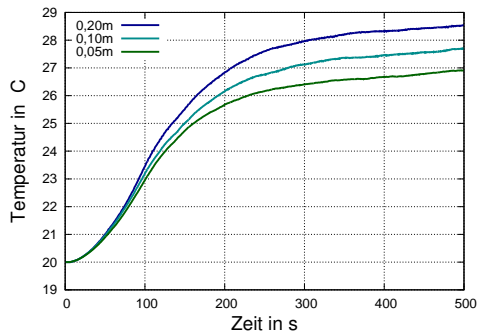
In der Abbildung 5.8 werden Wärme- und Massenstrom durch eine Türöffnung, Temperaturen und Dichten im oberen (Höhe 1,6 m – 3,2 m) und unteren (Höhe 0,0 m – 1,6 m) Volumen der gesamten Geometrie sowie die mittlere Rauchgasschichthöhe und die Temperatur unter der Decke in der Brandzone bei Gittern mit der (längsten) Kantenlänge von 0,2 m (blaue Kurven), 0,1 m (grob gepunktete grüne Kurven) und 0,05 m (fein gepunktete grüne Kurven) verglichen. Die integralen Werte, bezogen auf die Flächen bzw. Volumina, werden von FDS automatisch für jeden Zeitschritt berechnet. In der Darstellung für den Wärmestrom und den Massenstrom wurden die Messwerte als Punkt pro Zeitschritt dargestellt und nicht miteinander verbunden. Die maximale Streuung ist bei dem groben Gitter höher.



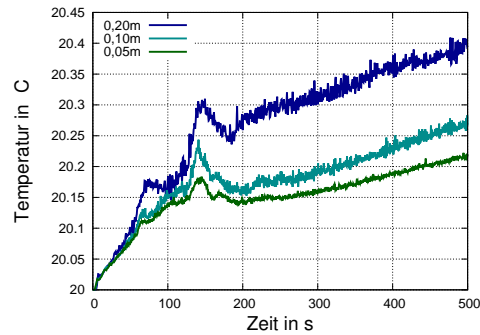
(a) Wärmestrom



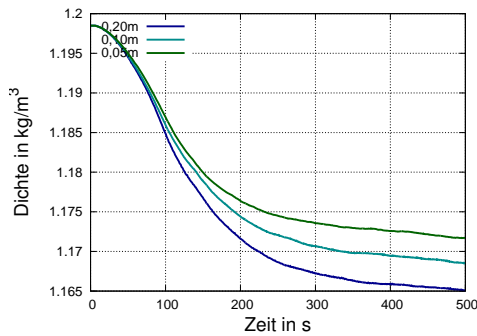
(b) Massenstrom



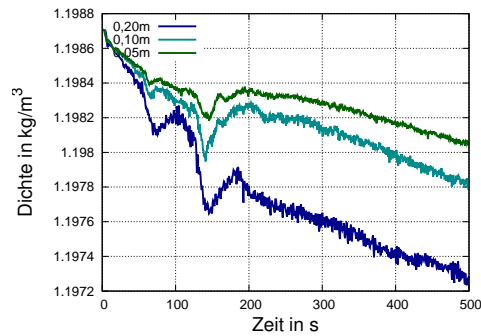
(c) Temp. im oberen Volumen



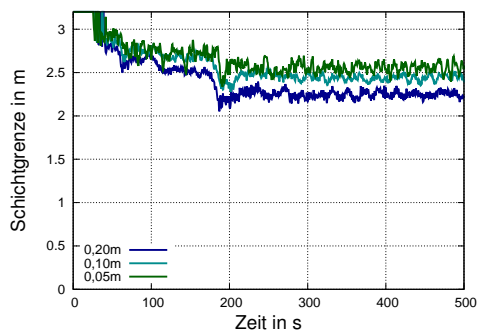
(d) Temp. im unteren Volumen



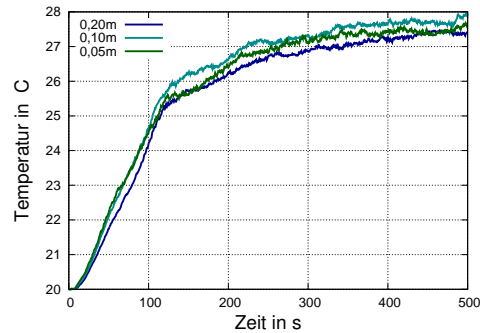
(e) Dichte im oberen Volumen



(f) Dichte im unteren Volumen



(g) Rauchgasschichthöhe



(h) Temp. unter der Decke

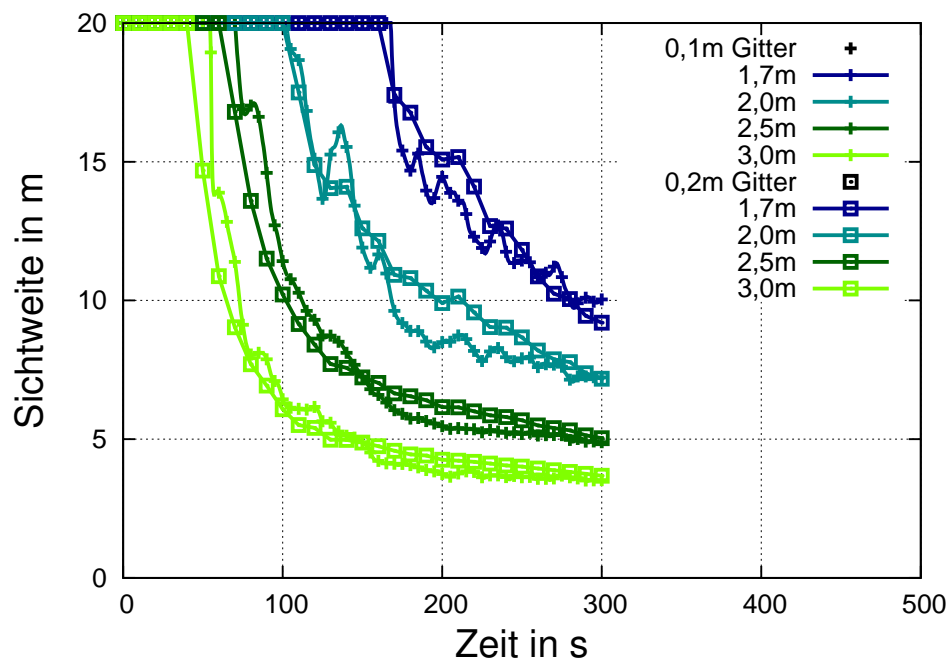
**Abbildung 5.8:** (a) Wärmestrom und (b) Massenstrom durch die Türöffnung;  
 (c) Durchschnittliche Temperatur im oberen, (d) unteren Volumen;  
 (e) Durchschnittliche Dichte im oberen, (f) unteren Volumen;  
 (g) Durchschnittliche Rauchgasschichthöhe; (h) Temperatur unter der Decke im  
 Brandbereich.

Auch diese Vergleiche zeigen deutlich, dass die Unterschiede zwischen den 50 mm und 100 mm Kantenlängen geringer sind, während sich bei einer Kantenlänge von 200 mm stärkere Unterschiede zeigen. Um alle in der Brandsimulation wesentlichen Werte zu vergleichen, wurden Sichtweiten, Wärmeströme, Massenströme, Temperaturen und die Rauchgasschichthöhe betrachtet.

### 5.2.2 Gitterstudie mit CFX

Die CFX-Berechnungen wurden im Gegensatz zu den FDS-Berechnungen nur 300 Sekunden durchgeführt. CFX rechnet im Vergleich zu FDS um ein Vielfaches langsamer auf derselben Hardware. Die Gittervergleiche kann man bereits nach dieser Simulationszeit ziehen.

Die folgende Abbildung 5.9 zeigt die Sichtweiten in den Höhen 3,0 m, 2,5 m, 2,0 m und 1,7 m. Hier wurden die Gitter von 100 mm und 200 mm Kantenlänge untersucht. 50 mm Kantenlänge wäre untersucht worden, wenn sich die Ergebnisse stark unterschieden hätten. Diese Untersuchung war nicht notwendig. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die berechneten Sichtweiten für die untersuchten Gitter nur gering unterscheiden. Aus diesem Grund wurde für die vollständige Brandsimulation in CFX das größte Gitter mit 200 mm Kantenlänge gewählt.

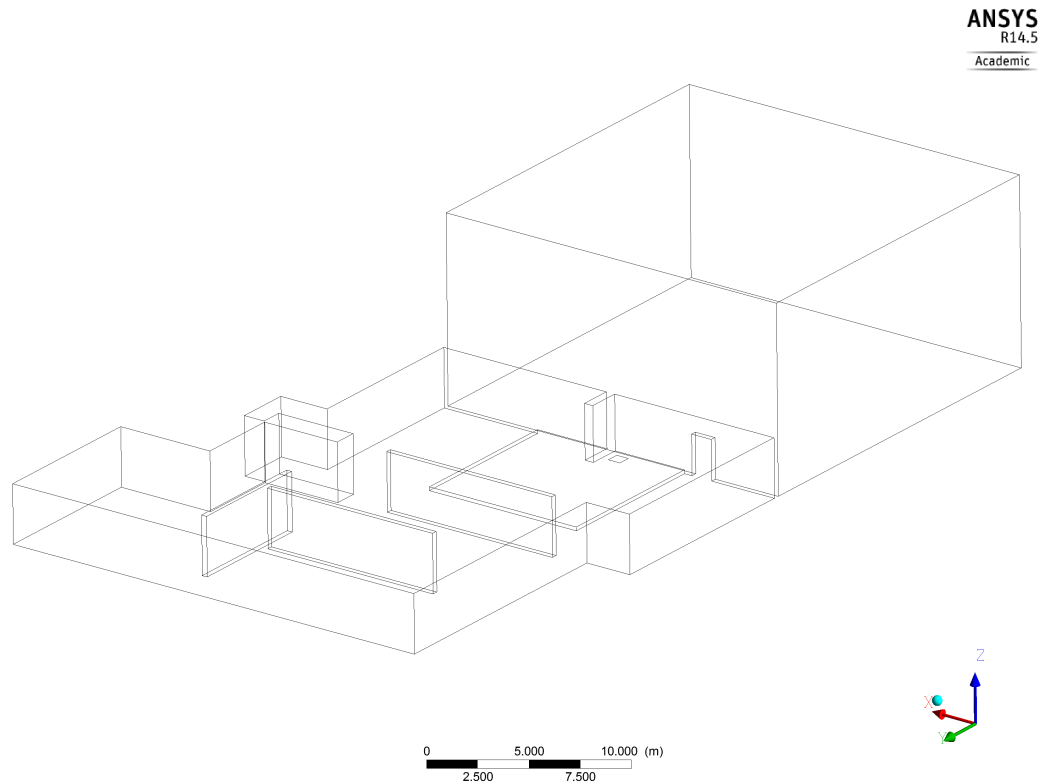


**Abbildung 5.9:** Sichtweite in 1,7 – 3,0 m Höhe für Gitter mit 0,1 und 0,2 m Kantenlänge



## 5.3 Brandsimulation in einer Hotellobby

Die folgende Abbildung 5.10 zeigt die untersuchte Geometrie des Hotels.



**Abbildung 5.10:** Darstellung der Geometrie des Hotels für die Brandsimulation

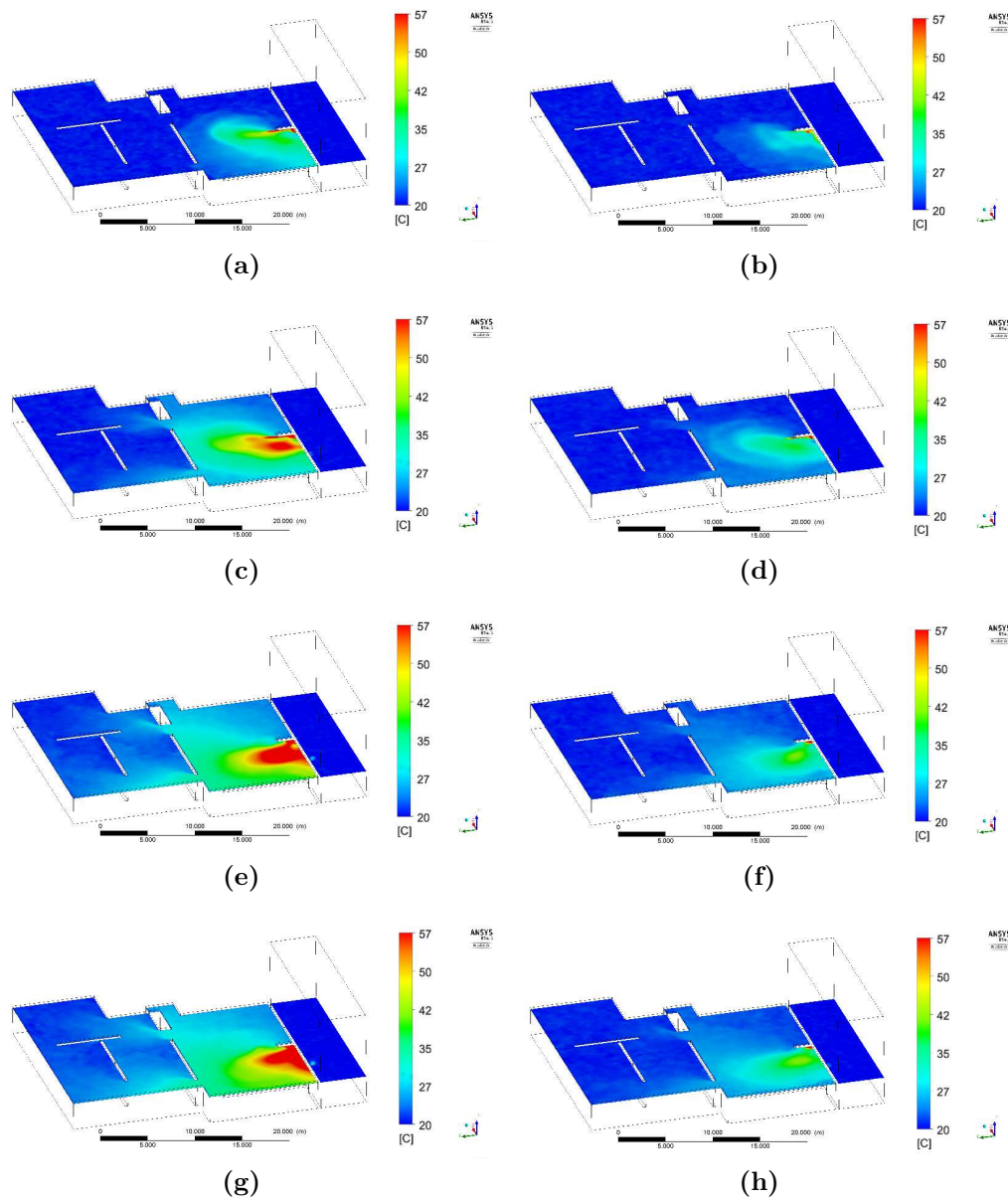
### 5.3.1 Untersuchung mit ANSYS CFX

In der folgenden Tabelle 5.2 werden die Geometriedaten, Modelle, Initialisierung und Solvereinstellungen dargestellt. Die ausgewählten Modelle und Solvereinstellungen entsprechen den Einstellungen aus der Validierung in der SDC.

Tabelle 5.2: Geometriedaten, Rand- und Gebietsbedingungen

<b>Geometriedaten</b>	
Maße	$x = 26,9\text{ m}$ ( <i>Breite</i> ), $y = 31,4\text{ m}$ ( <i>Länge</i> ), $z = 10,2\text{ m}$ ( <i>Höhe</i> )
Volumen	$2755,4\text{ m}^3$
<b>Netz</b>	
Knoten	2 903 644
Elemente	2 782 596
Kleinste Kantenlänge	$0,1\text{ m}$
Größte Kantenlänge	$0,1\text{ m}$
<b>Modelle</b>	
Wärmetransport	Thermal Energy
Turbulenz	SST
Verbrennung	EDM
Strahlung	Monte Carlo (Num. of Histories: 10 000, Transfer Model: Participating Media, Option: Gray, Scattering Model: None)
Auftrieb	Buoyant ( $x: 0\text{ m/s}^2$ , $y: 0\text{ m/s}^2$ , $z: -g$ , Ref. Density: $1,285\text{ kg/m}^3$ )
<b>Initialisierung</b>	
Temperatur	$20\text{ }^\circ\text{C}$
Sauerstoff	$23\text{ m}\%$
<b>Solver Control</b>	
Option	High Resolution
Transient Scheme	Second Order backward Euler
Turbulence Numerics	First Order
Min. Coeff. Loops	4
Max. Coeff. Loops	10
Residual Type	RMS $1.E - 4$
Conservation Target	0,01
<b>Analyse Type</b>	
Gesamte Zeit	$300\text{ s}$
Zeitschrittweite	$0,1\text{ s}$

Die Abbildungen 5.11 zeigen die Temperaturentwicklung von  $20$  (blau) bis  $57\text{ }^\circ\text{C}$  (rot) direkt unter der Decke in  $3\text{ m}$  Höhe aus den CFX Berechnungen. Minimale Auslösetemperaturen von Sprinklern liegen nach [VDI 6019 Blatt 1] bei  $57\text{ }^\circ\text{C}$ . Die Maximaltemperaturen können weit über  $57\text{ }^\circ\text{C}$  liegen und werden hier nicht weiter betrachtet. Der rote Bereich stellt die Auslösezonen von Sprinklern dar. Die linken Bilder zeigen die Temperaturen bei Verwendung der gewöhnlichen Reaktionsgleichung (flammende Verbrennung), die rechten Bilder bei der nicht-flammenden Verbrennung.



**Abbildung 5.11:** Darstellung der Temperaturen in  $3\text{ m}$  Höhe nach (a) 60 Sekunden (flammend), (b) 60 Sekunden (nicht-flammend), (c) 120 Sekunden (flammend), (d) 120 Sekunden (nicht-flammend), (e) 240 Sekunden (flammend), (f) 240 Sekunden (nicht-flammend), (g) 300 Sekunden (flammend), (h) 300 Sekunden (nicht-flammend).

Selbst nach 300 Sekunden reichen die beim Brand entwickelten Temperaturen unter der Decke für die nicht-flammende Verbrennung nicht aus, um die Sprinkler auszulösen.

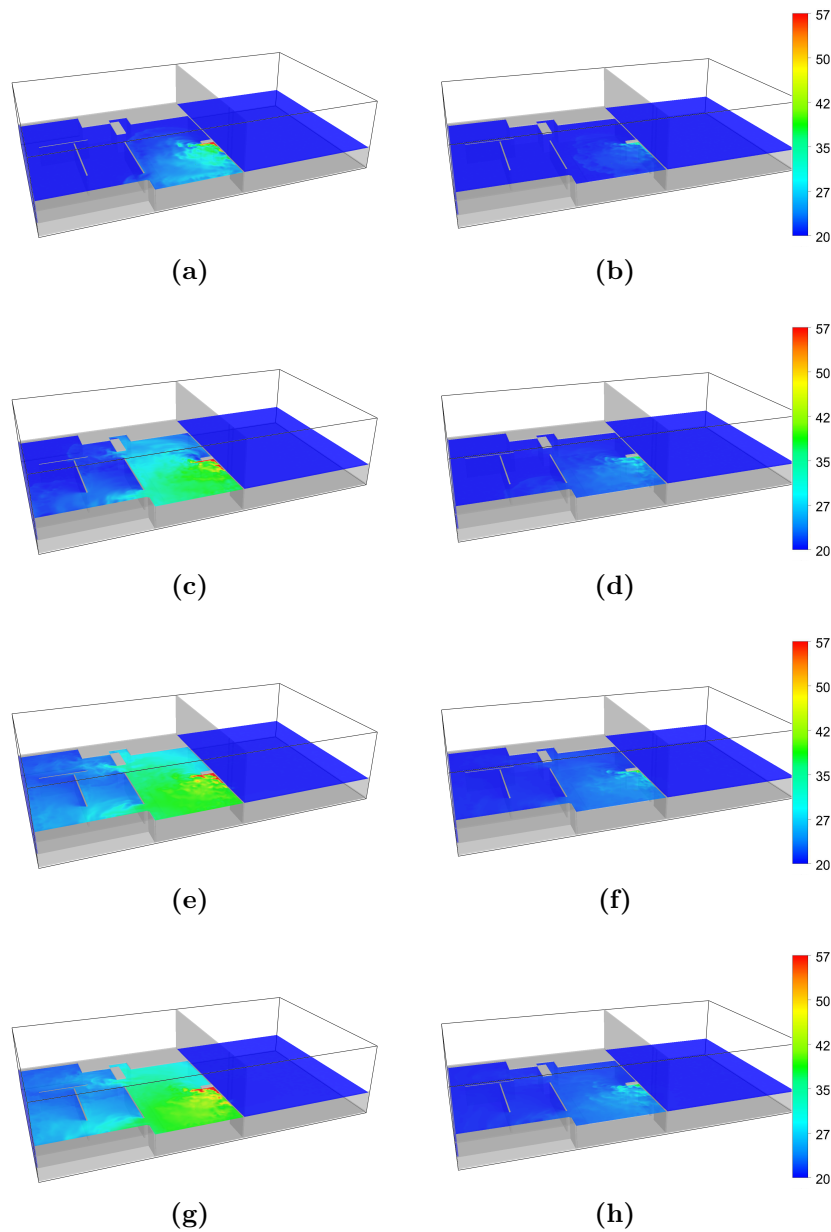
### 5.3.2 Hotellobby mit FDS

Die Eingabeparameter für die Simulation der Brände in der Hotellobby mittels FDS sind in folgender Tabelle 5.3 aufgelistet. Die Geometriedaten unterscheiden sich, da in FDS Bodenplatten und Seitenwände für die Wärmeleitungsrechnung benötigt wurden. In CFX wurden diese Eigenschaften als Randbedingung mit Wandstärke für die Wände und den Boden angegeben. Die untersuchten Strömungsräume hatten dieselben Maße, abgesehen von dem Atrium bei CFX. Dieses wurde nicht mit vollen 20 m berechnet, sondern nur 5 m mit einem Opening, da die Simulationszeiten unverhältnismäßig länger gebraucht hätten (siehe Kapitel 5.4.3). Dieser Geometrieunterschied hatte keinen Einfluss auf das betrachtete Strömungsgebiet in dem der Brand modelliert wurde.

**Tabelle 5.3:** Geometriedaten, Rand- und Gebietsbedingungen

<b>Geometriedaten</b>	
Maße	$x = 46,2 \text{ m}, y = 25,8 \text{ m}, z = 10,4 \text{ m}$
Volumen	$8\,322,8 \text{ m}^3$
<b>Netz</b>	
Elemente	12 396 384
Kleinste Kantenlänge	0,1 m
Größte Kantenlänge	0,1 m
<b>Modelle</b>	
Wärmetransport	Thermal Energy
Turbulenz	LES
Verbrennung	Mixture Fraction
Sootyield	0,5187 (siehe Gleichung 4.36)
Strahlung	RTE
<b>Initialisierung</b>	
Temperatur	20 °C
Sauerstoff	23 m%
<b>Analysetyp</b>	
Gesamte Zeit	500 s
Zeitschrittweite	automatisch

Abbildung 5.12 zeigt die Temperaturen 20 cm unter der Decke in 3,0 m Höhe im Bereich von 20 – 57 °C für die flammende (links) und nicht-flammende Verbrennung (rechts) zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die flammende Verbrennung entspricht einem Sootyield von 0,1, die nicht-flammende Verbrennung einem Sootyield von 0,5187.



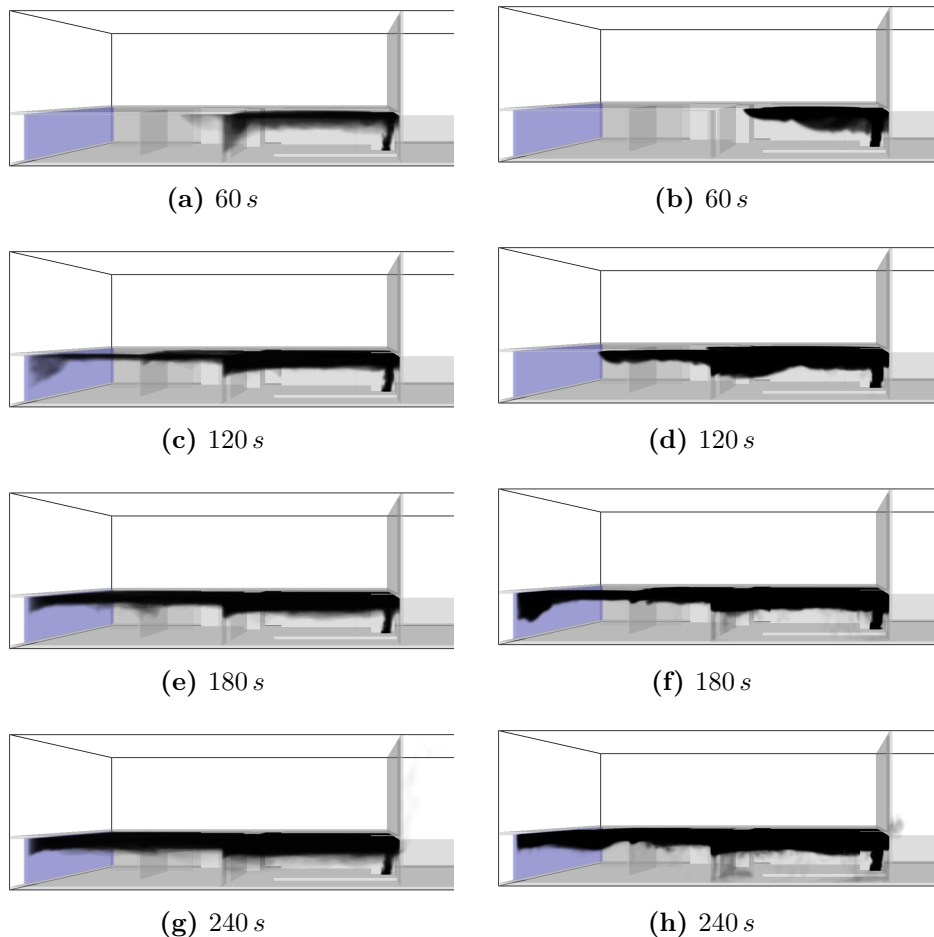
**Abbildung 5.12:** Darstellung der mit FDS berechneten Temperaturen in  $3,0\text{ m}$  Höhe (unter der Decke) für flammende (links) und die nicht-flammende Verbrennung (rechts) an unterschiedlichen Zeitpunkten

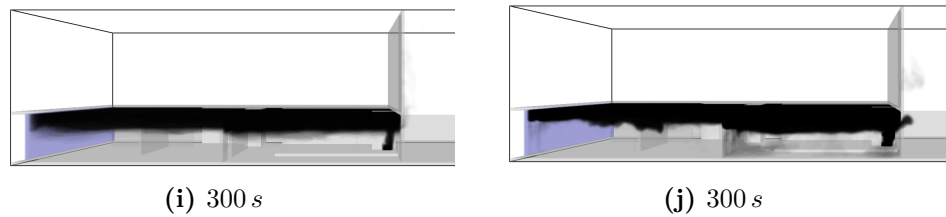
- (a) 60 Sekunden (flammend), (b) 60 Sekunden (nicht-flammend),  
 (c) 120 Sekunden (flammend), (d) 120 Sekunden (nicht-flammend),  
 (e) 240 Sekunden (flammend), (f) 240 Sekunden (nicht-flammend),  
 (g) 300 Sekunden (flammend), (h) 300 Sekunden (nicht-flammend).

Die Strömungsgeschwindigkeit und somit die Temperatureausbreitung waren bei der flammenden Verbrennung sehr viel schneller als bei der nicht-flammenden Verbrennung. Die Maximaltemperaturen bei der flammenden Verbrennung waren ebenfalls

viel höher als bei der nicht-flammenden Verbrennung. Dieser Unterschied zeigt, wie wichtig es ist, dass die Randbedingungen von Simulationen präzise gewählt werden. Auch in dieser Simulation der nicht-flammenden Verbrennung würden die Sprinkler nicht auslösen, da die Temperaturen unter der Auslösetemperatur von  $57^{\circ}\text{C}$  lagen.

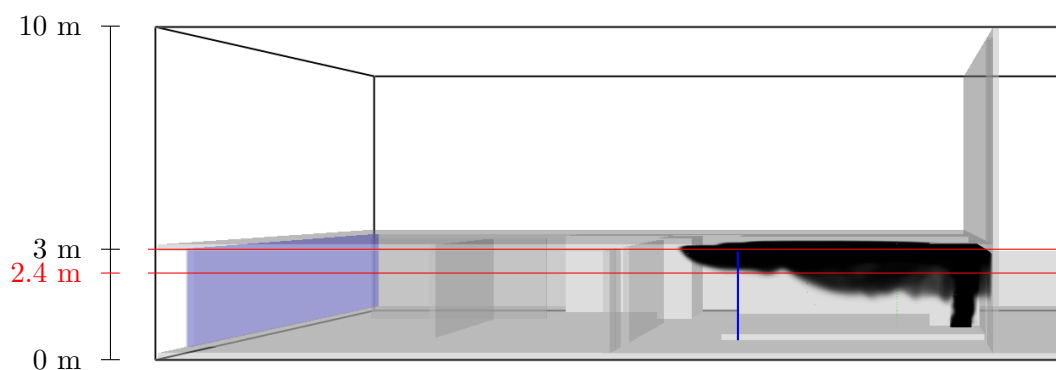
Auf den Abbildungen 5.13 wird die Rauchausbreitung für den Standardsootyield von 0,1 (flammende Verbrennung) und dem neu berechneten Sootyiel von 0,5187 (nicht-flammende Verbrennung) zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Die 3D Seitenansicht wurde gewählt, um die Ausbreitung der Rauchschicht in der Länge des Brandraumes und der Höhe gut erkennen zu können. Bei der flammenden Verbrennung und den höheren Temperaturen herrschen schnellere Strömungsgeschwindigkeiten, die die Rauchgase unter der Decke verteilen. Dabei besitzt die Rauchschicht eine geringere Höhe als bei der nicht-flammenden Verbrennung. Bei der nicht-flammenden Verbrennung ist der entstehende Rußanteil ungefähr fünfmal größer als bei der flammenden Verbrennung. Der hohe Rußanteil hat zur Folge, dass Fluchtwege in kürzerer Zeit nur noch eingeschränkter sichtbar sind.



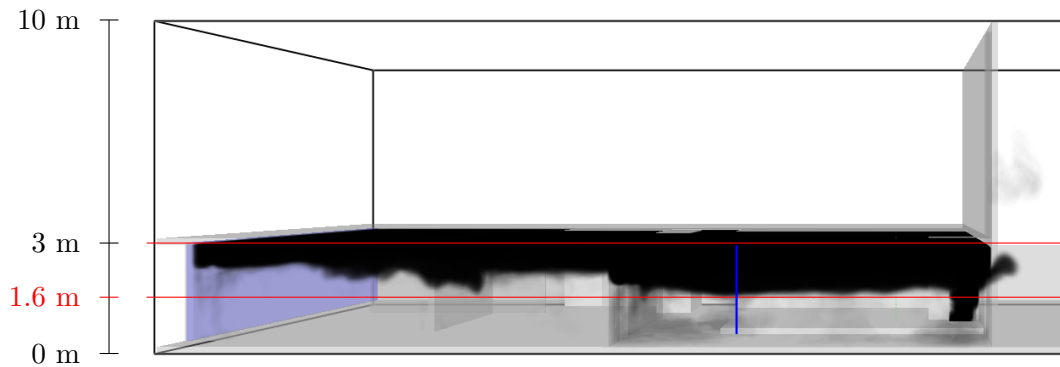


**Abbildung 5.13:** Darstellung der mit FDS berechneten Rauchausbreitung und Rauchschichthöhe für den Standard Sootyield=0,1 für flammende Verbrennungen (links) und den neu berechneten Sootyield=0,5187 für nicht-flammende Verbrennungen (rechts) an unterschiedlichen Zeitpunkten

Auf den folgenden Abbildungen 5.14 und 5.15 sind die Rauchschichthöhen nach 60 bzw. 300 Sekunden noch einmal vergrößert dargestellt. Die blaue Senkrechte wird auch in Abbildung 5.16 für die berechneten Temperaturen entlang dieser Höhenlinie benutzt. Die Abbildungen zeigen im Vergleich, dass die Rauchschichthöhe entlang der Höhenlinie mit der Zeit zunimmt. Diese Rauchschicht beeinträchtigt die Sichtweite entlang der Fluchtwege. Notausgangzeichen können je nach Beleuchtung nur noch eingeschränkt erkannt werden. Weitere Ergebnisse diesbezüglich sind in Abschnitt 5.4.2 beschrieben.



**Abbildung 5.14:** Rauchschichthöhe am Referenzort (senkrechte blaue Strecke) nach 60 s



**Abbildung 5.15:** Rauchschichthöhe am Referenzort (senkrechte blaue Strecke) nach 300 s

## 5.4 Vergleich von CFX und FDS

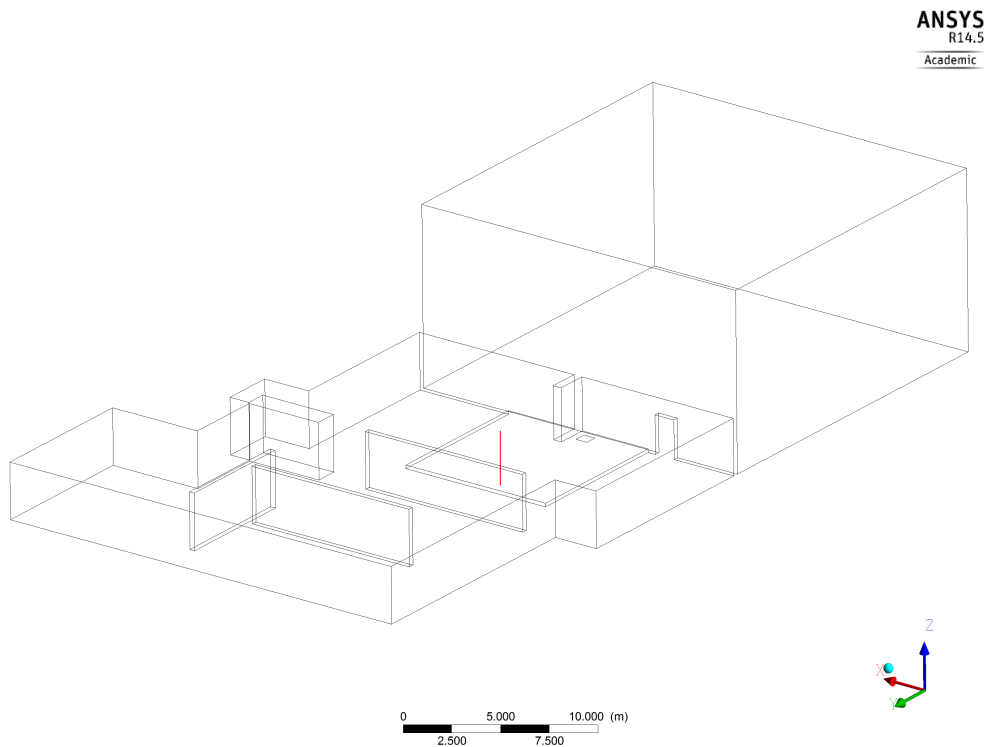
In den folgenden Abschnitten werden die Temperaturentwicklung und Rauchkonzentrationen anhand der Sichtweiten und Rechenzeiten in CFX und FDS verglichen. Es folgt ein qualitativer sowie quantitativer Vergleich der mit beiden Programmen durchgeführten Simulationen.

### 5.4.1 Temperatur

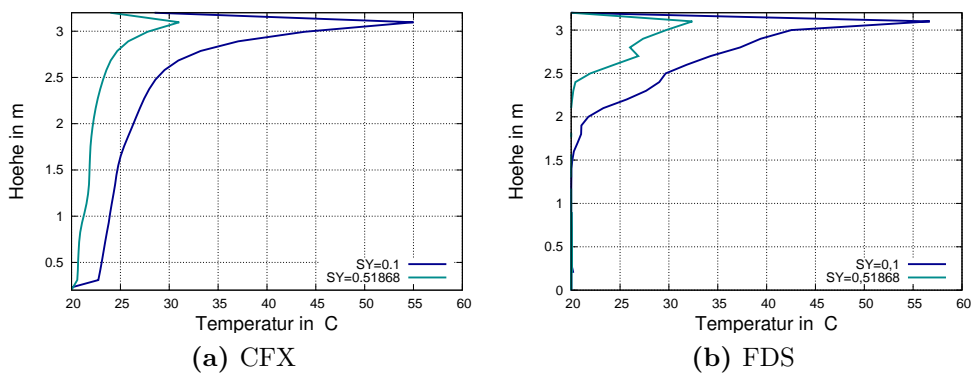
Auf der Abbildung 5.16 ist in rot die Höhenlinie in 8,5 m Entfernung vom Brandort in der Geometrie eingezeichnet, auf der die Temperaturen der flammenden und nicht-flammenden Verbrennung der CFX und FDS Simulation verglichen werden. Die berechneten Temperaturen nach 300 Sekunden Simulationszeit sind in den Abbildungen 5.17 dargestellt.

Die Maximaltemperaturen liegen für die nicht-flammende Verbrennung (grün) bei CFX bei 32 und bei FDS bei 33 °C. Bei der flammenden Verbrennung (blau) liegen die Maximaltemperaturen bei CFX bei 55 und FDS bei 57 °C. Die Abweichung ist kleiner als 5%.



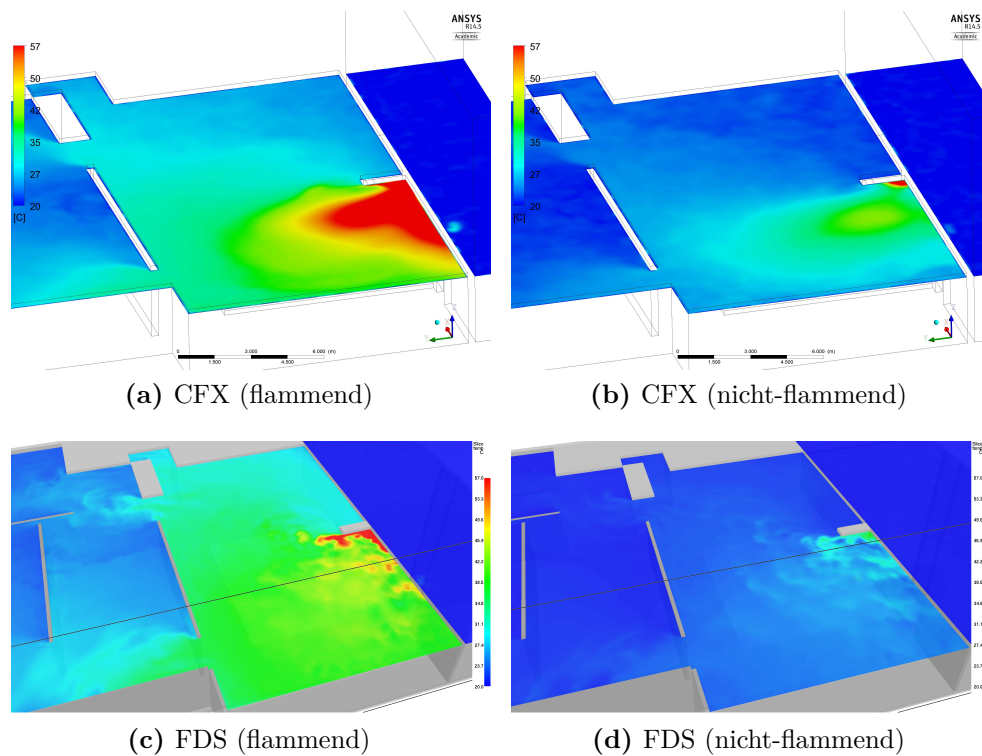


**Abbildung 5.16:** Hotelgeometrie mit Höhenlinie. Entlang der roten Linie werden die Temperaturen ausgewertet.



**Abbildung 5.17:** Berechnete Temperaturen in 8,5 m Entfernung vom Brand nach 300 s in (a) CFX und (b) FDS .

Die Abbildungen 5.18 zeigen die Temperaturen von 20–57 °C unter der Decke für die Berechnung mit CFX und FDS nach 300 Sekunden. Links sind die Temperaturen bei einer flammenden Verbrennung, rechts bei der nicht-flammenden Verbrennung dargestellt. Der rote Bereich zeigt den Auslösebereich von Sprinklern [VDI 6019 Blatt 1].



**Abbildung 5.18:** Temperaturverteilung ( $20 - 57^{\circ}\text{C}$ ) im Brandraum unter der Decke in  $3,0\text{ m}$  Höhe nach 300 Sekunden  
 (a) CFX (flammend); (b) CFX (nicht-flammend)  
 (c) FDS (flammend); (d) FDS (nicht-flammend) .

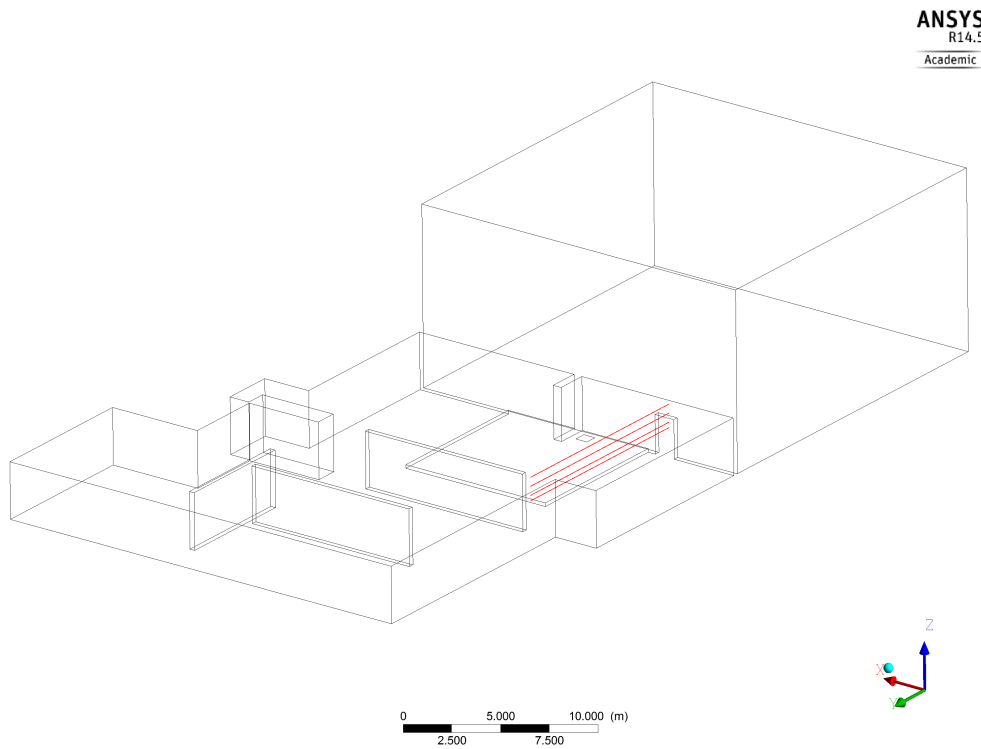
Die Unterschiede in der Temperaturverteilung zwischen den Programmen beruht auf den zwei verschiedenen Turbulenzmodellen. Das SST-Modell in CFX berechnet einen Durchschnittswert, das LES-Modell in FDS interpoliert die Temperatur entsprechend der Gitter- und Wirbelgröße.

In FDS treten höhere Temperaturdifferenzen in kurzen Zeiträumen auf. Der Auslösebereich ist somit etwas größer als in der Darstellung zu diesem Zeitpunkt zu erkennen ist. CFX arbeitet in dieser Betrachtung der Temperaturen etwas konservativer als FDS.

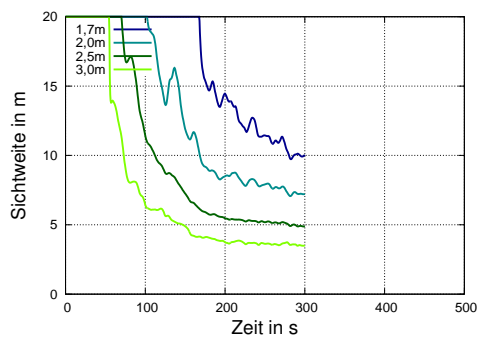
Bei der nicht-flammenden Verbrennung würden Sprinkler bei beiden Simulationsprogrammen nicht auslösen, bei der flammenden Verbrennung gäbe es bei beiden Simulationsprogrammen einen Auslösebereich in der Nähe vom Brandherd unter der Decke.

#### 5.4.2 Sichtweiten

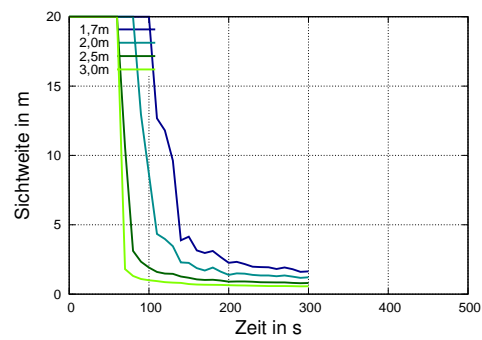
In den folgenden Diagrammen 5.20 werden die Sichtweiten im Bereich des Weges vom Essbereich zum Atrium verglichen. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte für die Sichtweite bei einer Entfernung von  $12\text{ m}$  in vier verschiedenen Höhen von  $3,0\text{ m}$ ,  $2,5\text{ m}$ ,  $2,0\text{ m}$  und  $1,7\text{ m}$  auf einer Ebene (siehe rote Linien in Abbildung 5.19).



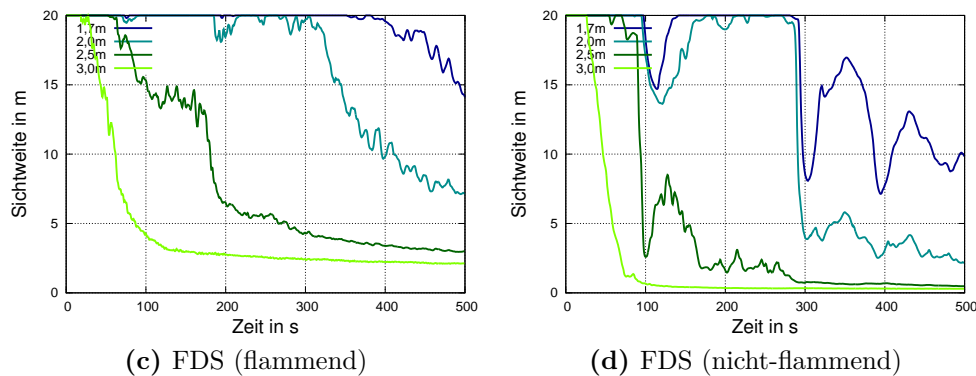
**Abbildung 5.19:** Hotelgeometrie mit Sichtlinien. Entlang der roten Linien wird die Sichtweite ausgewertet.



(a) CFX flammend)



(b) CFX (nicht-flammend)



**Abbildung 5.20:** Sichtweiten in verschiedenen Höhen bei CFX und FDS für die flammende und nicht-flammende Verbrennung:  
 (a) CFX (flammend); (b) CFX (nicht-flammend);  
 (c) FDS (flammend); (d) FDS (nicht-flammend) .

Die erforderlichen  $20,0\text{ m}$  Sichtweiten (siehe Kapitel 4.6.4) werden in  $3,0\text{ m}$  Höhe bei CFX nach ca. 70 Sekunden und bei FDS nach ca. 30 Sekunden unterschritten. Dies gilt für die flammende und nicht flammende Verbrennung. Bei FDS strömt die Rauchgasschicht etwas schneller unter der Decke entlang und verteilt sich somit mehr in der Breite als bei CFX. Dadurch sinken die Sichtweiten fast 40 Sekunden früher als bei CFX. In  $1,7\text{ m}$  Höhe werden die Sichtweiten von CFX nach 180 Sekunden in der flammende Verbrennung und nach 100 Sekunden in der nicht-flammenden Verbrennung unterschritten. Bei FDS werden diese Sichtweiten nach 350 Sekunden in der flammenden und das erste Mal nach 100 Sekunden in der nicht-flammenden Verbrennung unterschritten.

Beleuchtete Rettungszeichen befinden sich üblicherweise oberhalb von Türen. Diese Höhe wird hier mit  $2,5\text{ m}$  angenommen. Die Rettungszeichen wären in CFX bei der flammenden Verbrennung nach 70 Sekunden, bei nicht-flammender Verbrennung nach 60 Sekunden und bei FDS bei flammender Verbrennung nach 60 Sekunden und nicht-flammender Verbrennung nach 70 Sekunden nicht mehr erkennbar. Für diese Betrachtung erhält man bei beiden Simulationsprogrammen ein gut übereinstimmendes Ergebnis.

Die erste Unterschreitung der zulässigen Sichtweite wird von beiden Programmen sehr ähnlich berechnet. CFX ist in Bezug auf den Verlauf der unterschrittenen zulässigen Sichtweiten viel konservativer als FDS. Die rauchfreie Zone wird von CFX weniger hoch berechnet als von FDS.

### 5.4.3 Rechenzeiten

In der Tabelle 5.4 sind die Simulationszeiten für die unterschiedlichen Gittergrößen und den Ausschnitt des Hotels im Vergleich zum ganzen Hotel aufgelistet. Auf den ersten Blick ähneln sich die Zeiten zwischen CFX und FDS für die gleichen Bedingungen. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass die CFX Simulationen für 300 Sekunden Brandausbreitung und die FDS Simulationen für 500 Sekunden Brandausbreitung

berechnet wurden. Somit ergibt sich für CFX mehr als das Doppelte an Rechenzeit. Hinzu kommt, dass die FDS Simulationen auf einem Kern mit 3,0 GHz berechnet und die CFX Simulationen auf vier Kernen mit je 3,0 GHz berechnet wurden. Die Arbeitsspeicherauslastung beträgt bei CFX ebenfalls das vierfache. Pro Kern lag die Arbeitsspeicherauslastung bei sechs GB, d.h. bei FDS sechs GB und bei CFX 24 GB für eine Simulation. Die Workstation, auf der die Simulationen durchgeführt wurden, hat insgesamt zwei CPUs mit je sechs Kernen a 3,0 GHz und 48 GB RAM.

**Tabelle 5.4:** Rechenzeiten von CFX und FDS. Die maximale Simulationszeit beträgt in CFX 300 s und in FDS 500 s. Die Zeiten schwanken pro Gitter aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen.

Programm	Gitter	Simulations-zeit	Rechenzeit		Kerne	RAM
			Hotel	Ausschnitt		
CFX	10 cm	300 s	14 Tage	3 Tage	4	24 GB
CFX	20 cm	300 s		8 Stunden	4	24 GB
FDS	5 cm	500 s		22 Tage	1	6 GB
FDS	10 cm	500 s	7-10 Tage	18-30 Stunden	1	6 GB
FDS	20 cm	500 s	12 Stunden	2 Stunden	1	6 GB

## 5.5 Diskussion

Der Vergleich der Berechnungen mit den beiden Berechnungsprogrammen CFX und FDS hat gezeigt, dass sich sowohl die flammende als auch die nicht-flammende Verbrennung mit beiden Programmen berechnen lässt. Die berechneten Maximaltemperaturen entlang der Höhenlinie sowie die Sichtweiten führten dabei zu vergleichbaren Werten. Leichte Differenzen lassen sich durch die unterschiedlichen Submodelle für die Turbulenz erklären. Diese führen offensichtlich zu den Unterschieden bei der Berechnung der Temperaturverteilung unter der Decke. FDS benutzt das LES Modell, welches Wirbel abbilden kann. Bei CFX wurde das SST-Modell gewählt (ein RANS-Modell), das eine durchschnittliche Turbulenz berechnet. In CFX wurde bewusst nicht das LES-Modell gewählt, da die Rechenzeiten den zeitlichen Rahmen für eine Simulation sprengen würden. Der Unterschied zwischen den Modellen besteht darin, dass in FDS eine lokale Auflösung der Wirbel schnelle Variationen in Temperaturen und Gaskonzentrationen nach sich zieht. Somit können lokale Werte in jedem Zeitschritt stark schwanken.

Ein großer Unterschied zwischen beiden Programmen besteht darin, dass CFX die Möglichkeit bietet, während einer Simulation zwischen verschiedenen Reaktionsgleichungen wie zum Beispiel flammend und nicht-flammend zu wechseln. Außerdem können bei CFX unterschiedliche Reaktionsgleichungen parallel angewandt werden. Es besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Gegenstände aus zum Beispiel Polyurethan, PVC oder Holz separat zu berechnen. Jedes Material kann durch mehrere flexibel wechselnde Reaktionsgleichungen berücksichtigt werden. Das ist in FDS nicht

möglich.

FDS bietet nur die Möglichkeit, eine Reaktionsgleichung für eine Simulation zu verwenden. Der große Unterschied besteht darin, dass alle Stoffe, die berücksichtigt werden sollen, für das Brandszenario mit einer einzigen Reaktionsgleichung beschrieben werden müssen. Falls es zu einem Brand in einer Ecke kommt, bei dem Polstermöbel aus Polyurethan entzündet werden, wird dennoch die Reaktionsgleichung mit dem vorher festgelegten Material-Mix angewandt. Dadurch können Rauchgaskomponenten, die typisch für bestimmte Materialien sind, zu früh freigesetzt werden. Des Weiteren besteht auch nicht die Möglichkeit, zwischen der flammenden und nicht-flammenden Verbrennung zu wechseln.

