



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln

**Gas analytics for the very early detection of fires in road
tunnels**

**Analytique de gaz à la détection précoce de feu dans les
tunnels routiers**

Versuchsstollen Hagerbach AG
Dipl.-Ing. Maximilian Wietek

xirrus GmbH
Dr. Christian D. Berweger

combustion and flow solutions GmbH
Dr. Christian Lämmle

**Forschungsauftrag FGU 2010/006 auf Antrag der Fachgruppe
Untertagbau (FGU)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln

**Gas analytics for the very early detection of fires in road
tunnels**

**Analytique de gaz à la détection précoce de feu dans les
tunnels routiers**

Versuchsstollen Hagerbach AG
Dipl.-Ing. Maximilian Wietek

xirrus GmbH
Dr. Christian D. Berweger

combustion and flow solutions GbmH
Dr. Christian Lämmle

**Forschungsauftrag FGU 2010/006 auf Antrag der Fachgruppe
Untertagbau (FGU)**

Dezember 2013

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dipl.-Ing. Maximilian Wietek

Mitglieder

Dr. Christian D. Berweger

Dr. Christian Lämmle

Begleitkommission

Präsident

Prof. Dr. Georg Anagnostou

Mitglieder

Walter Steiner

Martin Bosshard

Chantal Leuenberger

Christian Gammeter

Guido Giovanoli

Antragsteller

Fachgruppe Untertagbau (FGU)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	10
	Summary	13
1	Einleitung	15
1.1	Ausgangslage.....	15
1.2	Zielsetzung	15
1.3	Vorgehensweise.....	15
1.3.1	Phase 1 – Literatur und Ersatzbrandstoff	15
1.3.2	Phase 2 – Versuchsbrand, Sensor im Tunnelquerschnitt.....	16
2	Stand des Wissens und der Technik	17
2.1	Fahrzeugbrandanalyse, Stand der Forschung.....	17
2.1.1	Brandforschung	17
2.1.2	Tunnelluftanalyse	22
2.1.3	Sensorik für Brände	22
2.1.4	Warnsysteme	25
2.1.5	Fahrzeugabgase	27
2.2	Zusammenfassung Literaturstudie.....	27
2.3	Folgerungen nach der Literaturstudie	28
3	Brandanzeiger und Ersatzbrandstoff	29
3.1	Literatur und chemische Grundlagen	29
3.2	Simulationsstudie	30
3.2.1	Absicht.....	30
3.2.2	Chemische Simulation	32
3.2.3	Gedankenfolge.....	32
3.2.4	Durchführung.....	34
3.2.5	Methodendetails	35
3.2.6	Resultate	35
3.2.7	Konzentrationen im Brandgas.....	40
3.3	Ersatzbrandstoff	41
3.4	Zusammenfassung Simulationsstudie	41
4	Folgerungen der Phase 1	42
5	Strömungssimulation der Brandgasausbreitung	43
5.1	Zur Vorbereitung der Brandexperimente	43
5.1.1	Geometrie.....	43
5.1.2	Netzbildung	44
5.1.3	Anfangs- und Randbedingungen	45
5.1.4	Modellannahmen.....	46
5.1.5	Ergebnisse	46
5.2	Reproduktion der Brandexperimente	54
5.2.1	Geometrie.....	54
5.2.2	Anfangs- und Randbedingungen	54
5.2.3	Modellannahmen.....	56
5.2.4	Ergebnisse	56
5.3	Zusammenfassende Diskussion	63
6	Marktanalyse Sensor	64
6.1	Anforderungen an den Sensor	64
6.1.1	Spezifität.....	64
6.1.2	Empfindlichkeit	64
6.1.3	Weitere Kriterien	64
6.1.4	Zusammenfassung Kriterien	65

6.2	Marktanalyse.....	65
6.2.1	Marktübliche Gassensoren und Gaswarngeräte	65
6.2.2	Gassensoren in der Brandmelde-Industrie	65
6.2.3	Hochempfindliche Messgeräte	66
6.2.4	Biologisch-Chemische Diagnoseverfahren.....	66
7	Vorversuche am Gasmessplatz und in einer Brandkammer.....	67
7.1	Messplattform zur H ₂ - und CO-Messung.....	67
7.2	Sensorkalibration	67
7.3	PP-Verschmelzung in einer kleinen Brandkammer	69
7.3.1	Verschmelzung von 1.5 g Polypropylen.....	69
7.3.2	Verschmelzung von 8.5 g PP.....	71
7.3.3	Weitere Beobachtungen	71
7.4	Zusammenfassung der Voranalyse	72
8	Versuchsbrand im VSH	73
8.1	Methode	73
8.2	Messtechnik	74
8.2.1	Waage.....	74
8.2.2	Thermoelemente.....	74
8.2.3	Gassensoren.....	75
8.2.4	Kameras.....	76
8.3	Versuchsanordnung.....	76
8.4	Polypropylen-Fasern.....	77
8.5	Versuchsdurchführung.....	78
8.5.1	Erster Vorversuch	79
8.5.2	Zweiter Vorversuch	79
8.5.3	Erster Hauptversuch	79
8.5.4	Zweiter Hauptversuch	79
8.5.5	Dritter Hauptversuch	81
9	Schlussfolgerungen	83
9.1	Zielerreichung	83
9.2	Offene Fragen	83
9.3	Ausblick.....	83
	Anhänge.....	87
	Abkürzungen	99
	Literaturverzeichnis.....	101
	Projektabschluss	107
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	111