CFX bietet damit Möglichkeiten, die Brandausbreitung detaillierter und realistischer zu modellieren. Allerdings ist die Rechenzeit erheblich länger. Um die Vorteile von CFX zu nutzen, müssen die entsprechenden experimentellen Daten zur Verfügung stehen. FDS zeichnet sich durch die kürzere Rechenzeit und die geringeren nötigen Ressourcen sowie die kostenfreie Lizenzierung aus. FDS bietet außerdem die Möglichkeit ein bereits eingebautes Pyrolysemodell zu verwenden. CFX ist daher eher geeignet, wenn es um Fragestellungen nach detaillierter Brandrauchzusammensetzung in komplexen Geometrien oder in schwierigen Strömungsverhältnissen geht. Die entsprechenden Versuchsdaten müssen dabei aufwändig ermittelt werden. FDS zeichnet sich durch einen robusten, wenn auch schlechter kontrollierbaren numerischen Löser aus. Es ist geeignet für Fragestellungen, bei denen die Materialzusammensetzung nicht bekannt ist und daher grob abgeschätzt werden muss, ebenso für einfachere Geometrien. Das Pyrolysemodell gestattet die Berechnung der Brandausbreitung. Die Berechnung der Rauchgaszusammensetzung und besonders eine Veränderung der Zusammensetzung in Abhängigkeit von veränderten Abbrandbedingungen ist nicht möglich.

# KAPITEL 6

---

## Zusammenfassung und Ausblick

---

### 6.1 Zusammenfassung

Eine Brandausbreitung mit mehreren Brandphasen wird in einer üblichen Simulation mit einer Reaktionsgleichung für das Ausgangsmaterial abgebildet. Bei der Verbrennung mehrerer Materialien wird oft sogar eine Mischreaktionsgleichung, die alle Edukte sowie Produkte enthält, als Simulationsgrundlage verwendet. Da die Reaktionsgleichung die Simulation des Brandverhaltens und des Brandverlaufs sehr stark beeinflusst, kann auf diese Art und Weise nur ein allgemeiner und wenig detaillierter Brandverlauf berechnet werden.

Um detaillierte Brandausbreitungen bei Brandsimulationen zu berechnen, müssen zusätzliche Eingabemöglichkeiten in den CFD-Programmen genutzt bzw. auch erst noch geschaffen werden. Parameter, wie die Eingabe der Reaktionsgleichung, müssen für den spezifischen Brandfall und auch die Brandphase gewählt werden können. Da ein Brand aus mehreren Brandphasen besteht, muss es möglich sein, in der Simulation auf die Brandphasen abgestimmte Reaktionsgleichungen zu verwenden.

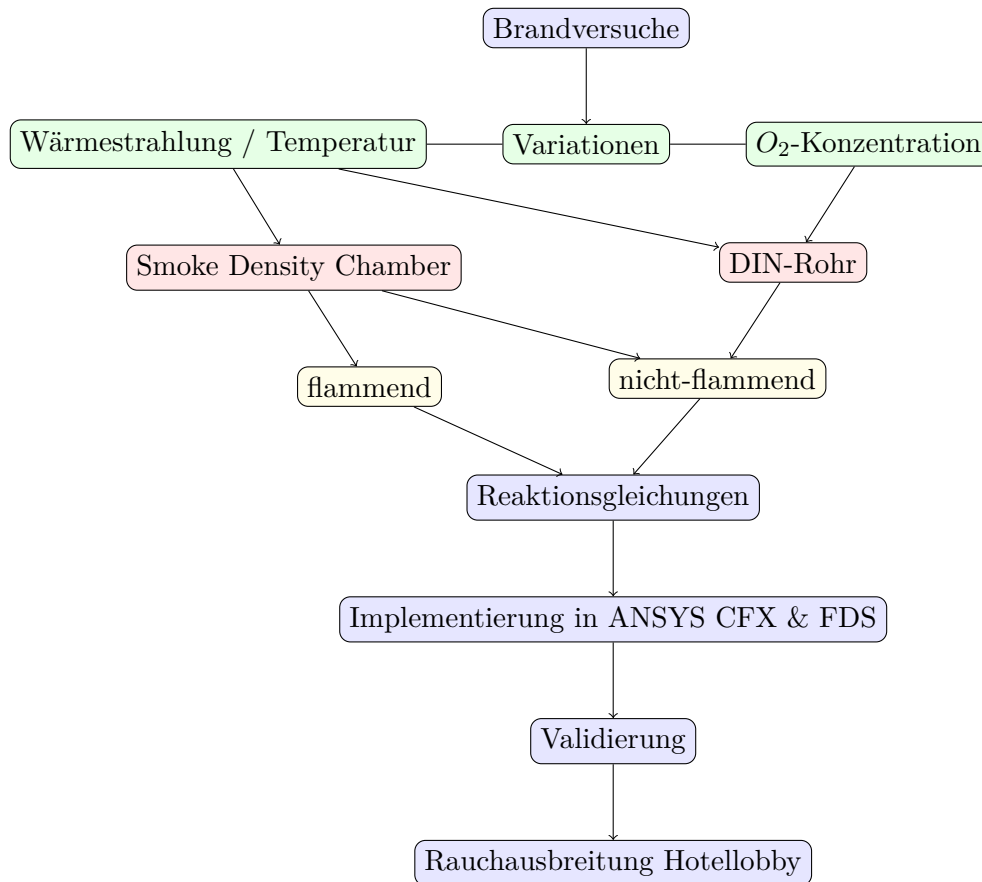
Die neu geschaffenen experimentellen Grundlagen wurden verwendet, um Reaktionsgleichungen herzuleiten, die eine Rauchmodellierung gestatten, die in ihren Anwendungsmöglichkeiten über die in den bisher in CFD-Programmen implementierten Modellen hinausgehen. Die neu entwickelten Reaktionsgleichungen für die drei untersuchten Materialien (siehe Diagramme 3.8) können in Abhängigkeit von den jeweiligen Temperaturverhältnissen wie auch veränderten Belüftungsbedingungen angewendet werden. Dadurch können die Rauchproduktion und -zusammensetzung genauer modelliert werden.

Durch Versuche in der Smoke Density Chamber und im DIN-Rohr wurde die experimentelle Grundlage geschaffen, um den Einfluss von unterschiedlichen Temperaturen bzw. Wärmeflüssen und Sauerstoffkonzentrationen auf die Rauchgasproduktion und -zusammensetzung für eine Auswahl von Materialien zu quantifizieren.

Die neu gewonnenen Koeffizienten der Reaktionsgleichungen für jedes Material können je nach Brandverlauf oder Brandphase benutzt werden.

Das folgende Schema 6.1 verdeutlicht das Vorgehen (blau) in dieser Arbeit. Die veränderten Parameter (grün) und die ausgewählten Brandprüfstände (rot) sowie das

resultierende Brandverhalten (gelb) werden in dieser Abbildung gezeigt.



**Abbildung 6.1:** Struktur der Untersuchungen von den Experimenten bis zu den Simulationen (blau: Vorgehen, grün: Parameter, rot: Prüfgeräte, gelb: Brandarten)

Aus den experimentellen Daten wurden Reaktionsgleichungen abgeleitet, die in die CFD-Software ANSYS CFX implementiert wurden. Die Reaktionsgleichungen unterscheiden sich für die untersuchten Kombinationen aus Temperaturniveau/Bestrahlungsstärke und Sauerstoffkonzentration/Belüftung. Durch die Anwendung der so abgeleiteten Reaktionsgleichungen wird der Einfluss dieser Größen auf die Rauchgasproduktion und -zusammensetzung in den Brandszenarien berücksichtigt. Gerade bei geringer Verfügbarkeit von Sauerstoff oder relativ niedrigen Temperaturen (ohne Entflammung) verändern sich Rauchgasproduktion und -zusammensetzung deutlich. Diese Zusammenhänge werden in dem entwickelten Rauchmodell berücksichtigt. Die unterschiedlichen Brandprüfungen in Smoke Density Chamber und DIN-Rohr mit reproduzierbaren Bedingungen zeigt, dass die ermittelten Reaktionsgleichungen den Beginn und das Abklingen eines Brandverlaufes gut darstellen. Es kann ein nicht-flammender oder auch schwelender Zustand durch diese Reaktionsgleichungen beschrieben werden.

Bisherige Rauchmodelle berücksichtigen diese Zusammenhänge nur sehr stark einge-



schränkt. Das zeigt sich in dem Vergleich von Standardreaktionsgleichungen zu den neu ermittelten Reaktionsgleichungen, der sowohl mit FDS als auch mit CFX durchgeführt wurde. Die veränderte Rauchgasproduktion und -zusammensetzung kann in bestimmten Brandszenarien entscheidend sein, da bei starker Rauchproduktion und gleichzeitig relativ niedrigen Temperaturen Fluchtwege nicht mehr erkennbar sein können. Wenn gleichzeitig die Sprinkler wegen der relativ geringen Temperaturen verzögert auslösen, werden Personen eventuell stark durch den Brand gefährdet. Diese Gefährdung ist in einer Berechnung, der eine flammende Verbrennung zu Grunde liegt, nicht erkennbar.

Die Unterschiede sind anhand von Berechnungen eines Brandes in einer Hotellobby dargestellt. Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Rauchsimulation mit Strömungssimulationsprogrammen wie ANSYS CFX oder FDS vom NIST bei Verwendung der Standardreaktionsgleichungen starke Einschränkungen aufweist. Die tatsächliche Gefährdung von Personen kann bei bestimmten Szenarien deutlich unterschätzt werden. Der in den Brandsimulationen von FDS verwendete übliche Rußkoeffizient von  $0,1 [kg_{Soot}/kg_{Fuel}]$  unterscheidet sich wesentlich von dem in dieser Arbeit aus den Brandversuchen ermittelten Wert von 0,5 für den Fall von nicht flammender Verbrennung. Die Rauchausbreitung verändert sich dadurch: Es entsteht eine dichtere, dickere und langsamere Rauchgasschicht, die sich vom Brandherd her ausbreitet. Dies bewirkt, dass Rauchmelder später auslösen und gleichzeitig die Sichtweiten zu den Fluchtwegkennzeichnungen eingeschränkter sind als bei einer flammenden Verbrennung mit geringerem Rußanteil. Auch das Auslösen von Sprinklern kann auf Grund geringerer Rauchgastemperaturen verzögert werden oder gar nicht stattfinden. Das Verhalten von Personen bei einer Evakuierung wird sich entsprechend verändern. Ein Brandgutachten sollte u.a. den "Worst Case" betrachten. Die in dieser Arbeit neu erarbeiteten Erkenntnisse können für Evakuierungen Hinweise für die Verbesserung der Sicherheit geben.

## 6.2 Ausblick

Bei CFX lassen sich mehrere Reaktionsgleichungen für unterschiedliche Materialien und auch für ein Material in einem Modell implementieren. Entscheidend sind die Kriterien, um zwischen den Reaktionsgleichungen für die Brandentstehungsphase, Vollbrandphase und Abklingphase zu wechseln. Diese Kriterien können zum Beispiel Sauerstoffkonzentrationen oder Temperaturen im Brandbereich sein.

FDS kann in der benutzten Version 5.5.3 nur mit einer Reaktionsgleichung rechnen. Das gilt auch für das Vorhandensein von unterschiedlichen Materialien. Wenn ein Brand in einer Ecke entsteht, in der nur Polyurethan vorhanden ist, aber in einer anderen Ecke auch PVC oder Holz als Brandlast vorhanden sind, wird nur mit einer Reaktionsgleichung für die gesamte Mischbrandlast gerechnet. Dieses kann starke Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung und/oder auch Rauchgaskomponenten während der Brandentwicklung haben, sodass die Simulationsergebnisse einen eher unrealistischen Brandverlauf wiedergeben könnten.

Die Strömungssimulationsprogramme ANSYS CFX und FDS vom NIST können flammende und nicht-flammende Zustände modellieren. Es ist Voraussetzung, dass hierzu geeignete Reaktionsgleichungen vorhanden sind. Einen Wechsel zwischen nicht-flammendem und flammendem Zustand kann CFX abbilden, wenn man mehrere Reaktionsgleichungen in einem Modell implementiert. Es müssen Grenzen wie zum Beispiel Sauerstoffkonzentrationen oder Temperaturen festgelegt werden, um zwischen den Gleichungen zu wechseln. FDS kann in der benutzten Version nur mit einer Reaktionsgleichung rechnen. Die inzwischen veröffentlichte Version 6.5.2 ist laut dem neuen User Guide [MHW<sup>+</sup>16] in der Lage, auch mit diesem Problem umzugehen. Es haben sich viele Neuerungen bezüglich der komplexen Eingabe von Reaktionsgleichungen für unterschiedliche Materialien bei differenzierten Umgebungsbedingungen ergeben. Während der Durchführung des praktischen Teils der Arbeit war dies nur mit der kommerziellen Software von ANSYS CFX möglich.

Um die Brandverläufe in Zukunft noch besser mit numerischen Modellen abbilden zu können, wird es nötig sein, für die am Brand beteiligten Materialien eine Datenbank mit ausgewählten Reaktionsgleichungen und weiterem spezifischen Materialverhalten aufzubauen. Für die oft auf CFD basierenden Gutachten von Sonderbauten müsste es Voraussetzung sein, auch solche "Worst-Case Zustände" zu berücksichtigen. Grundsätzlich müssten bei der Verwendung von CFD-Programmen für die Erstellung von Brandschutzkonzepten, bei denen die Bewertung der Rauchmenge und -zusammensetzung für die Gefährdungsbeurteilung herangezogen wird, folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Gitterstudie zur Wahl der Zellengröße
- Materialdatenbank als Basis für Reaktionsgleichungen für unterschiedliche Brandphasen
- Umschalten zwischen verschiedenen Reaktionsgleichungen (materialabhängig und brandphasenabhängig)

- Explosionsgefahr durch nicht vollständig umgesetzte Brandprodukte bei nicht-flammender Verbrennung

Die Freisetzung von langkettigen organischen Molekülen, besonders bei niedrigen Temperaturen und geringer Sauerstoffkonzentration, wird in dem Modell nur als reiner Kohlenstoff abgebildet. Die besondere Personengefährdung durch diese langkettigen organischen Moleküle hinsichtlich direkter Einwirkung auf den Organismus als auch hinsichtlich möglicher Nachverbrennungen wird in dem neu entwickelten Modell bisher noch nicht berücksichtigt. Die Einschränkung der Sichtweite wird über die Annahme, dass es sich um Kohlenstoff handelt, näherungsweise abgebildet. Diese Betrachtung zeigt, dass aus der sehr großen Anzahl an gewonnenen Versuchsdaten weitere Erkenntnisse gewonnen werden können, auf die in dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht mehr eingegangen werden konnte. Es besteht weiterhin großer Forschungsbedarf auf diesem Gebiet. Das neu entwickelte Rauchmodell bietet aber schon die Möglichkeit, einige der wichtigen Einflussfaktoren auf Rauchgasproduktion und -zusammensetzung zu berücksichtigen.

---

## Literaturverzeichnis

---

- [ANS06a] ANSYS: *ANSYS CFX Introduction*. ANSYS, 2006
- [ANS06b] ANSYS: *ANSYS CFX-Post User's Guide*. ANSYS, 2006
- [ANS06c] ANSYS: *ANSYS CFX-Pre User's Guide*. ANSYS, 2006
- [ANS06d] ANSYS: *ANSYS CFX Reference Guide*. ANSYS, 2006
- [ANS06e] ANSYS: *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. ANSYS, 2006
- [ANS06f] ANSYS: *ANSYS CFX-Theory*. ANSYS, 2006
- [BPW07] BANSEMER, Björn ; PASCHEN, Christian ; WITTBECKER, Friedrich-Wilhelm: Rauchkenndaten als Eingabeparameter für CFD basierte Sichtweitenberechnungen im Brandfall. In: *VFDB 2* (2007), S. 089–098
- [Bre01] BREIN, Dieter: *Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln)*. Universität Karlsruhe (TH), 2001
- [CT 13a] CT FORMPOLSTER GMBH: *Technisches Datenblatt / technical data sheet*. 2013. – Datenblatt
- [CT 13b] CT FORMPOLSTER GMBH: *Technisches Datenblatt / technical data sheet*. 2013. – Datenblatt
- [DIN 4102-01] Norm DIN 4102-01 1998 2007. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*
- [DIN 4844-1] *Graphische Symbole Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen Teil 1: Gestaltungsgrundlagen für Sicherheitszeichen zur Anwendung in Arbeitsstätten und in öffentlichen Bereichen (ISO 3864-1:2002 modifiziert)*. 2005

- [DIN 53436] Norm DIN 53436-1:1981 1981. *Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxi-kologische Prüfung; Zersetzungsgerät und Bestimmung der Versuchstemperatur*
- [DIN EN ISO 13943] Norm DIN EN ISO 13943 2011. *Brandschutz–Vokabular (ISO 13943:2008)*
- [DIN EN ISO 5659-2] Norm DIN EN ISO 5659-2 2007 2007. *Kunststoffe – Rauch-entwicklung – Teil 2: Bestimmung der optischen Dichte durch Einkammerprüfung (ISO 5659-2:2006); Deutsche Fassung EN ISO 5659-2:2006*
- [DiN08] DiNENNO, Philip J.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engi-neering*. Bd. 3rd Edition. National Fire Protection Association, 2008
- [FI08] FIRE INVESTIAGTION, Technical C.: *NFPA Handbook - Fire and Explosion Investigation*. NFPA, 2008
- [FP08] FERZIGER, Joel H. ; PERIĆ, Milovan: *Numerische Strömungs-mechanik*. Springer, 2008
- [HBM12] HOFMANN-BÖLLINGHAUS, A. ; MONREAL, N.: Quantifizie-rung von Brandrauch als Grundlage für simulationsbasierte Brandschutz- und Entrauchungskonzepte. In: *Forschungsini-tiative Zukunft Bau* (2012). ISBN 978–3–8167–8734–1
- [Hof03] HOFMANN, Anja: *Modellierung eines Entstehungsbrandes und die Anwendung auf den Single Burning Item Test*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2003
- [ISO TS 19700] Norm ISO TS 19700 2007. *Controlled equivalence ratio method for the determination of hazardous components of fire effluents*
- [Joo06] JOOS, Franz: *Technische Verbrennung*. Springer, 2006
- [Kna09] KNAUST, Christian: *Modellierung von Brandszenarien in Gebäuden*, Technische Universität Wien, Dissertation, 2009
- [Lö15] LÖHNERT, Andrea: *Modellierung von Brandszenarien mit CFD unter Berücksichtigung des Einflusses der Brandrauchzu-sammensetzung auf die Toxizität und Sichtweiten*, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Dissertation, 2015
- [LMKH13] LOEHNERT, A. ; MONREAL, N. ; KNAUST, C. ; HOFMANN, A.: Advanced CFD Modelling approach of smoke toxicity and light extinction for well ventilated and less well ventilated fires in a Compartment (Part 2). (2013), S. 13–24. ISBN 978–0–9556548–9–3

- [LRKK12] LÖHNERT, Andrea ; RABE, Frederik ; KNAUST, Christian ; KRAUSE, Ulrich: Numerical and Experimental Investigation of Fire Smoke Toxicity. (2012). ISBN 978-84-86116-69-9
- [Mü13] MÜNCH, Matthias: *Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und der Gefahrenabwehr*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2013
- [Ma10] MCGRATTAN, Kevin ; AL. et: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide - Volume 4: Software Configuration Management Plan*. NIST, 2010
- [MHF<sup>+</sup>10] 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
- [MHW<sup>+</sup>16] MCGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; WEINSCHENK, Craig ; HUGHES, Jensen ; OVERHOLT, Kristopher ; FLOYD, Jason: *Fire Dynamics Simulator (Version 6) - User's Guide*. NIST, 2016
- [MTK13] MTK PETER KRON GMBH: *Flowmesser TSI Serie 4000 / 4100 - Der einfache, kompakte Flowmesser*. 2013. – Datenblatt
- [OB06] OBERKAMPF, William L. ; BARONE, Matthew F.: Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics. In: *Journal of Computational Physics* 217 (2006), S. 5–36
- [OT07] OBERKAMPF, William L. ; TRUCANO, Timothy G.: Verification and Validation Benchmarks / Sandia National Laboratories. 2007. – Forschungsbericht
- [PCE] PCE DEUTSCHLAND GMBH: *Präzisionswaage der Serie PCE-BT*. – Datenblatt
- [REL13] RELI KUNSTSTOFFE GERHARD REINHOLD E.K.: *Werkstoffdatenblatt - PVC*. 2013. – Datenblatt
- [Sch08] SCHNEIDER, Ulrich: *Ingenieurmethoden im Brandschutz*. Werner, 2008
- [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

- 
- [VDI 6019 Blatt 1] Norm VDI 6019 Blatt 1 2006. *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden*
- [VDI 6019 Blatt 2] Norm VDI 6019 Blatt 2 2007. *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden*
- [Wit00] WITTBECKER, F.-W.: Zur szenarioabhängigen Ermittlung und Beurteilung des brandtechnologischen Materialverhaltens. In: *Baustofftechnologie und Brandschutz* 9 (2000), S. 71–84

---

## Symbolverzeichnis

---

Formelzeichen	Einheit	Erklärung
<b>Transmission</b>		
$T$	–	Transmissionsgrad
$I$	$W/m^2$	transmittierte Lichtintensität
$I_0$	$W/m^2$	eingestrahlte Lichtintensität
$\sigma_s$	$m^2/g$	spezifischer Extinktionskoeffizient
$\rho_s$	$g/m^3$	Rauchpartikel-Massenkonzentration
$L$	$m$	optische Pfadlänge bzw. Dicke der Rauchsicht
$S$	$m$	objektspezifische Sichtweite
$E$	–	Parameter, der vom Reflexionsgrad bzw. von der Leuchtdichte des anvisierten Objektes abhängig ist (E=2-4 für Licht reflektierende Objekte und E=5-10 für Licht emittierende Objekte)
$k$	$1/m$	Extinktionskoeffizient
<b>Auswertetool</b>		
$SN$		Start Nullmessung (Erster Messwert der Nullmessung bei der FT-IR Messung)
$SN$		Ende Nullmessung (Letzter Messwert der Nullmessung bei der FT-IR Messung)
$SV$		Start Versuch (Erster Messwert des Versuches bei der FT-IR Messung)
$EV$		Ende Versuch (Letzter Messwert des Versuches bei der FT-IR Messung)
$R$	$J/(mol \cdot K)$	ideale Gaskonstante
$t_{Versuch}$	$s$	Versuchszeit
$p_{Abzug}$	$hPa$	Druck im Abzug
$T_{Abzug}$	$^{\circ}C$	Temperatur im Abzug
$V_{Luft}$	$m^3$	zugeführte Luft während des Versuches
$V_{mittel}$	$m^3/s$	durchschnittlicher Zuluftstrom während des Versuches
$V_{Zuluft}$	$m^3$	vollständig zugeführte Luft während des Versuches
$V_m$	$l/mol$	

weiter auf der nächsten Seite



$M_i$	$g/mol$	Molare Masse des Gases/Stoffes i
$M_{Abzug}$	$g/mol$	Molare Masse der Luft im Abzug unter Berücksichtigung der gemessenen Gase
$M_{Edukt}$	$g/mol$	Molare Masse des Eduktes
$M_{Luft}$	$g/mol$	Molare Masse der Luft
$m_C$	$g$	Masse an Kohlenstoff von allen gemessenen Gasen
$m_{C_i}$	$g$	Masse an Kohlenstoff im Gas i
$m_{C_{Abzug}}$	$g$	Summe der Masse an Kohlenstoff im Abzug
$m_{C_{Probe}}$	$g$	Masse an Kohlenstoff in der Probe
$m_{C_{Ruß}}$	$g$	Masse an Kohlenstoff im Ruß
$X_{C_{Edukt}}$	$mol/mol$	Mol/Volumenanteil des Kohlenstoffs im Edukt
<b>Konzentrationsberechnungen</b>		
$\phi_i$	$ppm$	Volumenkonzentration des Gases i
$X_i$	$mol/mol$	Mol/Volumenanteil des Gases i
$\nu_i$	$mol$	Koeffizient des Stoffes i für die Reaktionsgleichung
<b>Luftbedarf</b>		
$\lambda$	–	Luftbedarf
$m_{Luft}$	$g$	Masse an Luft
$\Phi$	–	Brennstoffverhältnis
$m_{O_2}$	$g$	Masse an Sauerstoff
<b>Verbrennung</b>		
$\dot{m}$	$g/s$	Massenstrom
$\dot{Q}$	$kW$	Wärmefreisetzung
$\Delta H_{eff}$	$kJ/kg$	Heizwert

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CFX</i>	Kommerzielles Strömungssimulationsprogramm von ANSYS
<i>DT</i>	Discrete Transfer (Strahlungsmodell)
<i>EDM</i>	Eddy Dissipation Model (Verbrennungsmodell)
<i>FDS</i>	Open Source Software "Fire Dynamics Simulator" vom NIST
<i>FRCM</i>	Finite Rate Chemistry Model (Verbrennungsmodell)
<i>FT – IR</i>	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
<i>LES</i>	Large Eddy Simulation (Turbulenzmodell)
<i>MC</i>	Monte Carlo (Strahlungsmodell)
<i>mF</i>	mit Zündflamme (bei Versuchen in der SDC)
<i>NIST</i>	National Institute of Standards and Technology
<i>oF</i>	ohne Zündflamme (bei Versuchen in der SDC)
<i>PUR</i>	Polyurethan
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid
<i>RANS</i>	Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (Überbegriff für gewisse Turbulenzmodelle)
<i>RTE</i>	Radiative Transport Equation (Strahlungsmodell)
<i>SDC</i>	Smoke Density Chamber
<i>SST</i>	Shear Stress Transport (Turbulenzmodell)
<i>VG</i>	verwendete Gase (ausgewählte der gemessenen Gase für Berechnungen)
<i>VGC</i>	verwendete Gase mit Kohlenstoffanteil (ausgewählte der gemessenen Gase für Berechnungen, die Kohlenstoff enthalten)

---

## Abbildungsverzeichnis

---

1.1	Struktur der Untersuchungen von den Experimenten bis zu den Simulationen . . . . .	3
2.1	Smoke Density Chamber (1) mit FT-IR (2) . . . . .	7
2.2	DIN-Rohr (1) mit FT-IR (2) . . . . .	8
2.3	Zusammensetzung von Brandrauch . . . . .	13
2.4	Übersicht der Modelle für Wärmetransport, Turbulenz, Verbrennung, Strahlung und Elektromagnetik in ANSYS CFX (nach [ANS06c]) . .	17
2.5	Übersicht der Modelle für Wärmetransport, Turbulenz, Verbrennung, Strahlung und Festphasen in FDS (nach [MHF <sup>+</sup> 10]) . . . . .	18
3.1	Versuchsaufbau Smoke Density Chamber . . . . .	24
3.2	Gemessene Gaskonzentrationen, Masseverlust, spezifische optische Dichte und Transmission von Material A in der SDC bei $25\text{ kW/m}^2$ mit Zündflamme . . . . .	25
3.3	Versuchsaufbau DIN-Rohr . . . . .	27
3.4	Material A für Versuche im DIN-Rohr . . . . .	28
3.5	Gemessene Gaskonzentration, Rauchdichte, Ofentemperatur von Material A im DIN-Rohr bei $700\text{ }^\circ\text{C}$ und $18\text{ vol}\%$ Sauerstoff . . . . .	29
3.6	Konfidenzintervalle des Materials A im DIN-Rohr . . . . .	30
3.7	$\text{CO}/\text{CO}_2$ -Verhältnisse der DIN-Rohrversuche für die Materialien A, B und C . . . . .	35
3.8	Berechnete stöchiometrische Koeffizienten . . . . .	37
4.1	In dieser Arbeit verwendete Modelle von ANSYS CFX und FDS . .	40
4.2	Mit ANSYS CFX berechnete Rückwandtemperaturen in der SDC für die Strahlungsmodelle DT und MC . . . . .	42
4.3	Mixture-Fraction Modell: Zusammenhang zwischen Edukten und Produkten . . . . .	43
4.4	Auswertetool — Diagramme Dient zum Auswerten von Versuchen mit dem modifizierten DIN-Rohr, SDC oder Cone. Es werden Diagramme von Konzentrationsverläufen, Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten erzeugt. . . . .	46

4.5	Auswertetool-Reaktionsgleichungen Dieses Teilprogramm berechnet aus den Mittelwerten, die beim Auswertetool-Diagramme erzeugt werden, Reaktionsgleichungen für ein ausgewähltes Material aus den gemessenen Gaskonzentrationen über die gesamte Versuchszeit. Hier wird eine Reaktionsgleichung für PUR3554 mit den Materialdaten aus dem [DiN08] für die Versuchskonfiguration aus dem DIN-Rohr bei 700 °C und 21 vol% Sauerstoffgehalt für vier Wiederholungsversuche gemittelt berechnet. . . . .	48
4.6	Gesamte mittlere Gasfreisetzung während der DIN-Rohr Versuche . . . . .	55
4.7	SDC mit hervorgehobenen Geometrien mit Randbedingungen . . . . .	56
4.8	Mit CFX berechnete Temperaturverteilung auf der Rückwand in der SDC . . . . .	58
4.9	Mit Thermokamera aufgenommene Wärmebilder der SDC . . . . .	58
4.10	Geometrie des Hotels für die Brandsimulation . . . . .	60
4.11	Wärmefreisetzungsrate in den Brandphasen 1-5 (nach [VDI 6019 Blatt 1, S.10ff]) . . . . .	61
4.12	Gewählte Randbedingungen für Brandphase 1 . . . . .	62
5.1	Darstellung des Netzes in der SDC . . . . .	69
5.2	CO <sub>2</sub> -Konzentration, Transmission bei 25 kW/m <sup>2</sup> in der SDC mit und ohne Zündflamme . . . . .	71
5.3	CO <sub>2</sub> -Konzentration, Transmission bei 25 und 50 kW/m <sup>2</sup> in der SDC mit Zündflamme . . . . .	72
5.4	Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen in der SDC bei 25 kW/m <sup>2</sup> . . . . .	73
5.5	Darstellung des Brandausschnittes mit der strukturierten Vernetzung (grün) und Randbedingungen (blau) in CFX . . . . .	74
5.6	Darstellung des Brandausschnittes mit der strukturierten Vernetzung in FDS . . . . .	75
5.7	Sichtweitenentwicklung an unterschiedlichen Höhenlinien . . . . .	76
5.8	Mit FDS berechnete Wärmestrom, Massenstrom, Temperatur und Dichte im oberen und unterem Volumen, Rauchgasschichthöhe, Temperatur unter der Decke im Brandbereich . . . . .	77
5.9	Sichtweite in 1,7 – 3,0 m Höhe für Gitter mit 0,1 und 0,2 m Kantenlänge . . . . .	78
5.10	Darstellung der Geometrie des Hotels für die Brandsimulation . . . . .	79
5.11	Darstellung der mit CFX berechneten Temperaturen in 3 m Höhe an verschiedenen Zeitpunkten . . . . .	81
5.12	Darstellung der mit FDS berechneten Temperaturen in 3,0 m Höhe für flammende und die nicht-flammende Verbrennung an unterschiedlichen Zeitpunkten . . . . .	83
5.13	Darstellung der mit FDS berechneten Rauchausbreitung und Rauchschichthöhe für den Standard Sootyield für flammende Verbrennungen und den neu berechneten Sootyield für nicht-flammende Verbrennungen an unterschiedlichen Zeitpunkten . . . . .	85
5.14	Rauchschichthöhe am Referenzort (senkrechte blaue Strecke) nach 60 s . . . . .	85

---

5.15	Rauchschichthöhe am Referenzort (senkrechte blaue Strecke) nach 300 s	86
5.16	Hotelgeometrie mit Höhenlinie . . . . .	87
5.17	Mit CFX und FDS berechnete Temperaturen in 8,5 m Entfernung vom Brand nach 300 s . . . . .	87
5.18	Temperaturverteilung im Brandraum unter der Decke in 3,0 m Höhe nach 300 Sekunden . . . . .	88
5.19	Hotelgeometrie mit Sichtlinien . . . . .	89
5.20	Sichtweiten in verschiedenen Höhen bei CFX und FDS für die flammende und nicht-flammende Verbrennung . . . . .	90
6.1	Struktur der Untersuchungen von den Experimenten bis zu den Simulationen . . . . .	94

---

## Tabellenverzeichnis

---

2.1	Ist- und Soll-Werte sowie die prozentuale Abweichung für die Gasanalyse eines Prüfgases mit vier ausgewählten Gaskomponenten mit dem FT-IR Messgerät . . . . .	10
2.2	Vergleich von ausgewählten Strahlungsmodellen (nach [ANS06f]) . . . . .	20
2.3	Vergleich von ausgewählten Verbrennungsmodellen [ANS06f] . . . . .	21
2.4	Vergleich von ausgewählten Strahlungsmodellen (nach [ANS06f]) . . . . .	22
3.1	Summenformeln der Edukte (siehe [DiN08]) . . . . .	31
3.2	Berechnete stöchiometrische Koeffizienten Material A (PUR3554) . . . . .	32
3.3	Berechnete stöchiometrische Koeffizienten Material B (PUR3045SE) . . . . .	33
3.4	Berechnete stöchiometrische Koeffizienten Material C (PVC) . . . . .	34
4.1	Messgeräte und aufgezeichnete Dateien . . . . .	44
4.2	Vom FT-IR gemessene Gase und diejenigen Gase, die für die Bestimmung der Reaktionsgleichungen ausgewählt wurden. . . . .	49
4.3	Parameterstudie zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Cone-Strahlers für 25 und 50 $kW/m^2$ . Passende Werte sind grün eingefärbt. Die Zahl in der Klammer ist ein Mittelwert aus den SDC-Versuchen . . . . .	57
4.4	Randbedingungen der SDC . . . . .	59
4.5	Randbedingungen des Brandszenarios in der Hotellobby . . . . .	63
5.1	Geometriedaten, Rand- und Gebietsbedingungen und Solvereinstellungen . . . . .	68
5.2	Geometriedaten, Rand- und Gebietsbedingungen . . . . .	80
5.3	Geometriedaten, Rand- und Gebietsbedingungen . . . . .	82
5.4	Rechenzeiten von CFX und FDS. Die maximale Simulationszeit beträgt in CFX 300 s und in FDS 500 s. Die Zeiten schwanken pro Gitter aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen. . . . .	91

# ANHANG A

---

## Begriffe

---

Dies ist eine Auflistung der wichtigen in der Arbeit benutzten Begriffe aus der Norm DIN EN ISO 13943 [DIN EN ISO 13943].

**Abklingen des Feuers/Brands** – Phase des Brandablaufs, nachdem ein Brand bzw. ein Feuer seine maximale Intensität erreicht und überschritten hat und bei der sowohl die Wärmefreisetzungsrate als auch die Temperatur des Brands bzw. des Feuers wieder abnehmen

**andauerndes Brennen mit Flamme/anhaltende Flammenbildung** – Auftreten einer Flamme auf oder über der Oberfläche eines Probekörpers über eine Dauer, die eine festgelegte Dauer überschreitet (vgl. oberflächige Flammerscheinung und transiente Flamme)

*ANMERKUNG: Die festgelegte Dauer ist von Norm zu Norm verschieden.*

**Bemessungsbrand** – quantitative Beschreibung der angenommenen Eigenschaften eines Brands innerhalb des Bemessungsbrandszenarios

*ANMERKUNG: Der Bemessungsbrand ist typischerweise eine idealisierte Darstellung der zeitlichen Veränderung wichtiger Brandvariablen wie z. B. Wärmefreisetzungsrate, Flammenausbreitungsgeschwindigkeit, Rauchentwicklungsgeschwindigkeit, Freisetzungsgeschwindigkeit von toxischen Gasen und Temperatur.*

**Brandmodell/Brandsimulation** – Berechnungsverfahren, das ein System oder einen Vorgang in Bezug auf die Entwicklung eines Brands einschließlich Branddynamik und Brandauswirkungen beschreibt (vgl. deterministisches Modell, numerisches Brandmodell, physikalisches Brandmodell und probabilistisches Modell)

**Brennbarkeit (eng.: flammability)** – Eigenschaft eines Werkstoffs oder Erzeugnisses, unter festgelegten Bedingungen mit Flammenbildung zu brennen

**brennstoffarme Verbrennung** – Verbrennung, bei der das stöchiometrische Äquivalenzverhältnis kleiner als eins ist

*ANMERKUNG: In einem gut ventilierten Feuer bzw. Brand ist das Brennstoff/Luft-Gemisch brennstoffarm, und es kommt in der Regel zu einer vollständigen Verbrennung.*

**brennstoffreiche Verbrennung** – Verbrennung, bei der das stöchiometrische Äquivalenzverhältnis größer als eins ist

*ANMERKUNG: In einem ventilationsgesteuerten Feuer bzw. Brand ist das Brennstoff/Luft-Gemisch brennstoffreich, so dass relativ hohe Konzentrationen an Pyrolyseprodukten gebildet werden und eine unvollständige Verbrennung stattfindet.*

**Deckenstrahl/Ceiling-jet** – Gasstrom innerhalb einer Heißgasschicht direkt unterhalb einer Decke, ausgelöst durch eine Feuerplume

**Emissionsgrad** – Quotient aus der von einer Strahlungsquelle erzeugten Strahlung und der Strahlung, die bei der gleichen Temperatur von einem Planck'schen Strahler erzeugt würde

*ANMERKUNG: Der Emissionsgrad ist dimensionslos.*

**entflammbar** – Fähigkeit, unter festgelegten Bedingungen mit einer Flamme zu brennen

**Extinktionskoeffizient** – natürlicher Logarithmus des Quotienten aus der Intensität des einfallenden Lichts und der verringerten Intensität des Lichts nach Durchgang durch ein Medium in Abhängigkeit von der Weglänge des Lichts

*ANMERKUNG: Der Extinktionskoeffizient wird üblicherweise je Meter ( $m^{-1}$ ) angegeben.*

**Feuerplume** – oberhalb eines Feuers aufsteigender Rauchgasstrom sowie alle darin enthaltenen Partikel (vgl. Plume)

**Flamme** – schneller, in der Gasphase unterhalb der Schallgeschwindigkeit ablaufender, sich selbst erhaltender Verbrennungsvorgang; üblicherweise unter Lichtemission

**fortschreitendes Schwelen** – Ausbreitung einer exothermen Oxidation ohne Verbrennung mit Flammeneerscheinung

*ANMERKUNG: Kann mit einem Glühen einhergehen.*

**Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie/FT-IR** – analytisches chemisches Verfahren auf der Grundlage der Spektroskopie, bei dem die molekularen Bindungen in einer Gasprobe durch gepulste Breitband-Infrarotstrahlung angeregt werden und ein Absorptionsspektrum durch Anwendung der Fourier-Transformation berechnet wird

*ANMERKUNG: FT-IR kann zur gleichzeitigen Bestimmung der Konzentration(en) der Gase in einer Gasmischung angewendet werden und ist daher für die Analyse von flüchtigen Verbrennungsprodukten geeignet.*

**Glimmen** – Brennen eines Werkstoffs im festen Aggregatzustand ohne Flammen, jedoch mit Emission von Licht aus dem Verbrennungsbereich (vgl. Glühen)

**Glühen (engl. glowing)** – durch Hitze ausgelöste Leuchterscheinung

**Glühen (engl. incandescence)** – Lichtemission eines stark erhitzten Materials

*ANMERKUNG: Dies kann durch Materialien in flüssigem oder festem Zustand mit oder ohne Verbrennung erfolgen.*

**Lichtdurchlässigkeit (von Rauch)/Transmissionsgrad** – Verhältnis der Intensität des Lichts nach Durchgang durch Rauch und der Intensität des einfallenden Lichts unter festgelegten Bedingungen (vgl. Sichtminderung durch Rauch)

*ANMERKUNG 1: Die Lichtdurchlässigkeit von Rauch ist der reziproke Wert zur Lichtschwächung durch Rauch.*

*ANMERKUNG 2: Die Lichtdurchlässigkeit ist dimensionslos und wird üblicherweise als Prozentsatz angegeben.*



**Lichtschwächung durch Rauch** – Verhältnis der Intensität des einfallenden Lichts und der verringerten Intensität des Lichts nach Durchgang durch Rauch unter festgelegten Bedingungen (vgl. Sichtminderung durch Rauch)

*ANMERKUNG 1: Die Lichtschwächung durch Rauch ist der reziproke Wert zur Lichtdurchlässigkeit von Rauch*

*ANMERKUNG 2: Die Lichtschwächung durch Rauch ist dimensionslos.*

**mit Flammenbildung** – fortgesetzte Flammenbildung nach ihrem ersten Auftreten

**Nachbrennen** – Dauer des anhaltenden Nachbrennens unter bestimmten Bedingungen

**Nachglimmen** – andauerndes Glimmen, nachdem sowohl die Zündquelle entfernt wurde als auch alle Flammen erloschen sind

**nicht entflammbar** – nicht fähig, unter festgelegten Bedingungen mit einer Flamme zu brennen

**numerisches Brandmodell** – mathematische Darstellung einer oder mehrerer unterschiedlicher zusammenwirkender Prozesse, die eine Brandentwicklung maßgeblich beeinflussen

**optische Rauchdichte** – Maß für die Reduktion eines Lichtstrahls, der durch den Rauch hindurchtritt, ausgedrückt als dekadischer Logarithmus der Lichtschwächung durch Rauch (vgl. spezifische optische Rauchdichte)

*ANMERKUNG: Die optische Rauchdichte ist dimensionslos.*

**Plume (auftriebsbehafteter Massestrom)** – durch konvektive Auftriebseinflüsse nach oben steigender Massestrom oberhalb einer Wärmequelle (vgl. Feuerplume)

**Pyrolyse** – durch Wärme erzeugte chemische Zersetzung eines Werkstoffs

*ANMERKUNG 1: Der Begriff „Pyrolyse“ bezieht sich oft auf das Stadium eines Brands vor Beginn der Verbrennung mit Flammeneerscheinung.*

*ANMERKUNG 2: Unter Brandfachleuten werden keine Annahmen zum Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein von Sauerstoff getroffen.*

**Rauch** – sichtbarer Teil der flüchtigen Verbrennungsprodukte

**Ruß** – Partikel, die während oder nach der Verbrennung entstehen und sich ablagern

*ANMERKUNG: Ruß besteht üblicherweise aus fein verteilten Partikeln, hauptsächlich aus Kohlenstoff, die von der unvollständigen Verbrennung eines organischen Materials herrühren.*

**Sauerstoff-Index/Sauerstoffgrenzwert** – minimaler Volumenanteil an Sauerstoff in einem Sauerstoff-/Stickstoffgemisch bei  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , der eine Verbrennung mit Flammeneerscheinung unter festgelegten Bedingungen gerade noch ermöglicht

*ANMERKUNG: Der Sauerstoff-Index wird gewöhnlich in Prozent angegeben.*

**Schwelen** – Brennen eines Materials ohne Flammenbildung und ohne sichtbares Licht (vgl. Glimmen)

*ANMERKUNG: In der Regel wird das Schwelen durch einen Temperaturanstieg und/oder durch die Entwicklung von flüchtigen Verbrennungsprodukten charakterisiert.*

**selbständiges Weiterbrennen** – Ausbreitung einer Flammenfront nach Wegnahme der Zündquelle

**Sichtweite** – maximaler Abstand, bei dem ein Objekt mit festgelegter Größe, festgelegter Helligkeit und festgelegtem Kontrast gesehen und erkannt werden kann

**stöchiometrische Verbrennung** – Verbrennung, bei der das stöchiometrische Äquivalenzverhältnis eins beträgt

**stöchiometrisches Äquivalenzverhältnis** – Quotient aus dem Brennstoff/Luft-Verhältnis und dem für ein stöchiometrisches Gemisch erforderlichen Brennstoff/Luft-Verhältnis (vgl. brennstoffarme Verbrennung, brennstoffreiche Verbrennung, stöchiometrische Verbrennung und stöchiometrisches Gemisch)

*ANMERKUNG 1: Trockene Normluft enthält einen Volumenanteil von 20,95% an Sauerstoff. In der Praxis kann die Sauerstoffkonzentration in einem eingeschlossenen Luftvolumen davon abweichen, so dass die Sauerstoffkonzentration im Verhältnis zur trockenen Normluft berechnet werden muss.*

*ANMERKUNG 2: Das stöchiometrische Äquivalenzverhältnis ist dimensionslos.*

**thermische Zersetzung** – Vorgang, bei dem die Einwirkung von Wärme oder erhöhten Temperaturen auf ein Material zu einer Veränderung der chemischen Zusammensetzung führt

*ANMERKUNG: Nicht gleichzusetzen mit der thermischen Schädigung.*

**Verbrennung** – exotherme Reaktion eines Stoffs mit einem Oxidationsmittel

*ANMERKUNG: Bei der Verbrennung werden flüchtige Verbrennungsprodukte freigesetzt; im Allgemeinen treten dabei Flammen und/oder Glühen auf.*

**Verbrennung mit Flammenteerscheinung** – Verbrennung in der Gasphase, üblicherweise begleitet von Lichtemission

**Verbrennungseffektivität** – Quotient aus der freigesetzten Wärme bei unvollständiger Verbrennung und der Wärme, die rechnerisch bei einer vollständigen Verbrennung freigesetzt wird

*ANMERKUNG 1: Die Verbrennungseffektivität lässt sich nur für die Fälle berechnen, in denen die vollständige Verbrennung definiert werden kann.*

*ANMERKUNG 2: Die Verbrennungseffektivität ist dimensionslos und wird üblicherweise in Prozent angegeben.*

**vollständige Verbrennung** – Verbrennung, bei der alle Verbrennungsprodukte vollständig oxidiert werden

*ANMERKUNG 1: Das bedeutet, dass mit Sauerstoff als Oxidationsmittel sämtlicher Kohlenstoff in Kohlendioxid und sämtlicher Wasserstoff in Wasser umgewandelt wird.*

*ANMERKUNG 2: Sind andere Elemente als Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff im brennbaren Material vorhanden, werden diese Elemente in Produkte umgewandelt, die in ihrem Standardzustand bei 298 K am stabilsten sind.*

**Wärmefreisetzung** – Wärmeenergie, die während der Verbrennung freigesetzt wird

*ANMERKUNG: Die Wärmefreisetzung wird üblicherweise in Joule (J) angegeben.*

**Wärmefreisetzungsrates/Brandleistung** – Geschwindigkeit, mit der eine bestimmte Wärmemenge bei der Verbrennung freigesetzt wird

*ANMERKUNG: Die Wärmefreisetzungsrates wird üblicherweise in Watt (W) angegeben.*

**Zündgrenze** – Konzentration von Brennstoffgasen in Luft, unterhalb der die Ausbreitung einer Flamme bei Einwirkung einer Zündquelle nicht stattfindet (vgl. untere Zündgrenze und obere Zündgrenze)

*ANMERKUNG: Die Konzentration wird üblicherweise als Volumenanteil bei einer festgelegten Temperatur und einem festgelegten Druck in Prozent angegeben.*



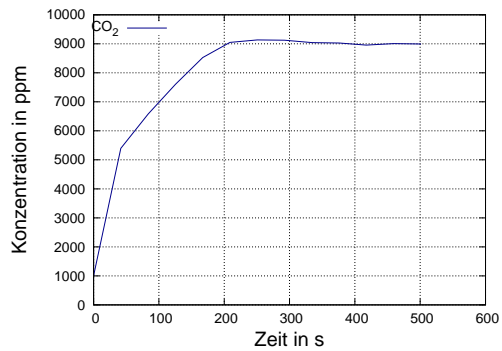
# ANHANG B

## Versuchsdaten SDC

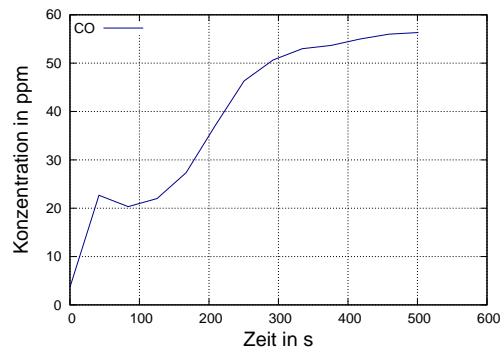
Ausgewertete gemittelte Gaskonzentrationen aller SDC Versuche für die Materialien PUR3554 und PUR3045SE für die Bestrahlungsstärken 25 und 50  $kW/m^2$  mit und ohne Zündflamme.

### B.1 PUR3554

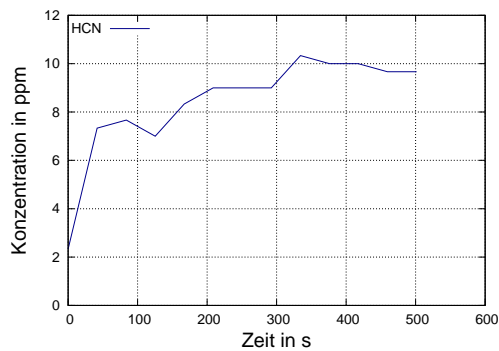
PUR3554 25  $kW/m^2$



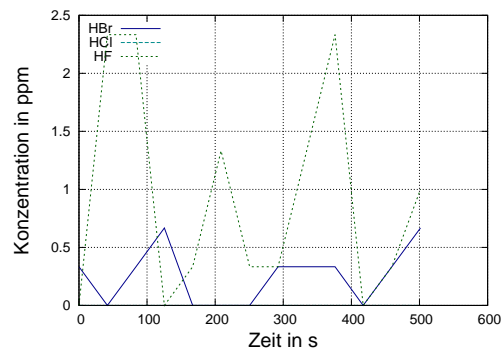
(a)



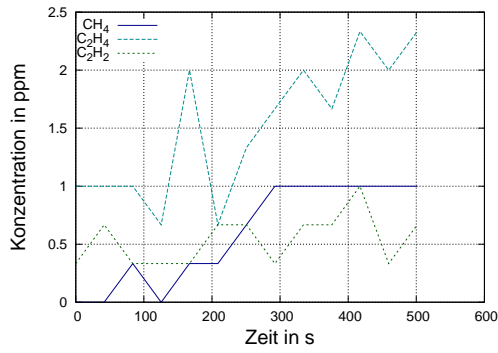
(b)



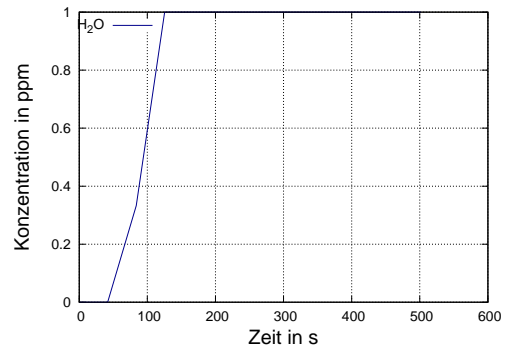
(c)



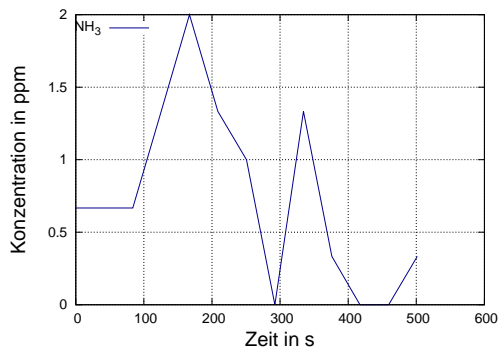
(d)



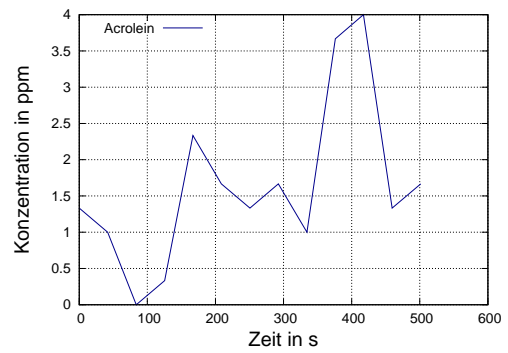
(e)



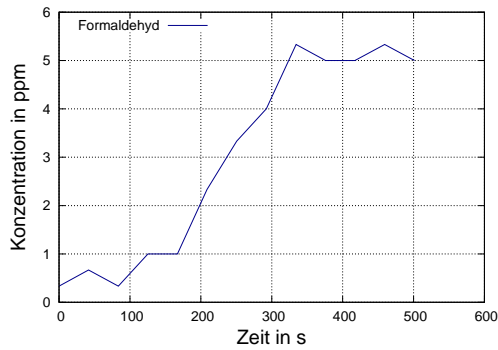
(f)



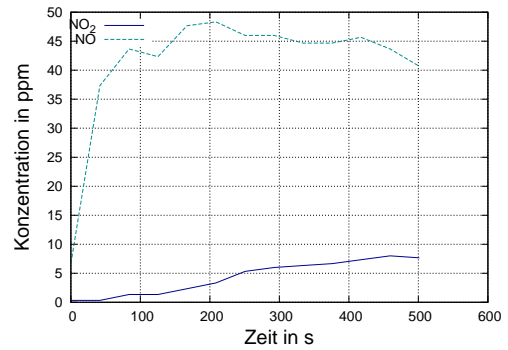
(g)



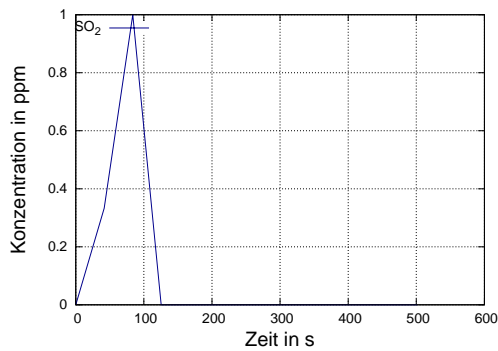
(h)



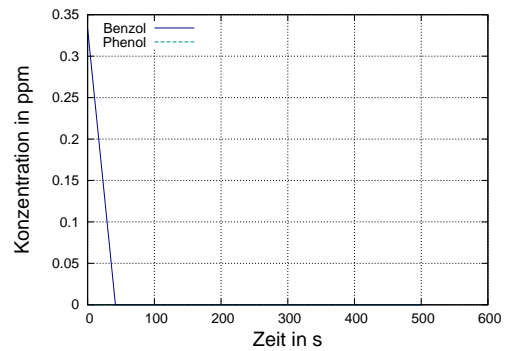
(i)



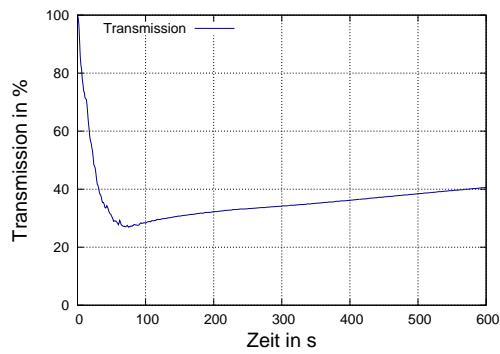
(j)



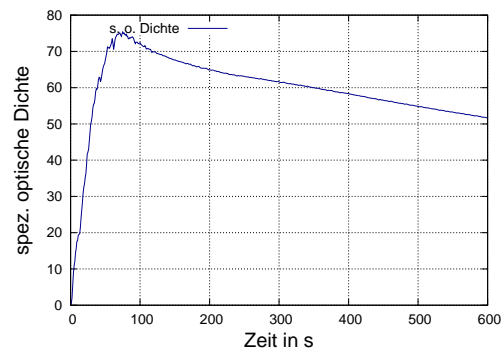
(k)



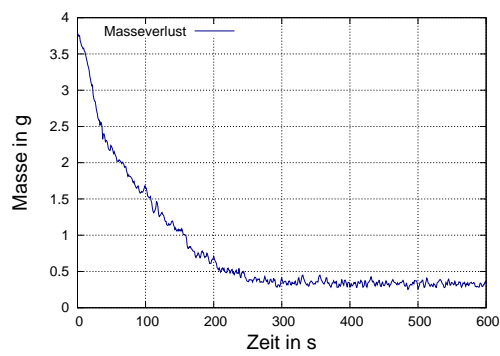
(l)



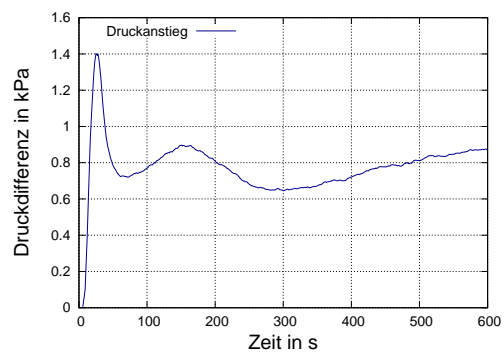
(m)



(n)

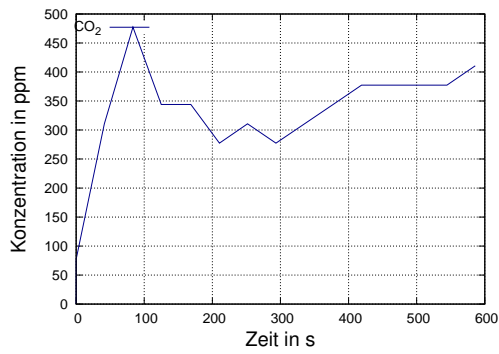


(o)

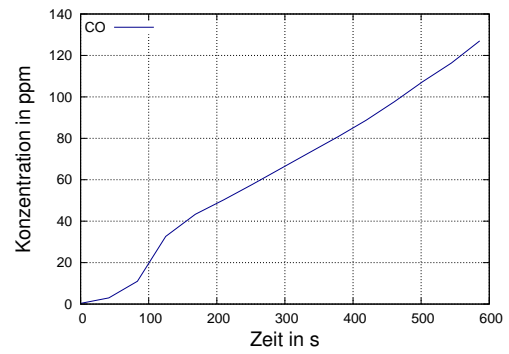


(p)

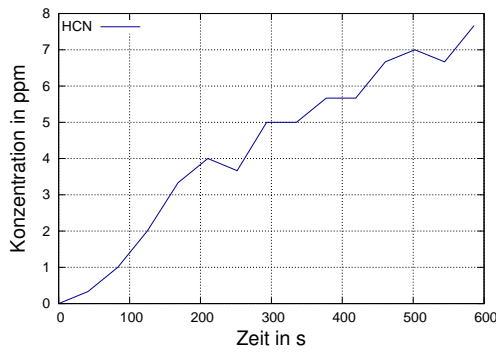
**Abbildung B.1:** (a) Kohlenstoffdioxid; (b) Kohlenstoffmonoxid; (c) Cyanwasserstoff; (d) Halogenwasserstoffe; (e) Methan, Ethen, Ethin; (f) Wasser; (g) Ammoniak; (h) Acrolein; (i) Formaldehyd; (j) Stickoxide; (k) Schwefeldioxid; (l) Benzol und Phenol ; (m) Transmission ; (n) spezifische optische Dichte ; (o) Masseverlust ; (p) relativer Druckanstieg.

PUR3554 25 kW/m<sup>2</sup> ohne Flamme

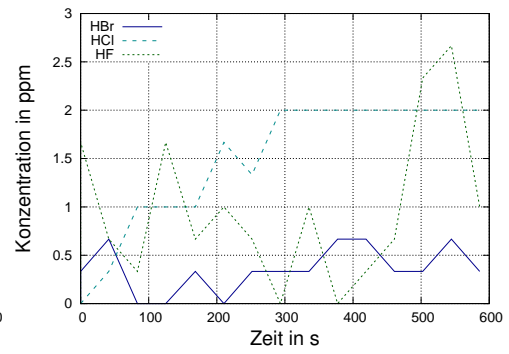
(a)



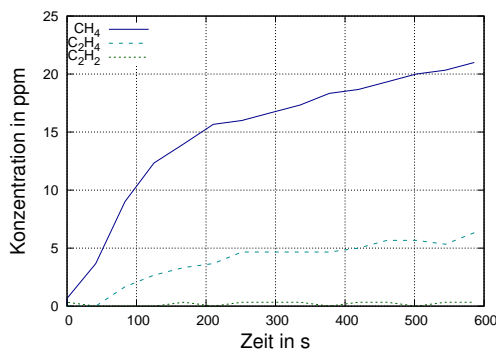
(b)



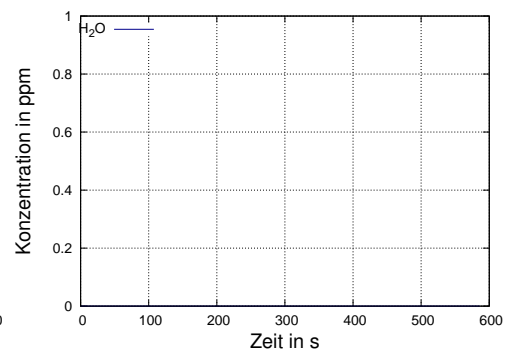
(c)



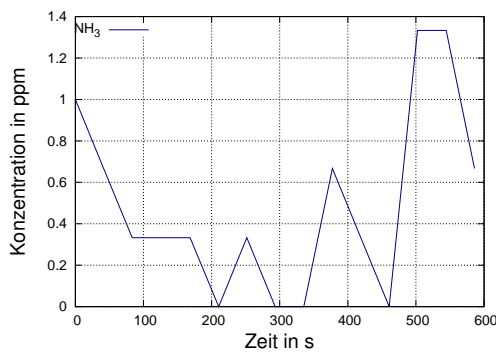
(d)



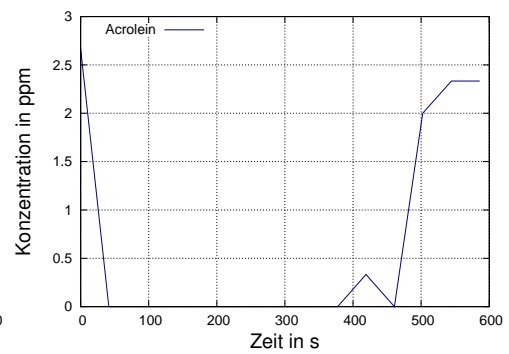
(e)



(f)

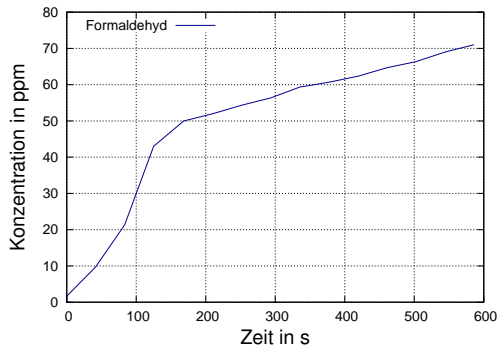


(g)

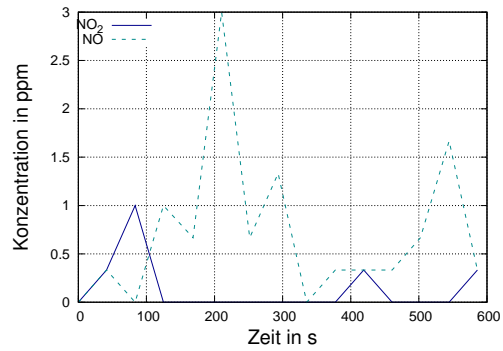


(h)

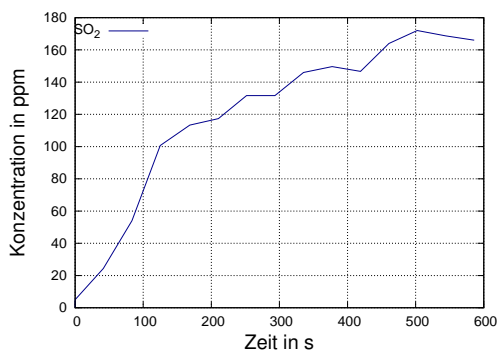




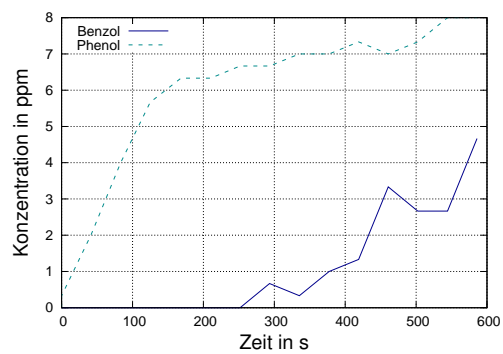
(i)



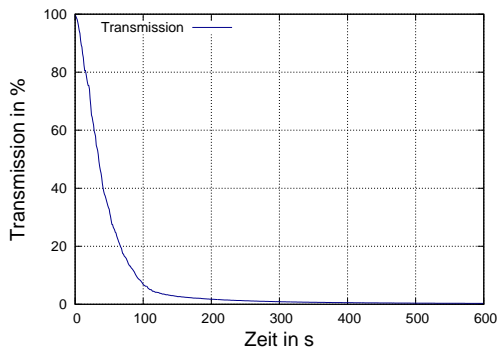
(j)



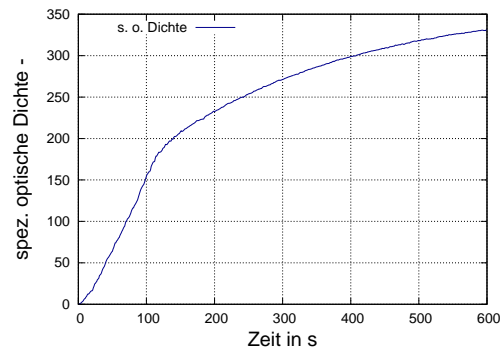
(k)



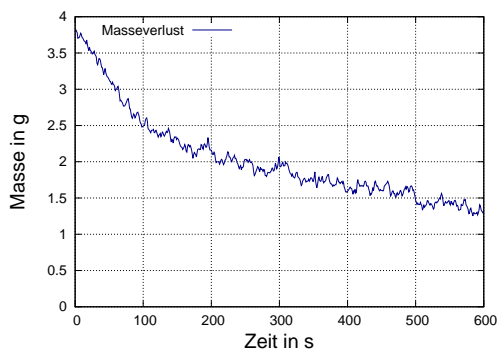
(l)



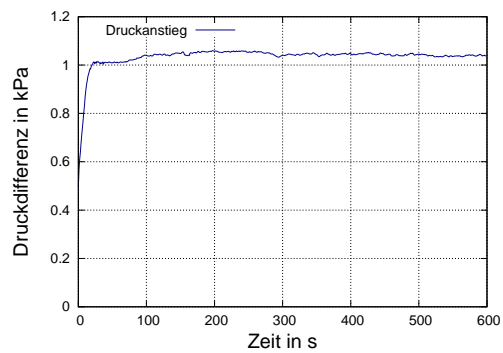
(m)



(n)

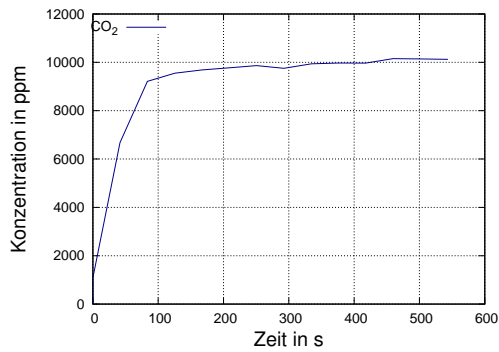


(o)

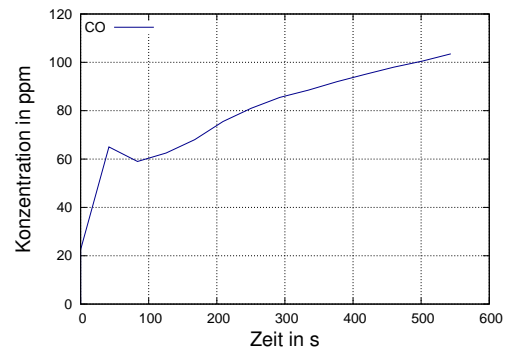


(p)

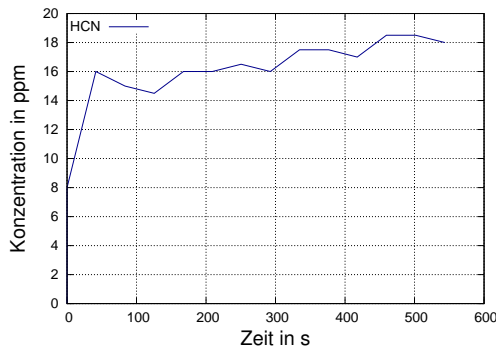
**Abbildung B.2:** (a) Kohlenstoffdioxid; (b) Kohlenstoffmonoxid; (c) Cyanwasserstoff; (d) Halogenwasserstoffe; (e) Methan, Ethen, Ethin; (f) Wasser; (g) Ammoniak; (h) Acrolein; (i) Formaldehyd; (j) Stickoxide; (k) Schwefeldioxid; (l) Benzol und Phenol ; (m) Transmission ; (n) spezifische optische Dichte ; (o) Masseverlust ; (p) relativer Druckanstieg.

PUR3554  $50 \text{ kW/m}^2$ 

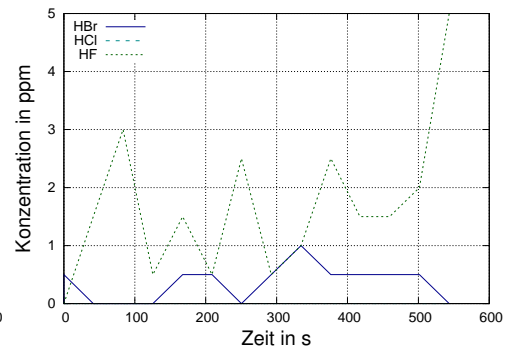
(a)



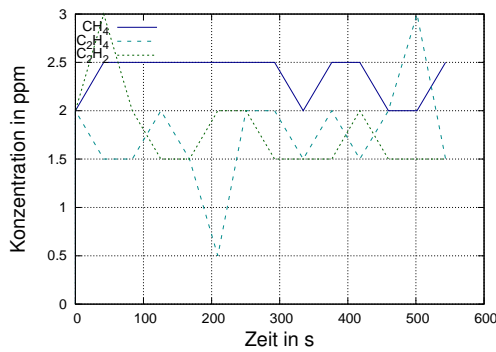
(b)



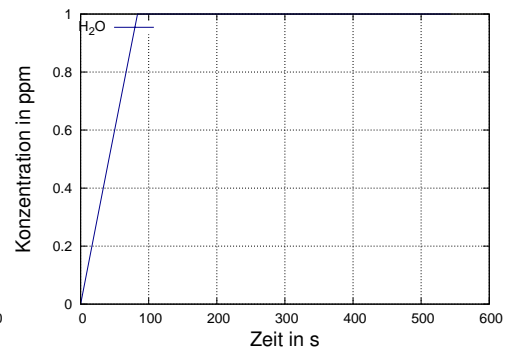
(c)



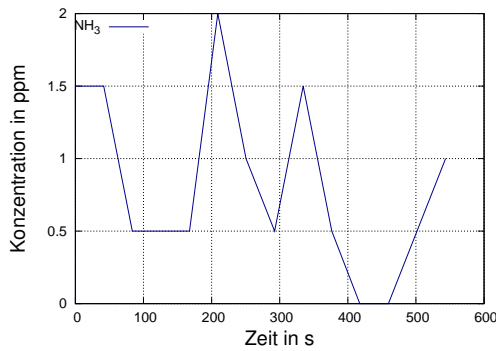
(d)



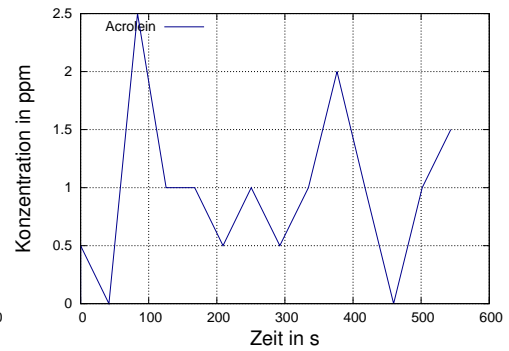
(e)



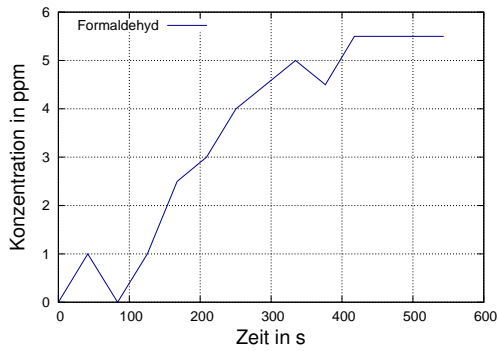
(f)



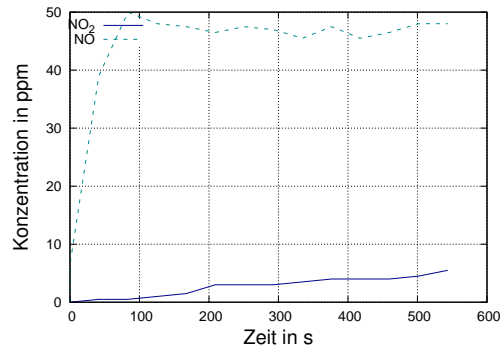
(g)



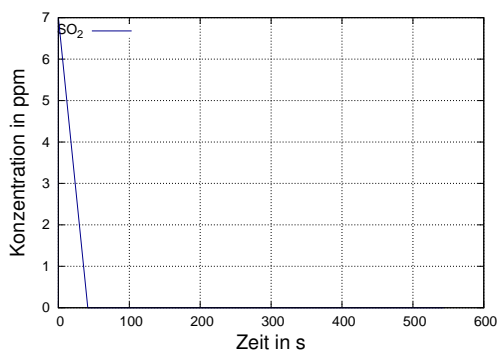
(h)



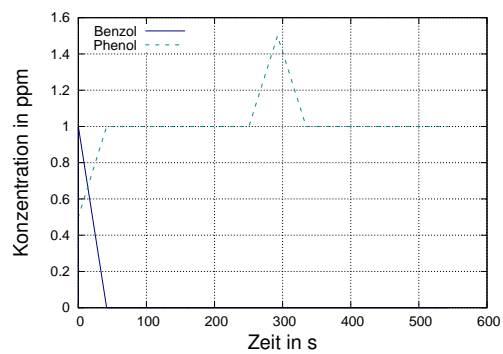
(i)



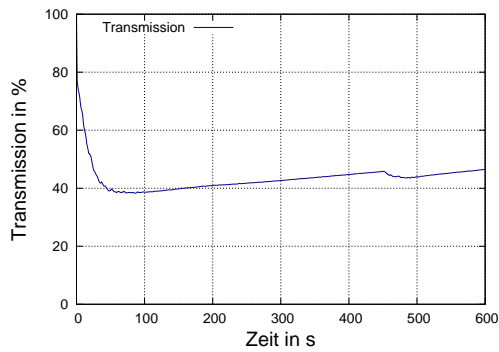
(j)



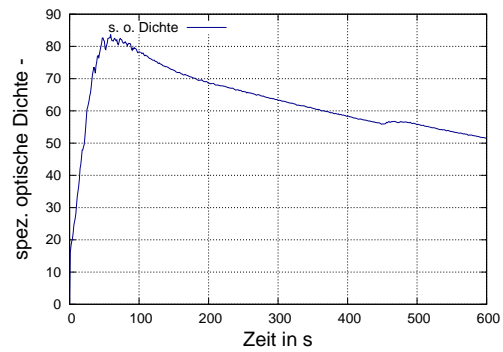
(k)



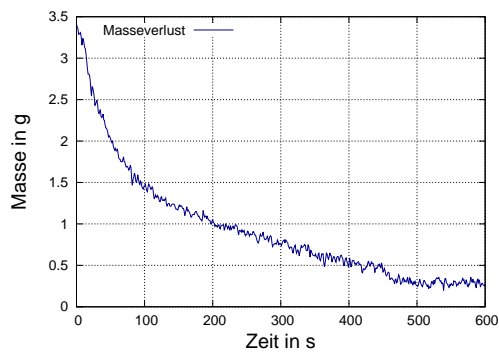
(l)



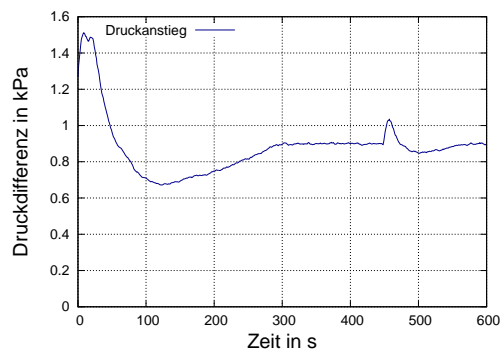
(m)



(n)



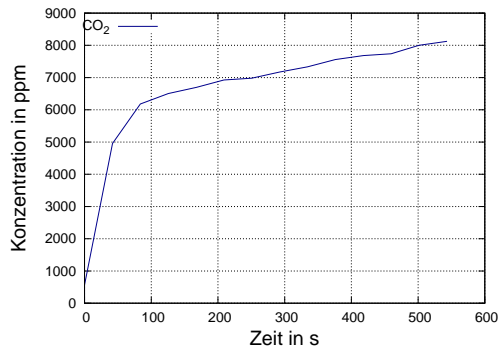
(o)



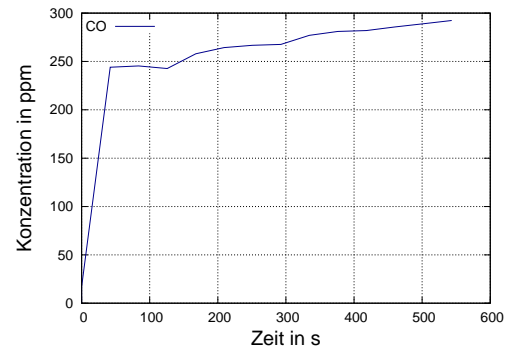
(p)

**Abbildung B.3:** (a) Kohlenstoffdioxid; (b) Kohlenstoffmonoxid; (c) Cyanwasserstoff; (d) Halogenwasserstoffe; (e) Methan, Ethen, Ethin; (f) Wasser; (g) Ammoniak; (h) Acrolein; (i) Formaldehyd; (j) Stickoxide; (k) Schwefeldioxid; (l) Benzol und Phenol ; (m) Transmission ; (n) spezifische optische Dichte ; (o) Masseverlust ; (p) relativer Druckanstieg.

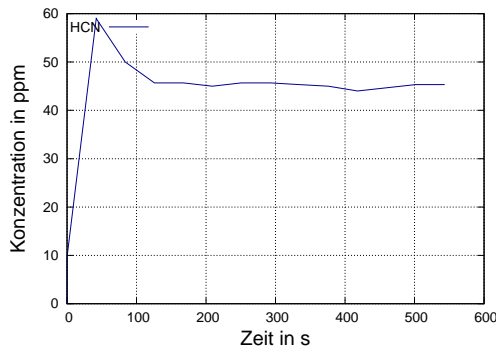
## B.2 PUR3045SE

PUR3045SE  $25 \text{ kW/m}^2$ 

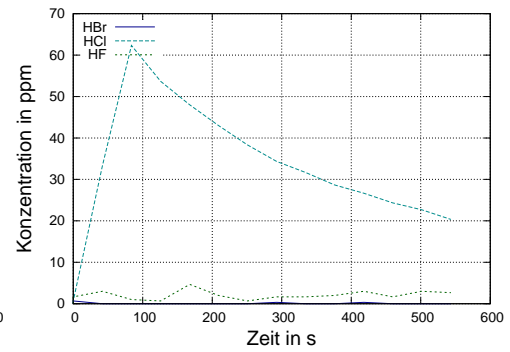
(a)



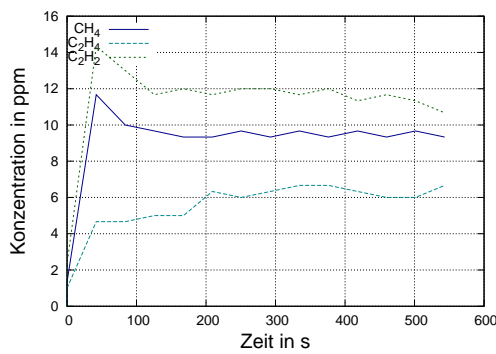
(b)



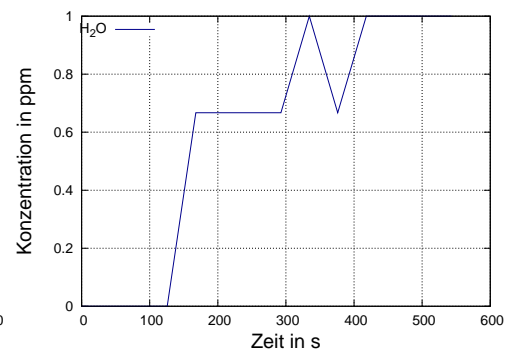
(c)



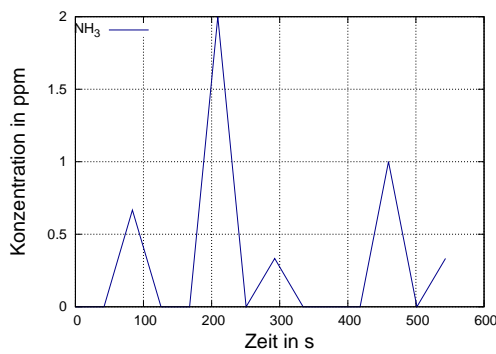
(d)



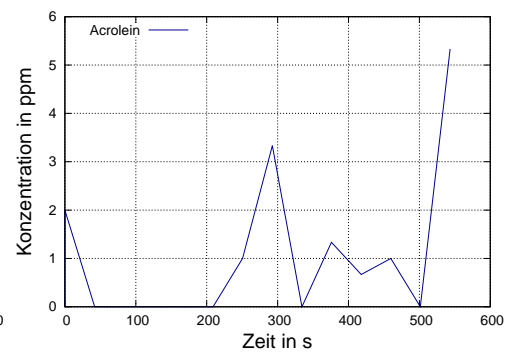
(e)



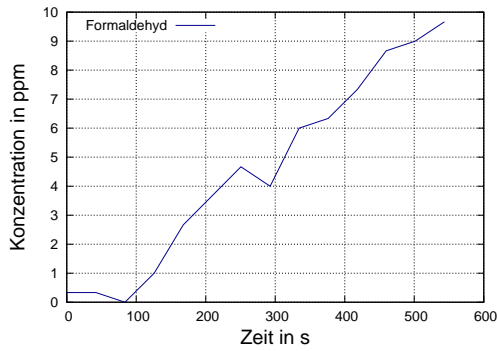
(f)



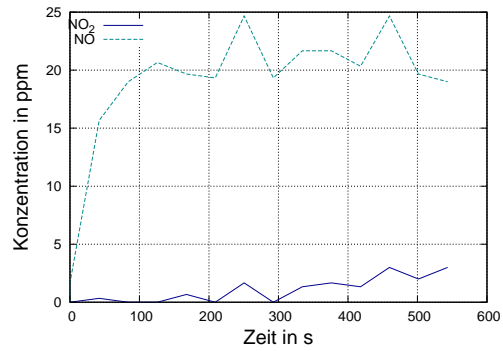
(g)



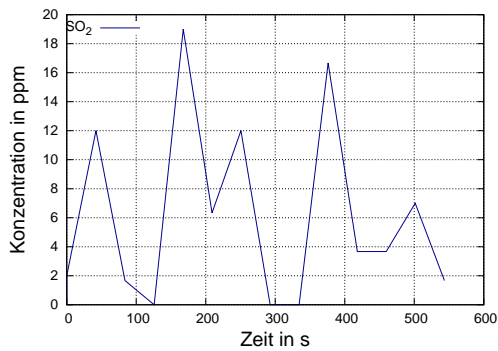
(h)



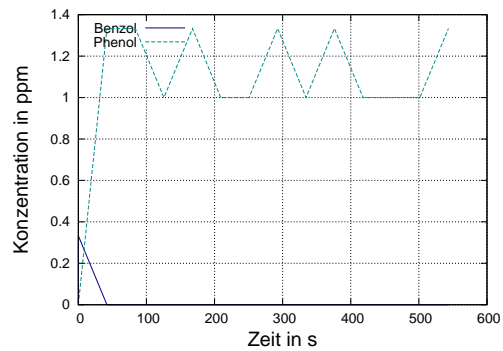
(i)



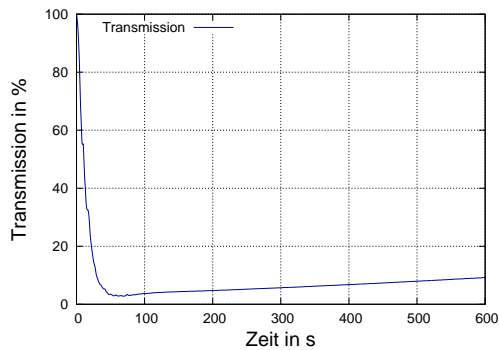
(j)



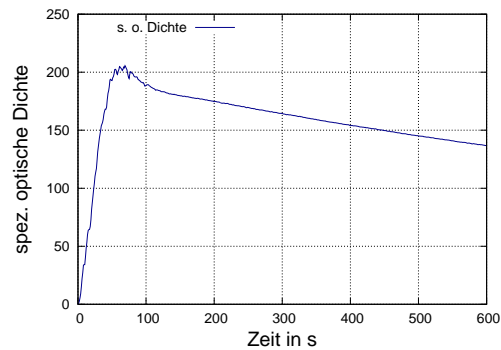
(k)



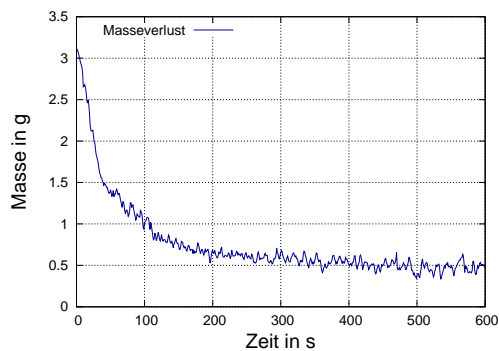
(l)



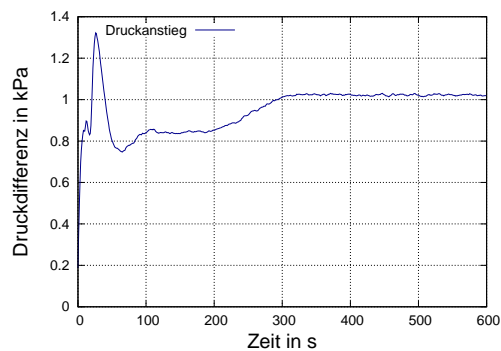
(m)



(n)

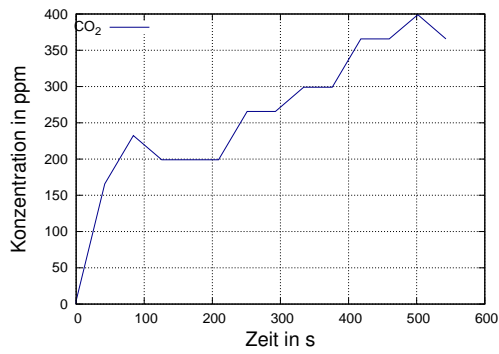


(o)

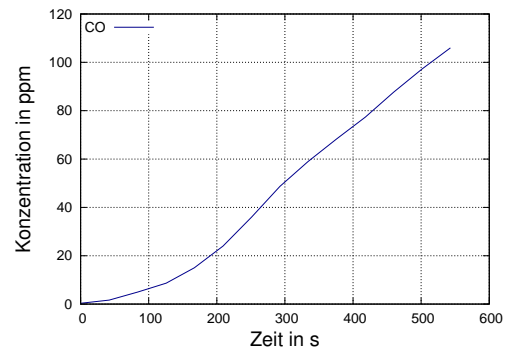


(p)

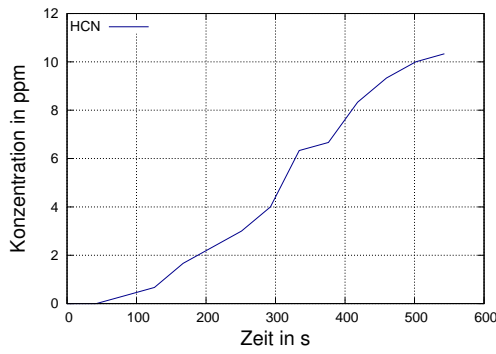
**Abbildung B.4:** (a) Kohlenstoffdioxid; (b) Kohlenstoffmonoxid; (c) Cyanwasserstoff; (d) Halogenwasserstoffe; (e) Methan, Ethen, Ethin; (f) Wasser; (g) Ammoniak; (h) Acrolein; (i) Formaldehyd; (j) Stickoxide; (k) Schwefeldioxid; (l) Benzol und Phenol ; (m) Transmission ; (n) spezifische optische Dichte ; (o) Masseverlust ; (p) relativer Druckanstieg.

PUR3045SE 25 kW/m<sup>2</sup> ohne Flamme

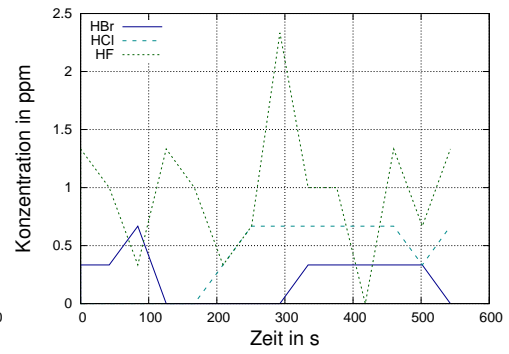
(a)



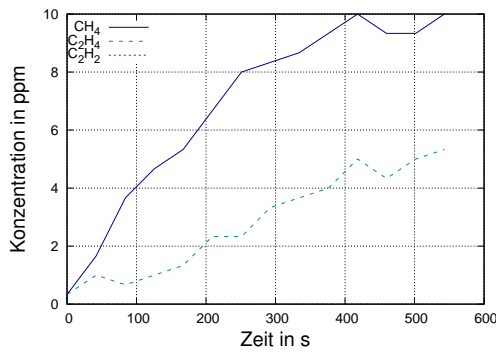
(b)



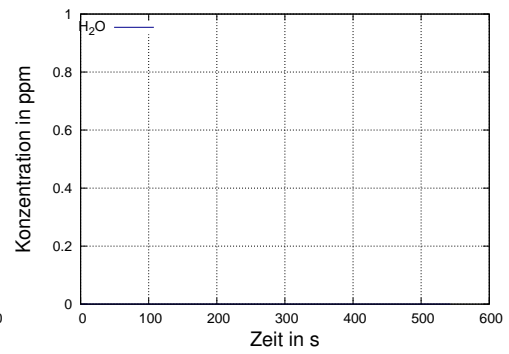
(c)



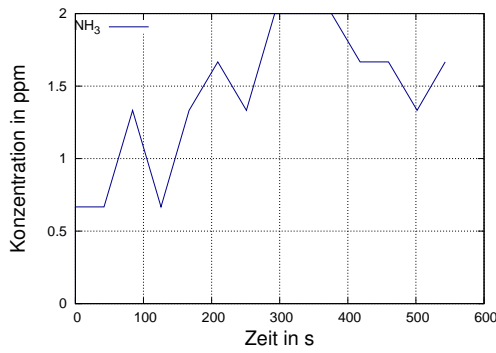
(d)



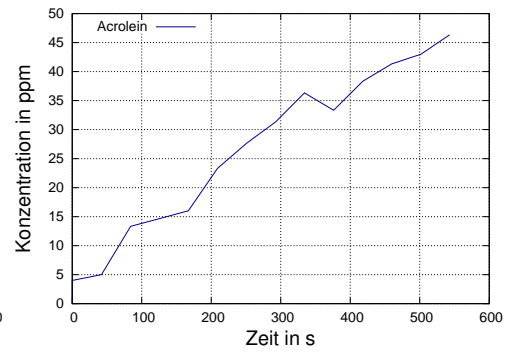
(e)



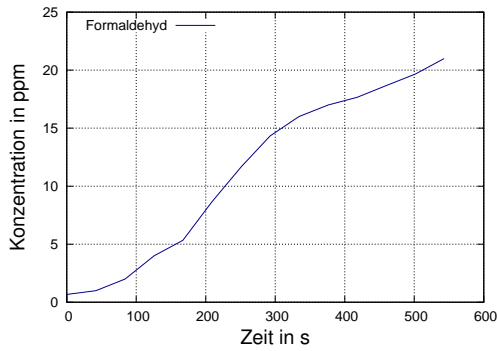
(f)



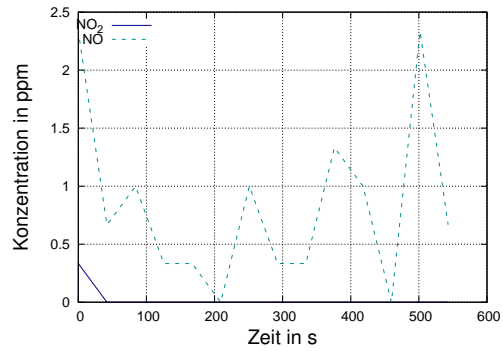
(g)



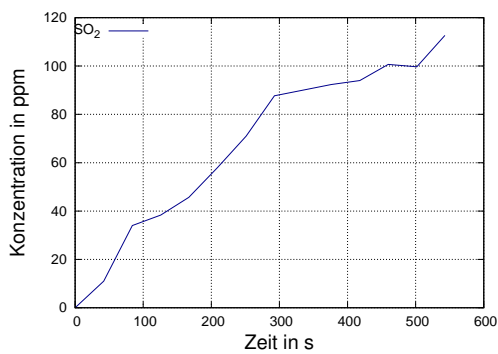
(h)



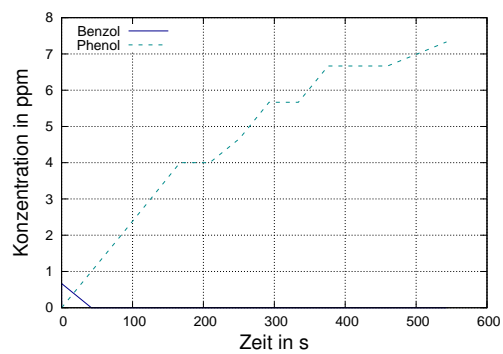
(i)



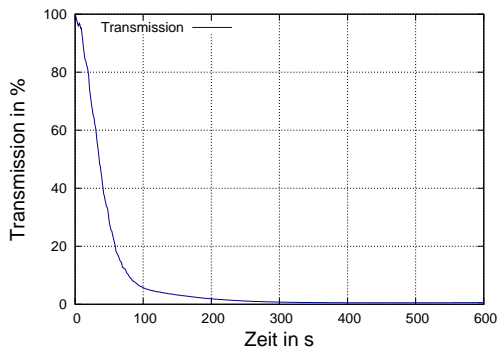
(j)



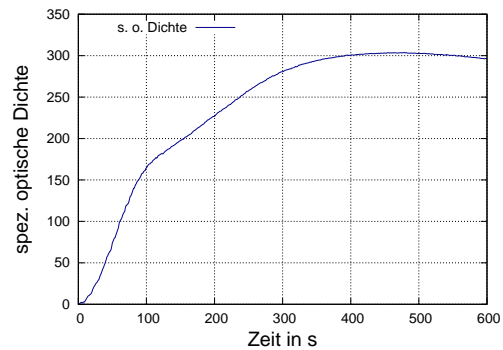
(k)



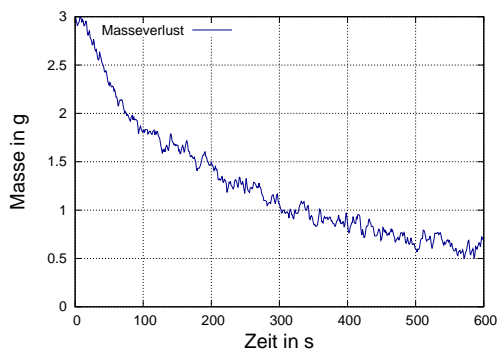
(l)



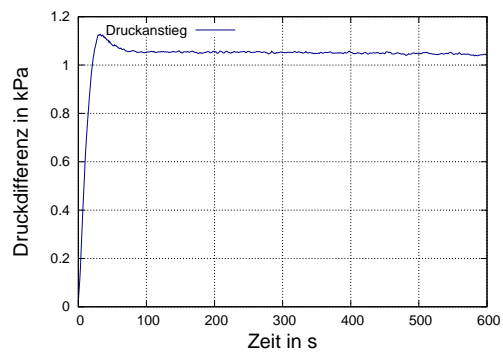
(m)



(n)

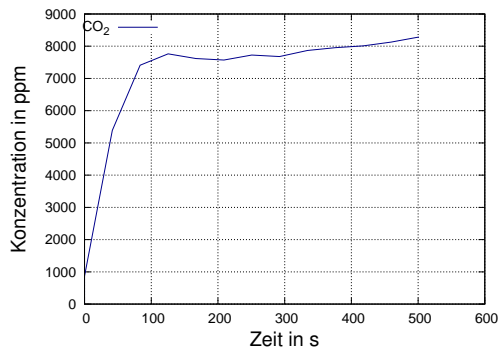


(o)

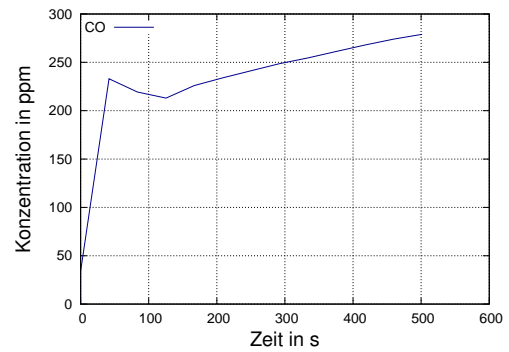


(p)

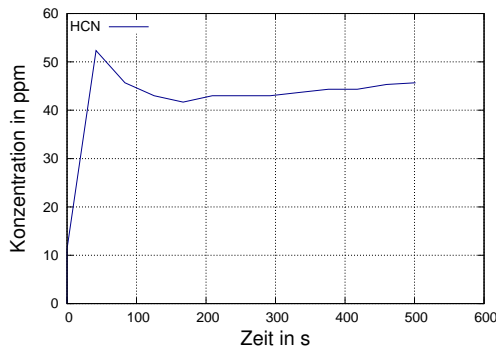
**Abbildung B.5:** (a) Kohlenstoffdioxid; (b) Kohlenstoffmonoxid; (c) Cyanwasserstoff; (d) Halogenwasserstoffe; (e) Methan, Ethen, Ethin; (f) Wasser; (g) Ammoniak; (h) Acrolein; (i) Formaldehyd; (j) Stickoxide; (k) Schwefeldioxid; (l) Benzol und Phenol ; (m) Transmission ; (n) spezifische optische Dichte ; (o) Masseverlust ; (p) relativer Druckanstieg.

PUR3045SE 50 kW/m<sup>2</sup>

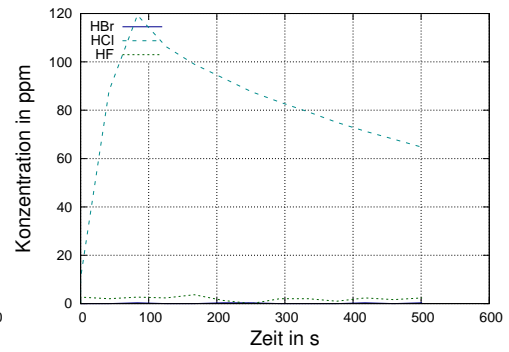
(a)



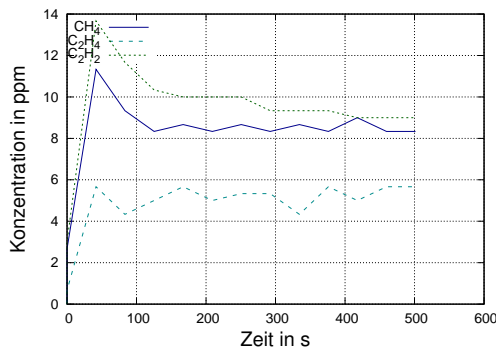
(b)



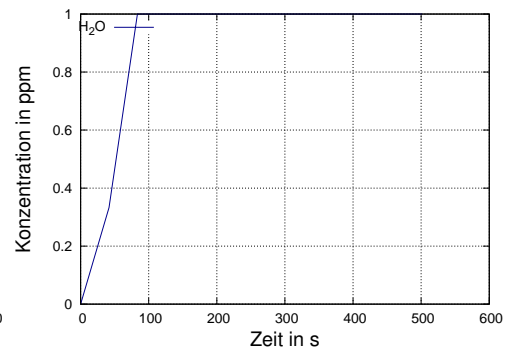
(c)



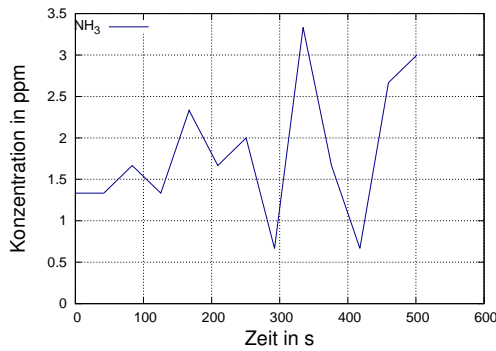
(d)



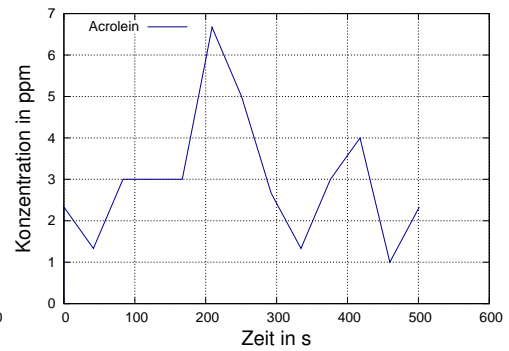
(e)



(f)

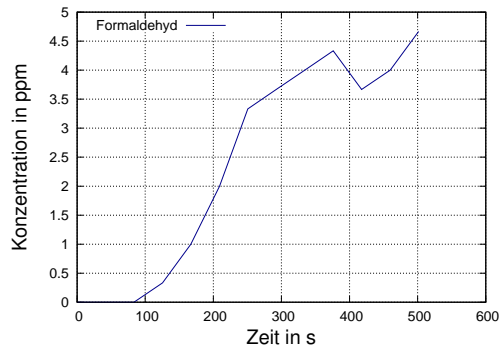


(g)

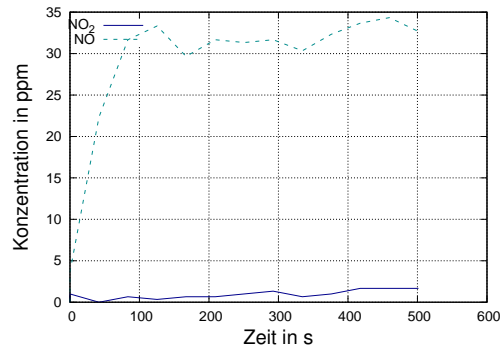


(h)

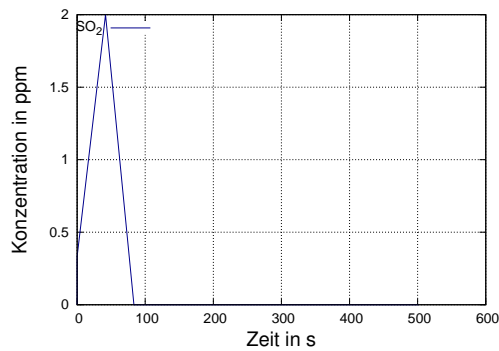




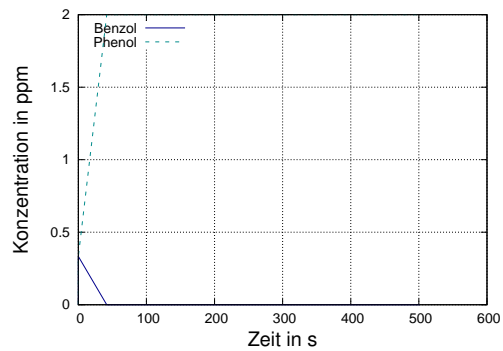
(i)



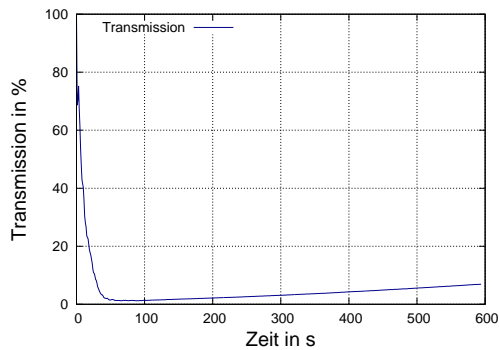
(j)



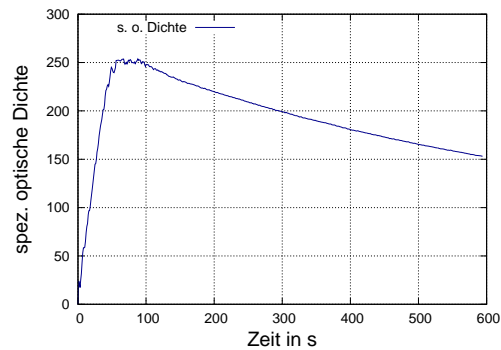
(k)



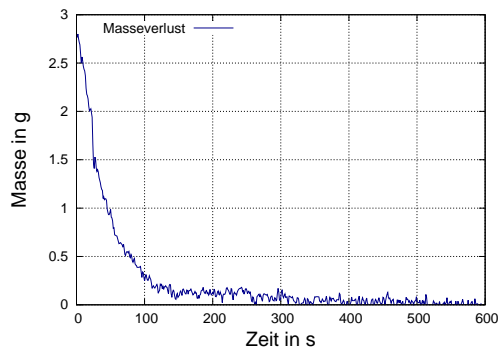
(l)



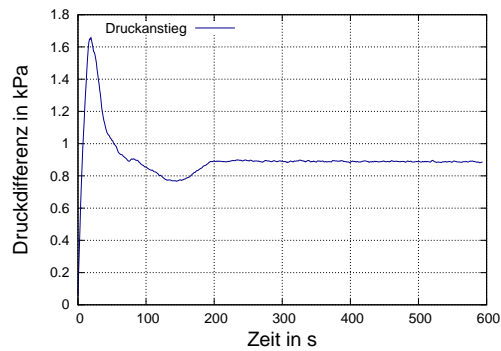
(m)



(n)



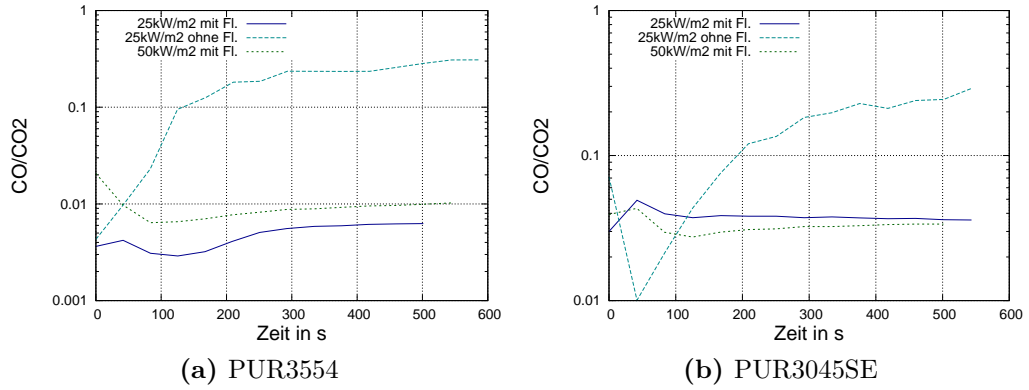
(o)



(p)

**Abbildung B.6:** (a) Kohlenstoffdioxid; (b) Kohlenstoffmonoxid; (c) Cyanwasserstoff; (d) Halogenwasserstoffe; (e) Methan, Ethen, Ethin; (f) Wasser; (g) Ammoniak; (h) Acrolein; (i) Formaldehyd; (j) Stickoxide; (k) Schwefeldioxid; (l) Benzol und Phenol ; (m) Transmission ; (n) spezifische optische Dichte ; (o) Masseverlust ; (p) relativer Druckanstieg.