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht stellt eine Grundlagenstudie vor, die den Einsatz von Gasdetektoren als Brandfrüherkennung im Strassentunnelbereich zum Ziel hat. Dazu gehört einerseits die Identifikation von geeigneten Brandgasen, die im abgashaltigen Strassentunnelumfeld dennoch zuverlässig einen beginnenden Fahrzeugbrand anzeigen können; andererseits sollten die Bedingungen geklärt werden, die insbesondere im Hinblick auf die Nachweisgrenze des Gassensors erfüllt sein müssen, um eine zuverlässige Warnung zu ermöglichen. Eine Validierung des Konzepts im Experiment im Versuchsstollen sowie eine Marktanalyse zu möglichen Sensoren komplettieren die Studie.

Eine Literaturstudie sollte dazu die nötige Basis liefern. Sie bestätigte, dass die Gassen-sorik als Brandfrüherkennung prinzipiell taugt, zeigte aber auch auf, dass die Situation je nach Brandquelle und Umfeld sehr verschieden sein kann. Insbesondere förderte sie hingegen zu Tage, dass zu hier wesentlichen Fragen, wie der Brandgaszusammensetzung bei verbrannten Kunststoffen, oder den Ursachen von Fahrzeugbränden, nur bruchstückhafte Erkenntnisse vorlagen.

Ein vollständiges Bild wäre aber nötig gewesen, um daraus einen potentiellen Brandanzeiger abzuleiten. Deshalb wurde entschieden, die nötigen Informationen aus chemischen Simulationen zu erhalten. Dazu wurde eine Vielzahl brennbarer Substanzen, die im Fahrzeugbau und auch der Ladung bzw. deren Verpackung vorkommen, unter verschiedenen Bedingungen in der Computersimulation verbrannt und verschwelt und die dabei entstehenden Zwischenprodukte vollumfänglich aufgezeichnet. Danach wurde aus diesen umfangreichen Brandzwischenprodukte-Katalogen automatisiert Substanzen ermittelt, die in allen oder wenigstens den meisten Situationen vorkommen. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass alle Brandsituation erfasst werden können. Von der verbleibenden Liste wurden kurzlebige, instabile Substanzen entfernt wie auch jene, die bekanntermassen in Fahrzeugabgasen vorkommen, und daher im Normalfall in der Tunnel-luft vorkommen würden.

Tatsächlich konnten so fünf potentielle Brandanzeiger ermittelt werden: Ethin (Acetylen), Propan, Cyclopropan, Propadien und Wasserstoff.

Als Prototyp eines Fahrzeugbrandes im Frühstadium wurde für die Versuche die Verschmelzung von Polypropylen (PP) unter der Hitze einwirkung einer Heizplatte gewählt. Die chemische Simulation hatte gezeigt, dass dieser Kunststoff die meisten Brandmarker in den grössten Konzentrationen freisetzt.

In einer zweiten Phase folgte der Praxistest. Mittels einer Strömungssimulation (CFD) wurden in Szenarien die zu erwartenden Brandanzeiger-Konzentrationen im Tunnel abgeschätzt und mit Erfahrungswerten verglichen. Parallel dazu wurde nach Sensoren gesucht, die die erforderlichen Bedingungen erfüllen. Es ergab sich, dass die innerhalb des Zeit- und Budgetrahmens des Projekts verfügbaren Sensoren hart an der Nachweisgrenze arbeiten würden. Die ursprünglich im grossen Brandversuchsstollen mit Luftströmung vorgesehen Versuche wurden daher redimensioniert und in einen kleineren Stollen ohne bewusste Luftströmung verlegt.

Vorversuche zeigten, dass die gewählte Brandgasquelle tatsächlich Wasserstoff freisetzte und dieser von den zur Verfügung stehenden Sensoren detektiert werden konnte. Bekannte Querempfindlichkeiten des Sensors konnten im Griff gehalten werden.