### B.3 $CO/CO_2$ -Verhältnisse



**Abbildung B.7:** SDC:  $CO/CO_2$ -Verhältnisse für die drei Versuchskonfigurationen 25 und  $50 \text{ kW/m}^2$  mit und ohne Zündflamme für (a) PUR3554 und (b) PUR3045SE.

# ANHANG C

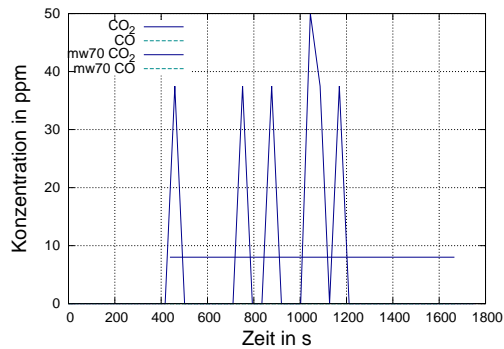
## Versuchsdaten DIN-Rohr

Gemittelte Gaskonzentrationen aller DIN-Rohr Versuche für die Materialien PUR3554, PUR3045SE und PVC für die Temperaturen 400 und 700°C sowie den Sauerstoffkonzentrationen von 0, 5, 15, 18 und 21 vol%. Außerdem findet sich hier für jeden Versuch ein Foto der beanspruchten Probe.

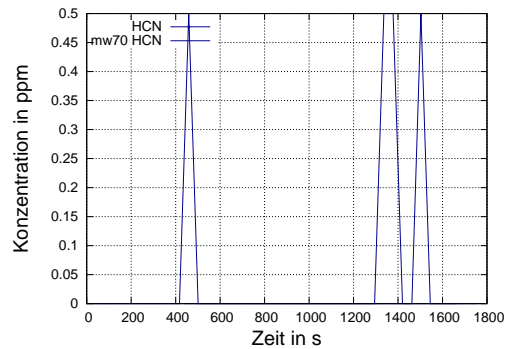
### C.1 PUR3554

PUR3554 400 °C

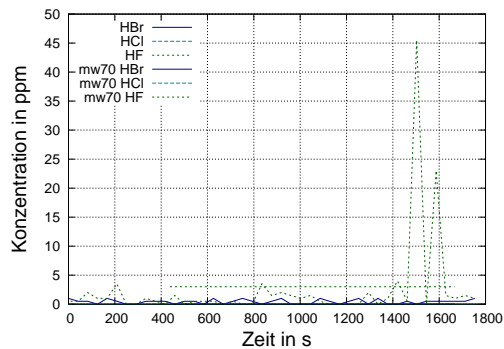
PUR3554 400 °C und 0 vol% O<sub>2</sub>



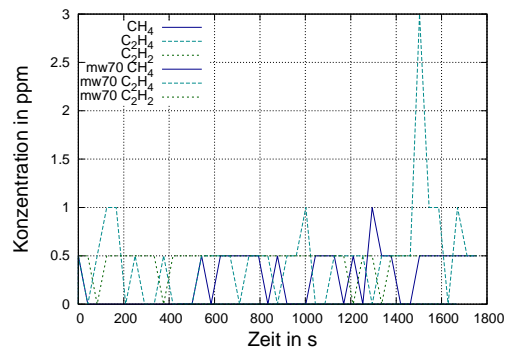
(a)



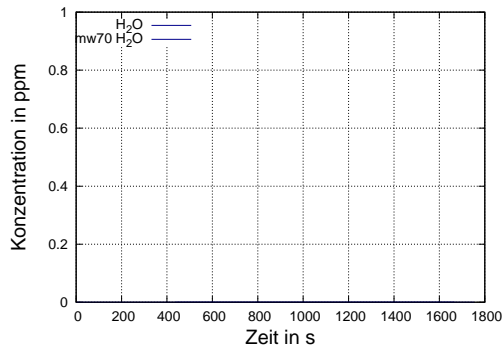
(b)



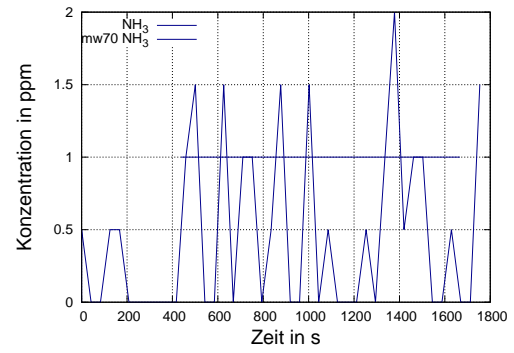
(c)



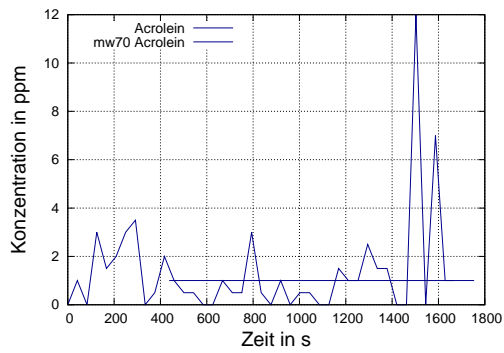
(d)



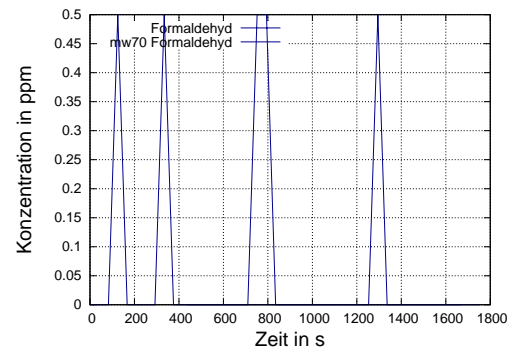
(e)



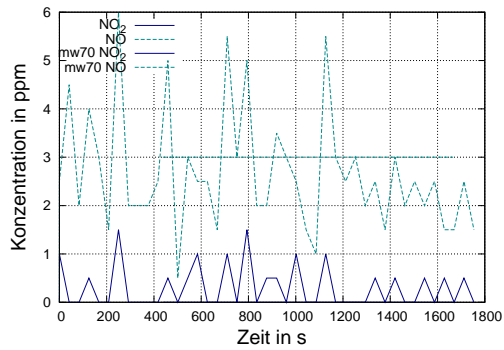
(f)



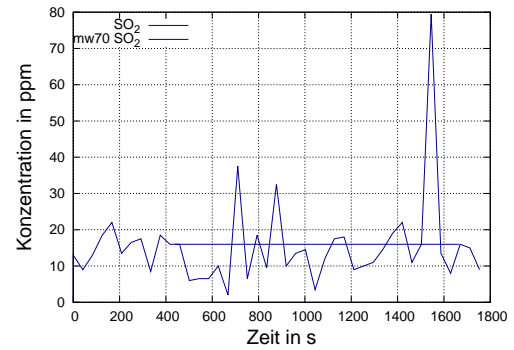
(g)



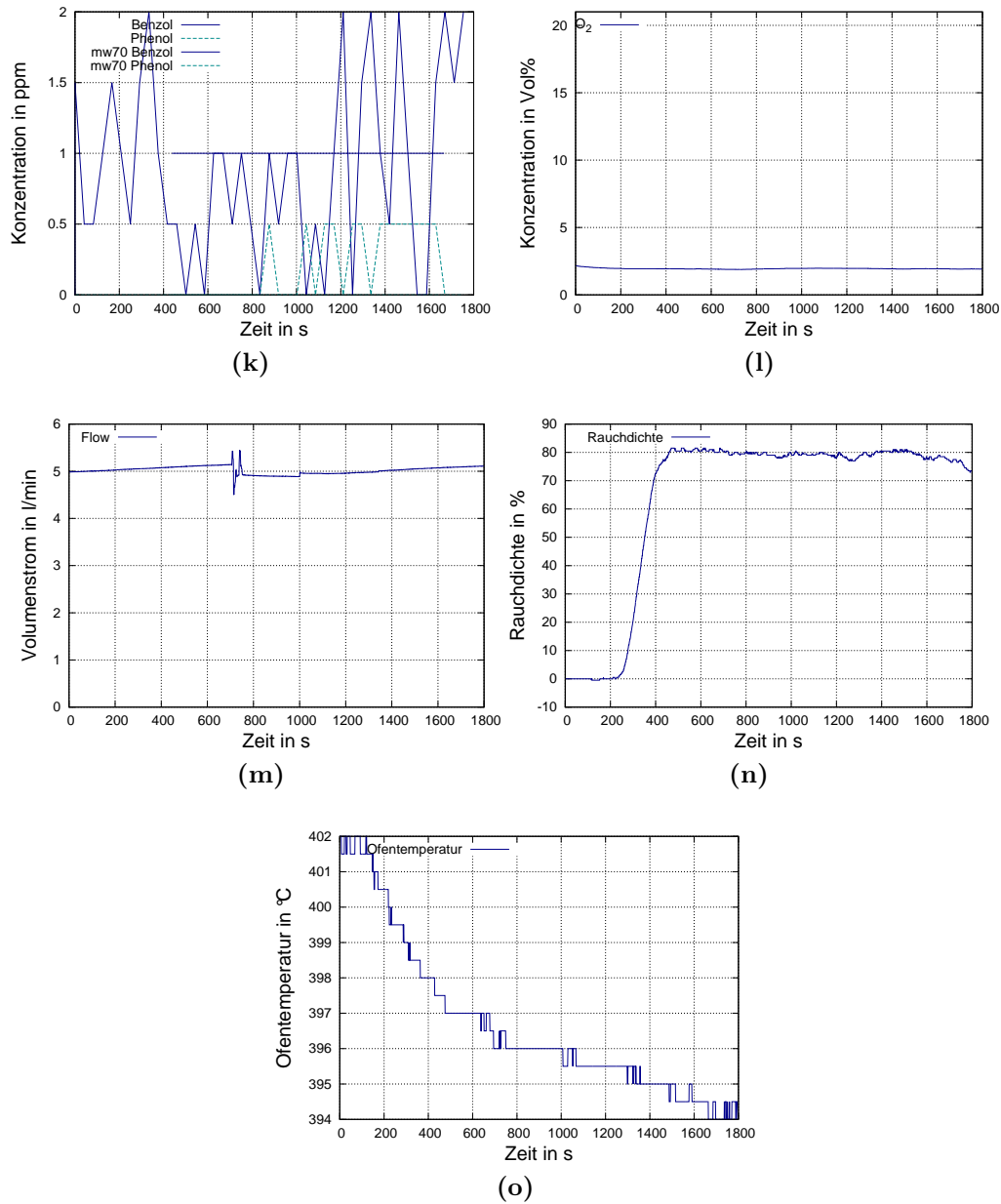
(h)



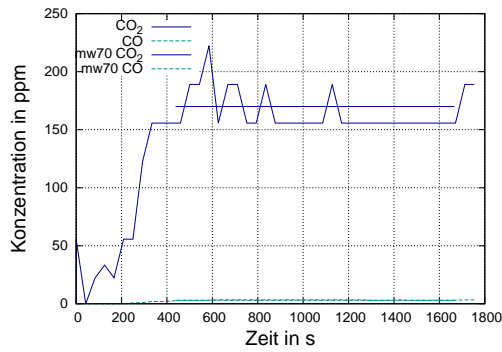
(i)



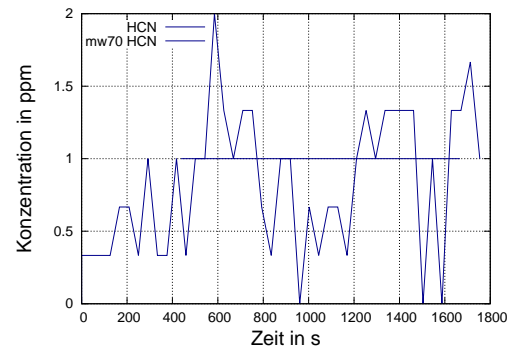
(j)



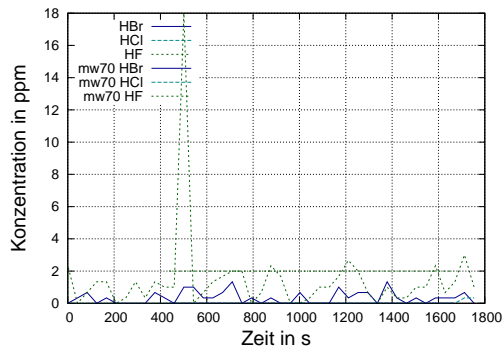
**Abbildung C.1:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 400 °C und 5 vol% O<sub>2</sub>

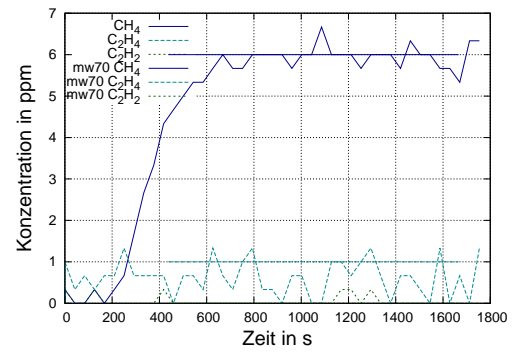
(a)



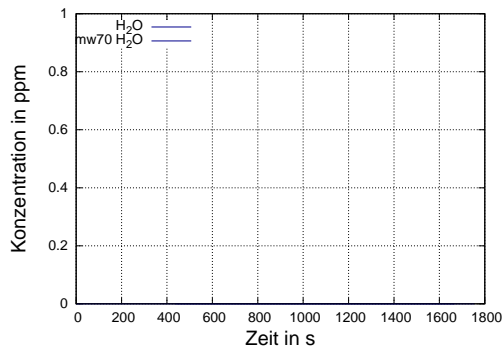
(b)



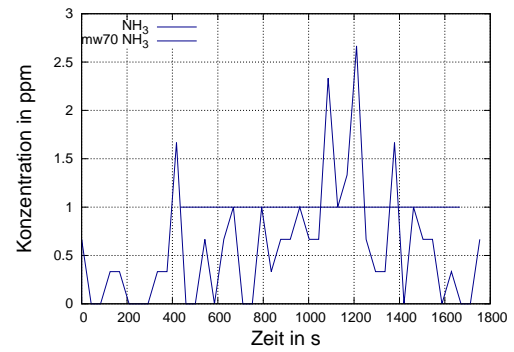
(c)



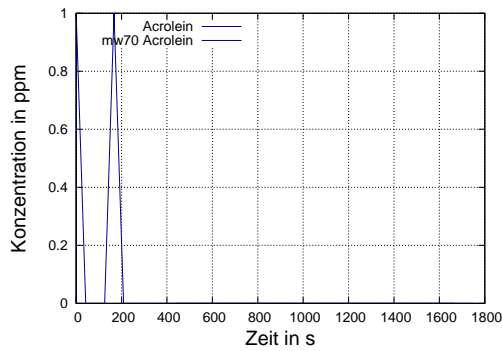
(d)



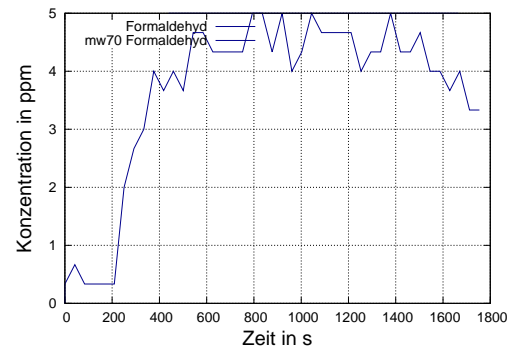
(e)



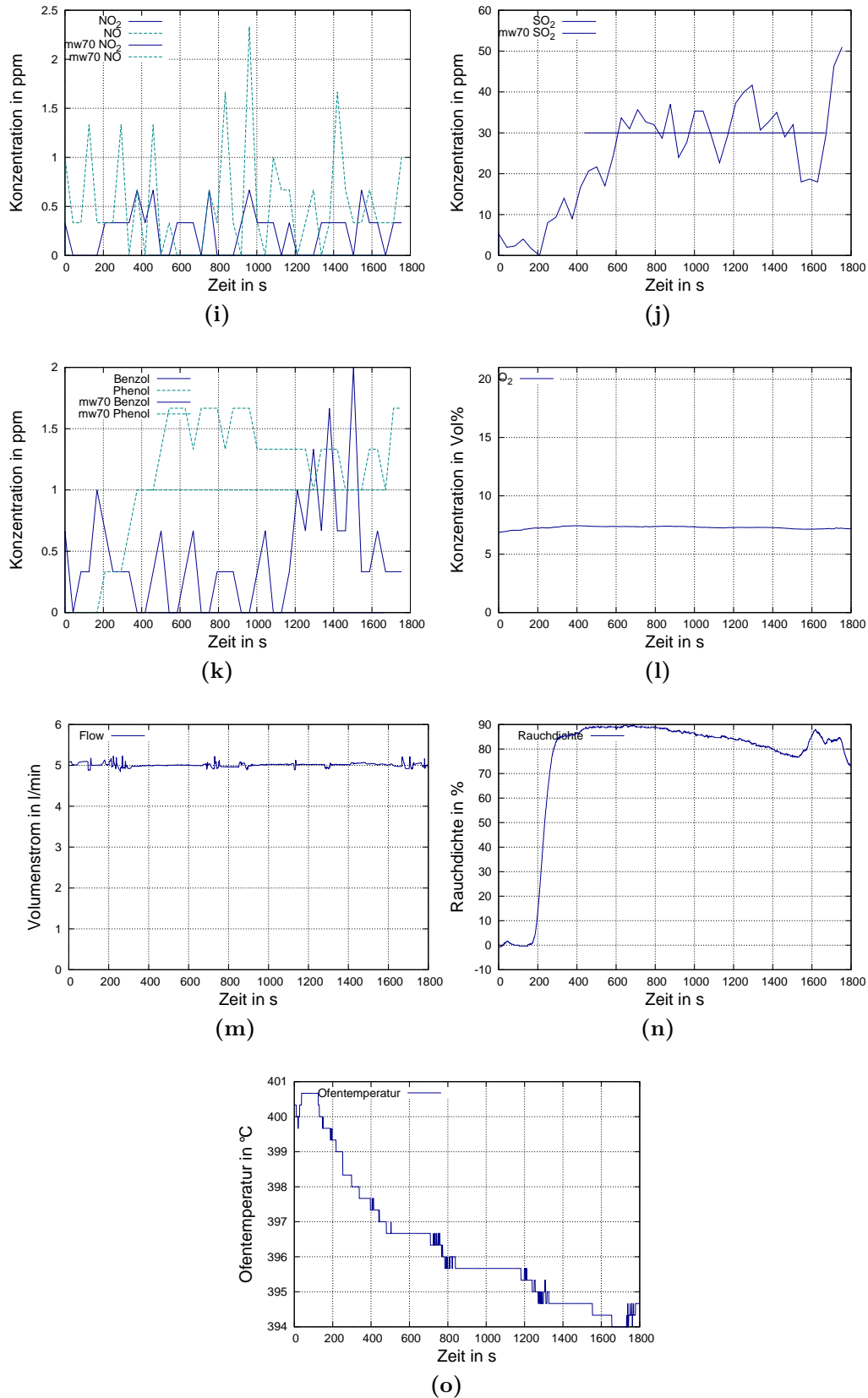
(f)



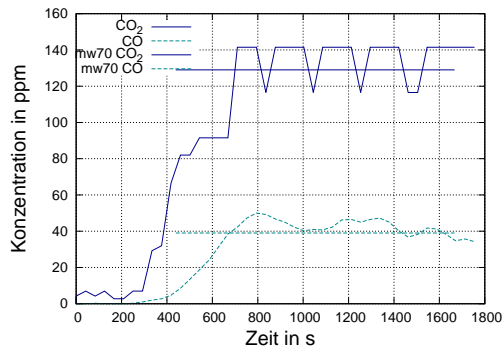
(g)



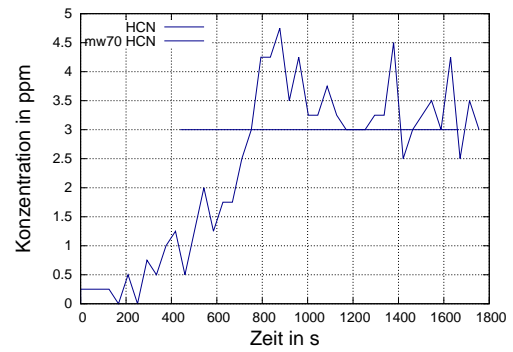
(h)



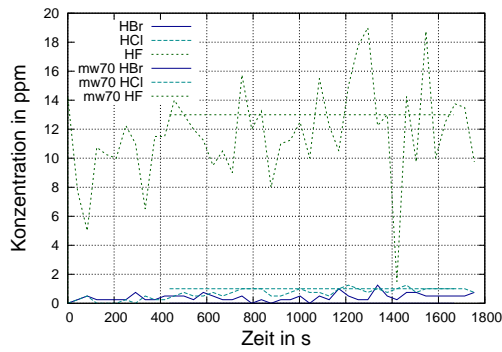
**Abbildung C.2:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 400 °C und 15 vol% O<sub>2</sub>

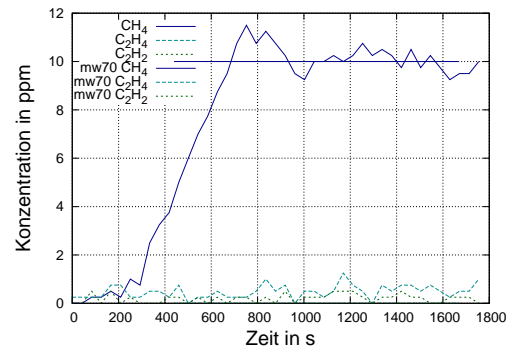
(a)



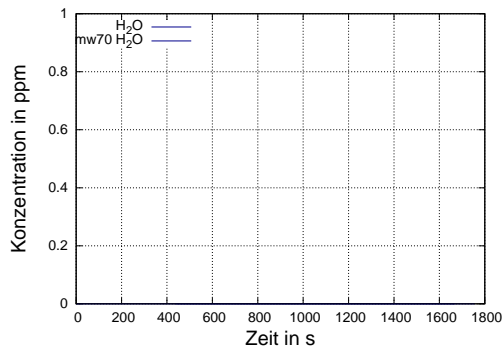
(b)



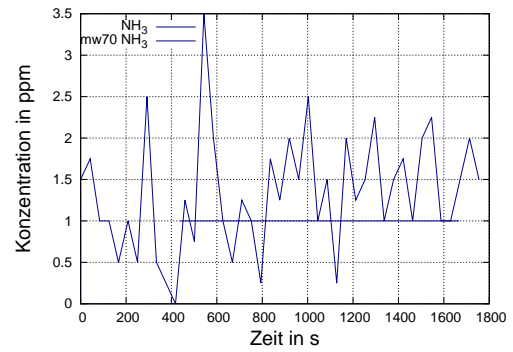
(c)



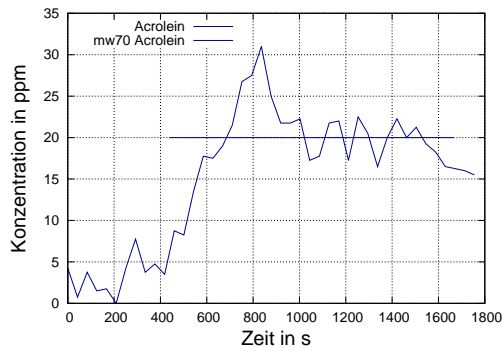
(d)



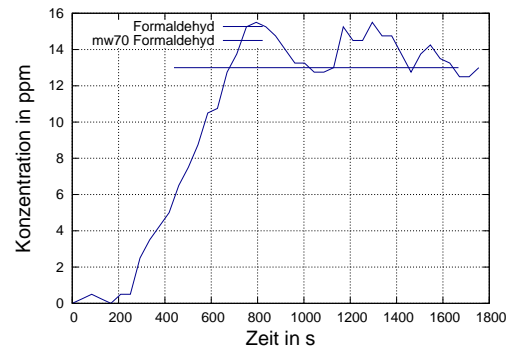
(e)



(f)

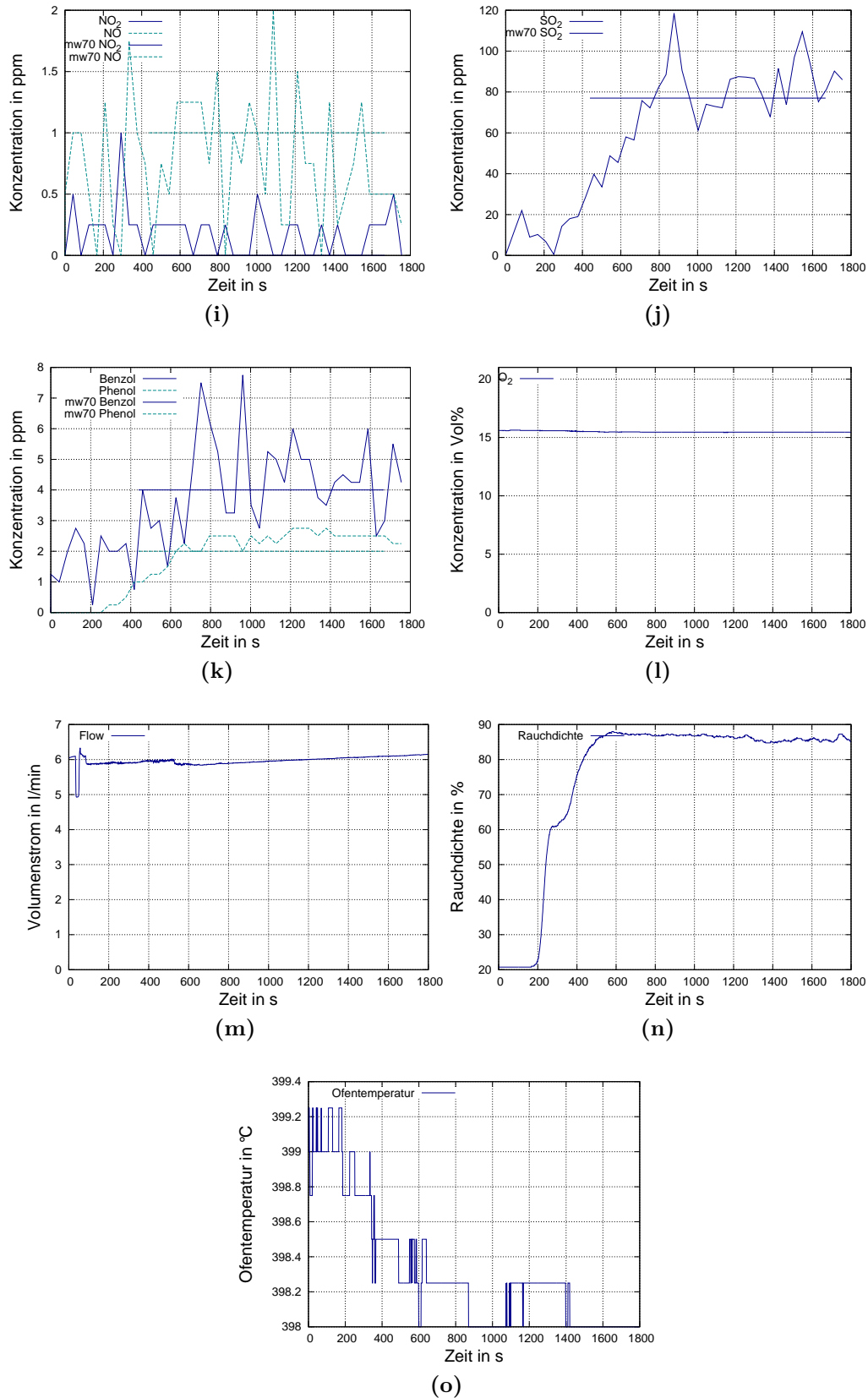


(g)

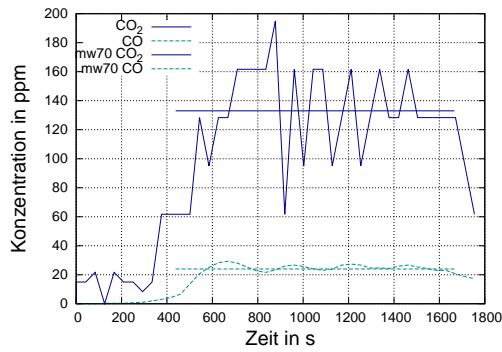


(h)

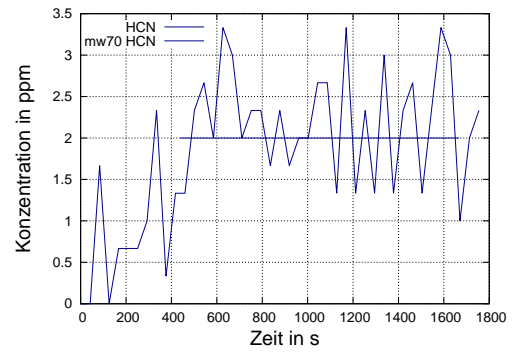




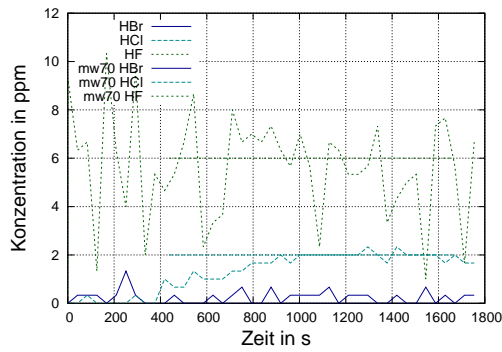
**Abbildung C.3:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 400 °C und 18 vol% O<sub>2</sub>

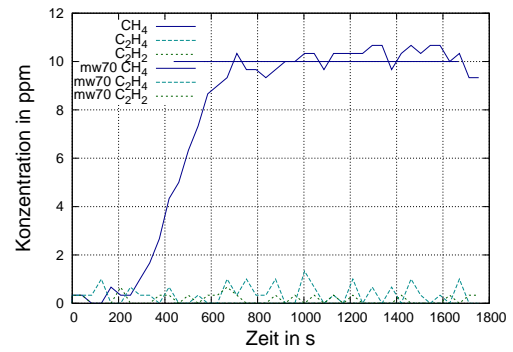
(a)



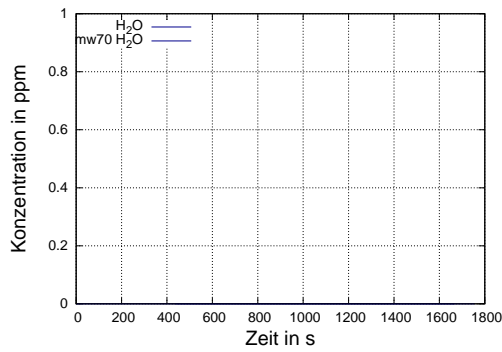
(b)



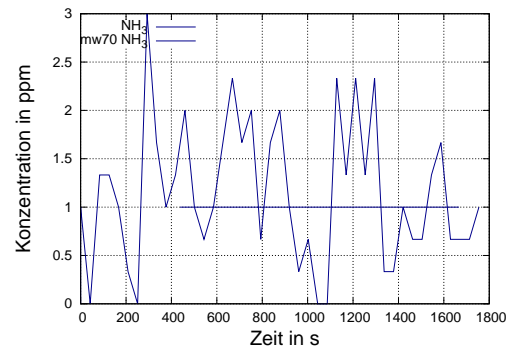
(c)



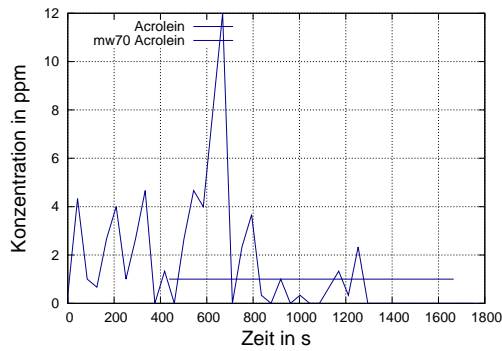
(d)



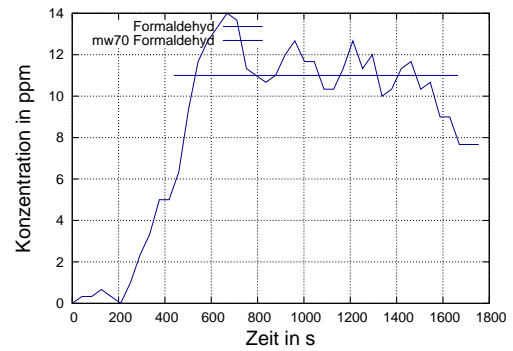
(e)



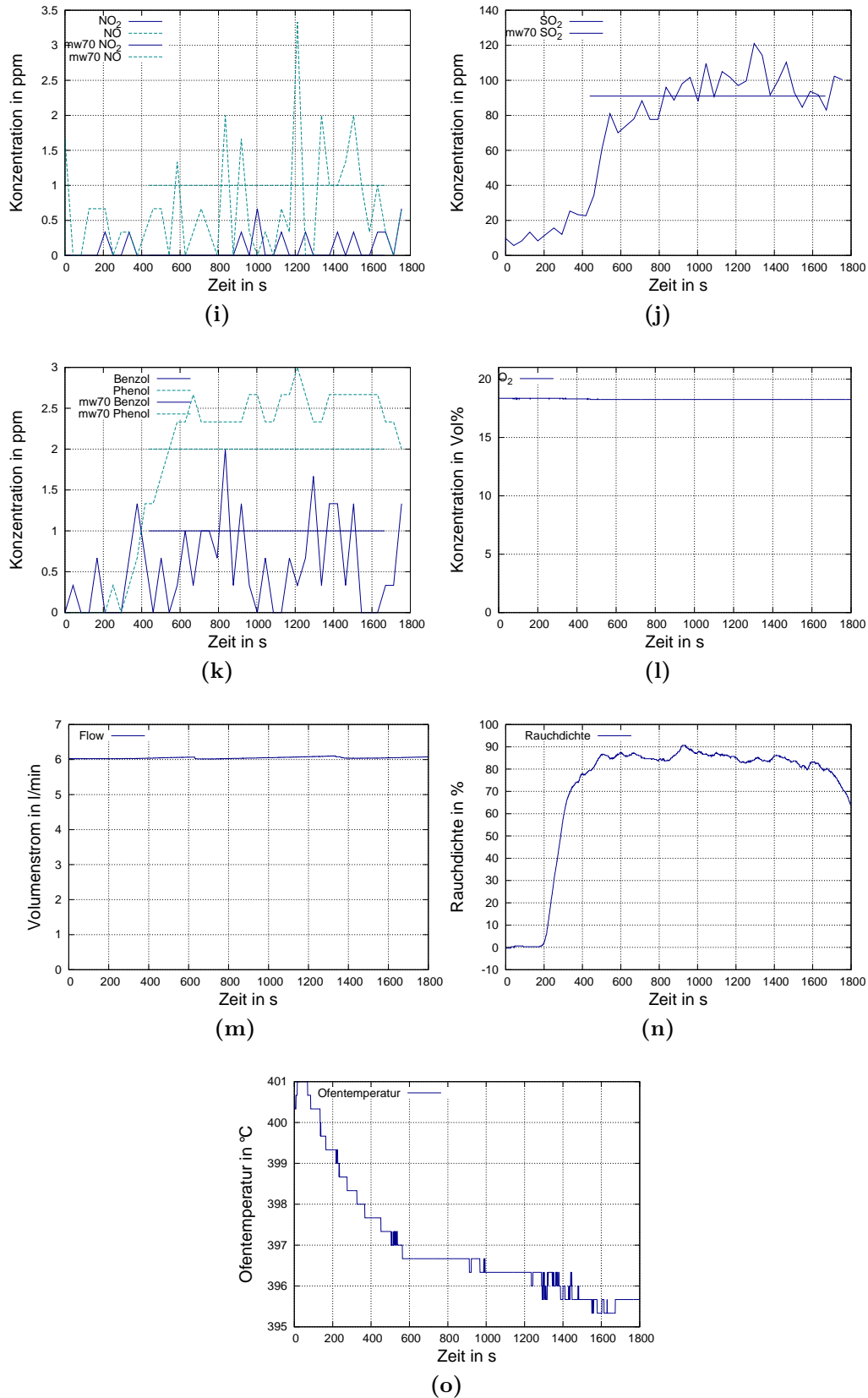
(f)



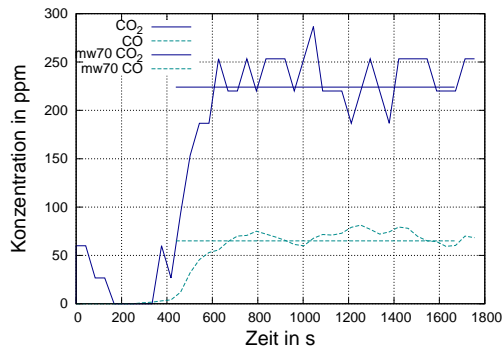
(g)



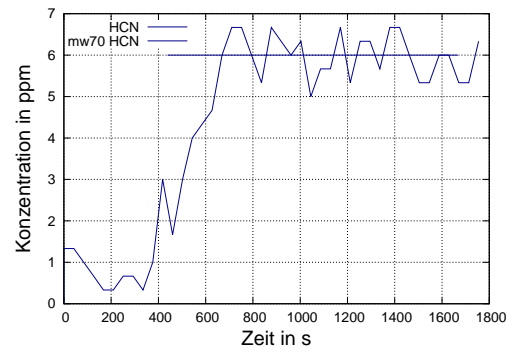
(h)



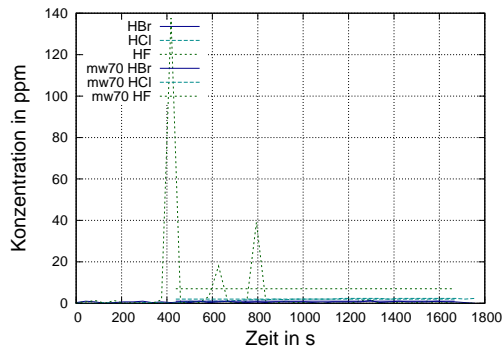
**Abbildung C.4:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 400 °C und 21 vol% O<sub>2</sub>

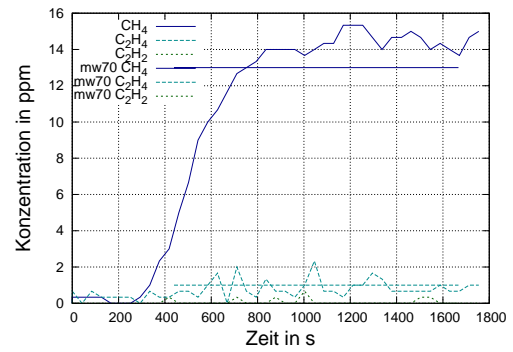
(a)



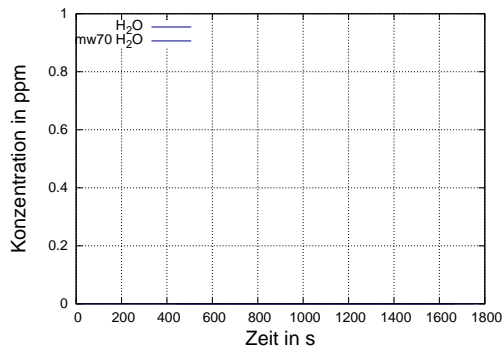
(b)



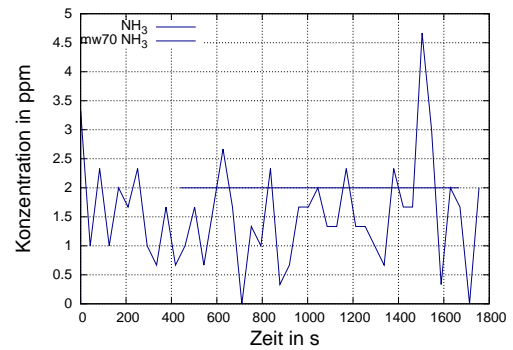
(c)



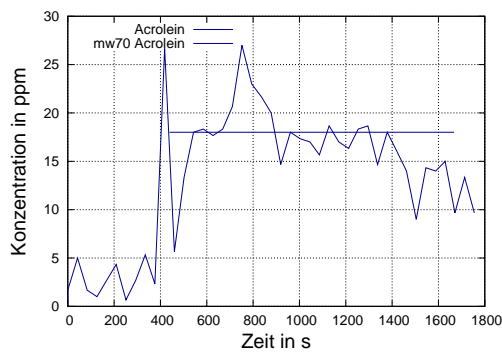
(d)



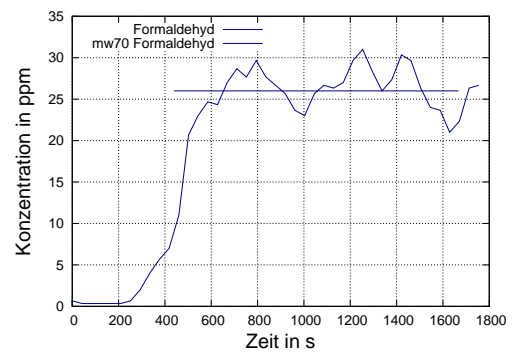
(e)



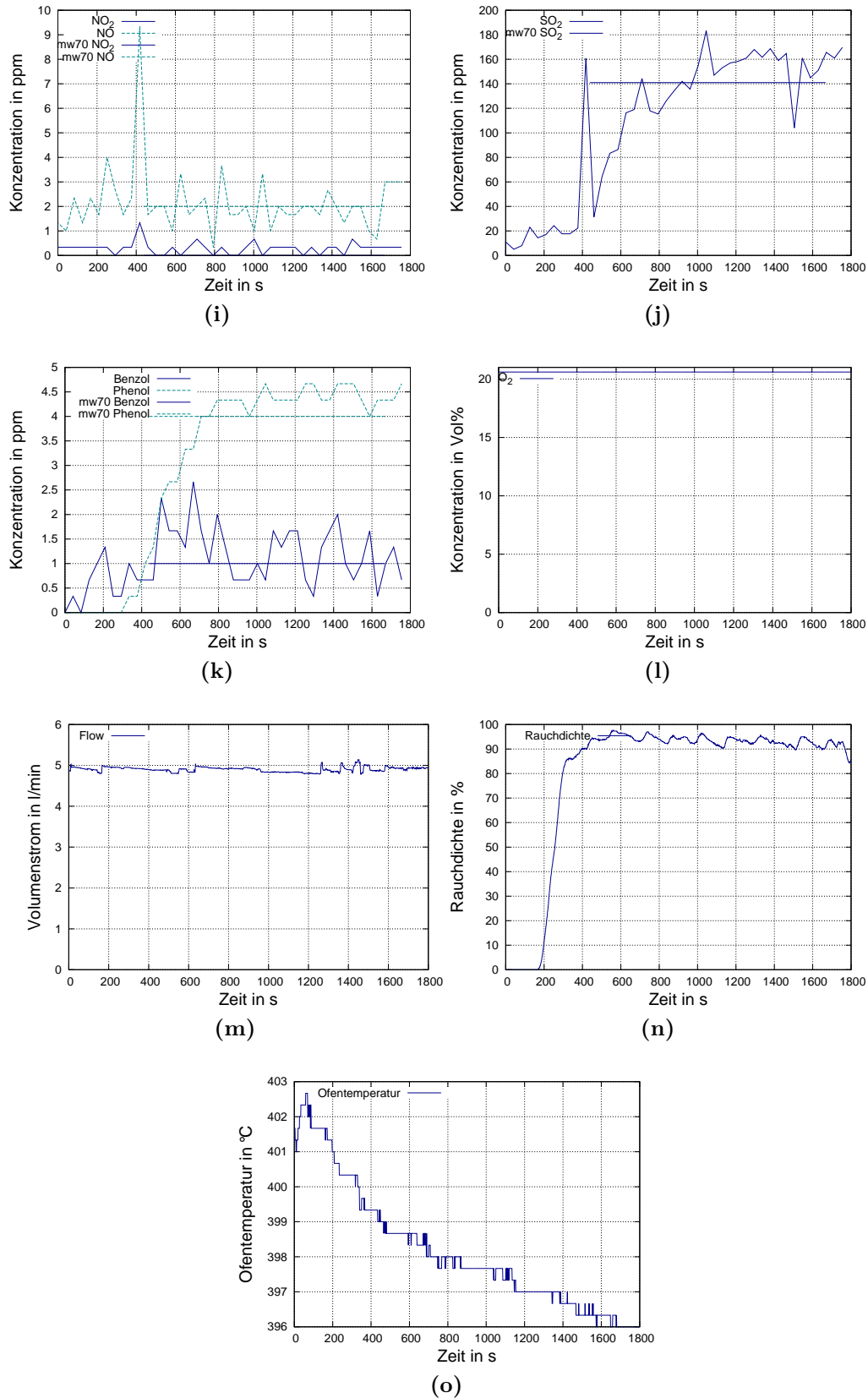
(f)



(g)

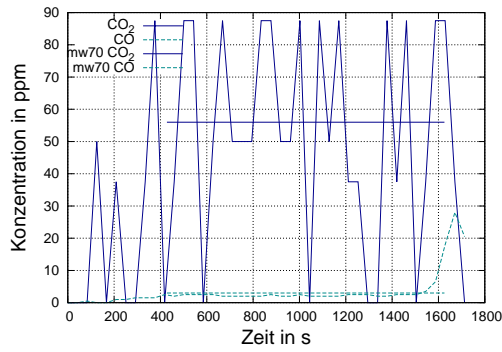


(h)

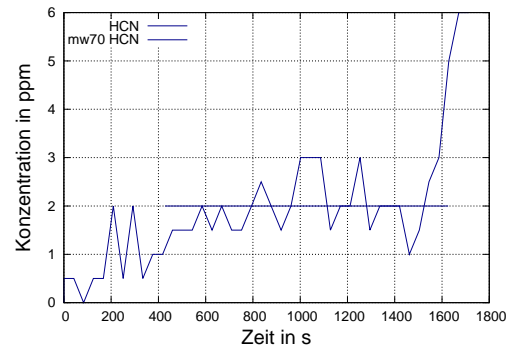


**Abbildung C.5:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

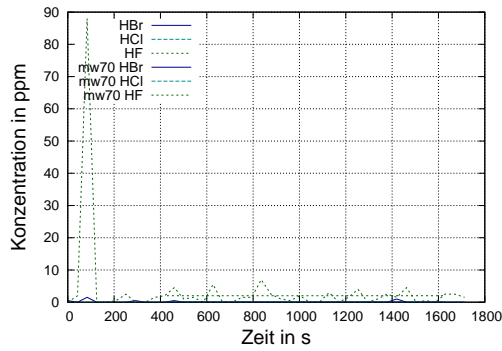
PUR3554 700 °C

PUR3554 700 °C und 0 vol% O<sub>2</sub>

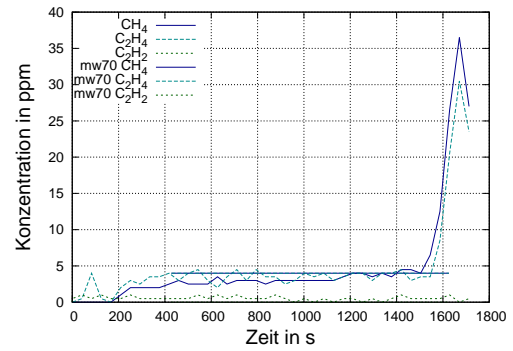
(a)



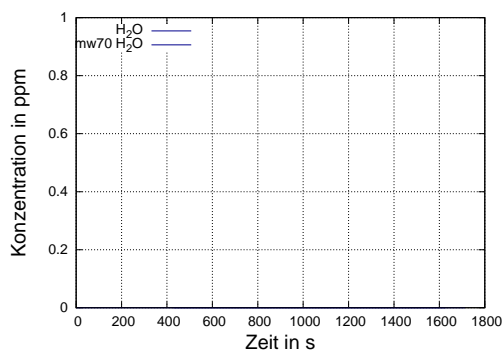
(b)



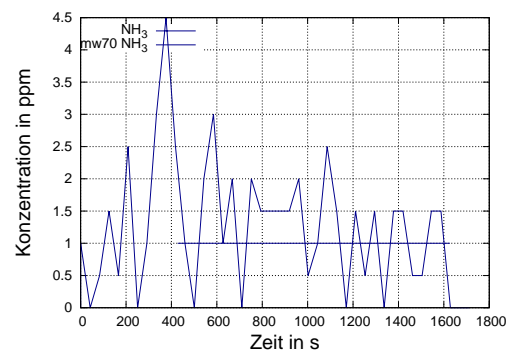
(c)



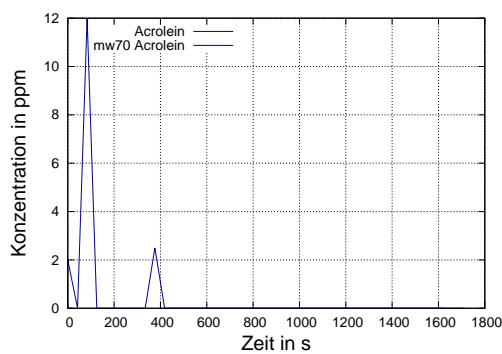
(d)



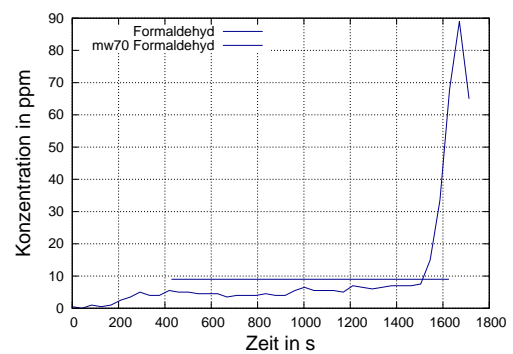
(e)



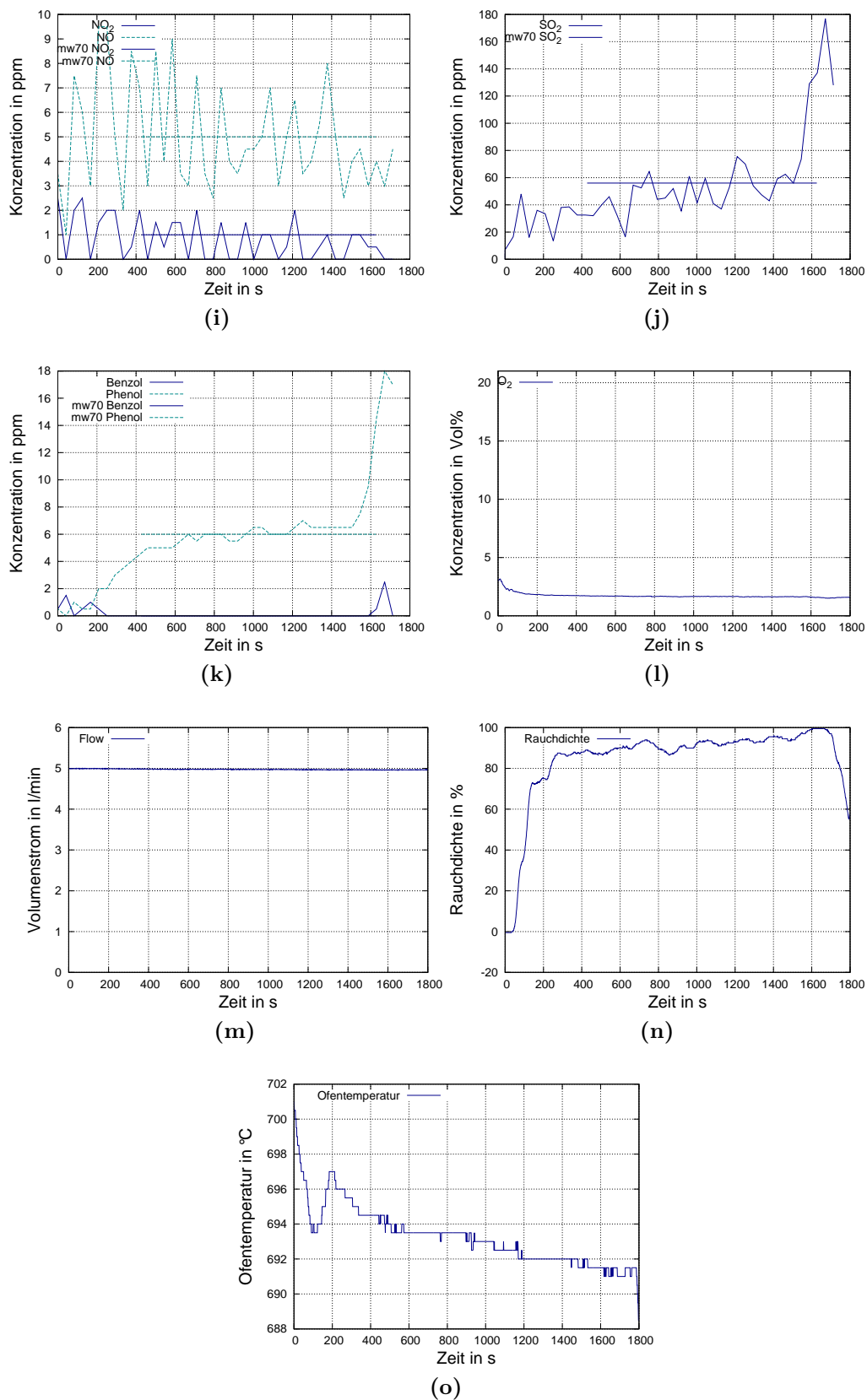
(f)



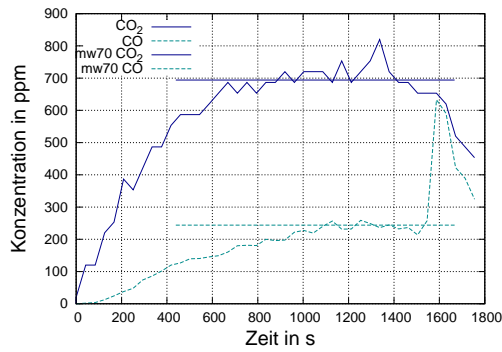
(g)



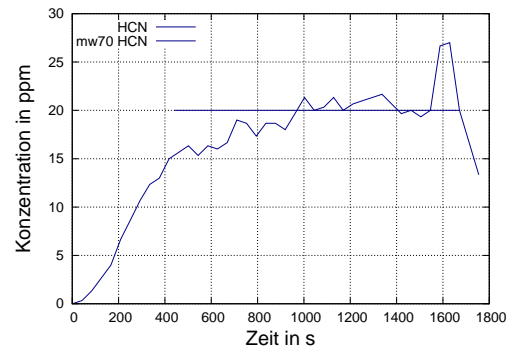
(h)



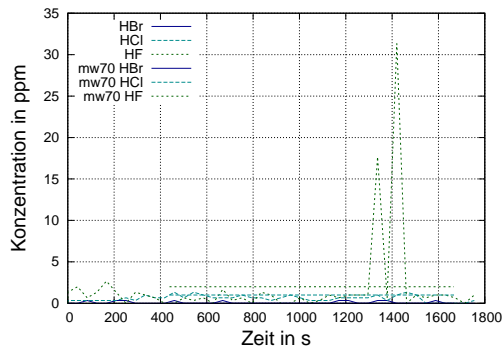
**Abbildung C.6:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 700 °C und 5 vol% O<sub>2</sub>

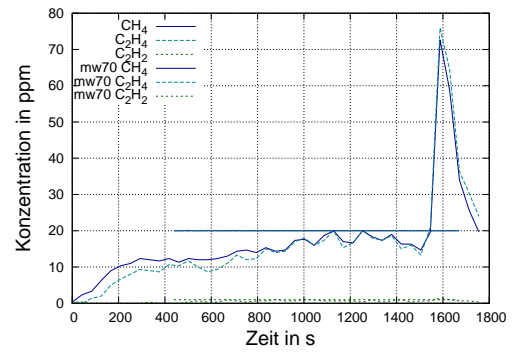
(a)



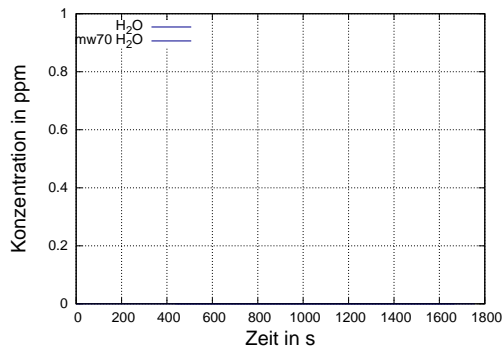
(b)



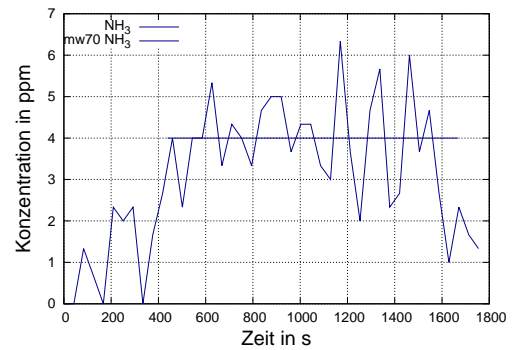
(c)



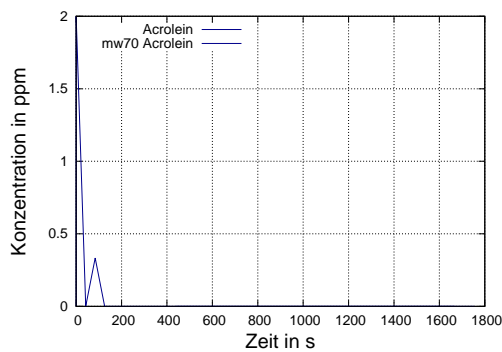
(d)



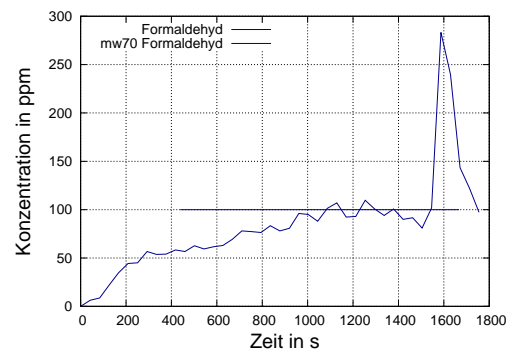
(e)



(f)

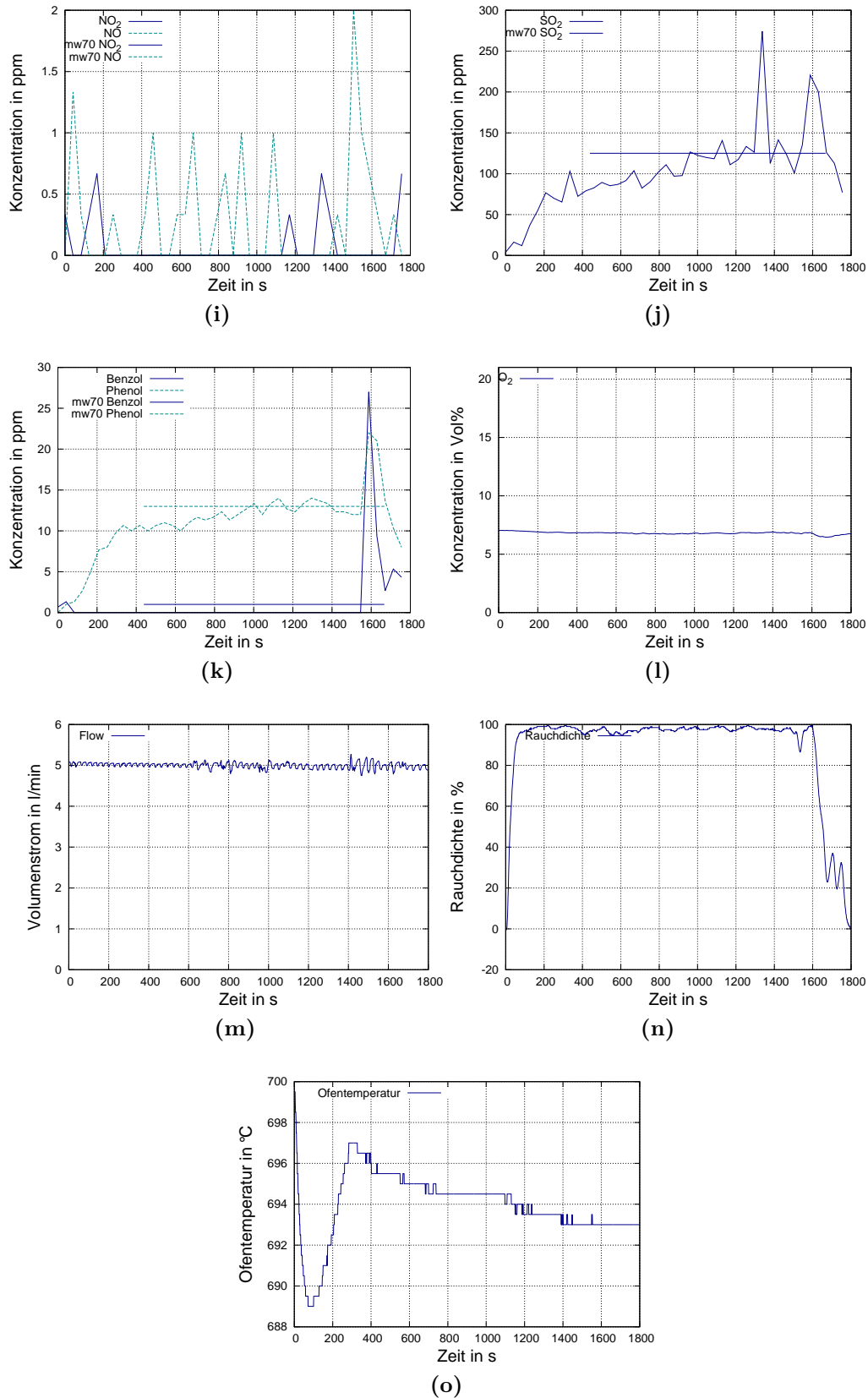


(g)

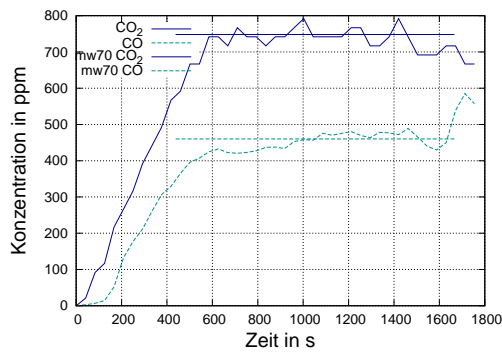


(h)

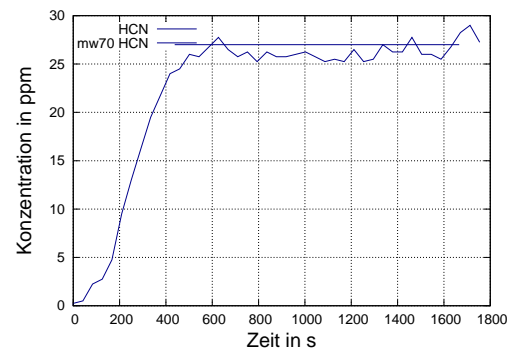




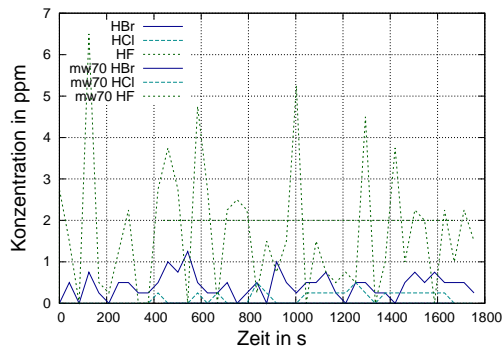
**Abbildung C.7:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 700 °C und 15 vol% O<sub>2</sub>

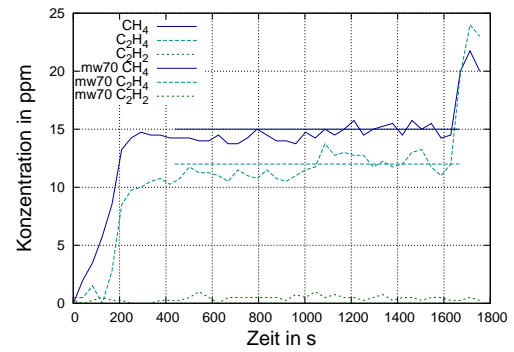
(a)



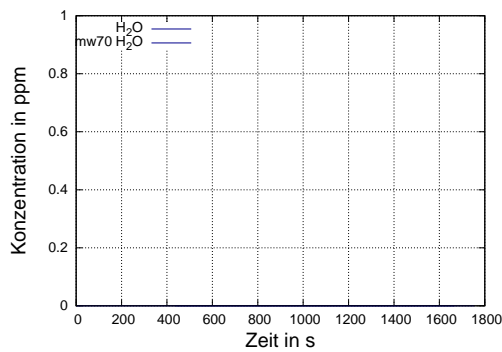
(b)



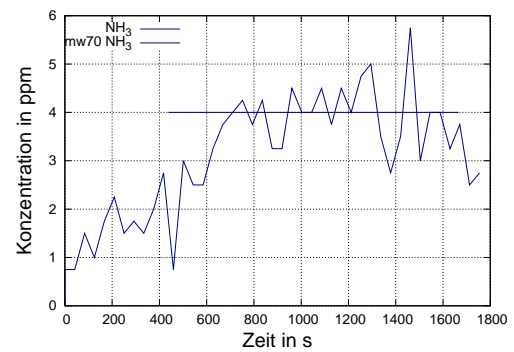
(c)



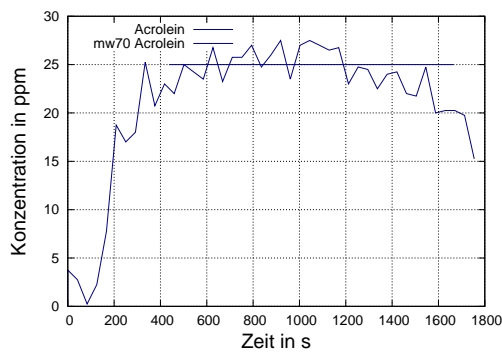
(d)



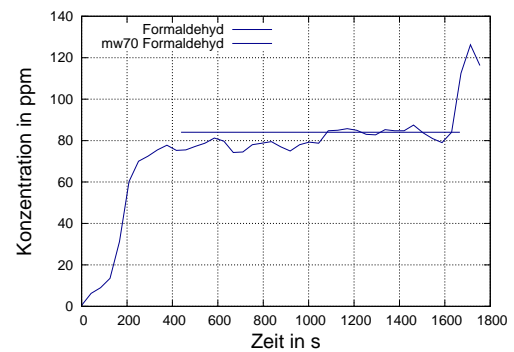
(e)



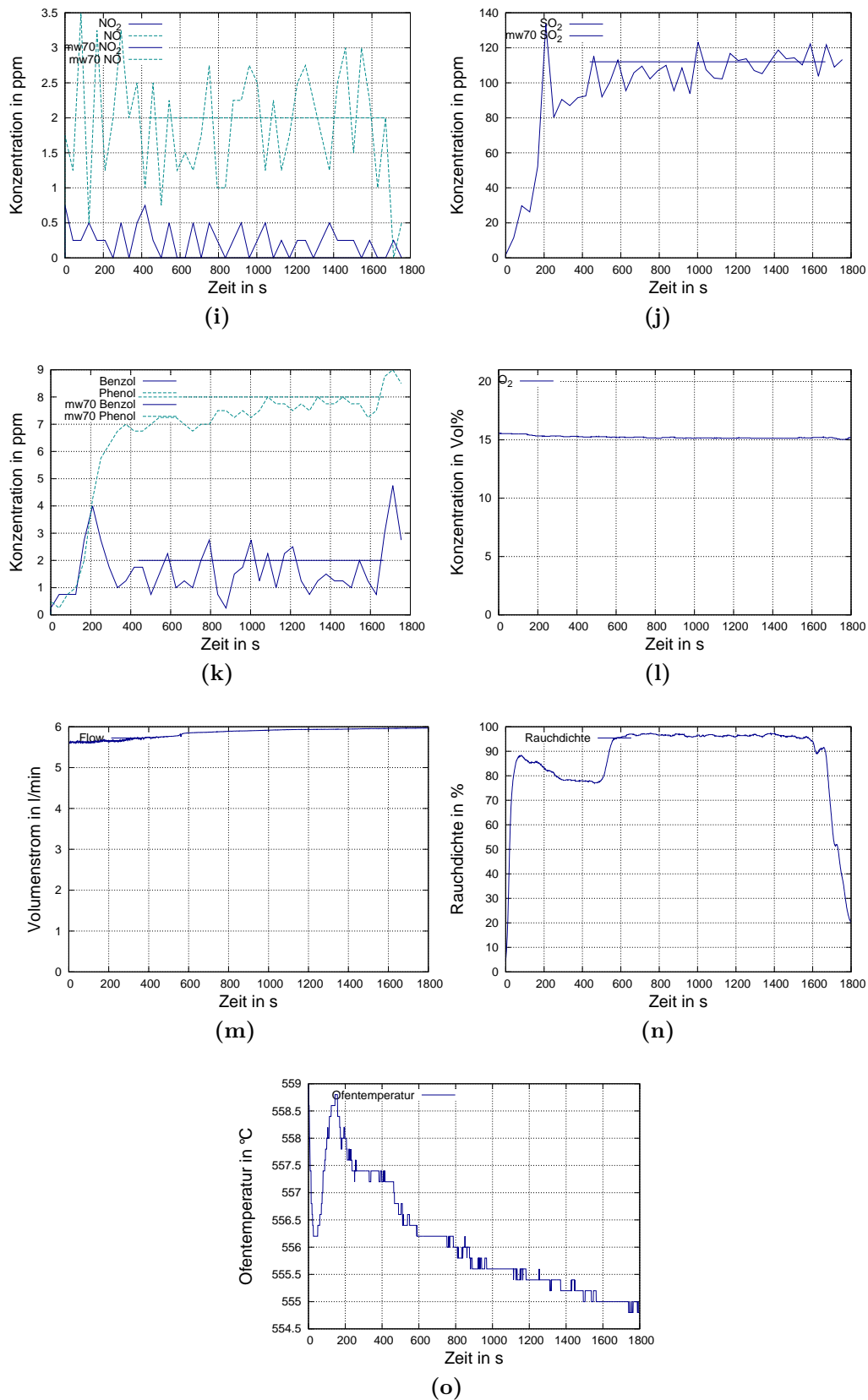
(f)



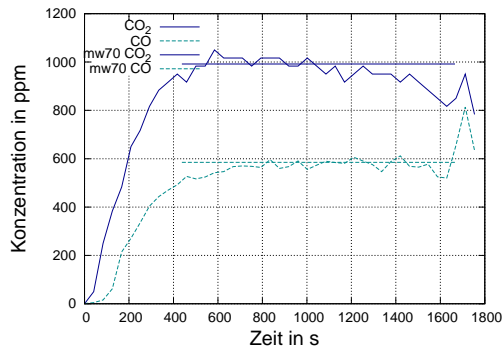
(g)



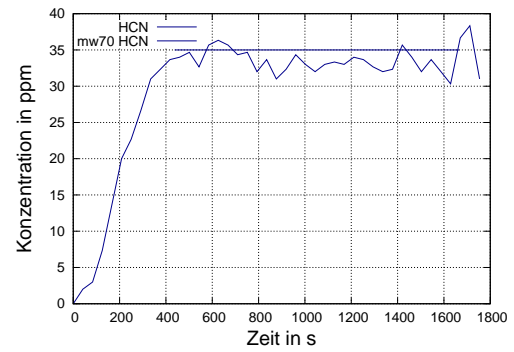
(h)



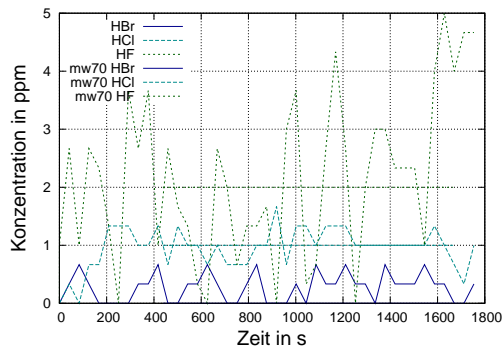
**Abbildung C.8:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 700 °C und 18 vol% O<sub>2</sub>

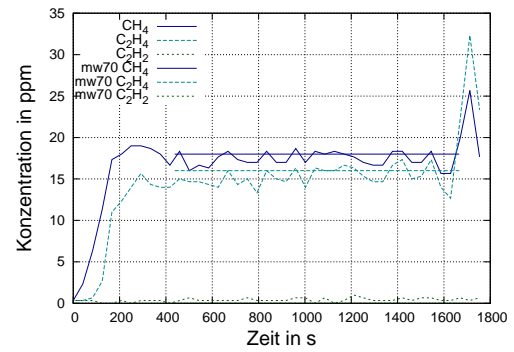
(a)



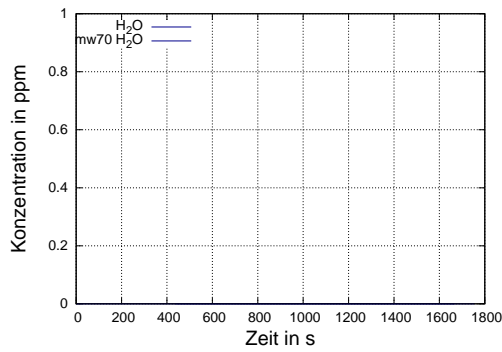
(b)



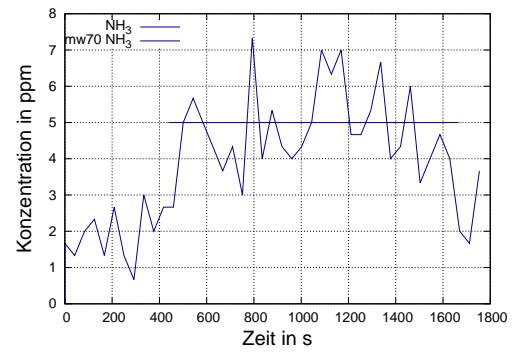
(c)



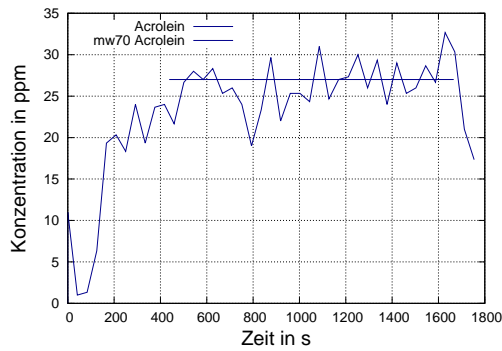
(d)



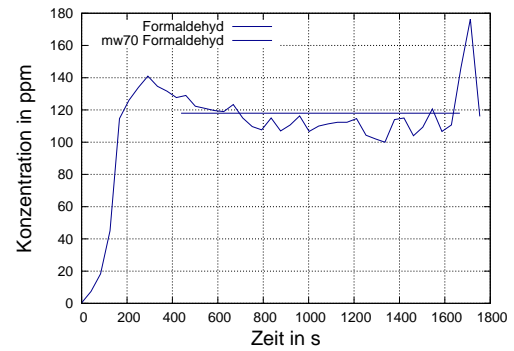
(e)



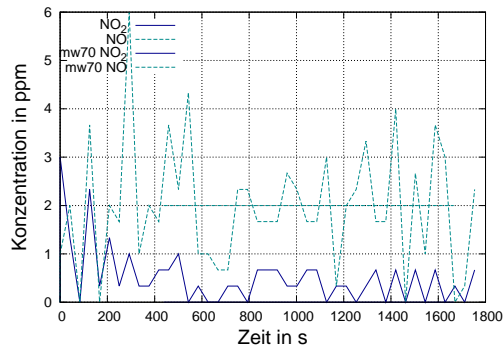
(f)



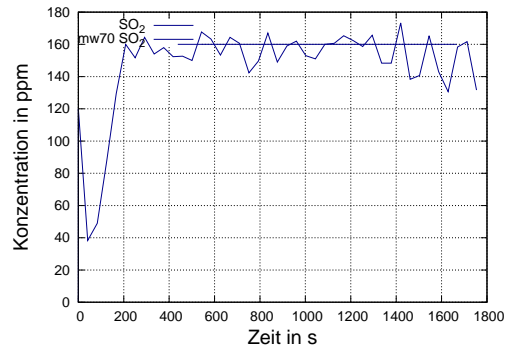
(g)



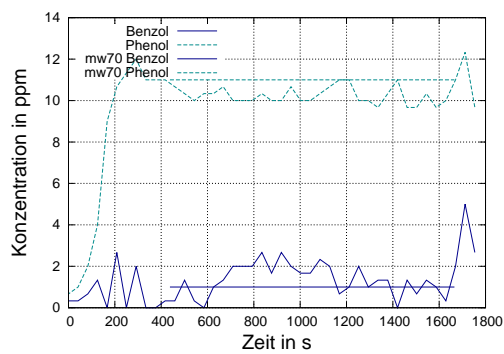
(h)



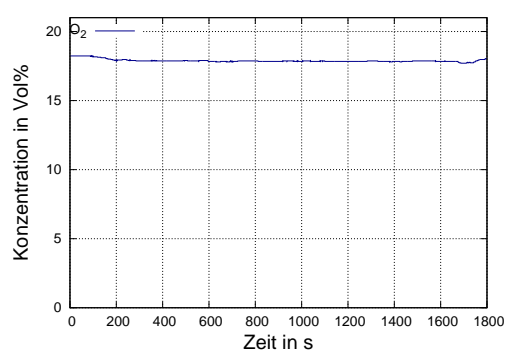
(i)



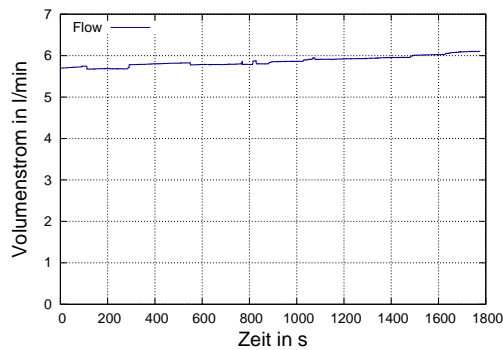
(j)



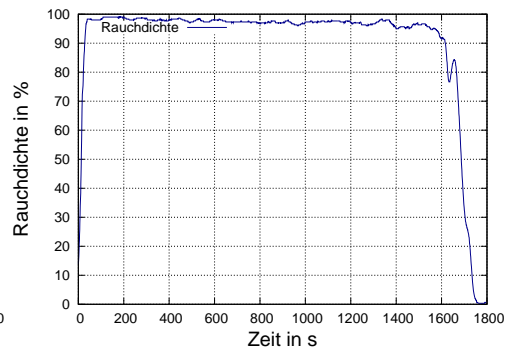
(k)



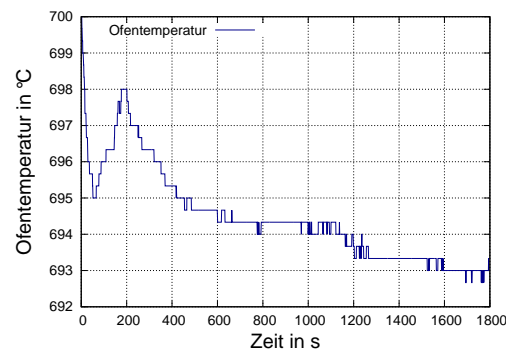
(l)



(m)

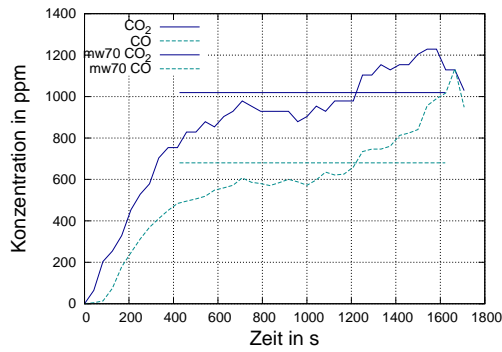


(n)

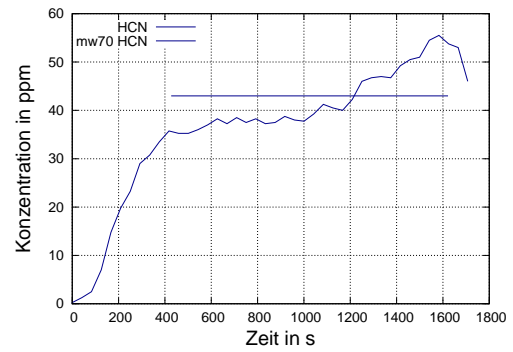


(o)

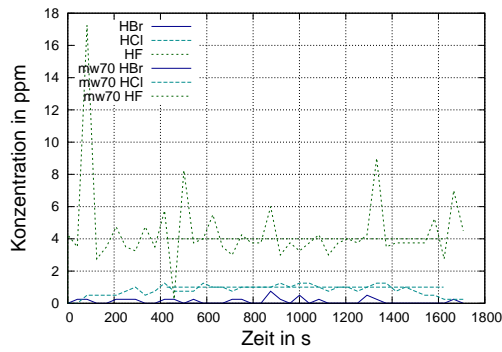
**Abbildung C.9:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3554 700 °C und 21 vol% O<sub>2</sub>

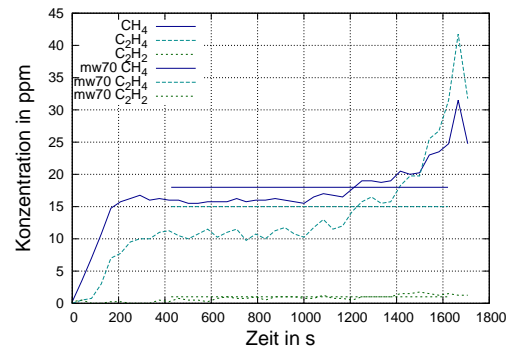
(a)



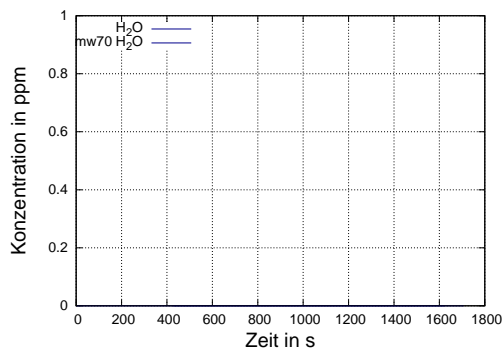
(b)



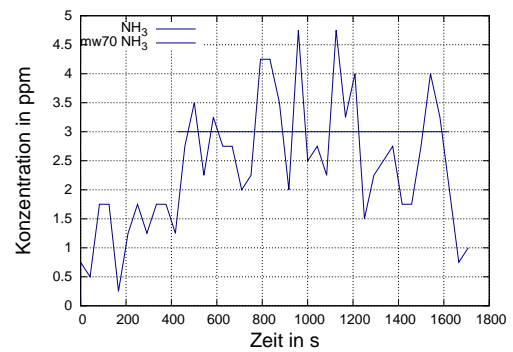
(c)



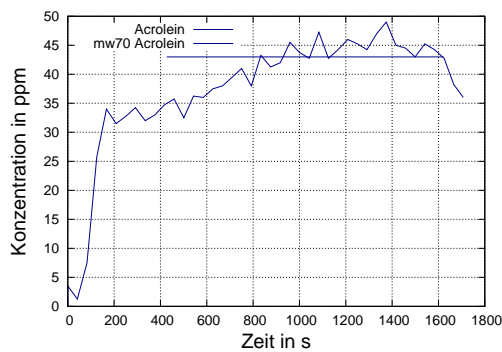
(d)



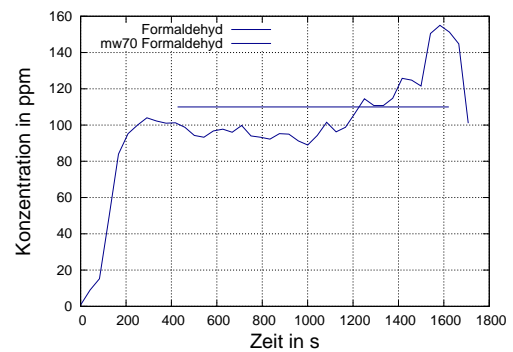
(e)



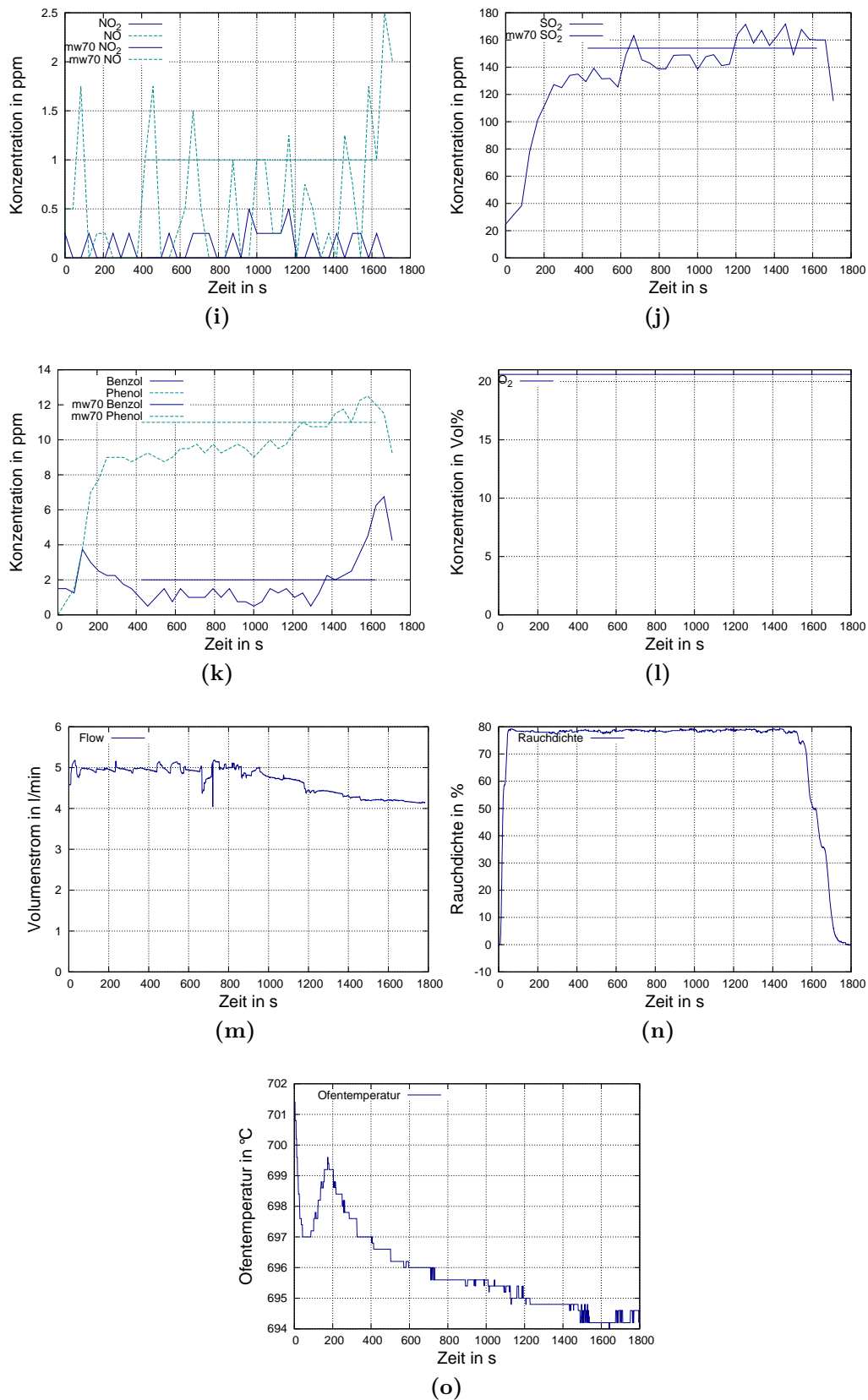
(f)



(g)



(h)















**Abbildung C.10:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .



## Proben nach Versuch

Die Proben nach den durchgeführten Versuchen mit  $200^{\circ}\text{C}$  sahen wie vor den Versuchen aus.

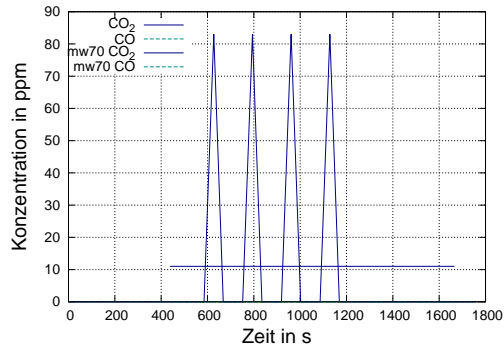
**Tabelle C.1:** PUR3554-Proben nach den DIN-Rohr Versuchen

	$200^{\circ}\text{C}$	$400^{\circ}\text{C}$	$700^{\circ}\text{C}$
$5\text{ vol}\% \text{O}_2$			
$15\text{ vol}\% \text{O}_2$			
$18\text{ vol}\% \text{O}_2$			
$21\text{ vol}\% \text{O}_2$			

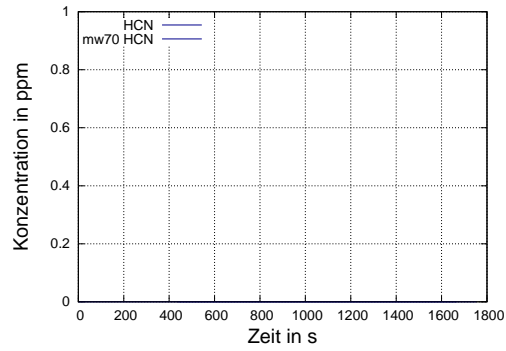


## C.2 PUR3045SE

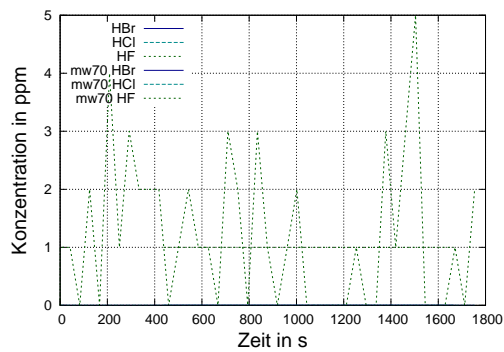
PUR3045SE 400 °C

PUR3045SE 400 °C und 0 vol% O<sub>2</sub>

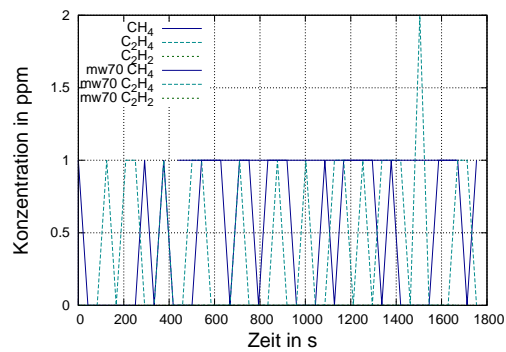
(a)



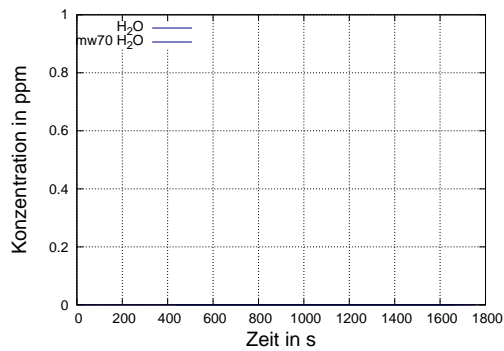
(b)



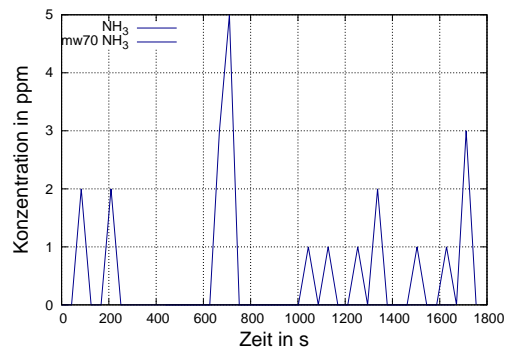
(c)



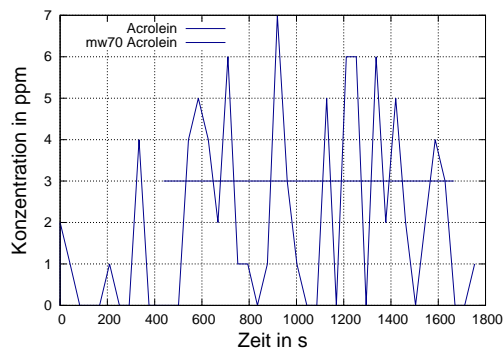
(d)



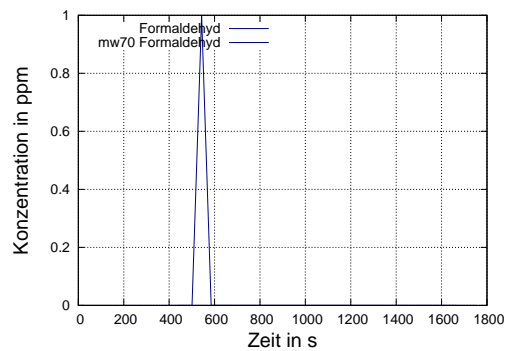
(e)



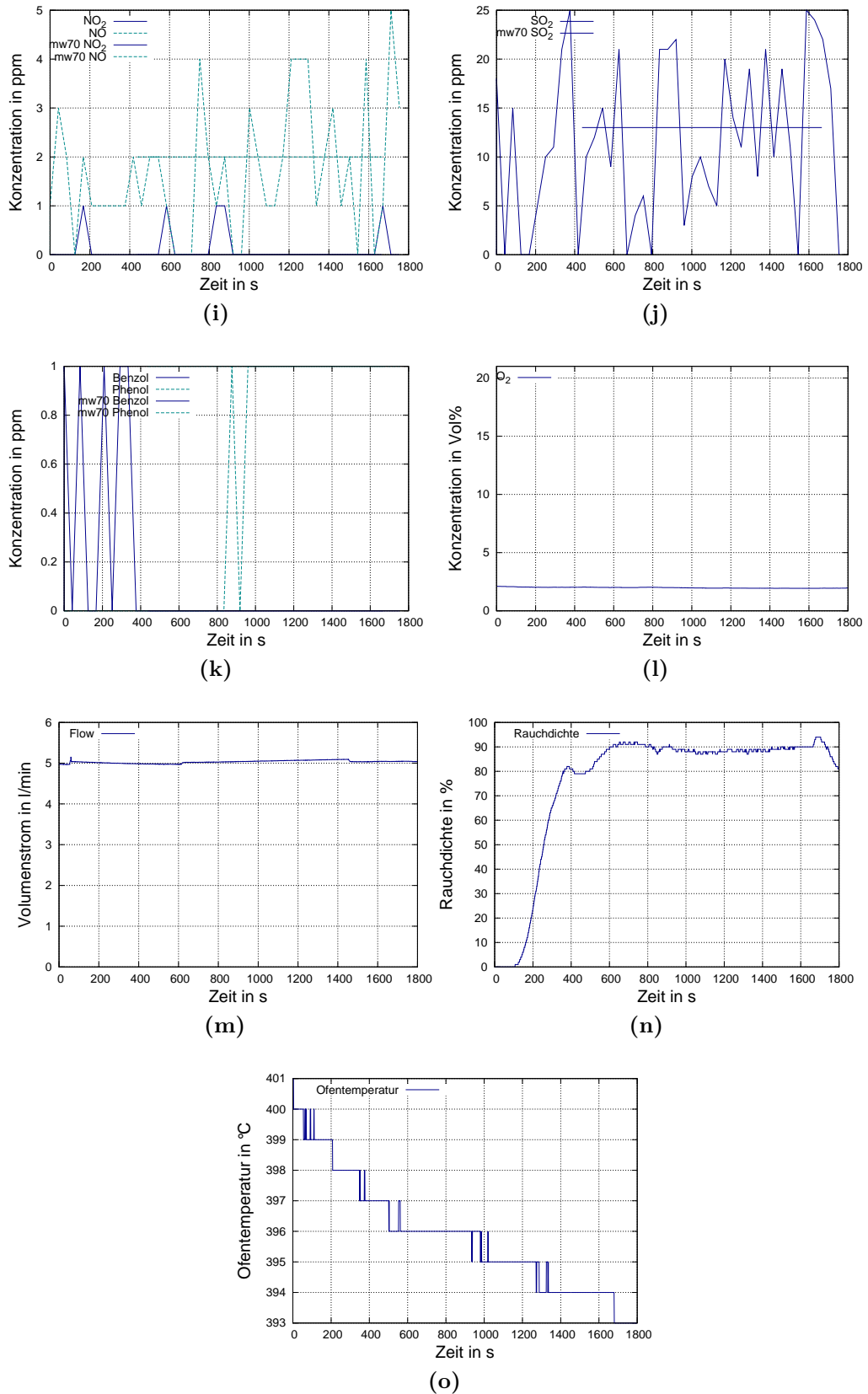
(f)



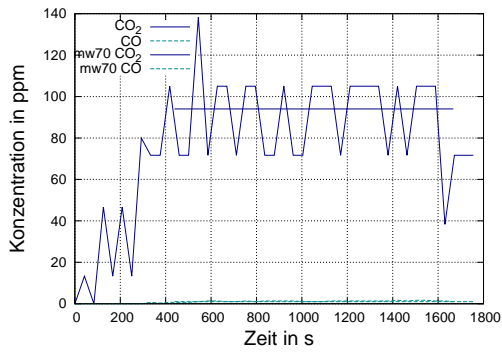
(g)



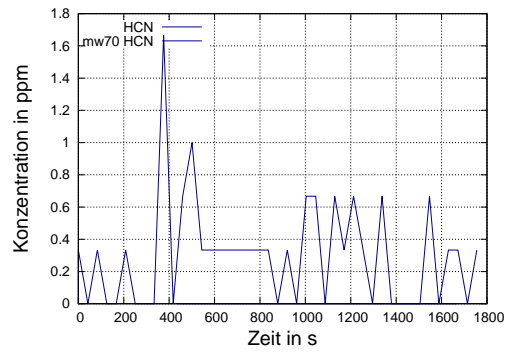
(h)



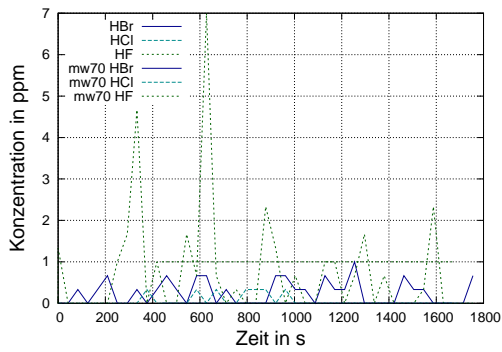
**Abbildung C.11:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3045SE 400 °C und 5 vol% O<sub>2</sub>

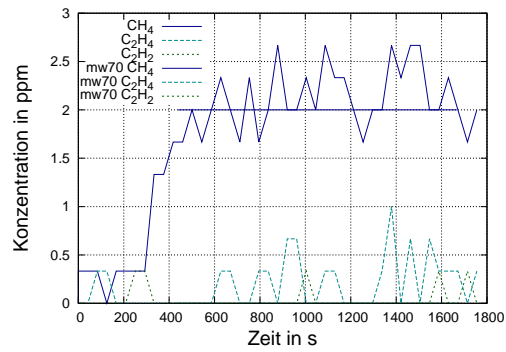
(a)



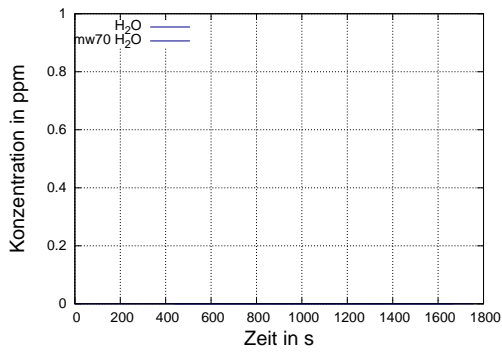
(b)



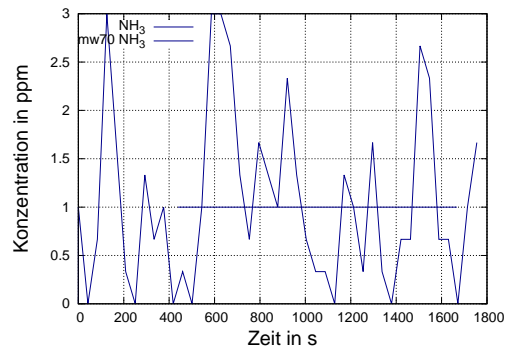
(c)



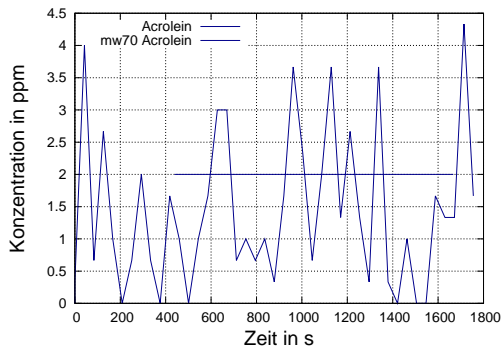
(d)



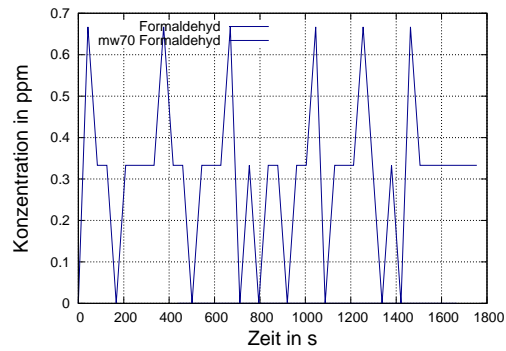
(e)



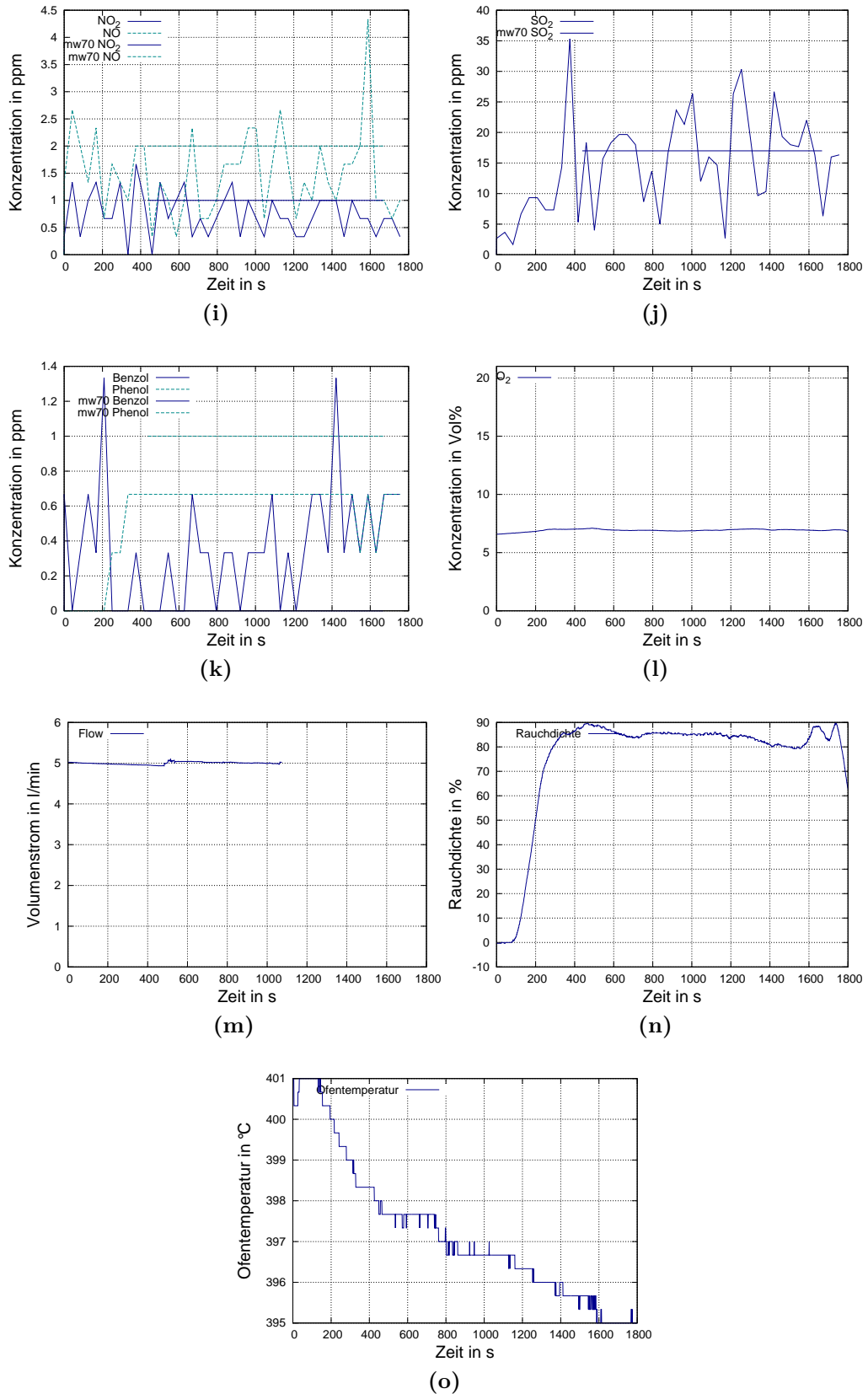
(f)