Die Hauptversuche zeigten dann ein durchzogenes Bild. Während beim ersten Versuchsaufbau kein Wasserstoff detektiert werden konnte, zeigte ein zweiter mit verbesserter Probengaszuführung und kleinerem Deckenabstand kleine Konzentrationen an, die über der Nachweisgrenze des Sensors lagen. Die Ergebnisse konnten nicht in klare Übereinstimmung mit den Simulationen dieser Situation gebracht werden, auch wenn sie nachvollziehbar scheinende Resultate lieferte. Wegen der vielen Unbekannten in diesen Experimenten wurde auf spekulative Interpretationen verzichtet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich Wasserstoff als Brandanzeiger in Tunneln eignen könnte. Der experimentell zum Einsatz gekommene Sensor hat dazu aber eine zu wenig ausgeprägte Empfindlichkeit bzw. die Wasserstoffkonzentration wird im Auftrieb zu sehr verdünnt. Zudem wies der Sensor für den definitiven Einsatz eine ungeeignete Temperaturabhängigkeit auf. Für andere potentielle Brandanzeiger existieren Messgeräte mit deutlich höherer Empfindlichkeit und beachtlicher Selektivität. Sie sind allerdings dementsprechend teuer.

Das Konzept des Brandanzeigers zur Früherkennung von Tunnelbränden mittels Gas-sensor konnte für Wasserstoff in einem einfachen Praxisversuch bestätigt werden. Andere potentielle Brandanzeiger mit alternativen Detektionsmöglichkeiten wurden entdeckt, konnten aber im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht weiter verfolgt werden. Entsprechende Anforderungen an einen solchen Detektor wurden festgehalten.

Résumé

Le rapport suivant présente une étude de base pour l'utilisation de détecteurs à gaz, dans des tunnels routiers, pour une détection rapide d'incendie. Pour ce faire il faut d'abord identifier le gaz d'incendie, qui démontre de manière fiable qu'un véhicule, dans l'environnement gazeux du tunnel est en train de s'enflammer, de plus, les conditions doivent être claires, particulièrement en ce qui concerne la limite justifiant le déclenchement du détecteur, permettant ainsi un avertissement fiable. Une validation du concept dans la galerie d'essai, ainsi qu'une analyse du marché pour les senseurs complètent l'étude.

Une étude de la littérature parue sur ce sujet devrait donner une base suffisante. Elle confirme que l'analyse sensorielle est la plus rapide pour la détection d'incendie, mais elle montre aussi que la situation peut varier considérablement suivant la source de l'incendie et l'environnement. Elle a avant tout montré que les connaissances concernant les questions essentielles comme la composition des gaz d'incendie, des plastiques brûlés ou les causes des incendies de véhicules ne sont que fragmentaires.

Il faudrait une image complète pour définir un indicateur d'incendie potentiel. C'est pourquoi il a été décidé d'utiliser une simulation chimique. Pour cela, une multitude de substances combustibles, entrant en compte dans la construction des véhicules, ainsi que dans la charge et dans l'emballage ont été brûlés dans différentes conditions, sous simulation d'ordinateur. Les produits dérivés qui se forment sont enregistrés. Suite à cela, un catalogue volumineux de ces substances, qui entre dans la plupart des situations, est établi. Ainsi toutes les situations d'incendie peuvent être enregistrées. Les substances instables, ou à vie courtes ont été enlevées, de même que les substances connues telles que les gaz d'échappement.

Cinq indicateurs d'incendie potentiel peuvent être détectés: L'étain (acétylène), le propane, le cyclopropane, le propadiène, et l'hydrogène.

Dans un premier essai, comme prototype d'incendie de véhicule on a choisi la carbonisation du polypropylène (pp). La simulation chimique montre que ce plastique dégage la plus grande concentration de marquage ainsi que les plus nombreuses impulsions.

Dans une deuxième phase, un test pratique a suivi. Avec une simulation de courants (CFD) des scénarios de concentration d'indicateur d'incendie ont été estimés et comparé avec des valeurs tirées d'expériences réelles. On a cherché alors des senseurs qui remplissent les conditions requises. Les senseurs disponibles entrant en temps et argent dans le cadre du projet, ont montré des résultats très proches de la réalité. Les essais originalement prévus dans la grande galerie avec courant d'air ont donc été redimensionnés et transposés dans une galerie plus petite et sans courant d'air.