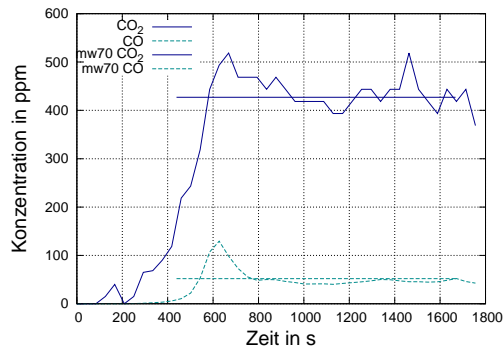
(g)



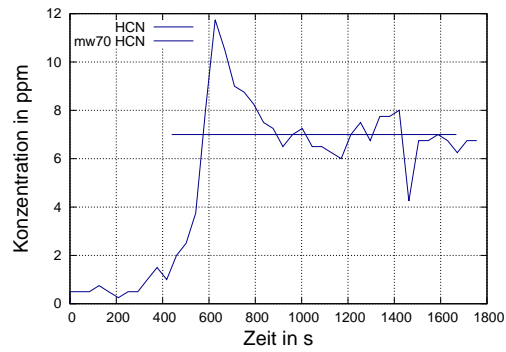
(h)



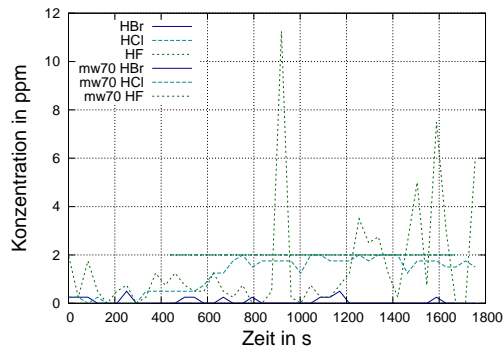
**Abbildung C.12:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3045SE 400 °C und 15 vol% O<sub>2</sub>

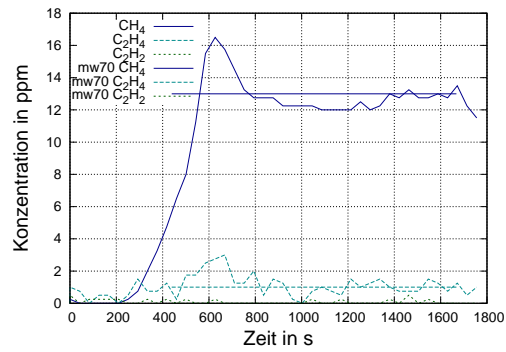
(a)



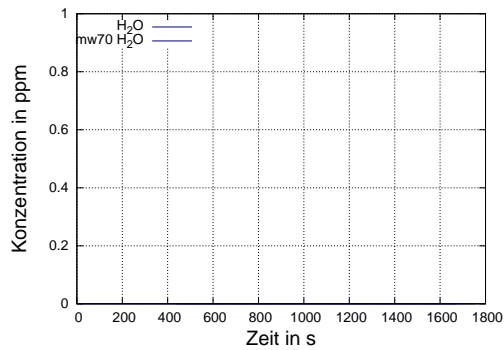
(b)



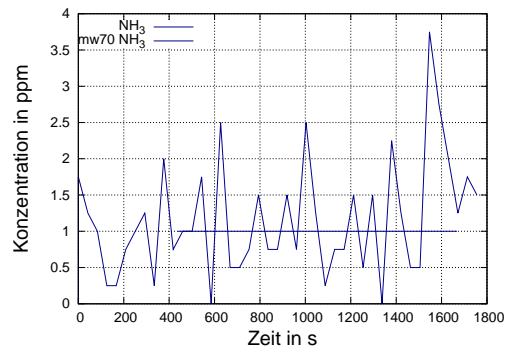
(c)



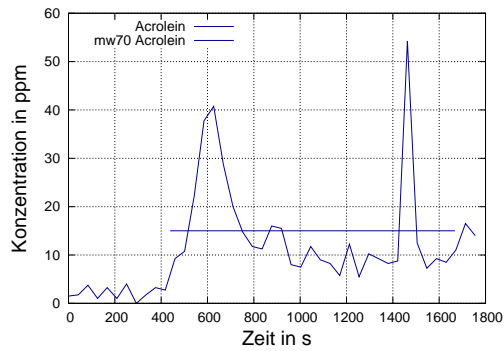
(d)



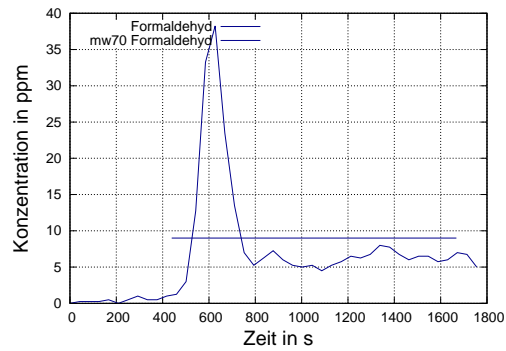
(e)



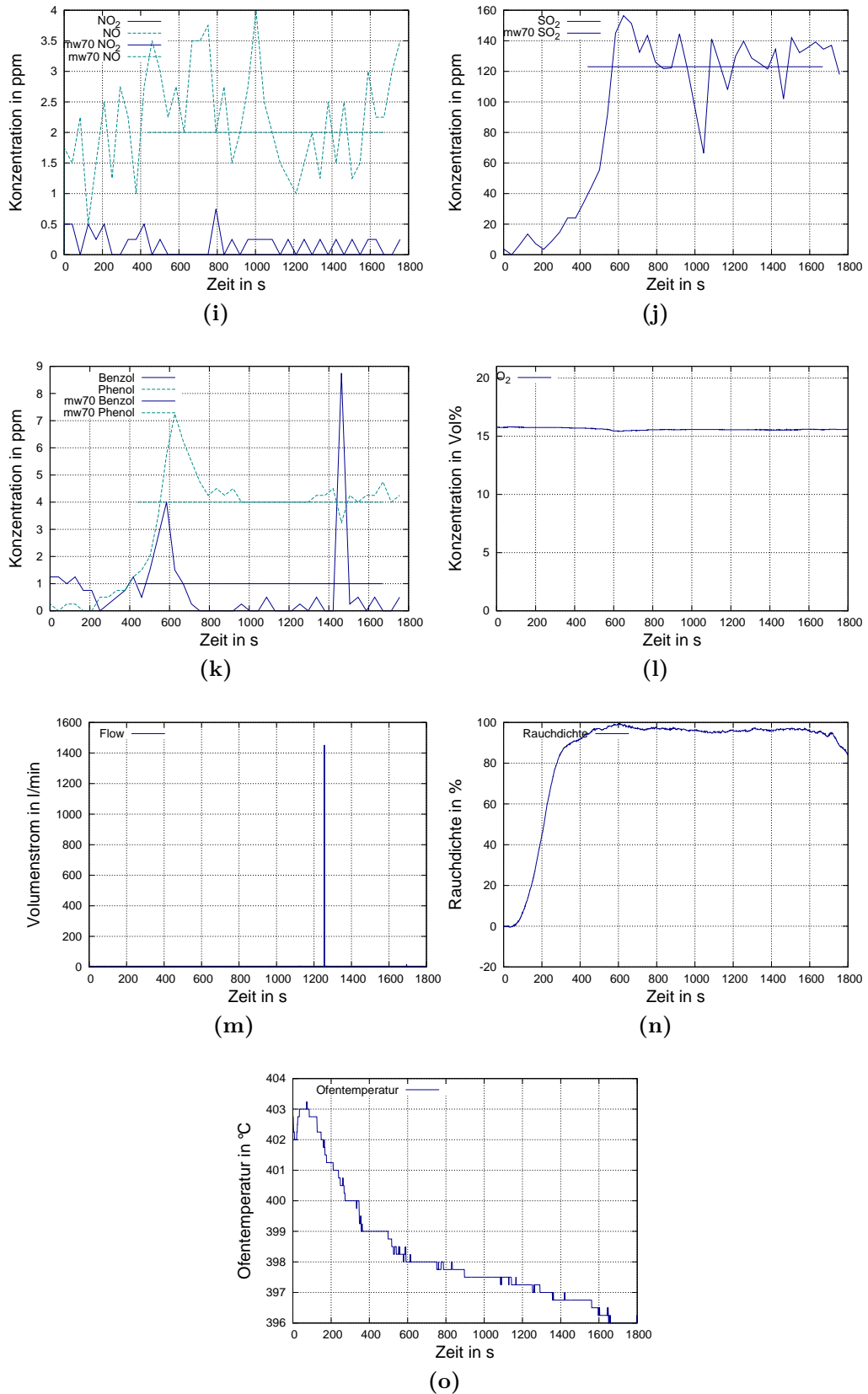
(f)



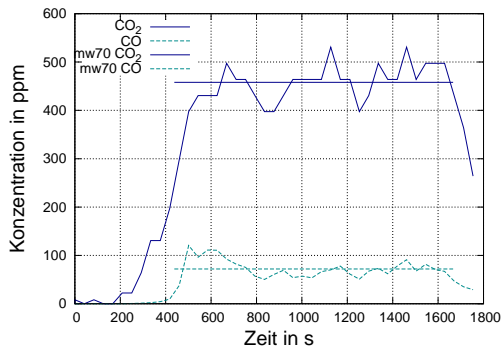
(g)



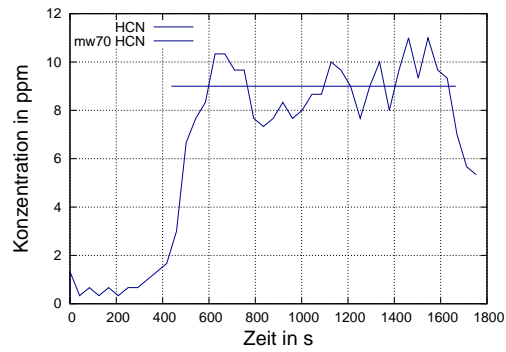
(h)



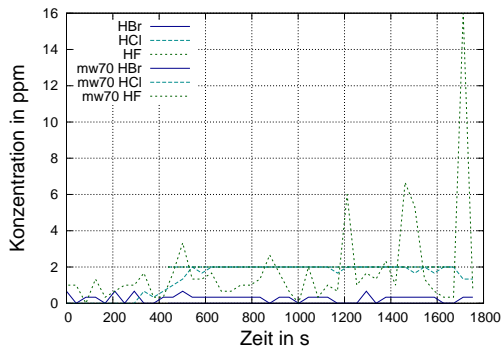
**Abbildung C.13:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3045SE 400 °C und 18 vol% O<sub>2</sub>

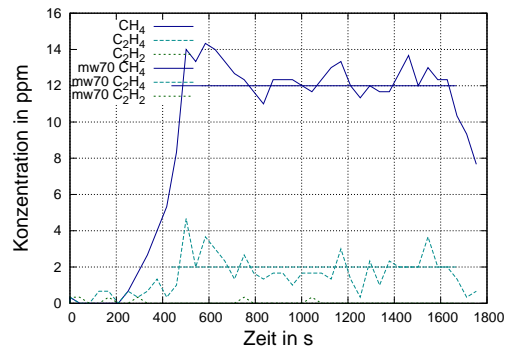
(a)



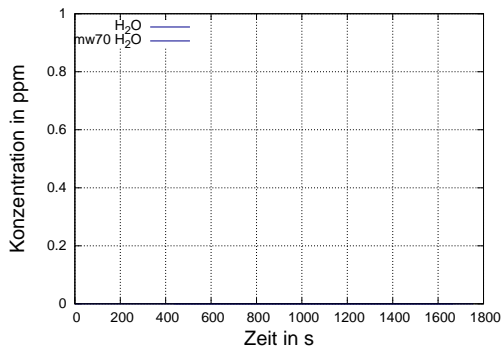
(b)



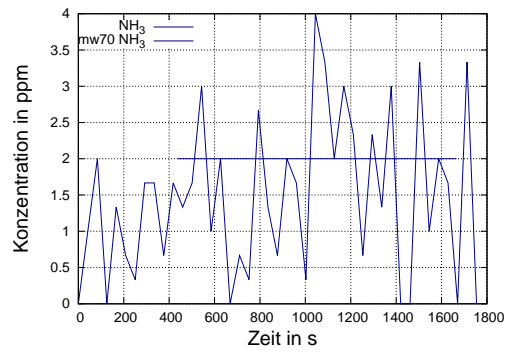
(c)



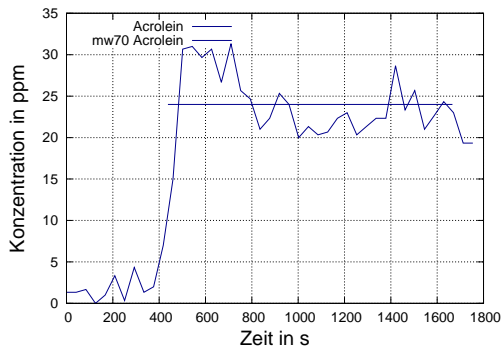
(d)



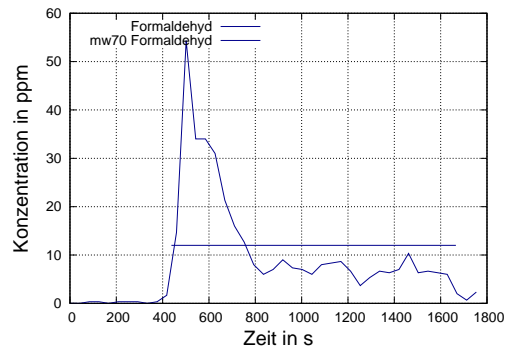
(e)



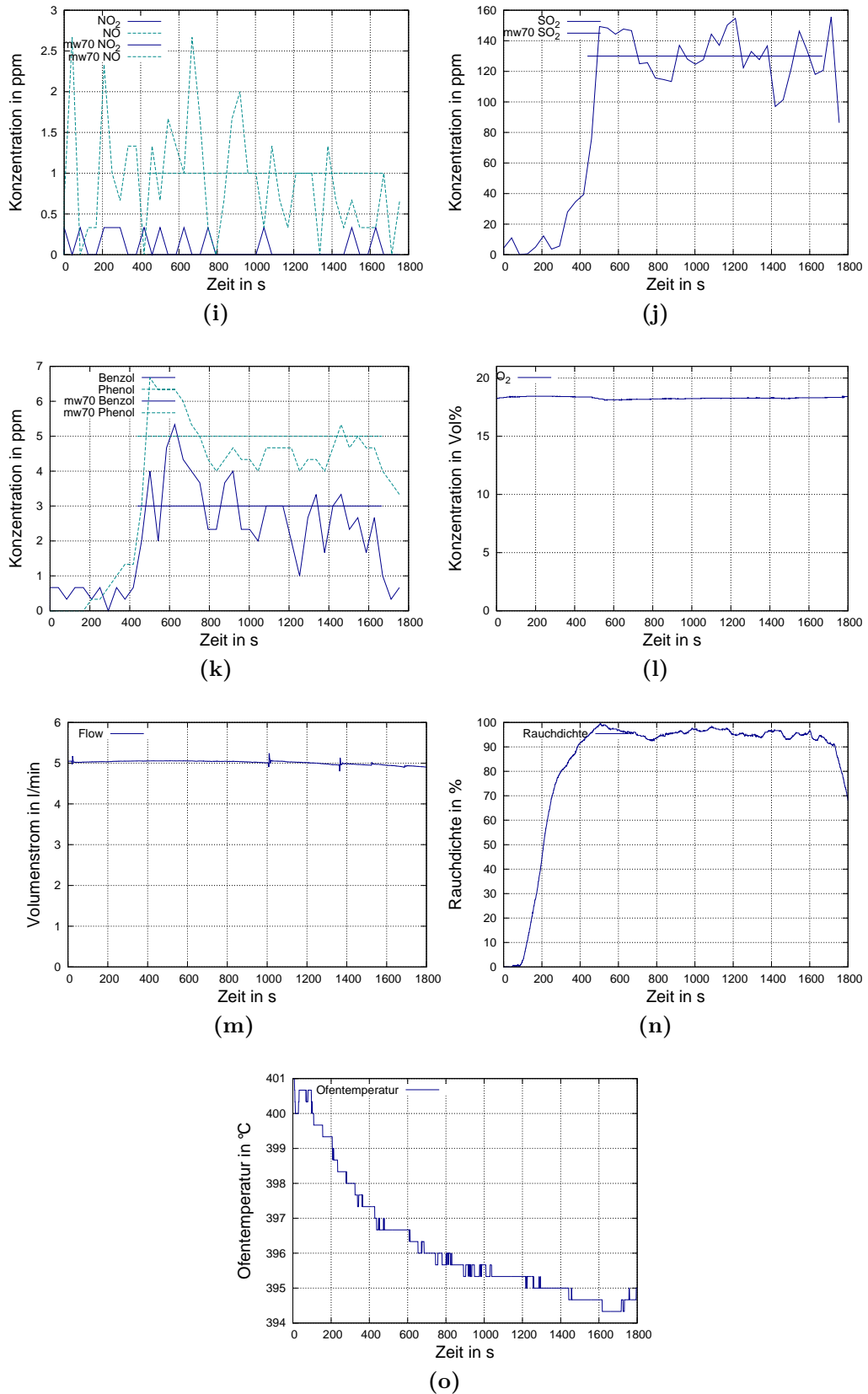
(f)



(g)

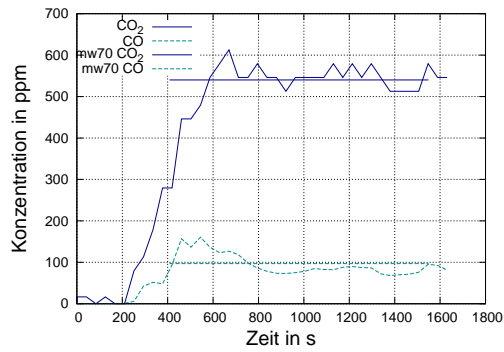


(h)

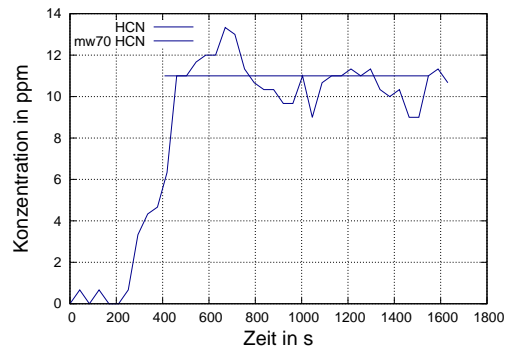


**Abbildung C.14:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

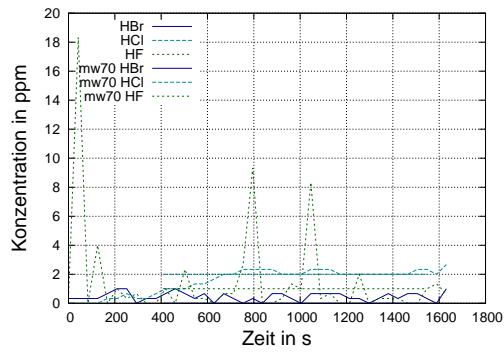


PUR3045SE 400 °C und 21 vol% O<sub>2</sub>

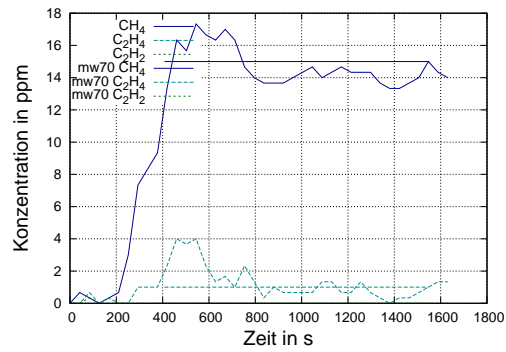
(a)



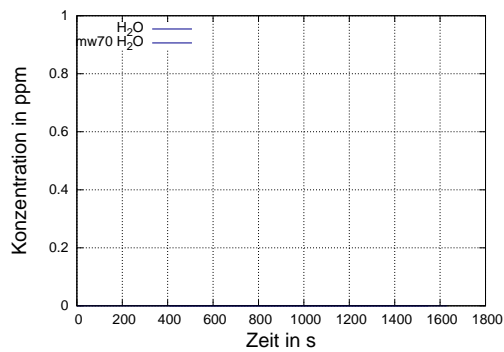
(b)



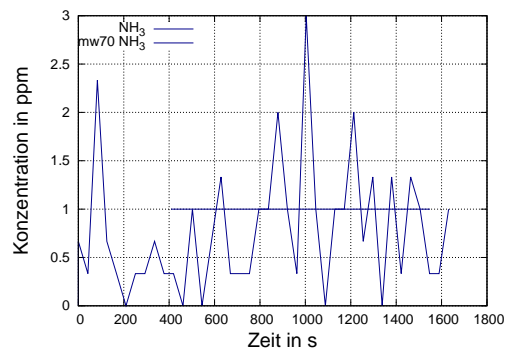
(c)



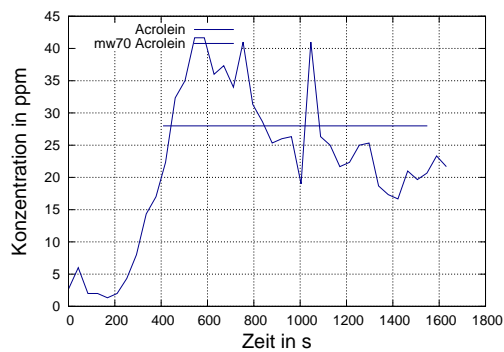
(d)



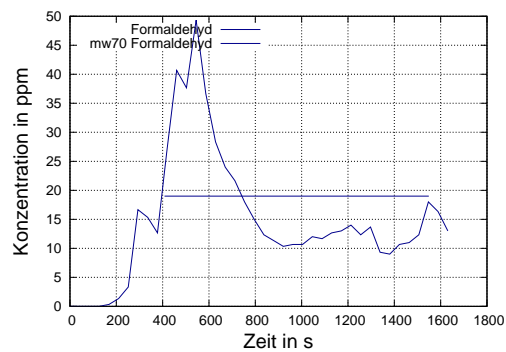
(e)



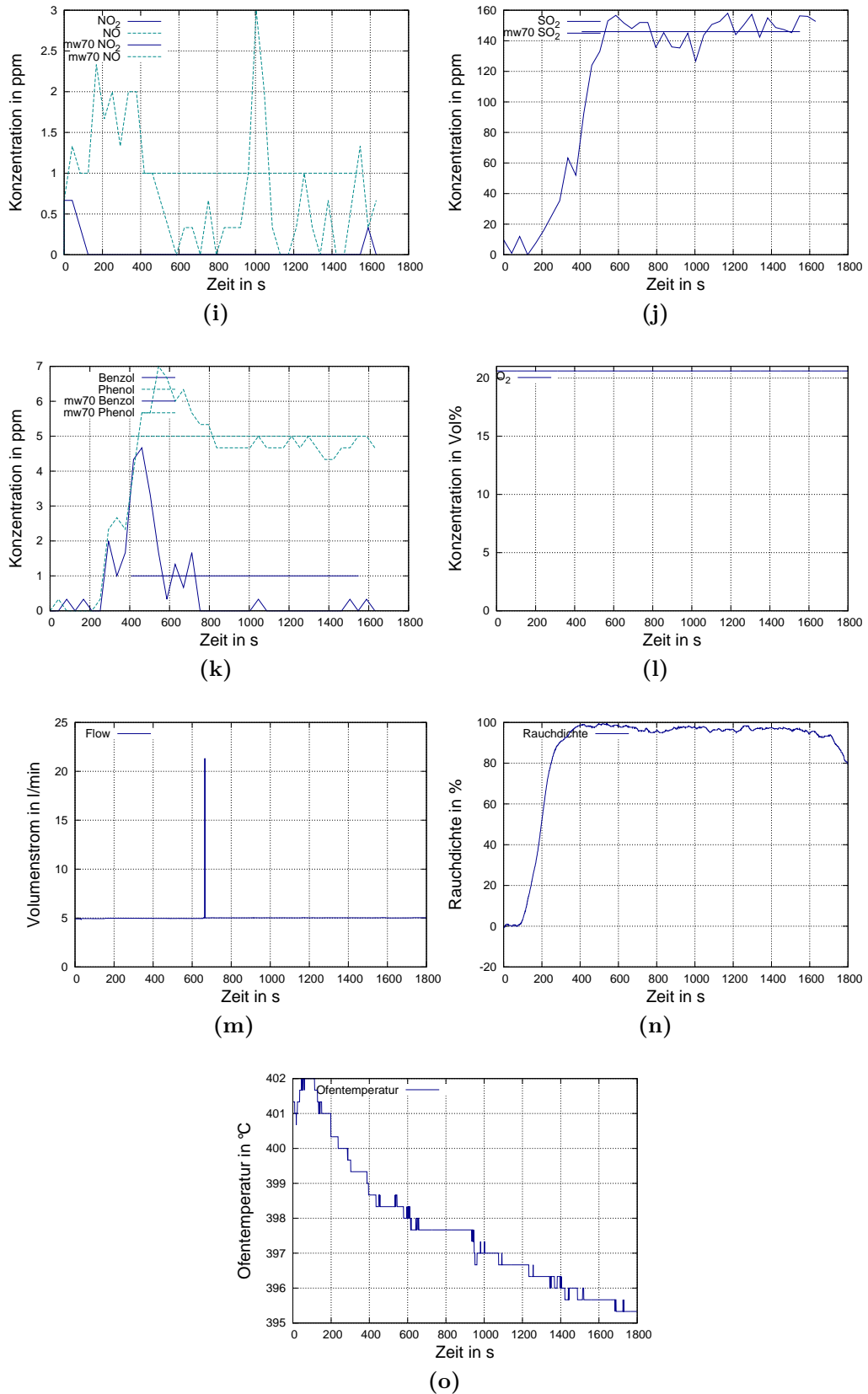
(f)



(g)

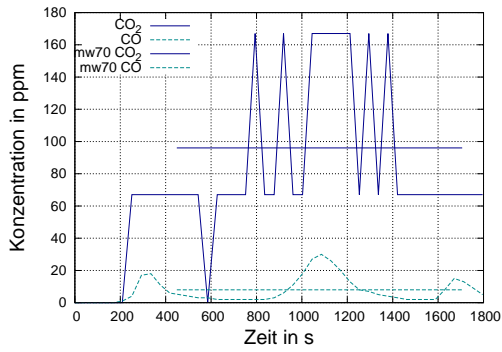


(h)

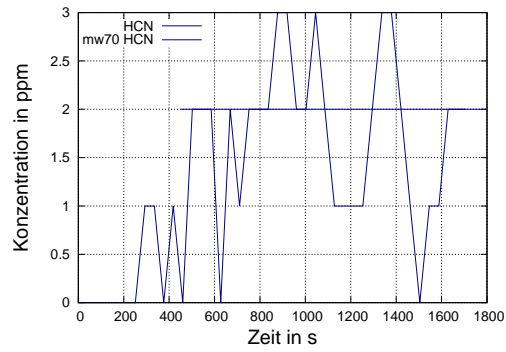


**Abbildung C.15:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

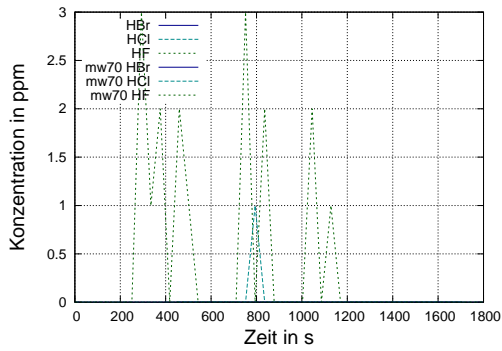
PUR3045SE 700°C

PUR3045SE 700°C und 0 vol% O<sub>2</sub>

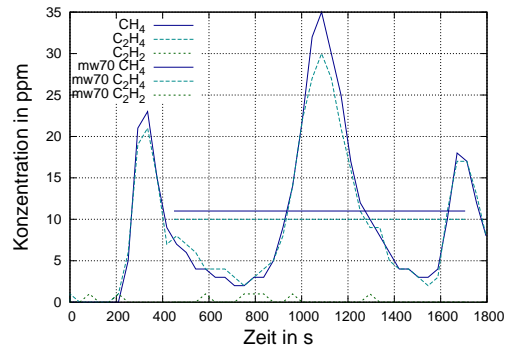
(a)



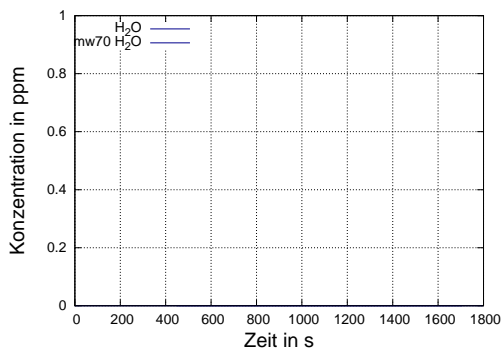
(b)



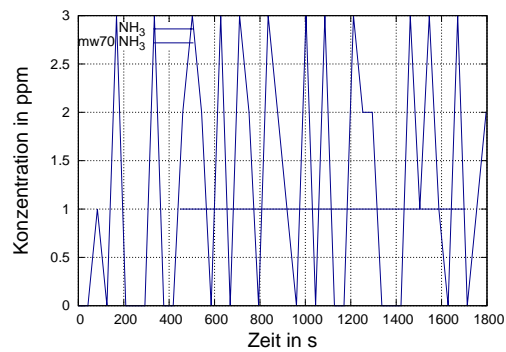
(c)



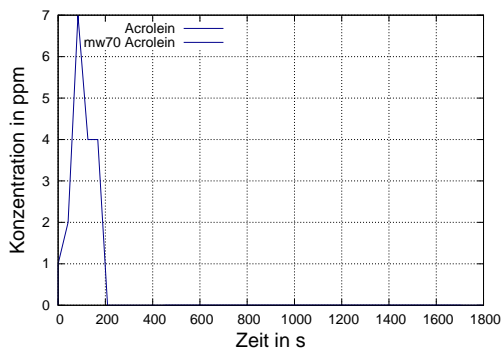
(d)



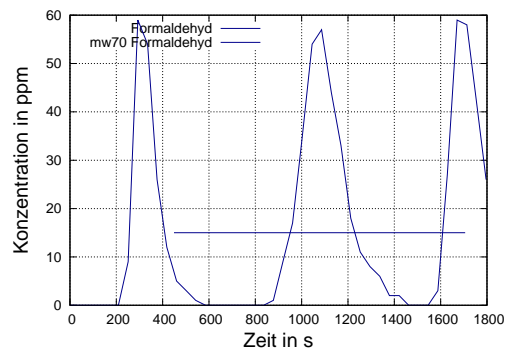
(e)



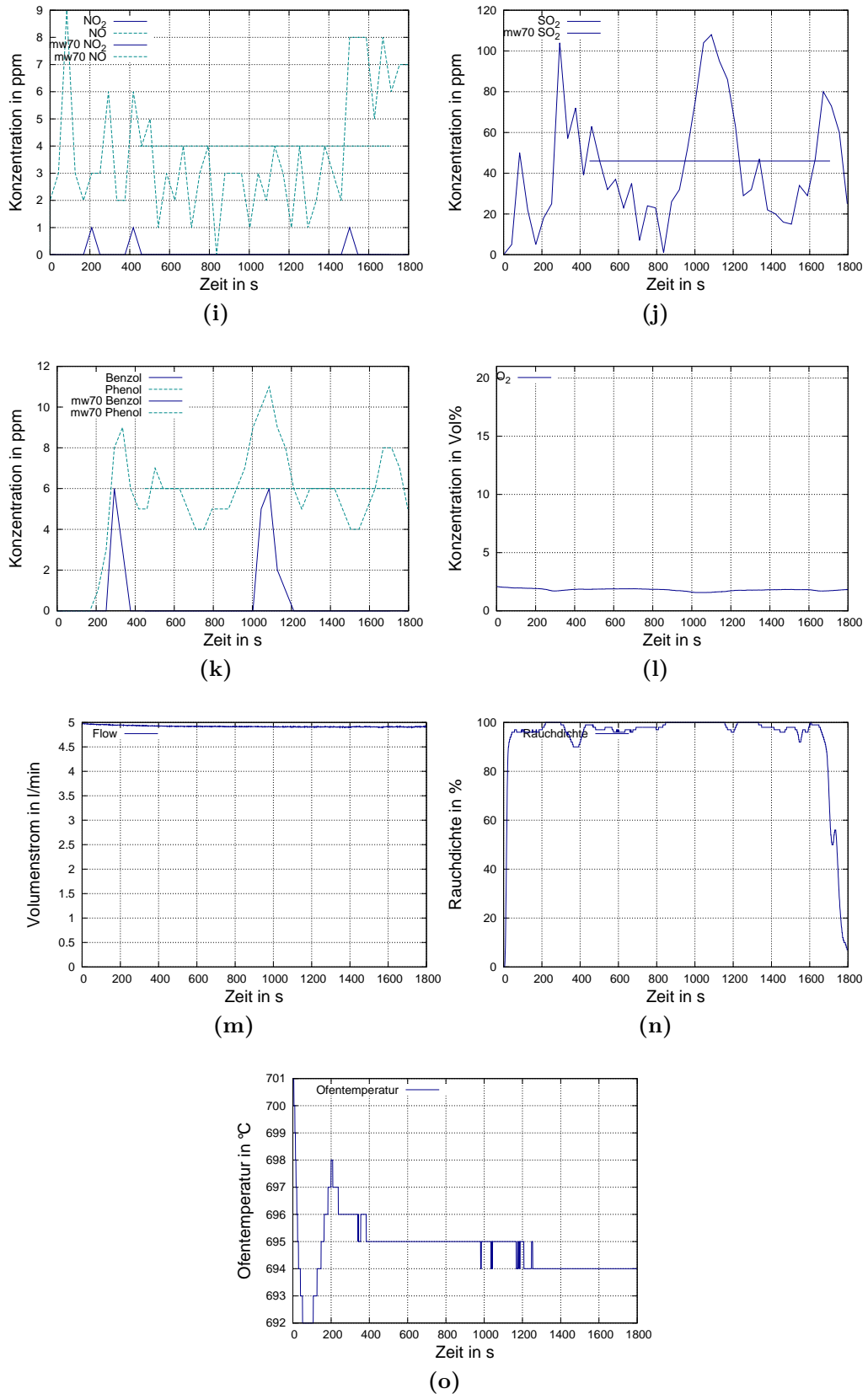
(f)



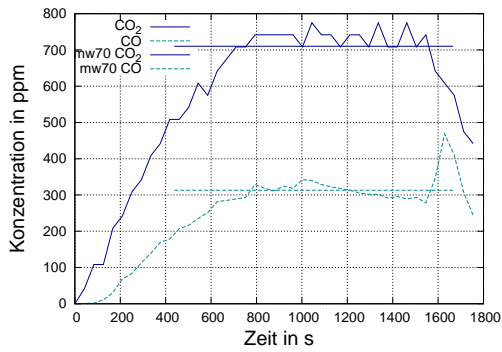
(g)



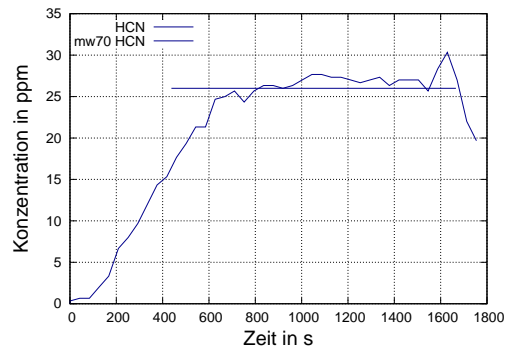
(h)



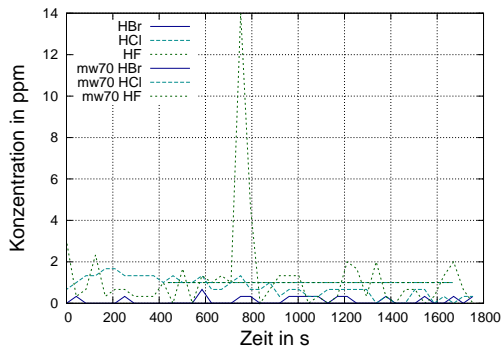
**Abbildung C.16:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3045SE 700 °C und 5 vol% O<sub>2</sub>

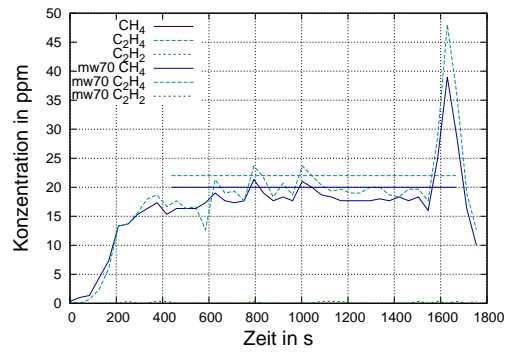
(a)



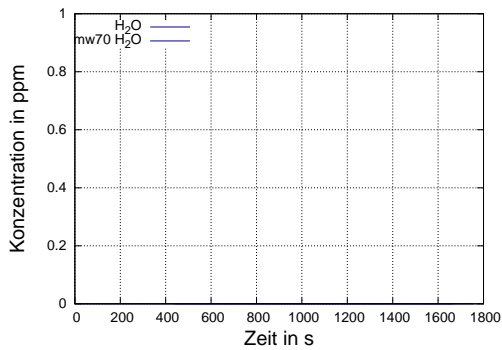
(b)



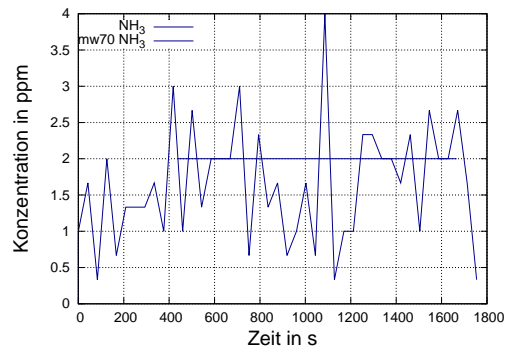
(c)



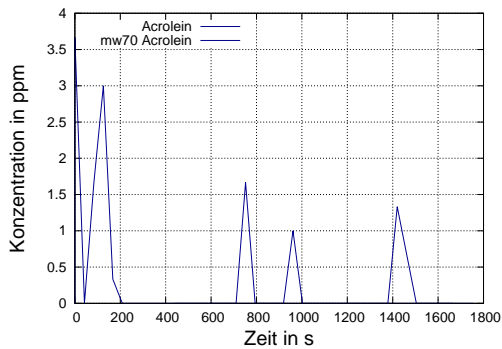
(d)



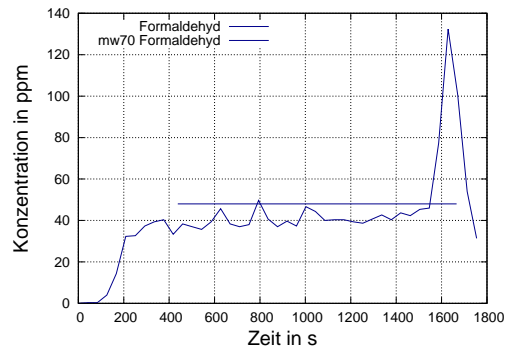
(e)



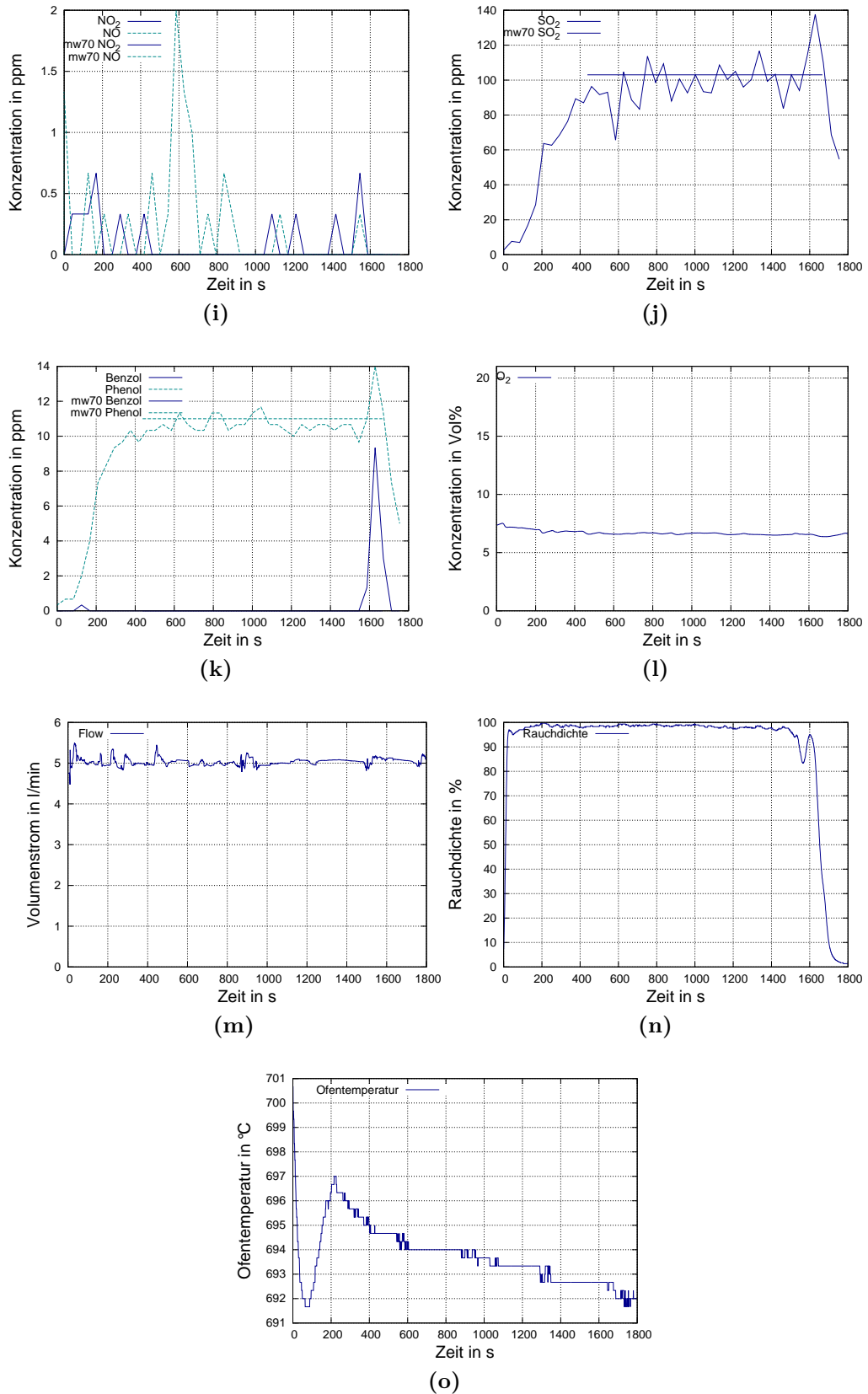
(f)



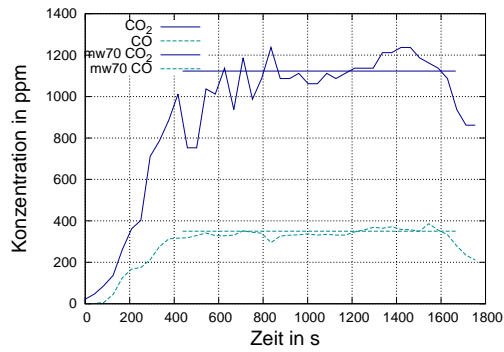
(g)



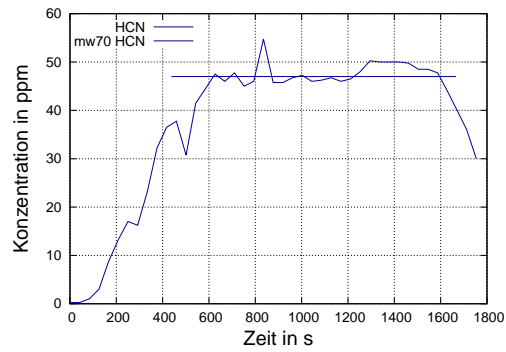
(h)



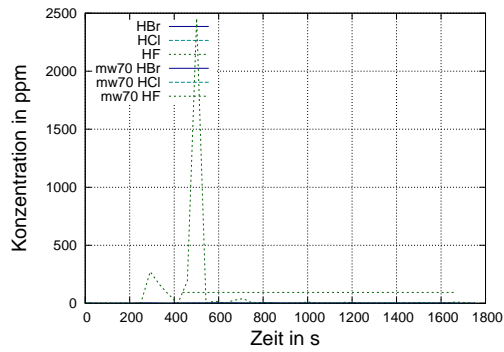
**Abbildung C.17:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3045SE 700 °C und 15 vol% O<sub>2</sub>

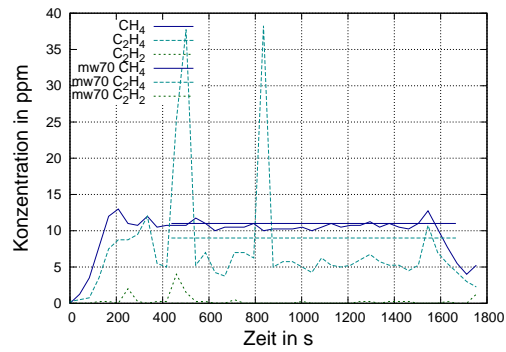
(a)



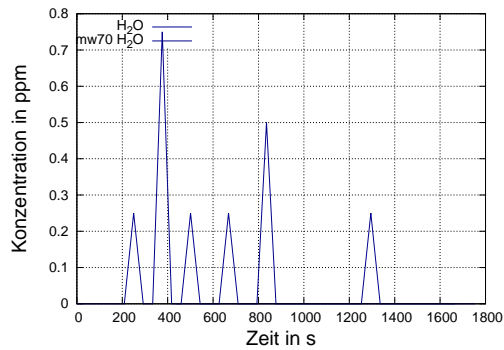
(b)



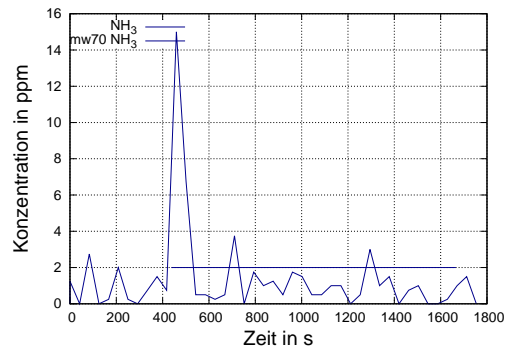
(c)



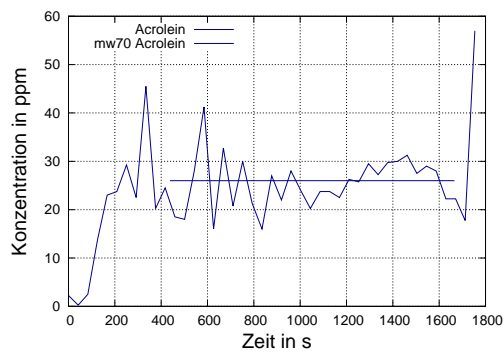
(d)



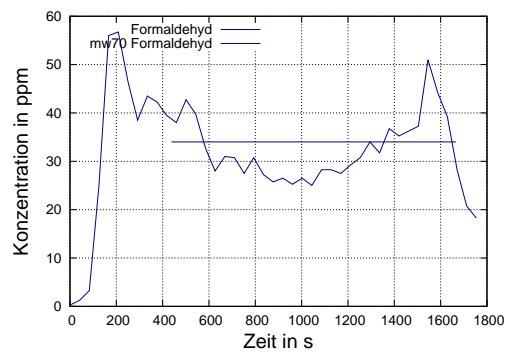
(e)



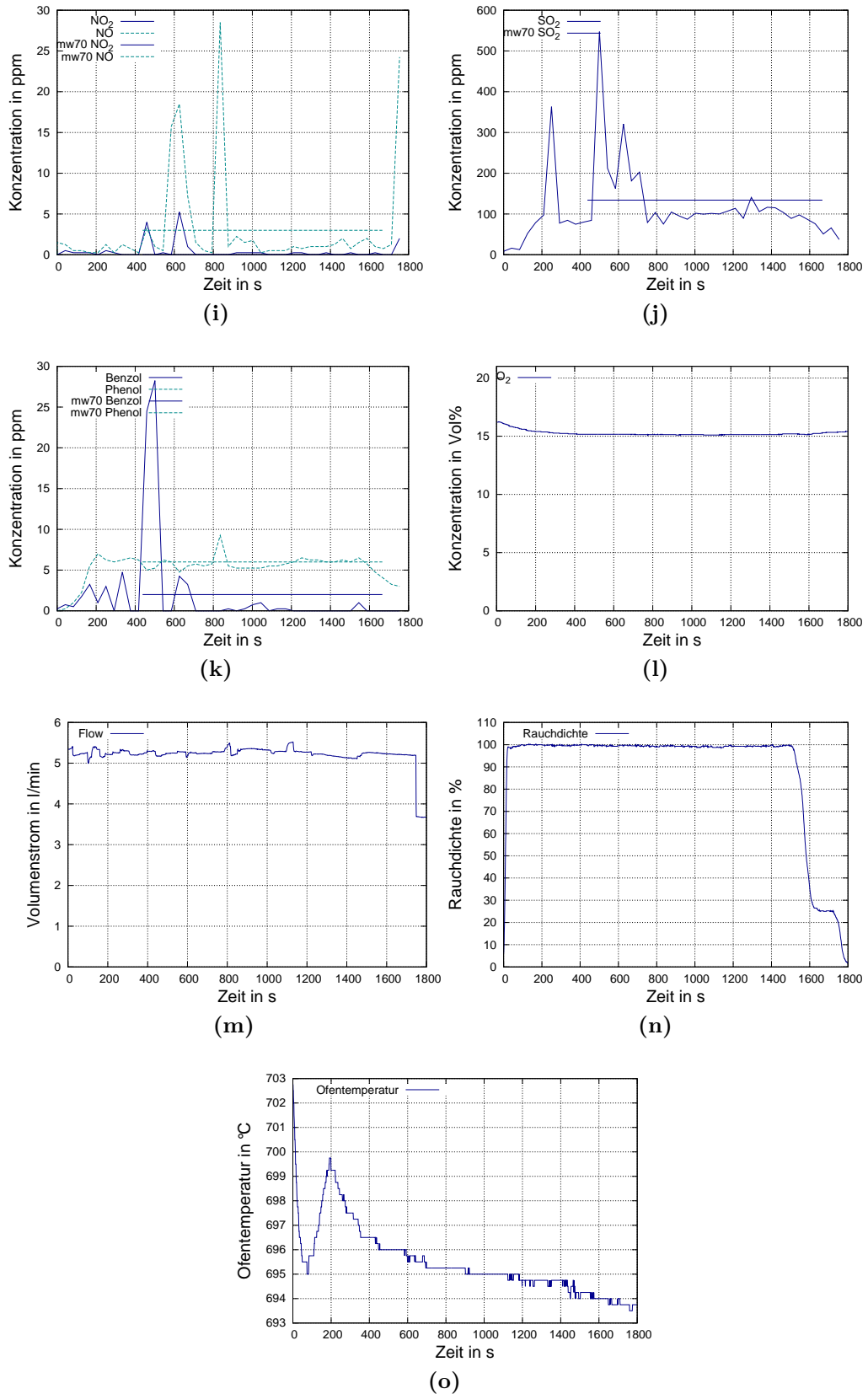
(f)



(g)