Les premiers essais ont montré que la source de gaz inflammable choisie a effectivement libéré de l'hydrogène et que celui-ci a été détecté par les senseurs. Des influences transversales connues n'ont pas été trop importantes, Les essais principaux ont montré une image ambivalente. Alors qu'au premier essai aucun hydrogène n'a pu être détecté, un deuxième essai, avec un meilleur mélange de gaz et une plus courte distance avec le plafond, a montré des concentrations plus faibles, mais étant encore supérieure à la limite de détections du senseur. Les résultats n'ont pu être mis en concordance avec la simulation de cette situation, même s'ils donnaient un résultat compréhensible. Les trop nombreuses inconnues de ces expériences ont en rendu impossible les interprétations.

On peut dire en résumé que l'hydrogène pourrait être utilisé comme détecteur d'incendie dans des tunnels. Le senseur utilisé de manière expérimentale n'a pourtant pas une assez grande sensibilité, et la concentration d'hydrogène est trop diluée. Le senseur a d'ailleurs eu un problème de température, le rendant inapproprié pour une utilisation définitive. Pour d'autres détecteurs d'incendie potentiels, il existe des appareils de mesure avec une sensibilité beaucoup plus élevée et une spécificité importante. En conséquence, cela les rend plus chers !

Le concept d'indicateur d'incendie pour la détection rapide d'incendie de tunnel, avec des senseurs à gaz pourrait être confirmé pour l'hydrogène, dans un essai pratique et simple. D'autres détecteurs d'incendie alternatifs ont été trouvés, mais ils n'ont pu être retenus dans le cadre du présent projet. Les exigences correspondantes à un tel détecteur ont été retenues.

Summary

This report presents a study that aims at using gas detectors as a means of very early warning of fires in road tunnels. On one hand, this encompasses identifying suitable combustion gases that allow for a reliable detection of a beginning car fire even in an exhaust-filled environment. On the other hand, requirements posed to such a detector in regard to sensitivity and specificity shall be cleared. Finally, validation of the concept in a real experiment in the test gallery and a market survey concerning suitable detectors, make the study complete.

A literature study should provide the relevant basis. It confirmed that in principle, gas analysis is able for very early fire detection. It also showed that the situation is very much dependent on the fire, its source, its substrate, and its environment and can thus be very diverse. Especially it made clear that knowledge about what gases emit from burning various plastics – as a prototype of a car fire – is very fragmentary.

A complete picture about those emitted gases would have been required to derive a potential universal fire marker. That is why it was decided to obtain the relevant information from chemical simulation from the burning processes. A variety of combustible substances that are used in vehicle construction, cargo and its packaging, was subjected to simulated combustion and smouldering under various conditions. The intermediate chemical products during the process were meticulously monitored. From these comprehensive catalogues of intermediate products, those appearing under all conditions were filtered out – or at least under most conditions. Doing so, it was secured that all fire situations should be covered. In further filtering steps, short-lived and unstable species were removed as well as those known to be found in engine exhaust, which would anyway be present in tunnel air.

Indeed, five potential fire markers were found: Ethine (Acetylene), Propane, Cyclopropane, Propadiene and Hydrogen (Dihydrogen).

As a prototype for a beginning car fire, smouldering of polypropylene subjected to heating on a hotplate was selected. The chemical simulation showed that this plastic emitted the most types of fire markers at the highest concentrations. It is also quite ubiquitously used in vehicle construction.

The second phase of the project comprised the test in practice. By means of a computational fluid dynamics (CFD), various experimental scenarios were evaluated in regard to the expected concentrations of fire marker in the tunnel. Simultaneously, detectors were sought that meet the set requirements. The only detectors available in the time and budget constraints of the project, would operate at their limit of detection. So the experiments – initially planned to be performed in the large tunnel with ventilation – were displaced into a smaller tunnel section without airflow.

Pilot tests showed that the selected way of producing fire marker indeed produces hydrogen in a detectable amount. Known cross-sensitivities of the detector in use should be under control. However, the main experiments exhibited an unclear picture. In a first setup, no hydrogen could be detected. A second attempt with an improved probe gas feed showed little concentrations close to the tunnel ceiling. Those results could not be clearly superposed with simulated results of the same setup. Still, the results seemed comprehensible. Because of the many unknowns in the experiments, no speculative interpretations were made.

Summarizing, it can be stated that hydrogen seems suitable as a fire marker for road tunnel use. The experimental detector however, was too weak in regard to sensitivity and temperature dependence for a definitive use. The fire marker is also very much diluted during lifting. For the other potential fire markers, detectors with a substantially higher sensitivity and impressive selectivity do exist. However, they are correspondingly expensive.

The concept of using a fire marker for the very early detection of tunnel fires by means of a gas detector could be confirmed for hydrogen in a simple practice test. Further potential fire markers with alternative detection means were identified, but could not be evaluated further in this project. Appropriate requirements for such a detector were determined.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Es gibt mittlerweile eine Vielzahl an Studien und Forschungsprojekten, die sich mit dem Thema Tunnelbrand, dem baulichen Brandschutz oder auch mit der Detektion von Bränden beschäftigen. Eine wesentliche und unumstrittene Erkenntnis dabei ist, dass frühzeitige Detektion ein sehr taugliches Mittel zur effizienten Schadensminimierung darstellt. Überlegungen aus dem Bereich der Simulation von chemischen Reaktionen und der rechnerischen Optimierung von Verbrennungsprozessen haben das Konsortium dazu bewogen, Erkenntnisse aus der Analyse von Verbrennungen auf Fragestellungen der frühzeitigen Branddetektion zu übertragen und somit einen Ansatz zu verfolgen, der einen Brand erkennen lässt, bevor heute gebräuchliche Systeme anschlagen.

1.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes ist die Verbesserung der Sicherheit in Strassentunnels durch eine frühere Erkennung eines sich entwickelnden Fahrzeugbrandes.

Eine verlässliche und möglichst frühzeitige Detektion von Bränden hat einen besonderen Stellenwert, da sie Möglichkeiten zur Verhinderung oder wenigstens Minimierung unvermeidbarer Schäden eröffnet. Zudem sind vorbeugende Massnahmen in diesem Bereich oft bedeutend kostengünstiger als nachgelagerte Massnahmen. Durch die Identifizierung spezieller Substanzen, die in der Frühphase eines Brandes entstehen, und deren zuverlässige Detektion wird Tunnelsicherheit bezüglich Unterhalt und Betrieb erhöht. Gleichzeitig werden Folgekosten durch Brandunfälle in Tunneln reduziert.

Eine bis jetzt im Strassentunnelbereich sehr wenig verbreitete Möglichkeit ist die Branddetektion mittels Gasanalyse. Projektziel ist, einen geeigneten Sensor und dessen Platzierung im Tunnel für die Früherkennung von Fahrzeugbränden zu finden. Dazu werden grundlegende Erkenntnisse über die Mechanismen, die zu Fahrzeugbränden führen, erarbeitet. Zudem wird ein einfacher Tunnelbrand zur Validierung einer Computersimulation durchgeführt. Nach erfolgreicher Kalibration können Extrapolationen auf andere Tunnelsituationen durchgeführt werden, um verschiedene Tunnel effizient und effektiv mit Sensoren ausrüsten zu können.

Neben dem Sicherheitsaspekt werden als Nebenprodukt auch Resultate bezüglich der Umweltsituation erwartet, gerade auch über die möglichen Substanzen, die bei Bränden von Fahrzeugen und deren Ladung entstehen können, sowie deren Verteilung im Tunnel.

Die Projektarbeit beinhaltet:

- Identifizierung einer Substanz (Gas), welche in der Frühphase eines Brandes entsteht.
- Identifikation eines Sensors zur zuverlässigen Detektion
- Evaluation optimaler Platzierungen der Sensoren im Tunnelquerschnitt
- Evaluation der Möglichkeiten und Überprüfung der Resultate im Pilotexperiment im Versuchsstollen Hagerbach.

1.3 Vorgehensweise

1.3.1 Phase 1 – Literatur und Ersatzbrandstoff

Basis aller Überlegungen sind Literaturstudien und Analysen von Brandereignissen, die es erlauben, Brandursachen gezielt (chemisch) zu simulieren. Von besonderem Interesse ist hierbei der Vergleich respektive die Differenzierung von Stoffen in der Frühphase eines Brandes und jenen, die im Normalbetrieb in der Tunnelluft zu finden sind. Dieser erste Schritt führt zu einem „Katalog über gasförmige und feste Stoffe im Tunnel unter Normalbetrieb und im Brandfall“ (Milestone1).

Basierend auf diesem Resultat soll ein Ersatzbrandstoff für die Detektion und die Versuche gefunden werden. Dieser Stoff soll beim Verbrennen den Brandanzeiger in reproduzierbarer Konzentration freisetzen. Die Eingrenzung und die Identifikation des Ersatzbrandstoffes erfolgt aufgrund von chemischen Überlegungen der Verbrennung und soll wie die Abbranddynamik durch molekulare Simulation unterstützt werden.

Resultierend aus diesen ersten beiden Aktivitäten sollen Sensoren identifiziert werden, die ausschliesslich auf den Brandanzeiger, nicht aber auf andere Abgasprodukte (die im Normalbetrieb in der Tunnelluft zu finden sind) ansprechen.