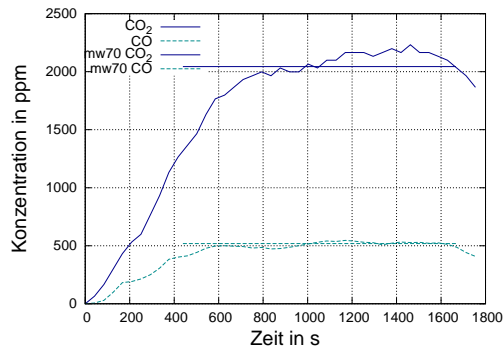


(h)

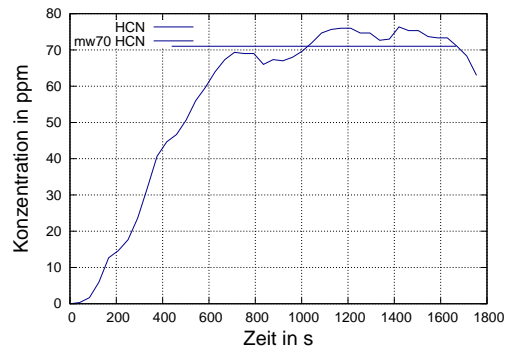


**Abbildung C.18:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

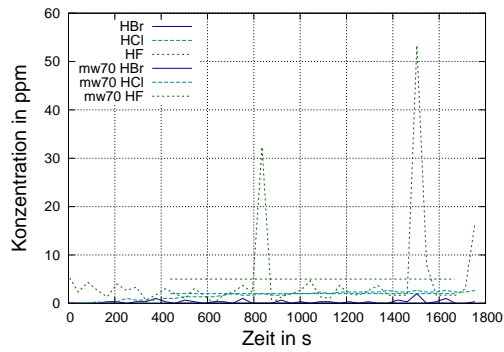


PUR3045SE 700 °C und 18 vol% O<sub>2</sub>

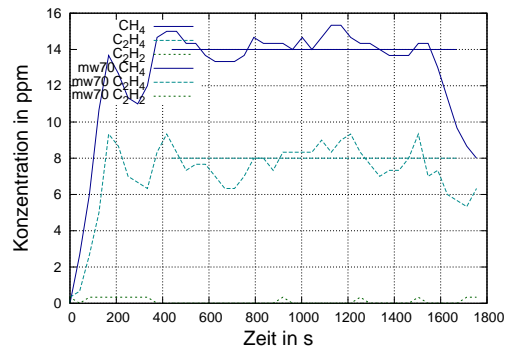
(a)



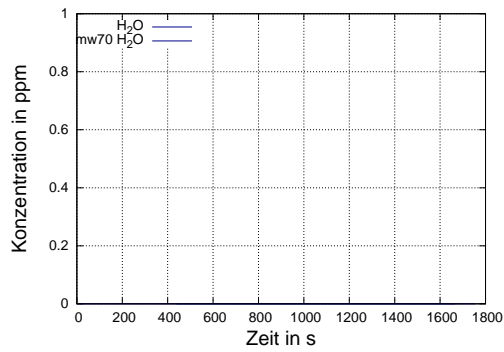
(b)



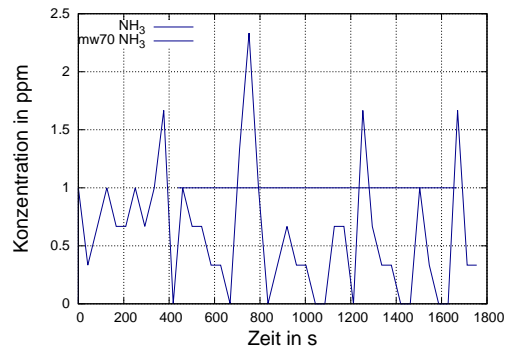
(c)



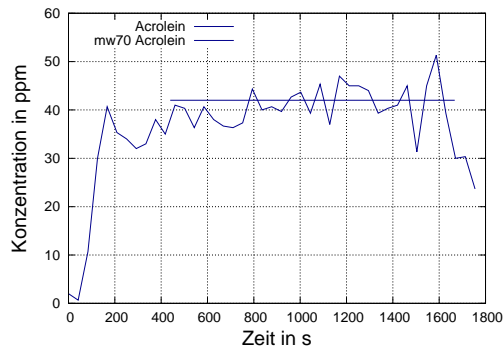
(d)



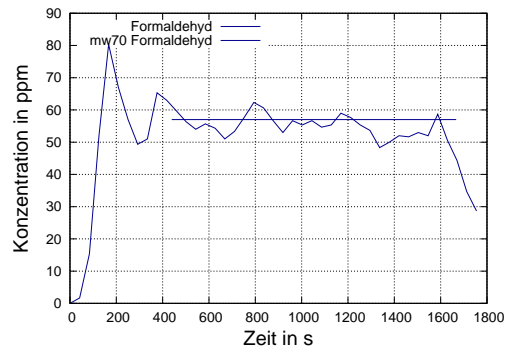
(e)



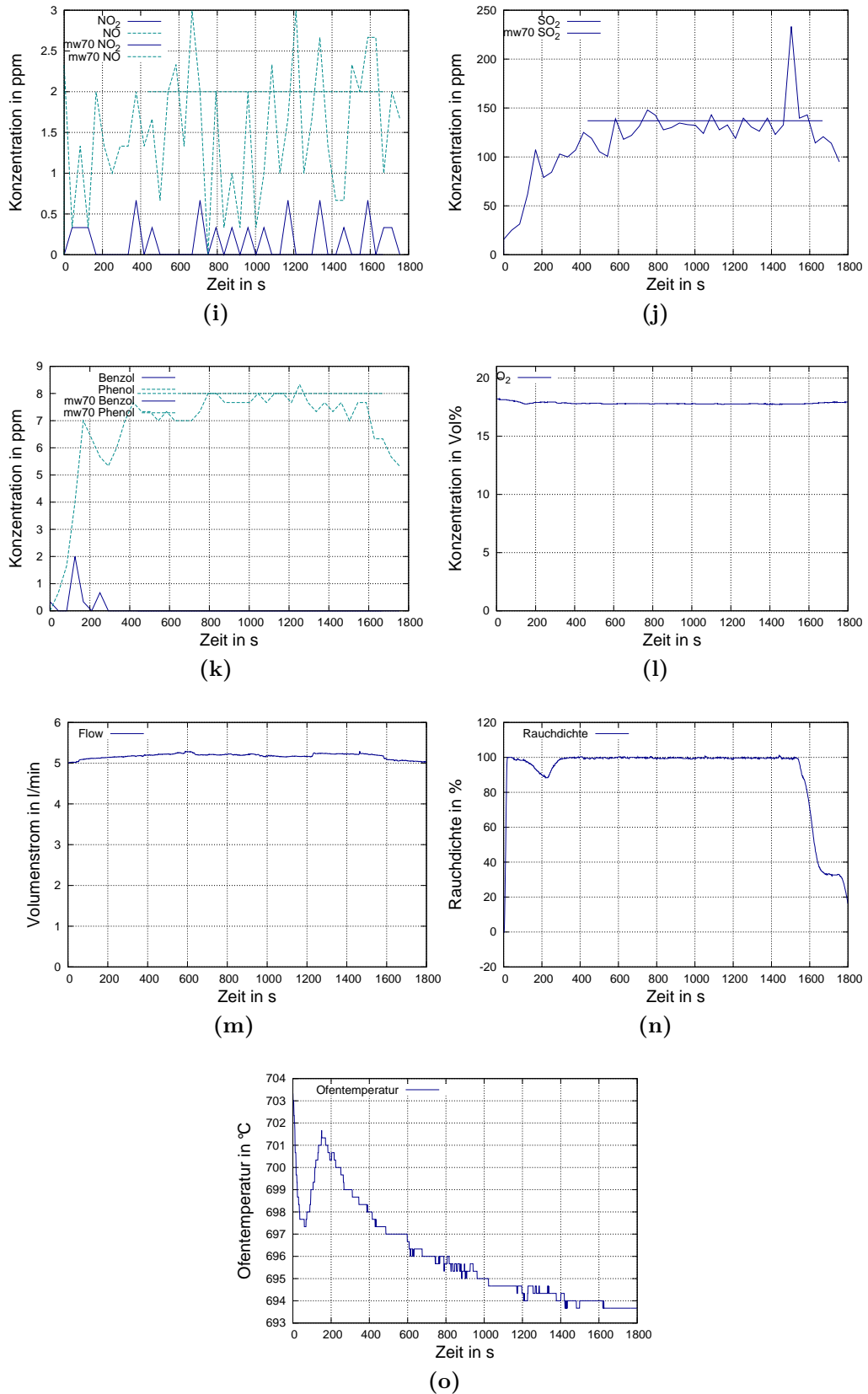
(f)



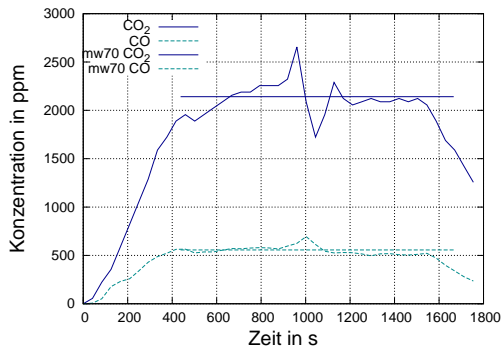
(g)



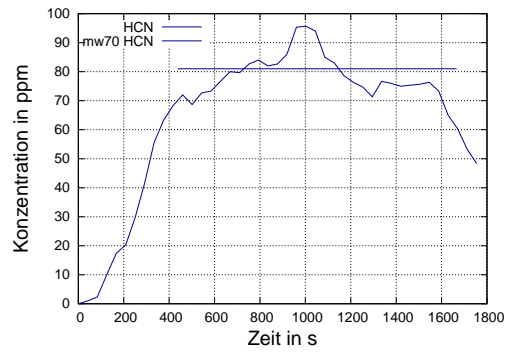
(h)



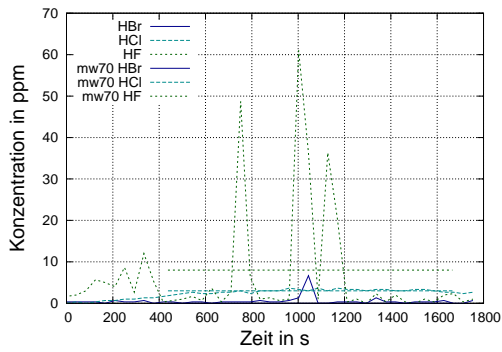
**Abbildung C.19:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PUR3045SE 700 °C und 21 vol% O<sub>2</sub>

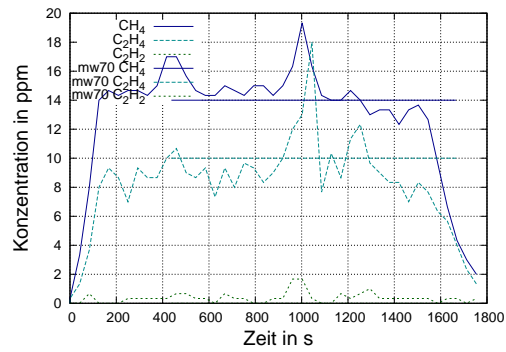
(a)



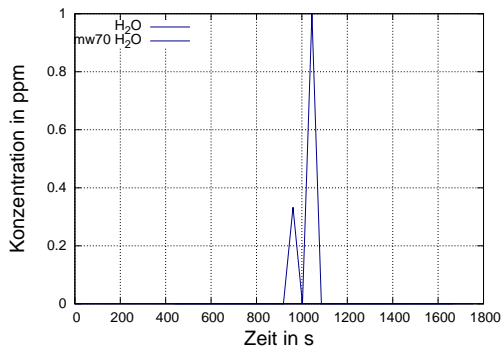
(b)



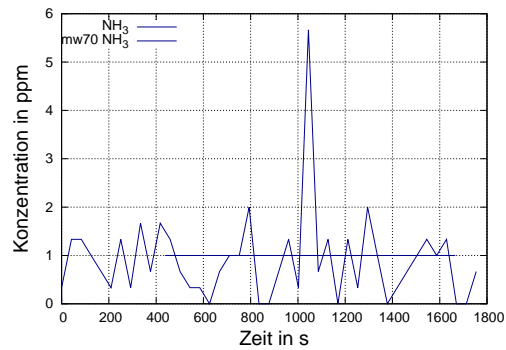
(c)



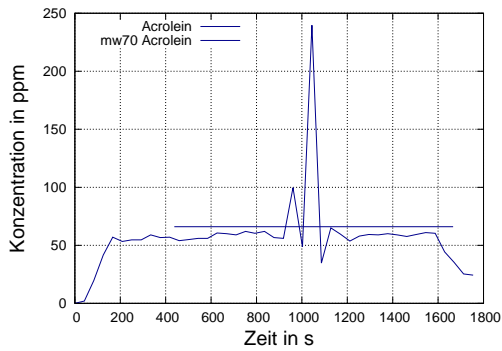
(d)



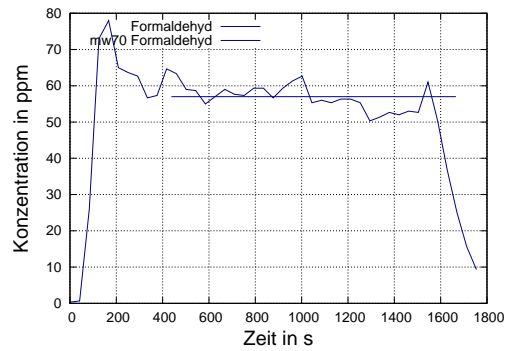
(e)



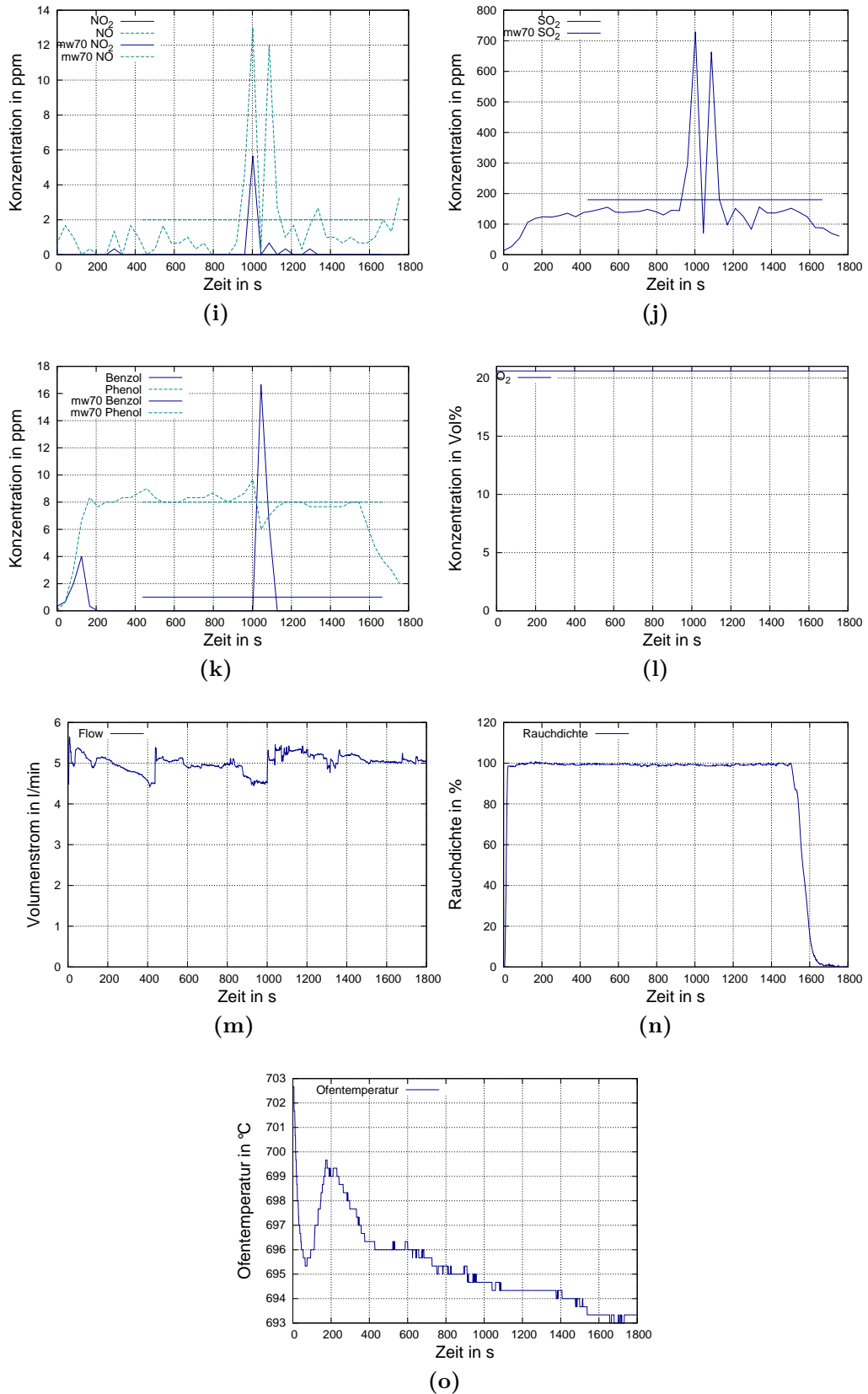
(f)



(g)



(h)















**Abbildung C.20:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

## Proben nach Versuch

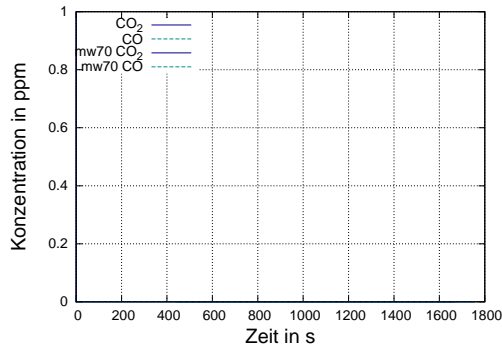
Die Proben nach den durchgeführten Versuchen mit  $200^{\circ}\text{C}$  sahen wie vor den Versuchen aus.

**Tabelle C.2:** PUR3045SE-Proben nach den DIN-Rohr Versuchen

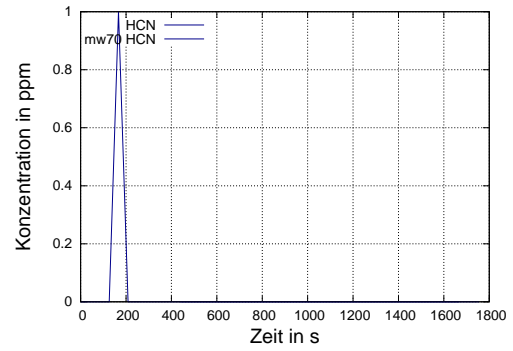
	200 °C	400 °C	700 °C
5 vol% O <sub>2</sub>			
15 vol% O <sub>2</sub>			
18 vol% O <sub>2</sub>			
21 vol% O <sub>2</sub>			

## C.3 PVC

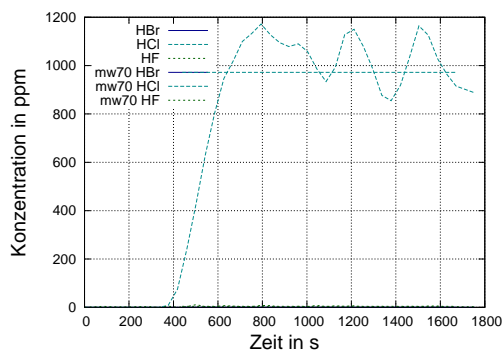
PVC 400 °C

PVC 400 °C und 0 vol% O<sub>2</sub>

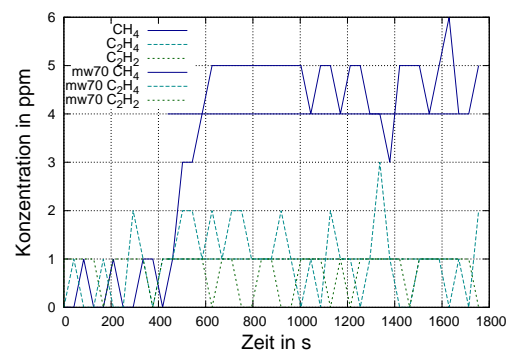
(a)



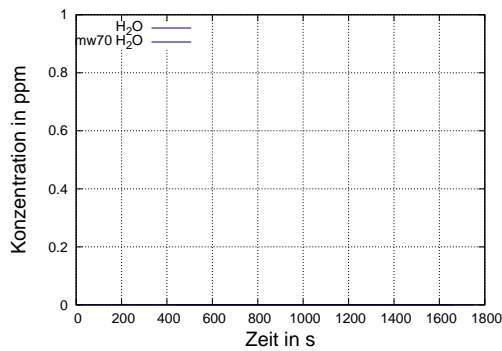
(b)



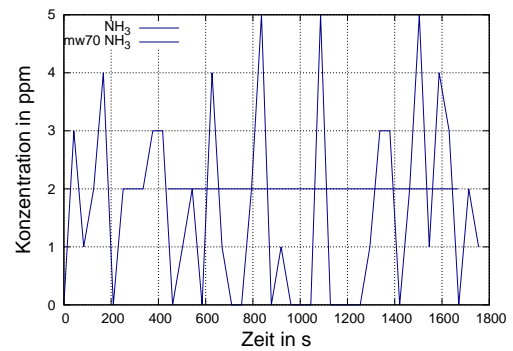
(c)



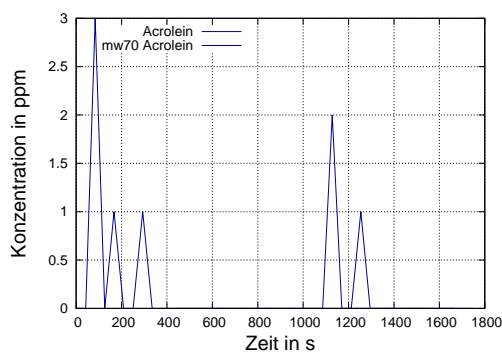
(d)



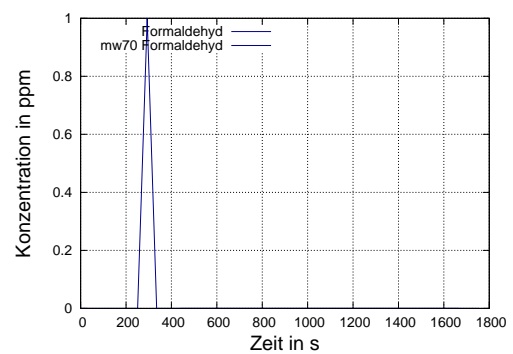
(e)



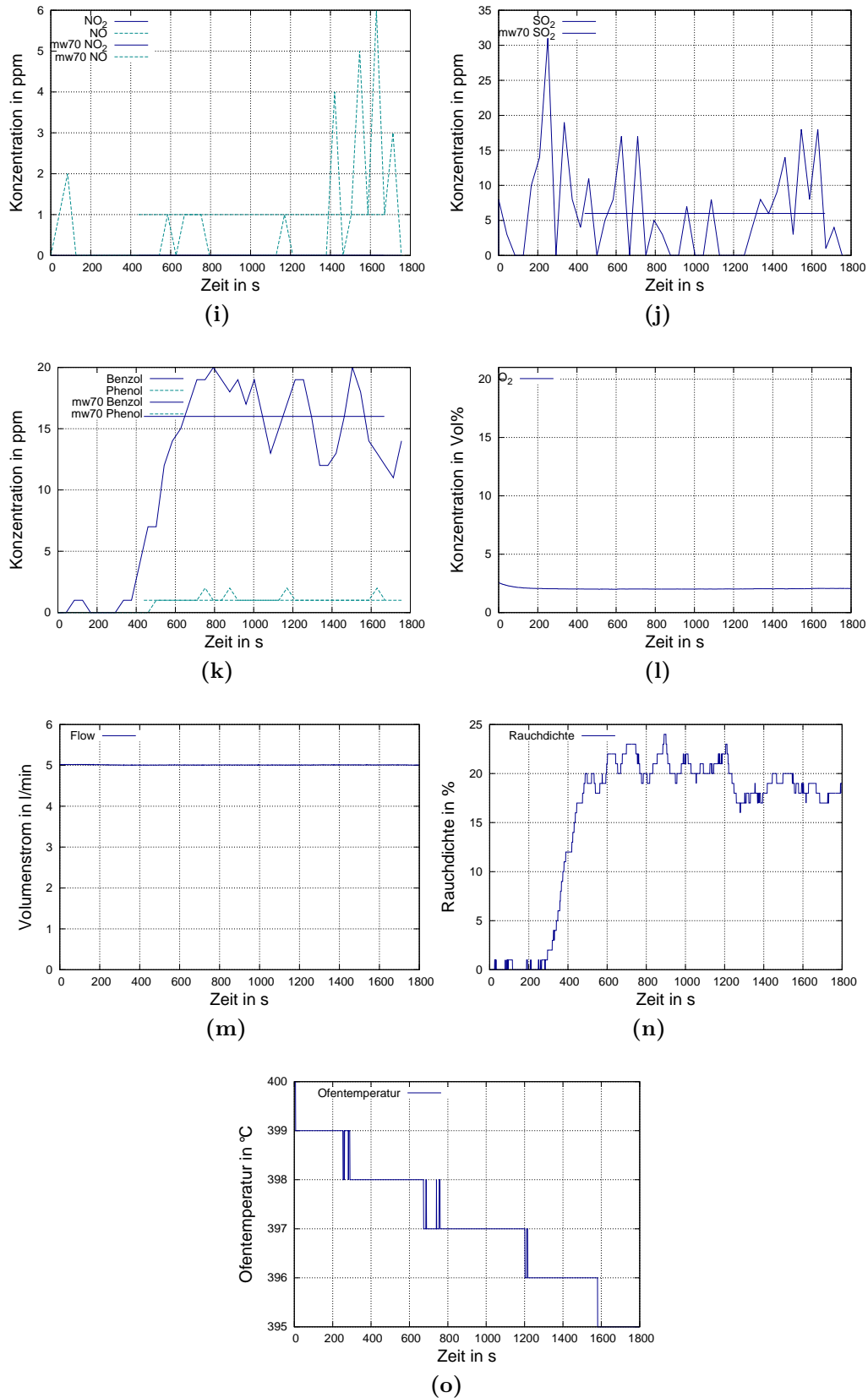
(f)



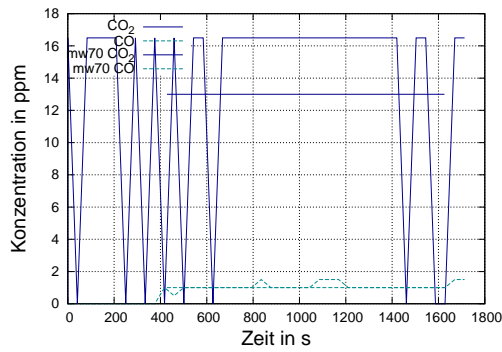
(g)



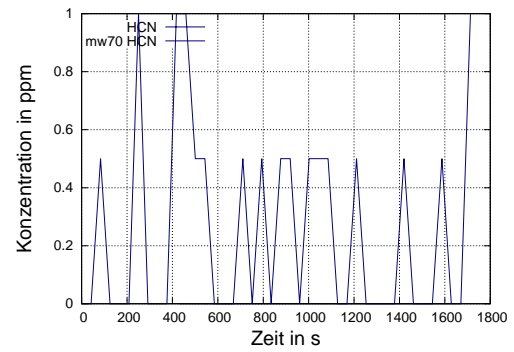
(h)



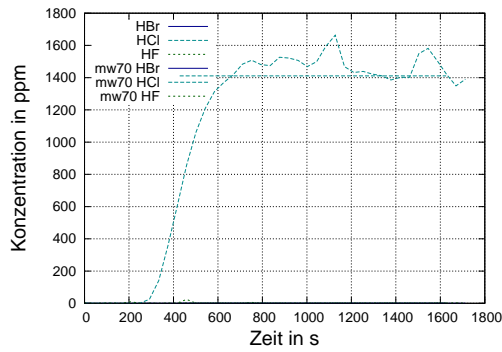
**Abbildung C.21:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 400 °C und 5 vol% O<sub>2</sub>

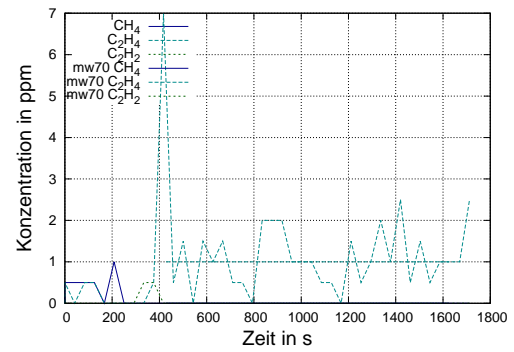
(a)



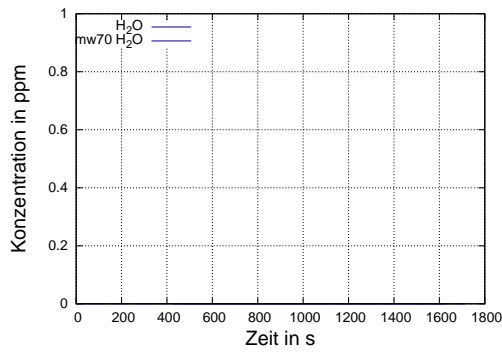
(b)



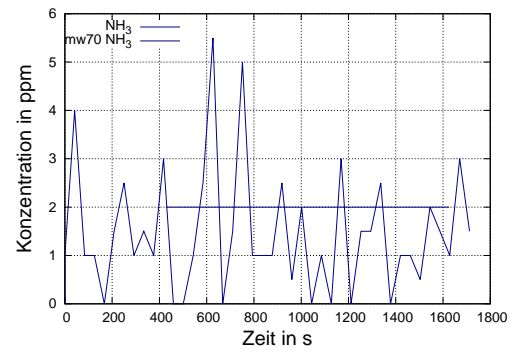
(c)



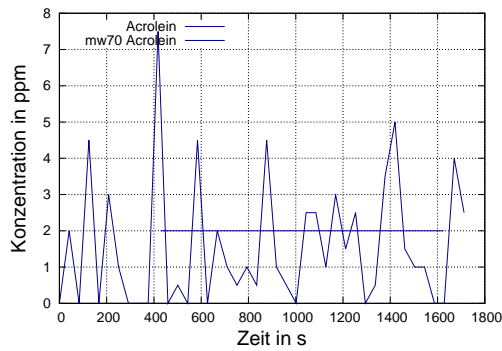
(d)



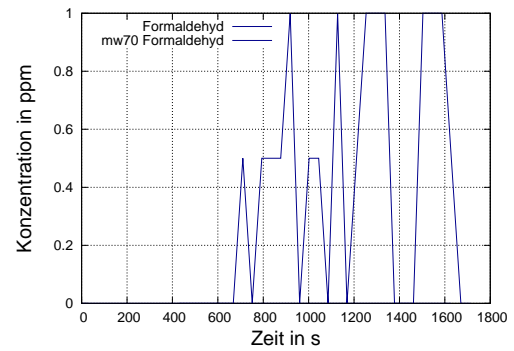
(e)



(f)

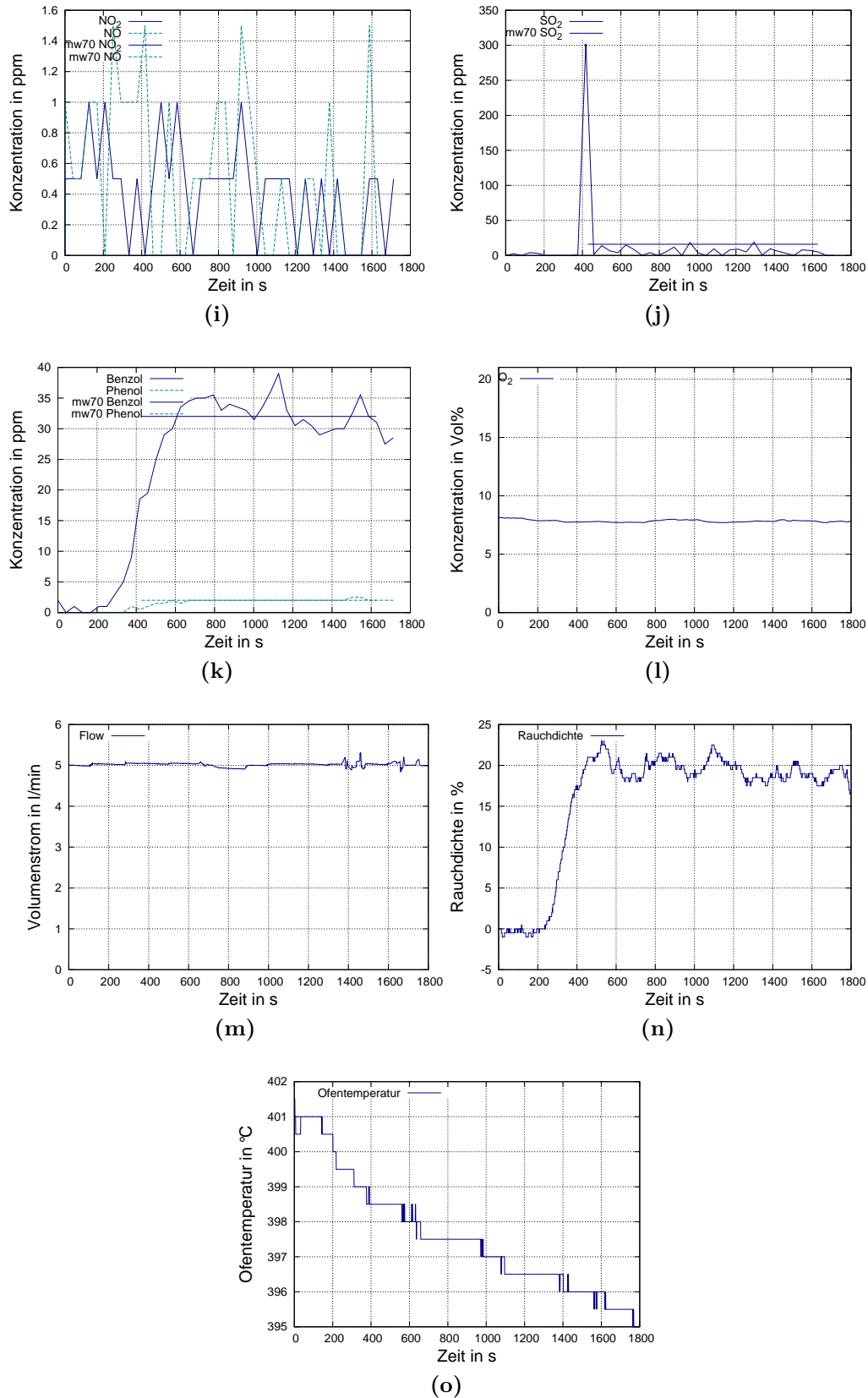


(g)

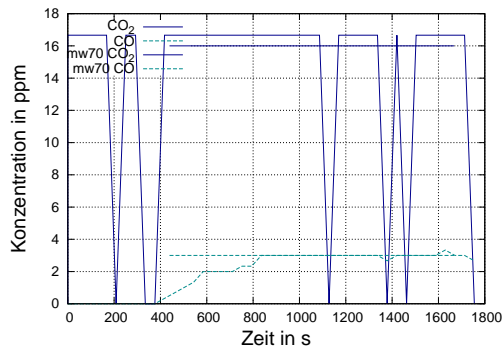


(h)

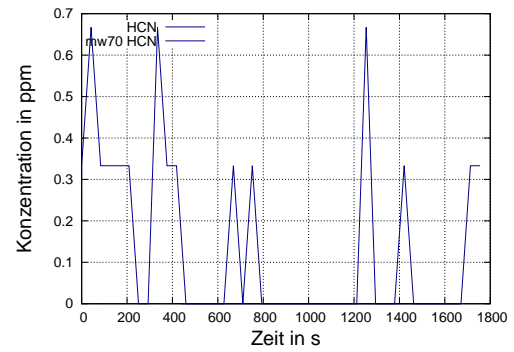




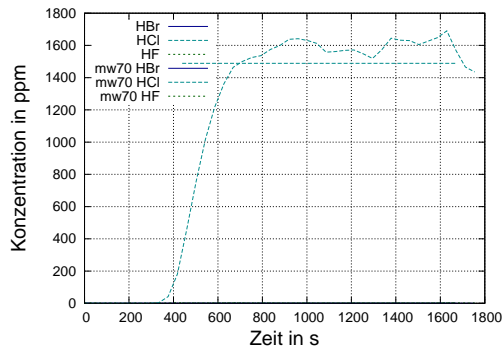
**Abbildung C.22:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 400 °C und 15 vol% O<sub>2</sub>

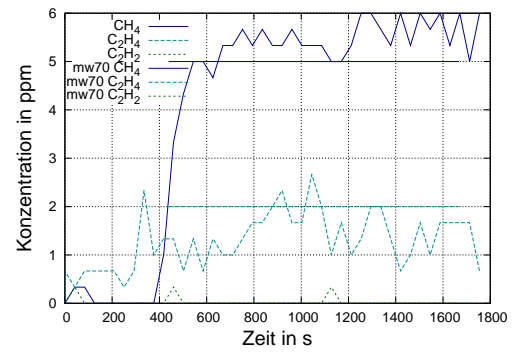
(a)



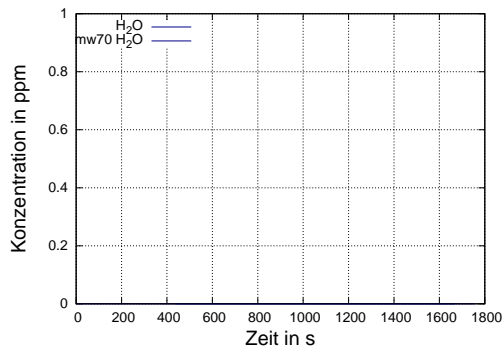
(b)



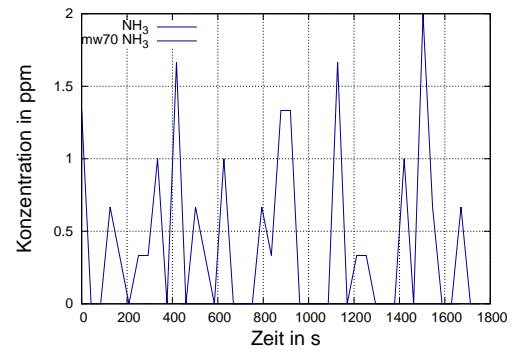
(c)



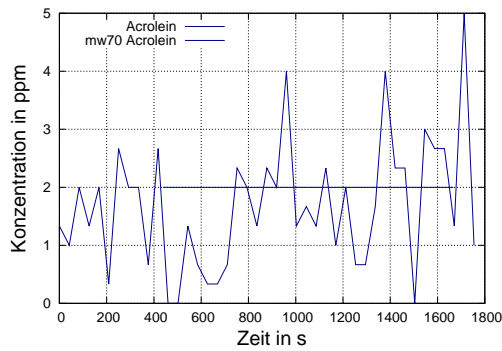
(d)



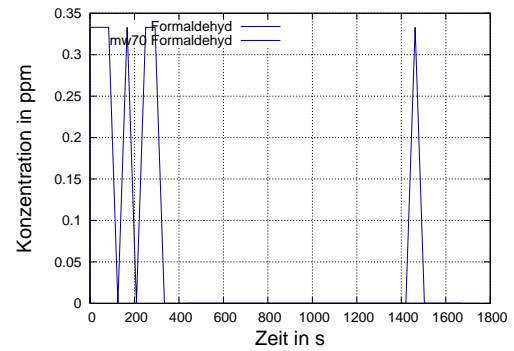
(e)



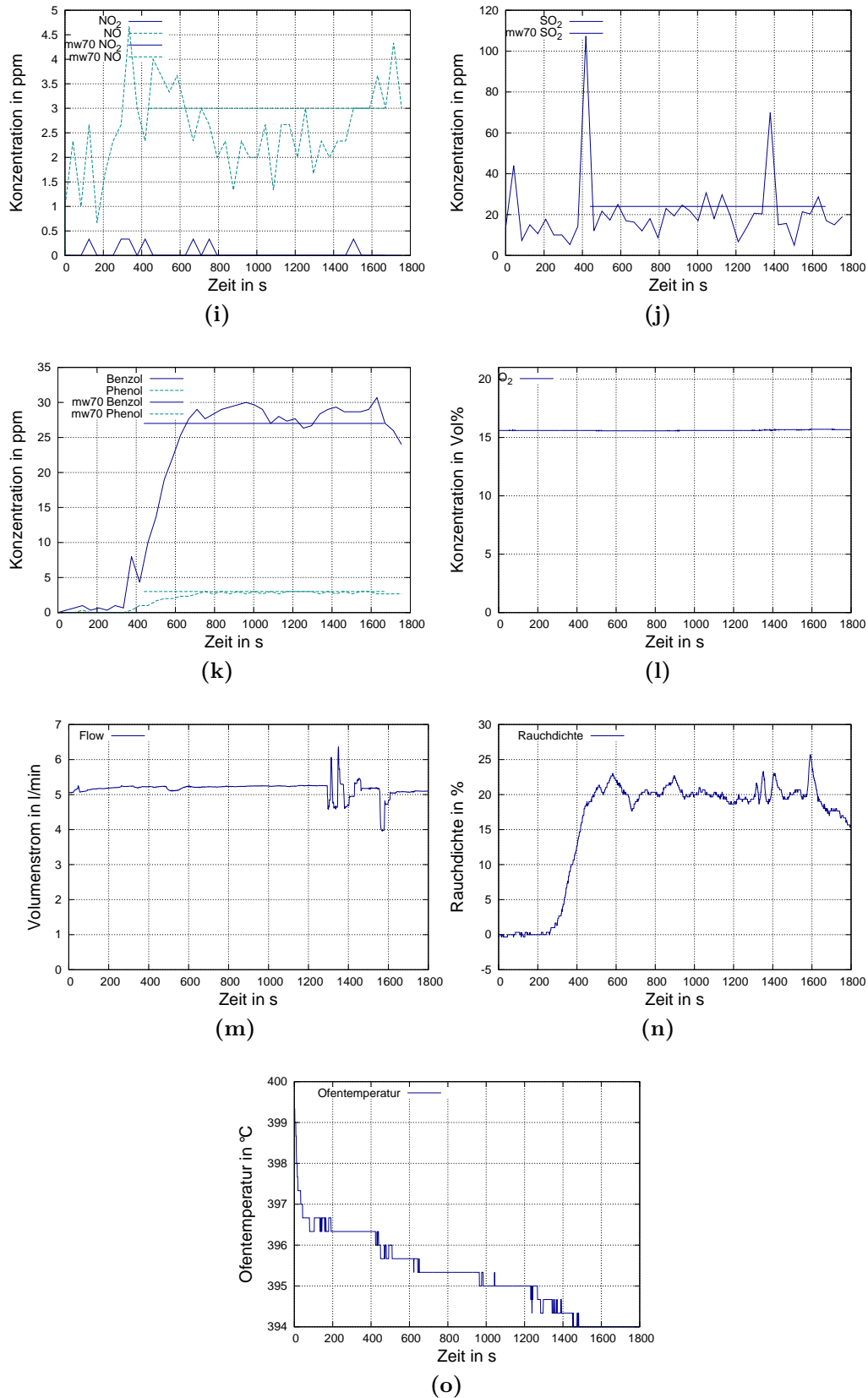
(f)



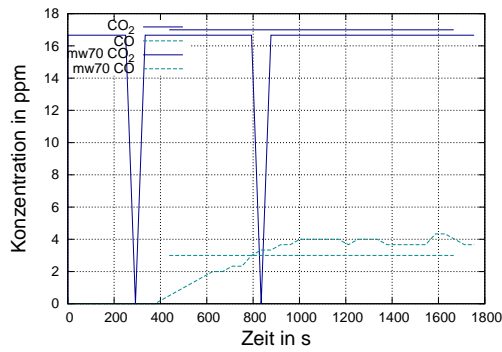
(g)



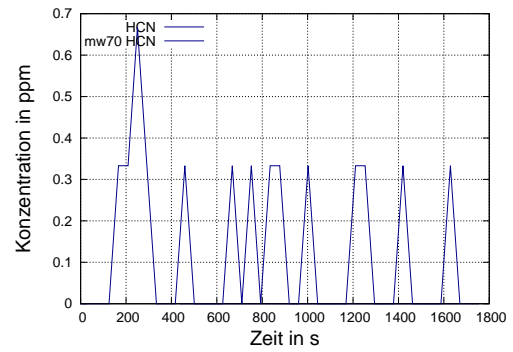
(h)



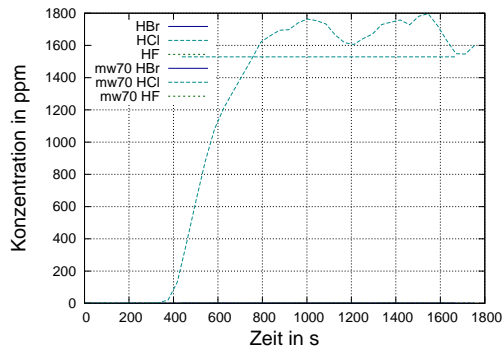
**Abbildung C.23:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 400 °C und 18 vol% O<sub>2</sub>

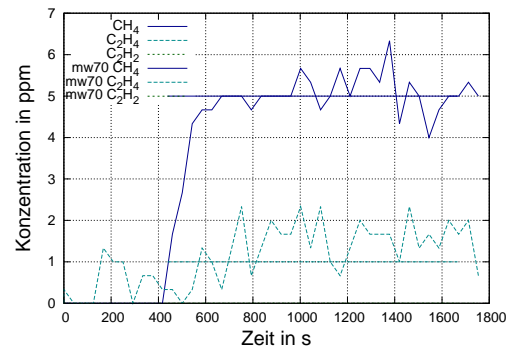
(a)



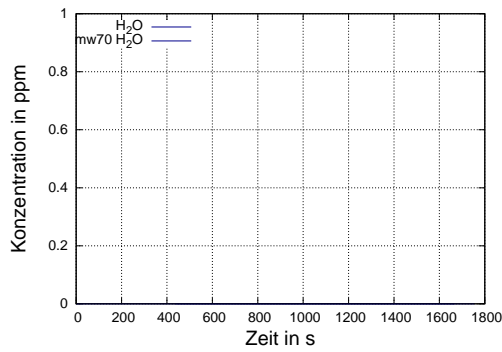
(b)



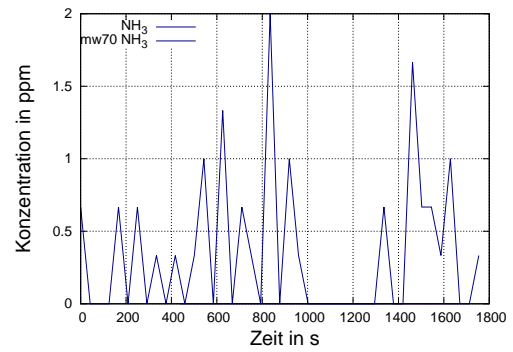
(c)



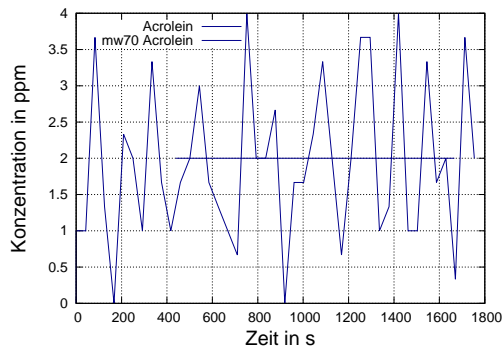
(d)



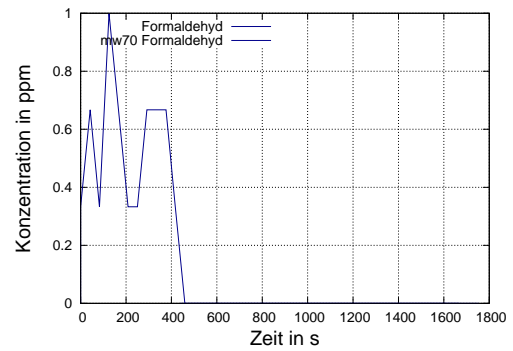
(e)



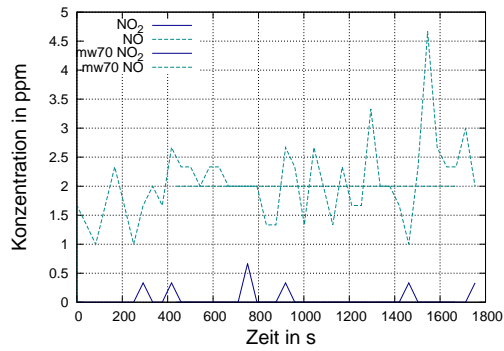
(f)



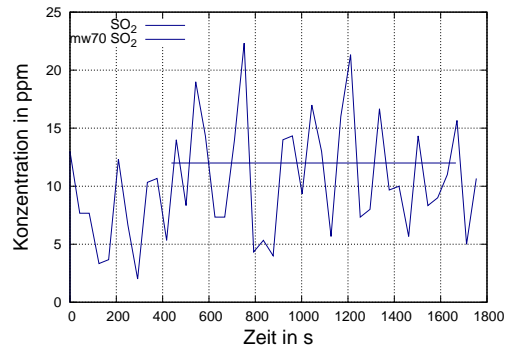
(g)



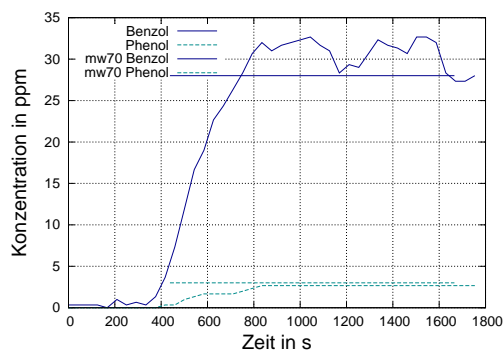
(h)



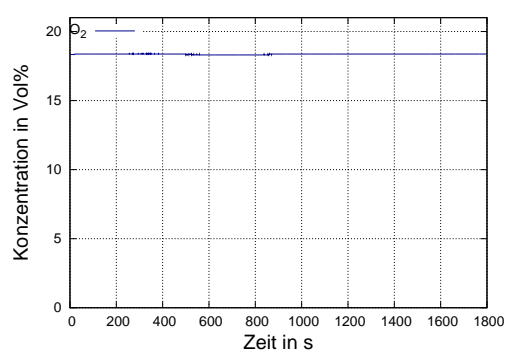
(i)



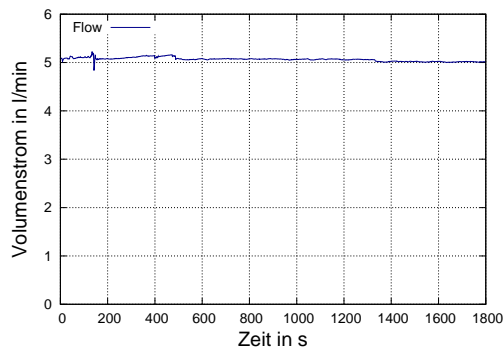
(j)



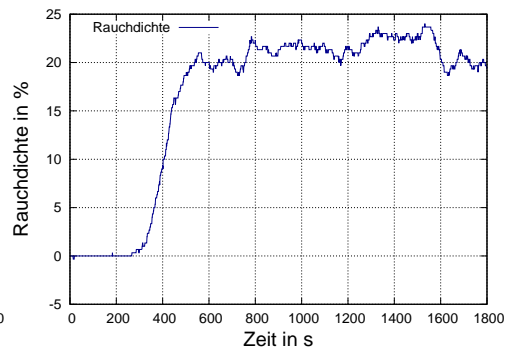
(k)



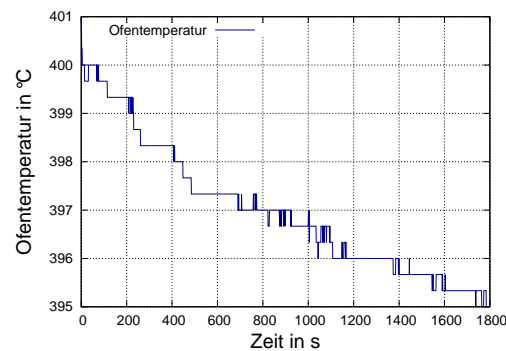
(l)



(m)

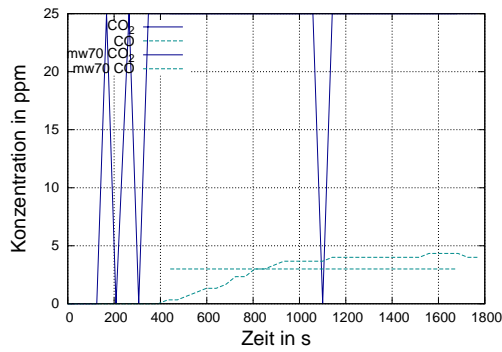


(n)

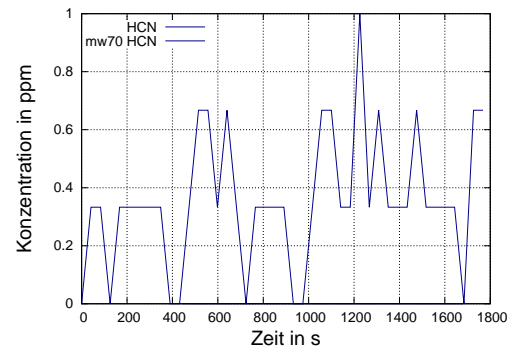


(o)