1.3.2 Phase 2 – Versuchsbrand, Sensor im Tunnelquerschnitt

Im Fall einer erfolgreichen Sensorevaluation soll ein Brandversuch Aufschluss über die gefundenen Erkenntnisse geben. Um Realitätsnähe bestmöglich sicher zu stellen, werden dazu Szenarien von früheren Forschungsprojekten im Bereich Grossbrandversuche im VSH herangezogen. Querschnitt, Geometrie, Fahrzeuge und Windgeschwindigkeit (Lüftung, Luftströmung infolge der Fahrzeuge) spielen dabei eine zentrale Rolle wie auch die Dynamik des Brandes (Hitzeentwicklung, Gasausbreitung).

Auf Grund bestehender Szenarien von Grossversuchen im Bereich Tunnelbrand sollen die Verteilungen von Gaskonzentrationen im Tunnel berechnet werden. Faktoren wie das frühe Eintreffen der Brandgase am Sensor (Frühwarnung), gesichertes Erreichen bei verschiedenen Brandherdlagen (Zuverlässigkeit), und möglichst hohe Konzentration (Ansprechbarkeit) sind massgebend.

Diese Computational-Fluid-Dynamics-Simulationen (CFD) erfolgen in enger Abstimmung mit den Ergebnissen aus dem Versuchsbrand, wobei im ersten Schritt eine möglichst gleichartige Anordnung verwendet wird. Da das Projekt das Ziel verfolgt, die optimale Platzierung der Sensoren im Tunnel-Querschnitt, sowie die maximalen Abstände in Längsrichtung zu finden, wird das validierte Simulationsmodell auf andere Situationen im Tunnel angewendet. Beispielsweise können mehrere Fahrzeuge, verschieden grosse Fahrzeuge, und auch Gegenverkehr berücksichtigt werden, da sich damit die Strömungsverhältnisse verändern.

Um den Unsicherheiten bezüglich der eindeutigen Identifikation des Brandanzeigers gerecht zu werden, ist es vorgesehen, nach eben dieser Identifikation eine für den weiteren Projektverlauf massgebende Entscheidung zu fällen. Falls Brandanzeiger und Sensor eindeutig gefunden werden, gibt es keinen Bedarf an Anpassungen und das Projekt wird wie oben beschrieben weitergeführt. Falls entweder Brandanzeiger oder der Sensor nicht wie geplant verfügbar sind, werden entweder die Ziele leicht angepasst oder das Projekt mit dem dann verfügbaren Wissenstand abgeschlossen.

2 Stand des Wissens und der Technik

Mit einer Literaturstudie und Fragenkatalogen an Tunnelbetreiber sollen Antworten zu folgenden Fragen gefunden werden:

- **Brandanalyse:** Wo brechen bei Fahrzeugen Brände aus? Was beginnt zuerst zu brennen? Was sind die Auslöser dazu? Welche Bedingungen produzieren sie? Schwelt es, mottet es, brennt es? Welche Stoffe entstehen dabei? *Damit soll der Bereich möglicher Brandsubstrate möglichst eingegrenzt werden und ein Überblick über Brandprodukte erhalten werden.*
- Sind **Tunnelluftanalysen** in der Literatur beschrieben? Was kommt in Strassentunneln in der Abluft vor? In welchen Konzentrationen? Welche Verbrennungsprodukte kommen in **Fahrzeugabgasen** von Verbrennungsmotoren, Benzin wie Diesel sowie neuere Biotreibstoffe, vor? *Damit sollen Störquellen identifiziert werden sowie Substanzen, die als Brandanzeiger in Tunneln sicher nicht in Frage kommen.*
- Welche **Sensoren** gibt es für Brände und Brandprodukte? Gassensoren? Funktionsweise? Welche Spezifität, Empfindlichkeit, Vorteile und Nachteile haben sie? *Damit soll ein Überblick gewonnen werden über die gegenwärtige Leistungsfähigkeit von Branddetektoren sowie neueste Trends in der Branddetektion, mit einem Fokus auf Gassensoren.*
- Sind bereits Sehrfrüh-**Warnsysteme** auf Sensorbasis vorgeschlagen oder beschrieben? Wie funktionieren sie? Was sind die Vorwarnzeiten, mögliche Einbindung in Rettungssysteme, Vorteile, Nachteile, Probleme, Erfahrungen? Welche Anforderungen stellen Tunnelbetreiber an neue Warnsysteme, was sind entscheidende Kriterien? Gibt es konkrete Wünsche? Oder Visionen, was mit moderner Sensortechnologie erreicht werden kann? *Damit soll ein Überblick über das zu erwartende Umfeld gewonnen werden und das Thema in einen grösseren Zusammenhang gestellt werden.*

In den folgenden Abschnitten werden die Details kurz zusammengestellt und schliesslich im Hinblick auf unser Studienthema zusammengefasst und ausgewertet.

2.1 Fahrzeugbrandanalyse, Stand der Forschung

2.1.1 Brandforschung

Ziel des Abschnitts: Wo brechen Brände aus? Was beginnt zuerst zu brennen? Was sind die Auslöser (Hitze, elektrische Entladungen, ...) Was brennt, schwelt, mottet? Welche Brandprodukte entstehen dabei?

[Haak2000STUVA] erwähnt, dass die Hauptursache für Brände in Verkehrstunneln Fahrzeugdefekte waren. Bei den Strassentunneln konnte in 62% der Fälle Fahrzeugdefekte die Ursache des Brandes gefunden werden. Die Brandursache ist leider oft sehr oberflächlich beschrieben, wobei als Ursachen folgende Ereignisse erwähnt werden: Reifenbrand, Reifenbrand eines Zwillingrades, Auslaufen von Dieselmotorkraftstoff, überhitzter Motor, Getriebeschaden, defekte Bremsen, Kupplungsschaden. Insgesamt handelt der Bericht aber eher um allgemeine Themen wie die Höhe der Brandlast, die eingesetzten Baumaterialien und die Verkehrsführung. Es wird ferner erwähnt, dass LKWs überproportional viele Brände auslösen. Auch in [VDV2005ÖPNV] wird erwähnt, dass Motorbrände, elektrische Kurzschlüsse mit nachfolgendem Kabelbrand, Brände von Unterstuhlheizgeräten und Bremsenheissläufer die Hauptursachen von Fahrzeugbränden darstellen.

In [Schneider2006BPT] wird erwähnt, dass bei Strassenfahrzeugen zwischen einem Brand durch Zündung im Motorraum, Innenraum oder der Ladung sowie dem Ausfliessen brennbarer Flüssigkeiten im Fall einer Lachenbildung unterschieden wird. Bei einem Motorbrand entwickelt sich der Brand etwa 5 bis 10 Minuten nach der Zündung im Fahrzeuginnenraum zum Vollbrand, während bei einer Kraftstofffreisetzung durch mechanische Schäden an Kraftstoffbehältern sich der Brand nach 30 bis 60 Sekunden zum Vollbrand entwickelt. Zudem wird erwähnt, dass in über 50% der Fälle Fahrzeugdefekte als Ursache für die Brände gefunden wurden.

Es wird kaum konkret über die Brandursache diskutiert, die Brandlast in MJ aber ausführlich dargestellt, wie folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 1: Brandlasten in Megajoule für verschiedene Fahrzeuge

Versuchsbrandlasten	Brandlast [MJ]	Holz [kg]	Diesel [l]
LKW mit Möbeln beladen	87'400	5081	1556
Reisebus	40800	2372	727
PKW (Kunststoffkarosserie)	7000	407	125
PKW (Stahlkarosserie)	6000	349	107
Eisenbahnwagen (Stahlkarosserie)	77000	4477	1372
U-Bahnwagen (Stahlkarosserie)	3000	1919	588
U-Bahnwagen (Alukarosserie)	41400	2407	737
Mischbrandlast (Autoreifen, Plastik, Holz)	63700	3703	1134
*) teilweise ohne Innenausstattung			

In [Hosser2009BBT] werden in einigen Vorträgen ebenfalls die Brandlasten besprochen. Auch eine Evakuierungssimulation in einem Gebäude wird gezeigt, wobei auch hier die Brennrate vordefiniert wird. In einem Beitrag wird dargestellt, welche verschiedenen Temperatur-Zeit-Kurven den verschiedenen Normen zugrunde gelegt werden. Zudem wird in verschiedenen Tabellen gezeigt, wie hoch Brandlastdichten für die verschiedenen Brände sein können, wobei Fahrzeuge kaum zu finden sind.