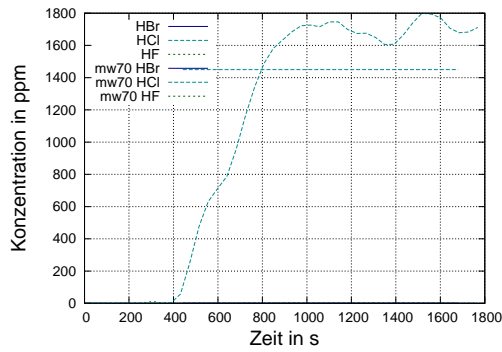
**Abbildung C.24:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 400 °C und 21 vol% O<sub>2</sub>

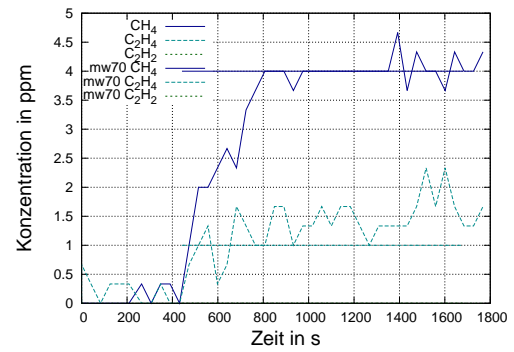
(a)



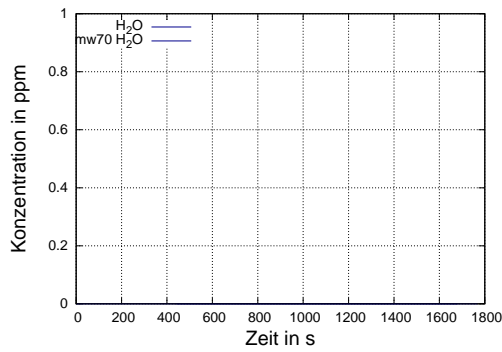
(b)



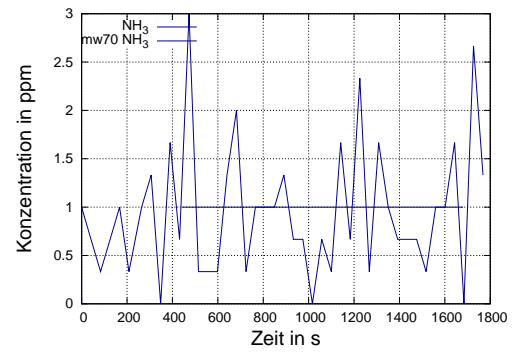
(c)



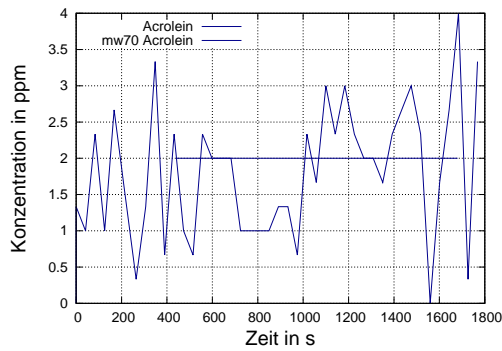
(d)



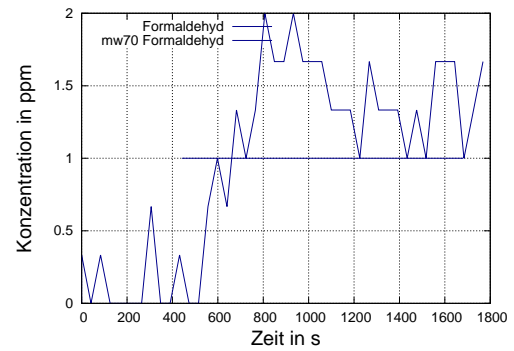
(e)



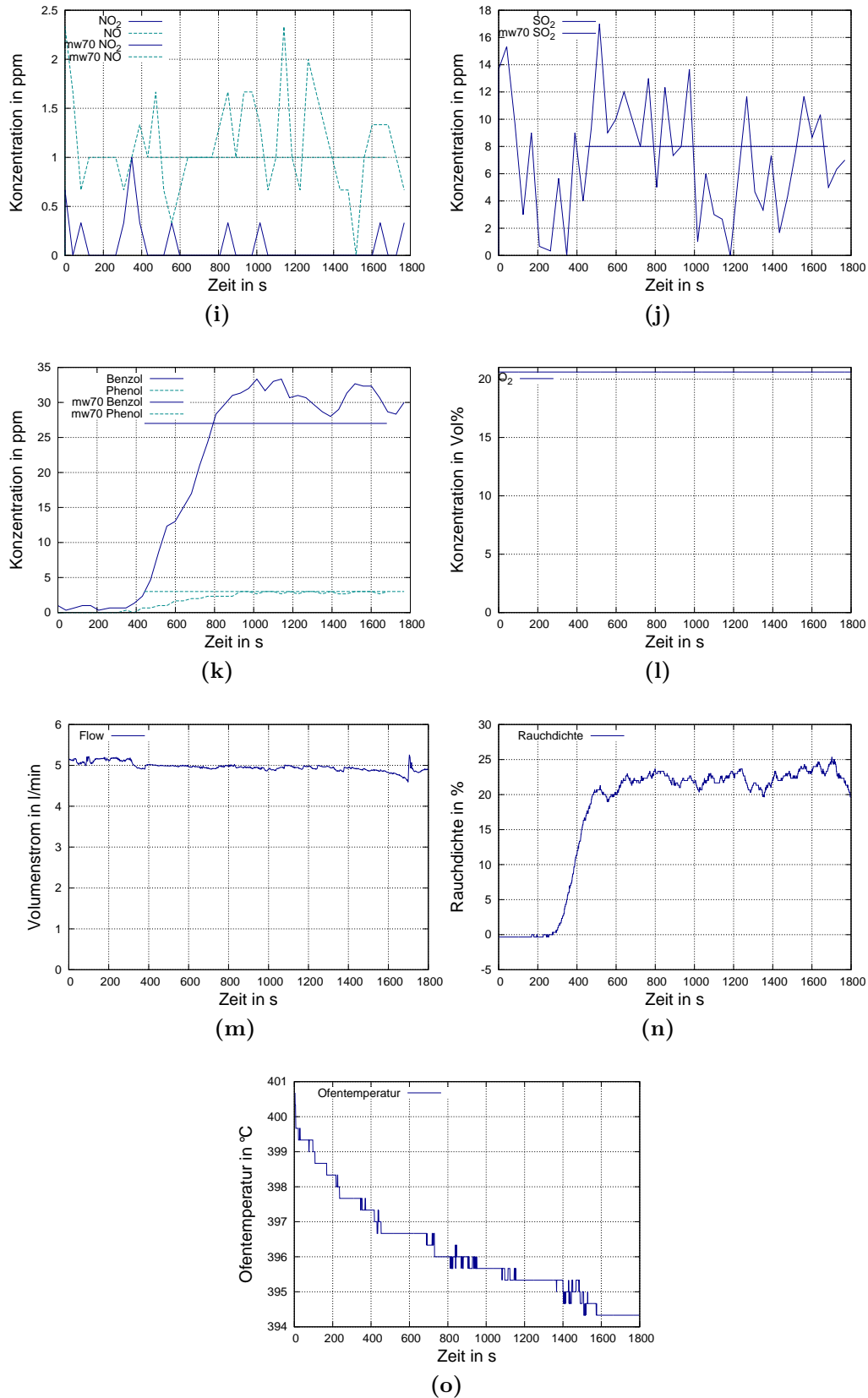
(f)



(g)

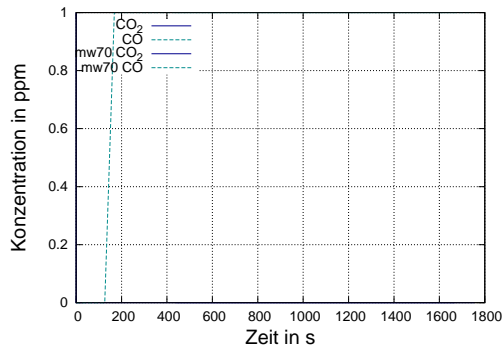


(h)

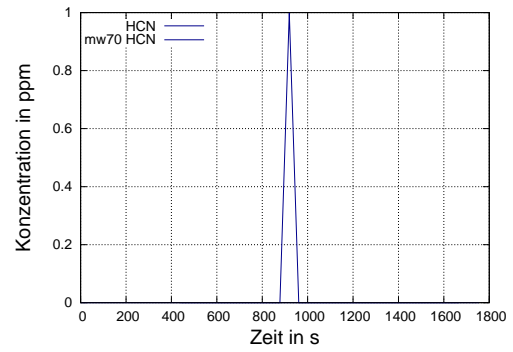


**Abbildung C.25:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

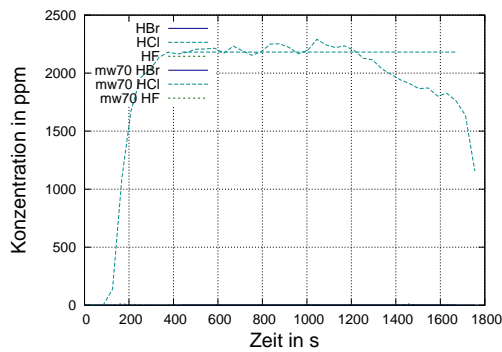
PVC 700 °C

PVC 700 °C und 0 vol% O<sub>2</sub>

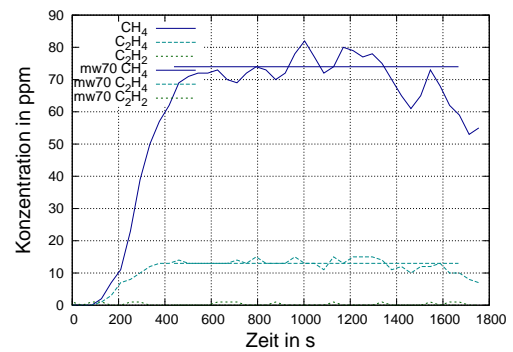
(a)



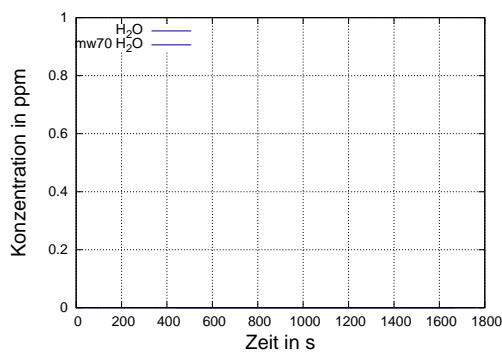
(b)



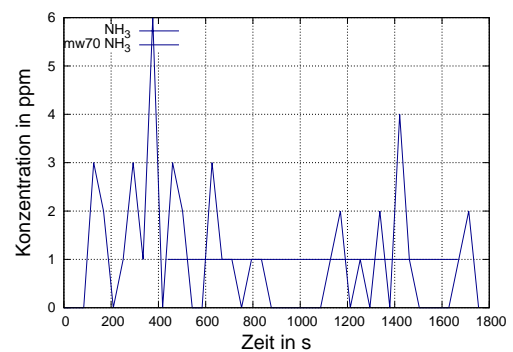
(c)



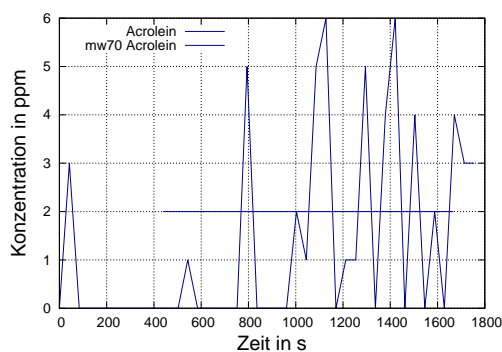
(d)



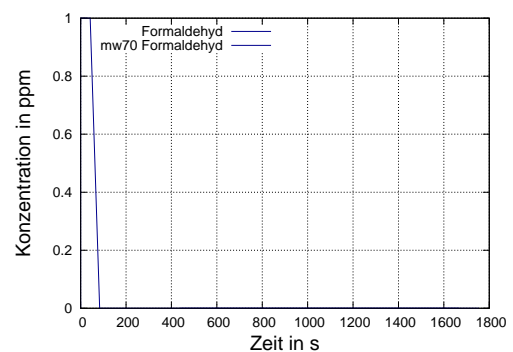
(e)



(f)

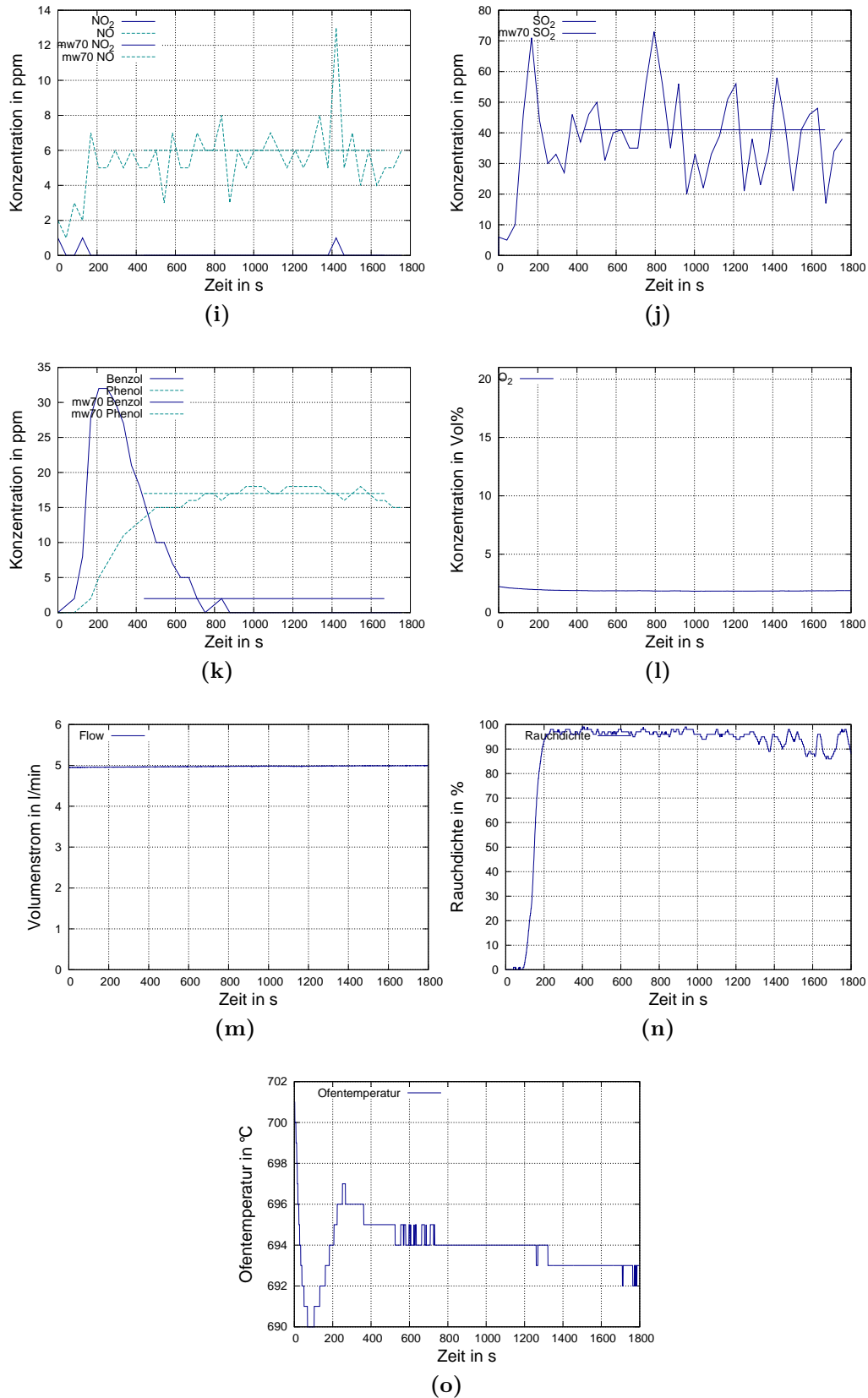


(g)

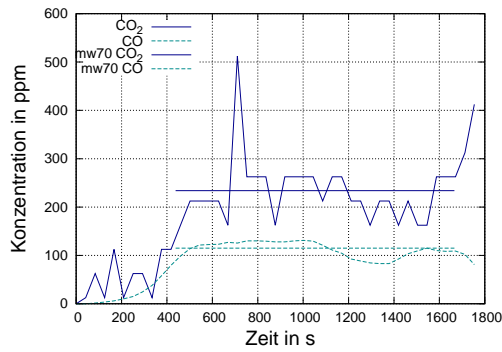


(h)

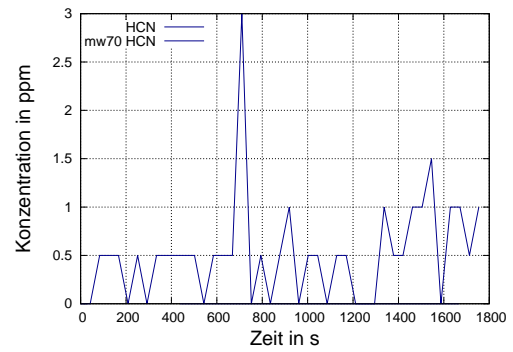




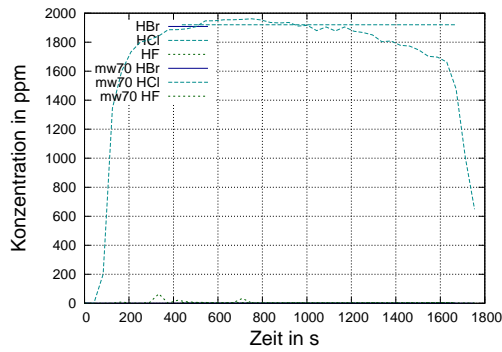
**Abbildung C.26:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 700 °C und 5 vol% O<sub>2</sub>

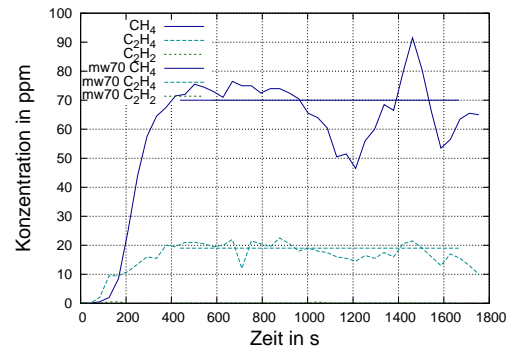
(a)



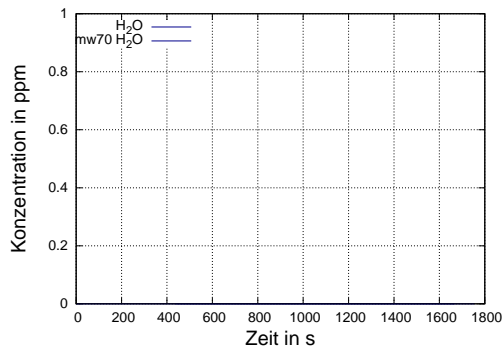
(b)



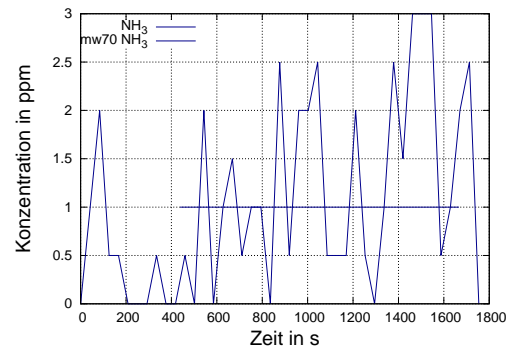
(c)



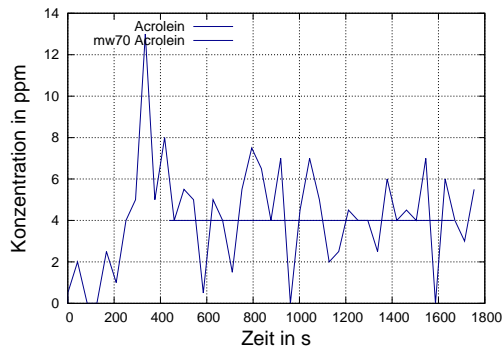
(d)



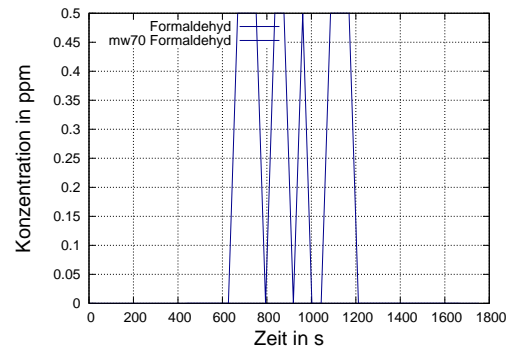
(e)



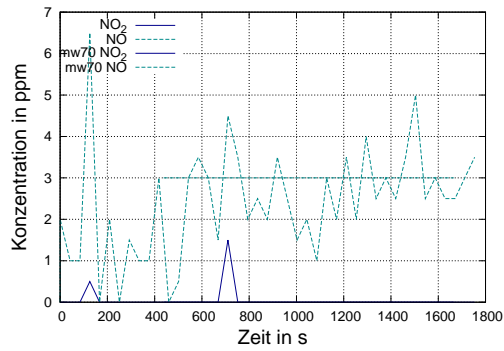
(f)



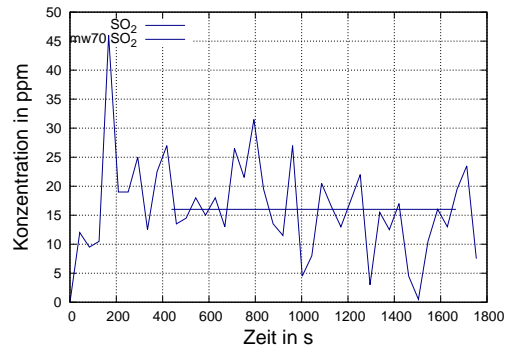
(g)



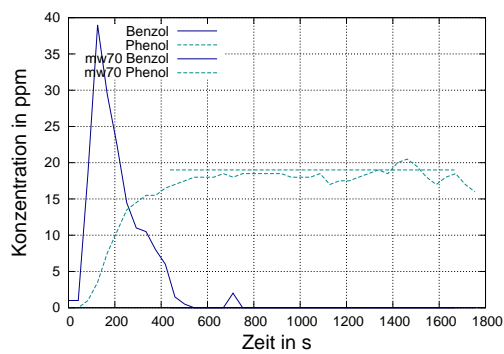
(h)



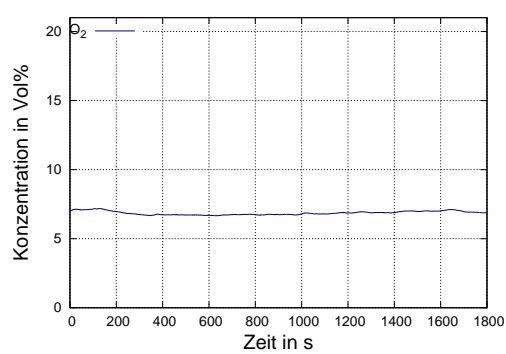
(i)



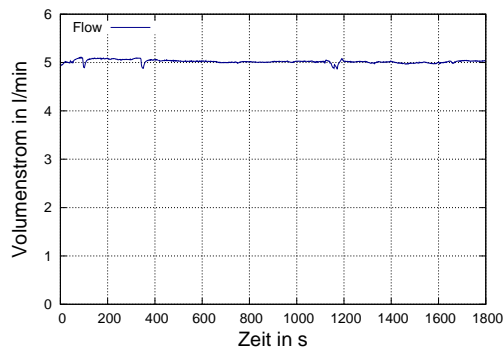
(j)



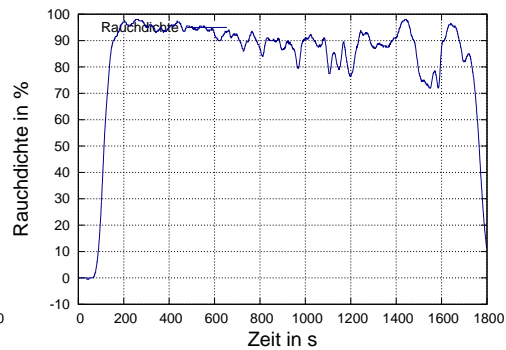
(k)



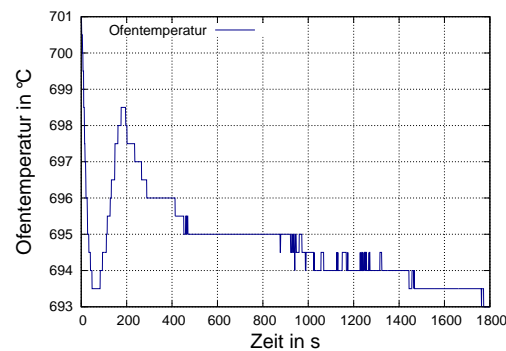
(l)



(m)

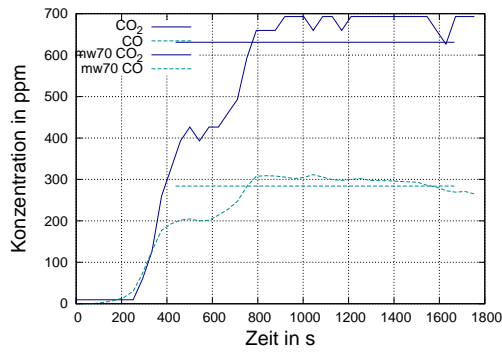


(n)

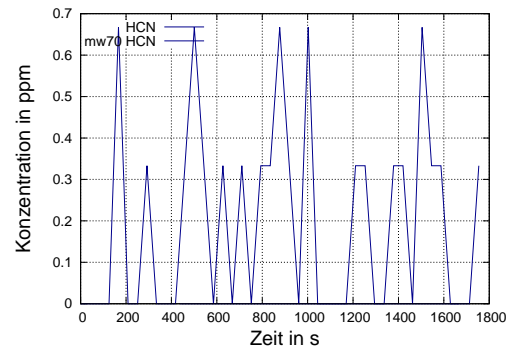


(o)

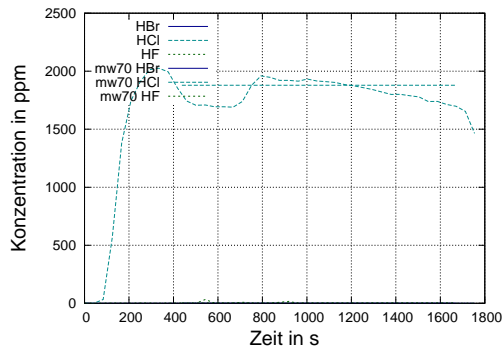
**Abbildung C.27:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 700 °C und 15 vol% O<sub>2</sub>

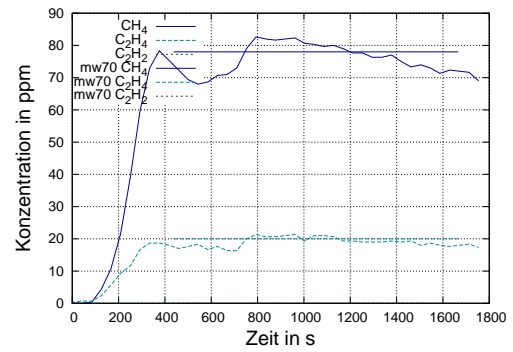
(a)



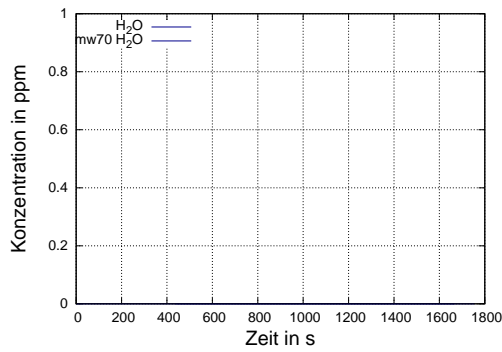
(b)



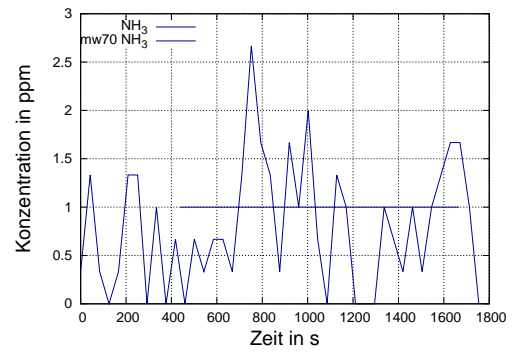
(c)



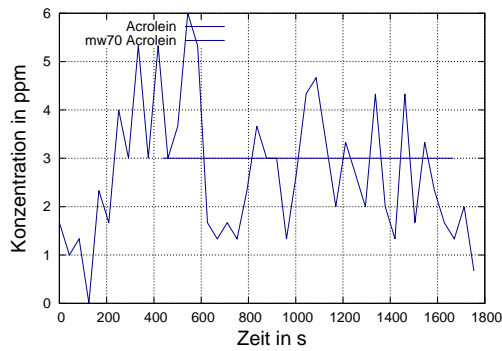
(d)



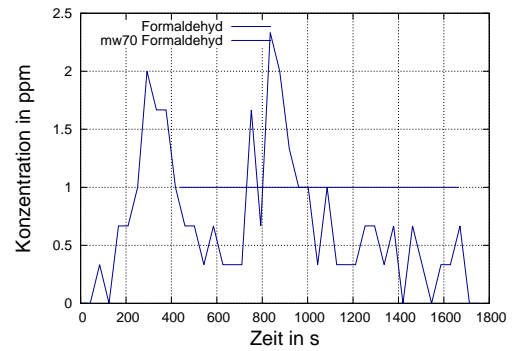
(e)



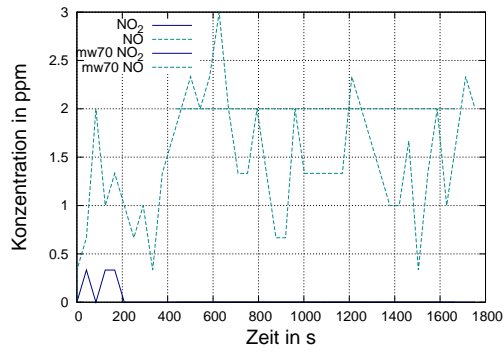
(f)



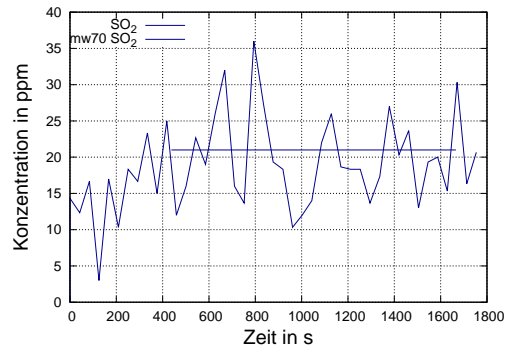
(g)



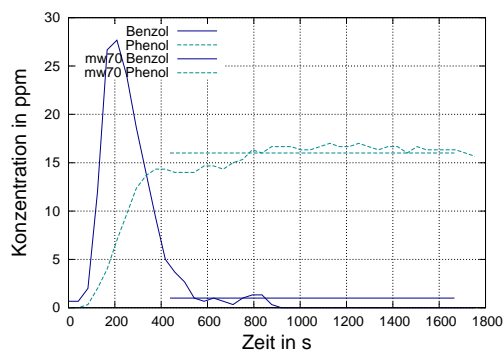
(h)



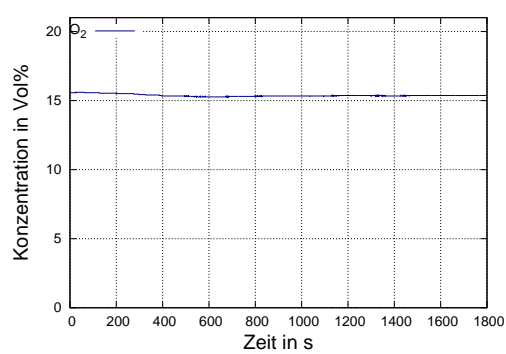
(i)



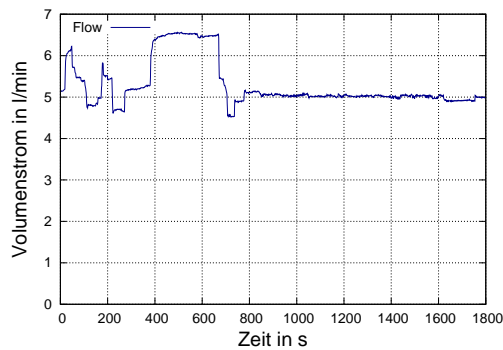
(j)



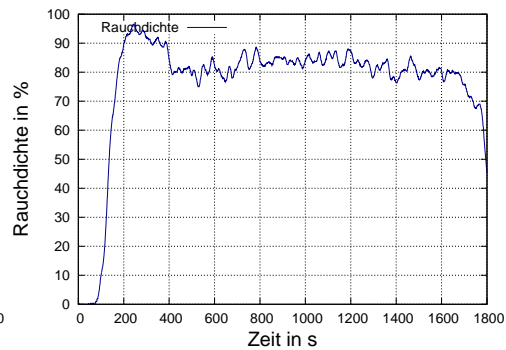
(k)



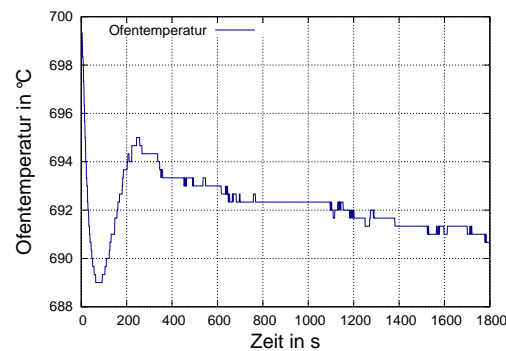
(l)



(m)

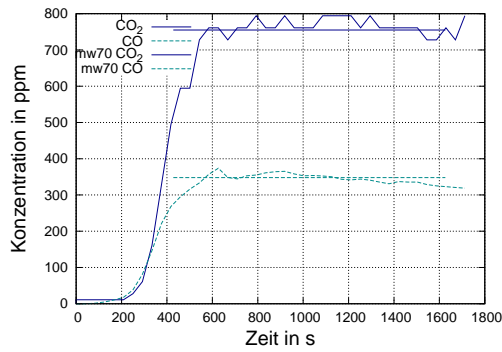


(n)

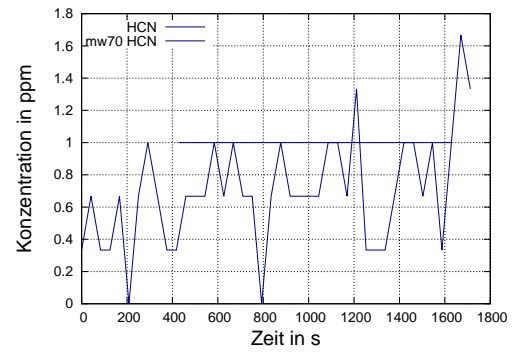


(o)

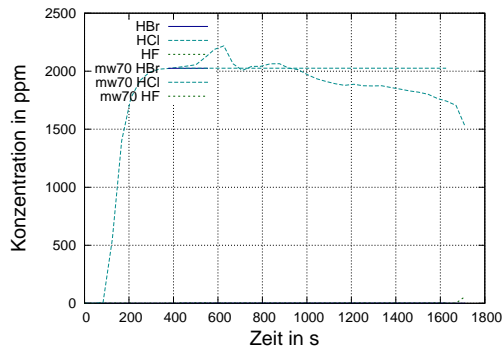
**Abbildung C.28:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 700 °C und 18 vol% O<sub>2</sub>

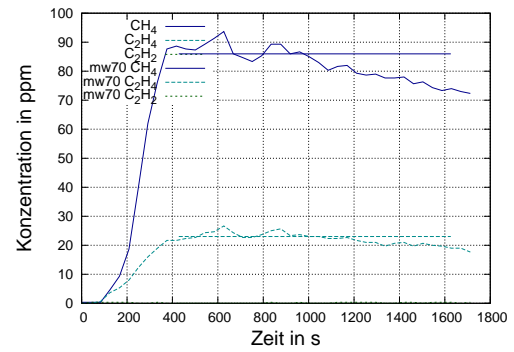
(a)



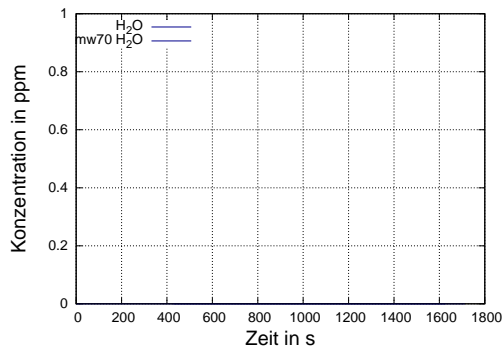
(b)



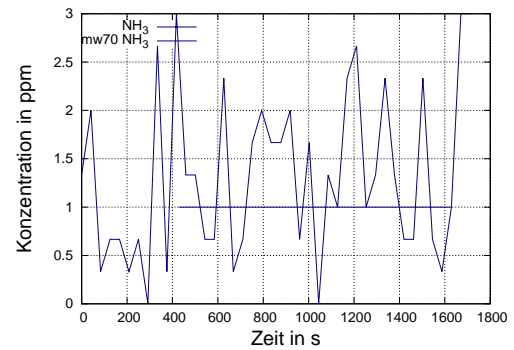
(c)



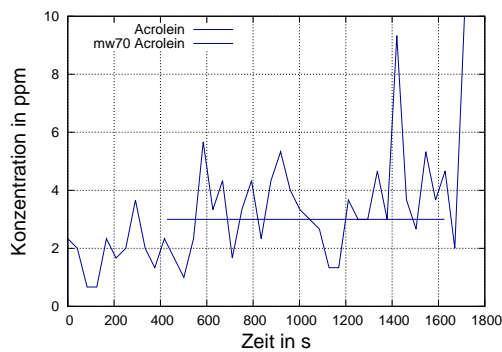
(d)



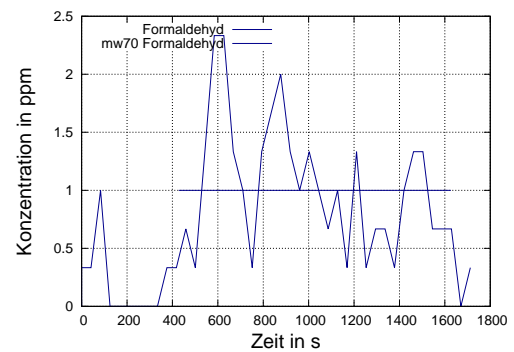
(e)



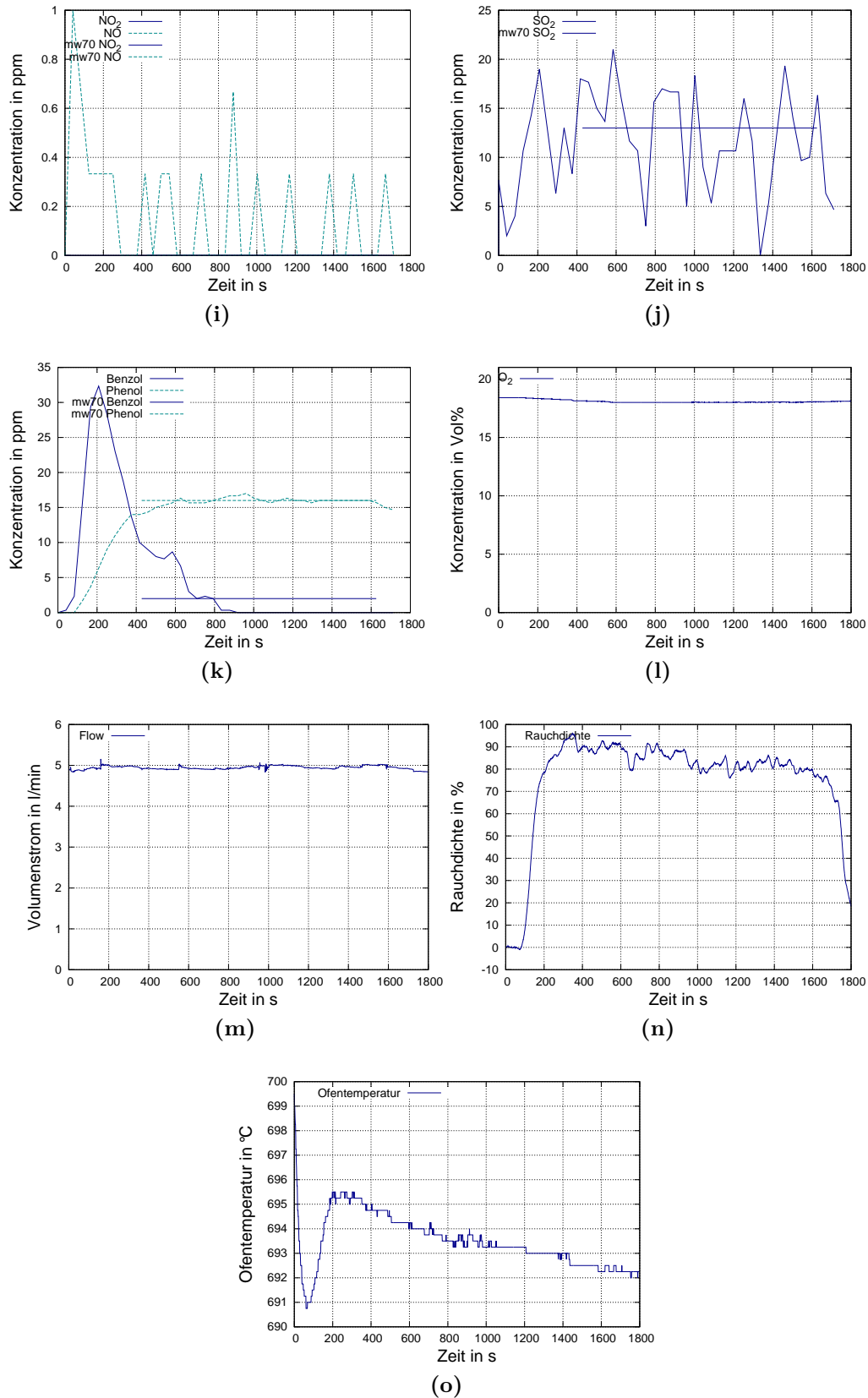
(f)



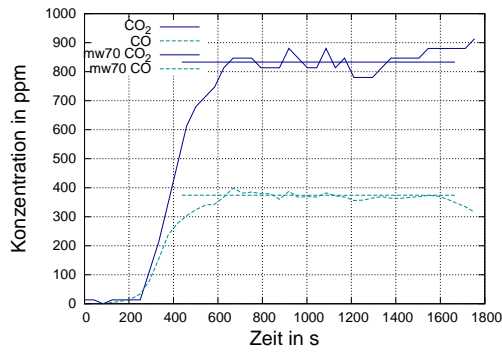
(g)



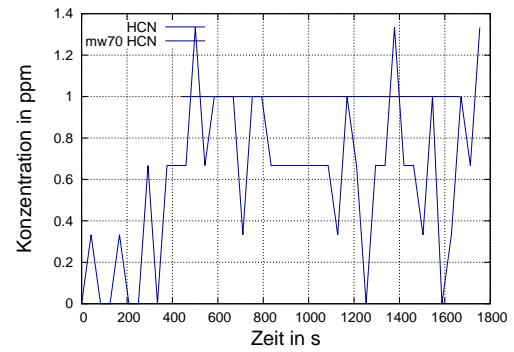
(h)



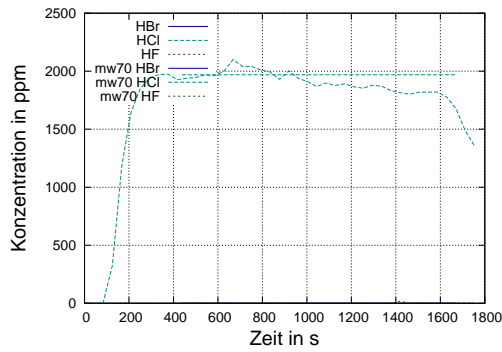
**Abbildung C.29:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

PVC 700 °C und 21 vol% O<sub>2</sub>

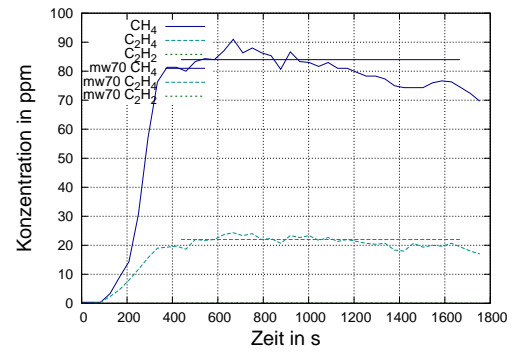
(a)



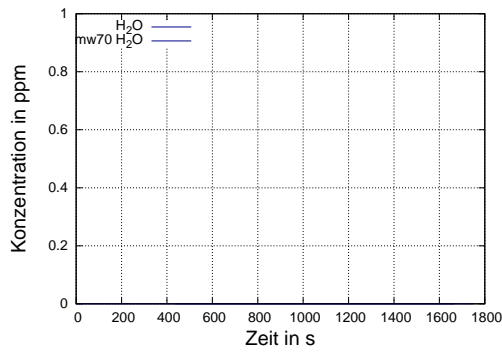
(b)



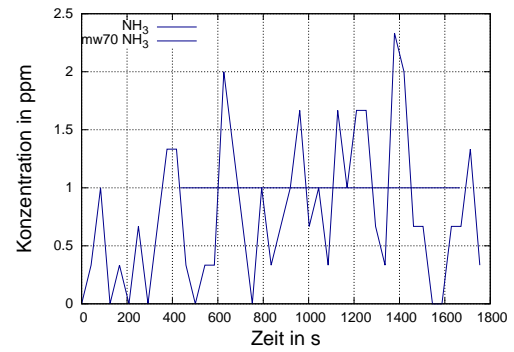
(c)



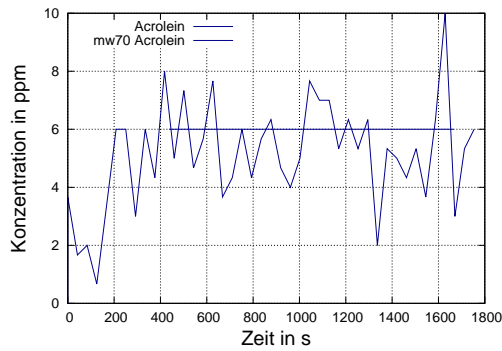
(d)



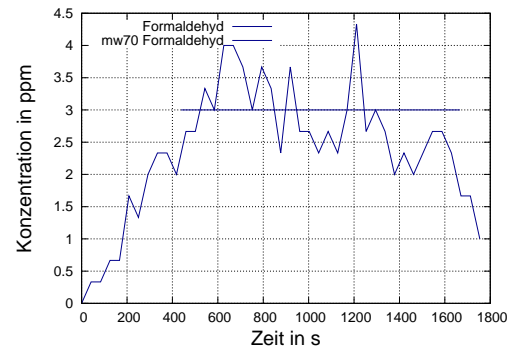
(e)



(f)

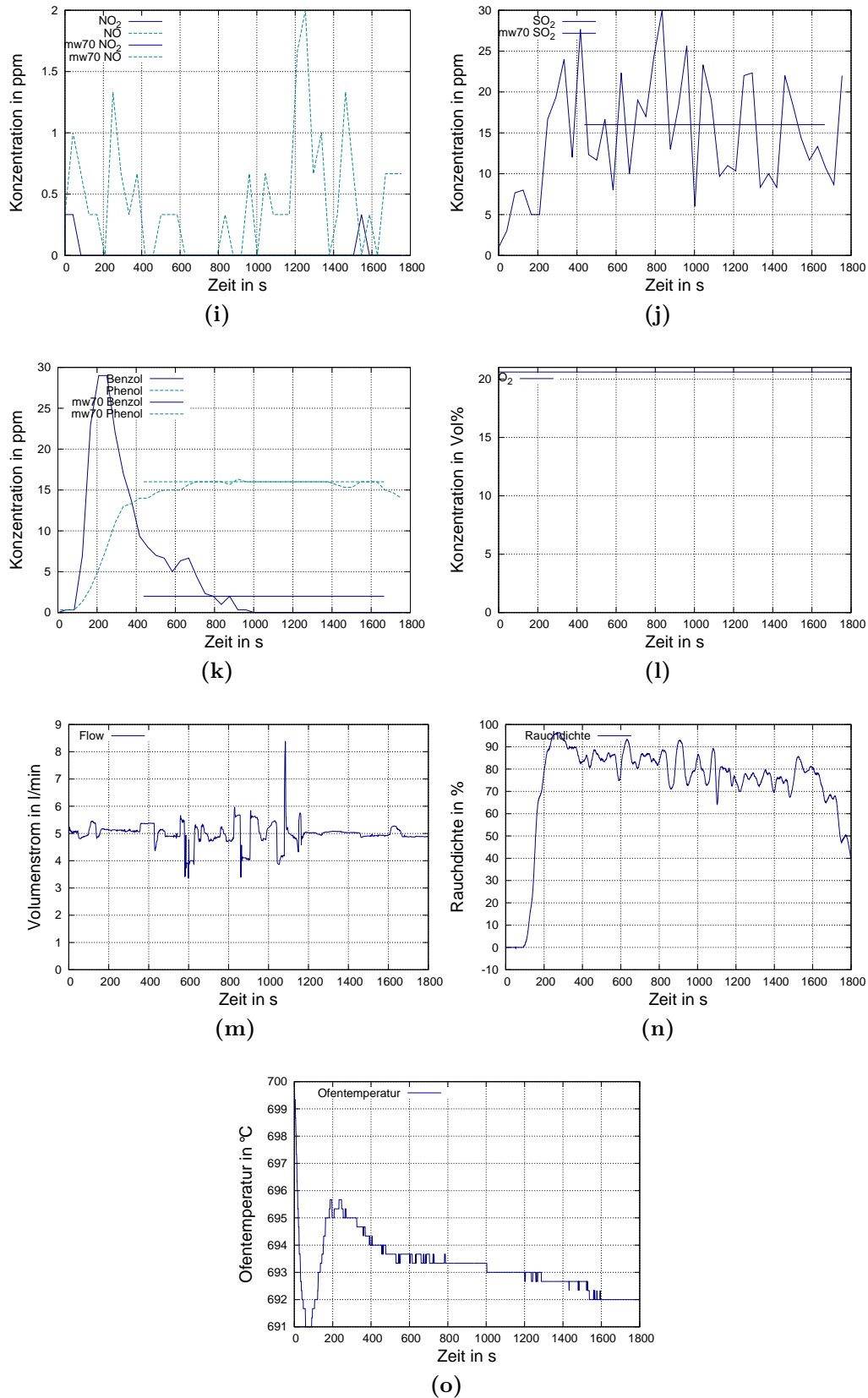


(g)



(h)



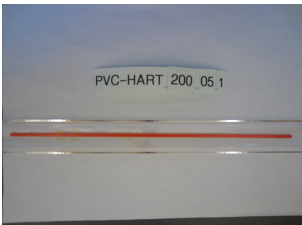


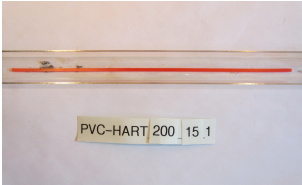


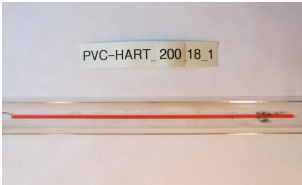


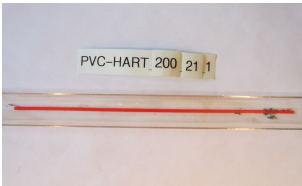




**Abbildung C.30:** (a) Kohlenstoffdioxid und -monoxid; (b) Cyanwasserstoff; (c) Halogenwasserstoffe; (d) Methan, Ethen, Ethin; (e) Wasser; (f) Ammoniak; (g) Acrolein; (h) Formaldehyd; (i) Stickoxide; (j) Schwefeldioxid; (k) Benzol und Phenol ; (l) Sauerstoff ; (m) Volumenstrom ; (n) Rauchdichte ; (o) Ofentemperatur .

## Proben nach Versuch

Die Proben nach den durchgeführten Versuchen mit 200°C sahen wie vor den Versuchen aus.

**Tabelle C.3:** PVC-Proben nach den DIN-Rohr Versuchen

	200 °C	400 °C	700 °C
5 vol% O <sub>2</sub>			
15 vol% O <sub>2</sub>			
18 vol% O <sub>2</sub>			
21 vol% O <sub>2</sub>			

*Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.*