In einem Vortrag zum Thema „Brandszenarien und Bemessungsbrände für die numerische Brandsimulation“ wird beschrieben, dass bei den Simulationsmodellen in der Regel keine Verbrennung gerechnet wird, sondern die Brandwirkung einer Brandverlaufskurve folgt. Deshalb müssen die Rauchanteile geschätzt und ebenfalls vordefiniert werden. Die Massenanteile werden in diesem Fall in g/g von CO₂, CO und Russ und ein sogenanntes Rauchpotenzial in [m²/g] vorgegeben. Die folgende Tabelle zeigt eine „Übersicht zu statistisch gesicherten Y- und Dm-Werten für Kunststoffe“:

Tabelle 2: Statistisch gesicherte Y- und Dm-Werte für Kunststoffe

Kunststoff/Brandphase	YCO ₂	YCO	YRuss	Dm
	g/g	g/g	g/g	m ² /g
gut ventiliert – min	0.86	0.05	0.06	0.10
gut ventiliert – mittel	0.97	0.07	0.11	0.134
gut ventiliert – max	1.12	0.09	0.17	0.173
unterventiliert - min	1.45	0.11	0.07	0.14
unterventiliert – mittel	1.93	0.17	0.13	0.44 *)
unterventiliert - max	2.57	0.27	0.20	0.64 **)
*) Mittelwert plus Standardabweichung **) Ausser Polystyrol mit einem Dm-Wert von 1.0m ² /g				

Für Zellulose werden folgenden Werte angegeben:

Tabelle 3: Statistisch gesicherte Y- und Dm-Werte für Zellulose

Zellulose/Brandphase	YCO ₂	YCO	YRuss	Dm
	g/g	g/g	g/g	m ² /g
gut ventiliert – min	--	0.004	0.02	0.06
gut ventiliert – mittel	0.83	0.034	0.053	0.10
gut ventiliert – max	--	0.09	0.09	0.10
unterventiliert - min	1.25	0.07	--	--
unterventiliert – mittel	1.52	0.15	0.12	0.22
unterventiliert - max	--	0.23	--	--

Ferner wird erwähnt, dass sich brennbare Flüssigkeiten je nach Art der Rauchausbreitung sowohl den Grössen der zellulosehaltigen Brandstoffe (z. B. Methanol, Ethanol) als auch den Kunststoffen (z. B. Benzin, n-Hexan) zuordnen lassen.

Die Abbrandgeschwindigkeiten werden für PU und PVC mit 0.5 bis 0.7 kg/(m²*min) und für PE, PP, PS mit 0.4 bis 0.5 kg/(m²*min) angegeben.

Der Temperatur-Zeitverlauf, sogenannte Bemessungsbrände, und die Wärmefreisetzungsrate – die eine Folge der Umsetzung der chemischen Komponenten ist – spielt in der Literatur eine grosse Rolle. In [Schneider2006BPT] werden projektbezogene Temperatur-Zeit-Kurven gezeigt, bei dem beispielsweise auch eine SBB-ETK (Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve der SBB) enthalten ist, wie die folgende Darstellung zeigt.

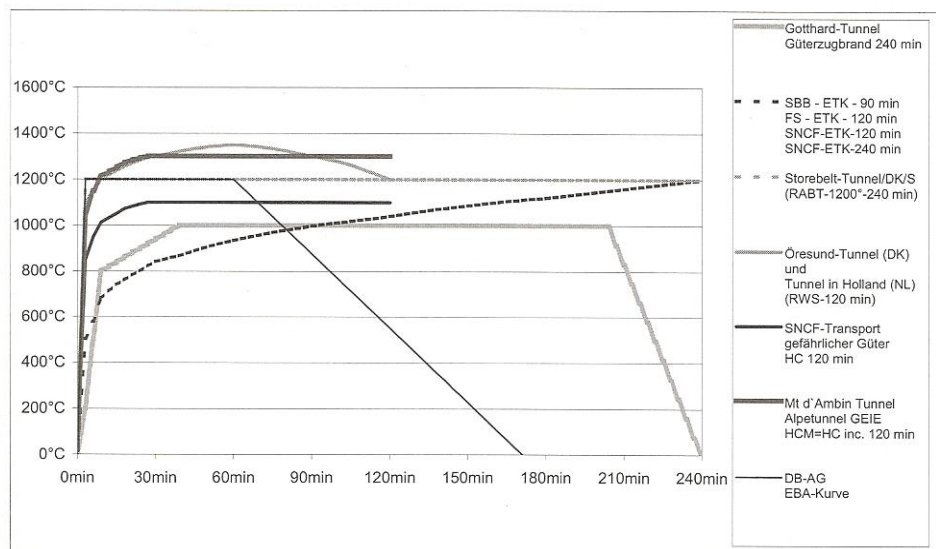


Abbildung 1: Zusammenstellung von Temperatur-Zeit-Kurven für bestimmte Projekte nach [Schneider2006BPT].

Die folgende Abbildung aus [VDV2005ÖPNV] zeigt ein Beispiel, bei dem gut zu erkennen ist, wie unterschiedlich diese Verläufe aussehen können. Die Kurven zeigen je nach Region oder Bau des Tunnels eine unterschiedlich vorgeschlagene Kurve.

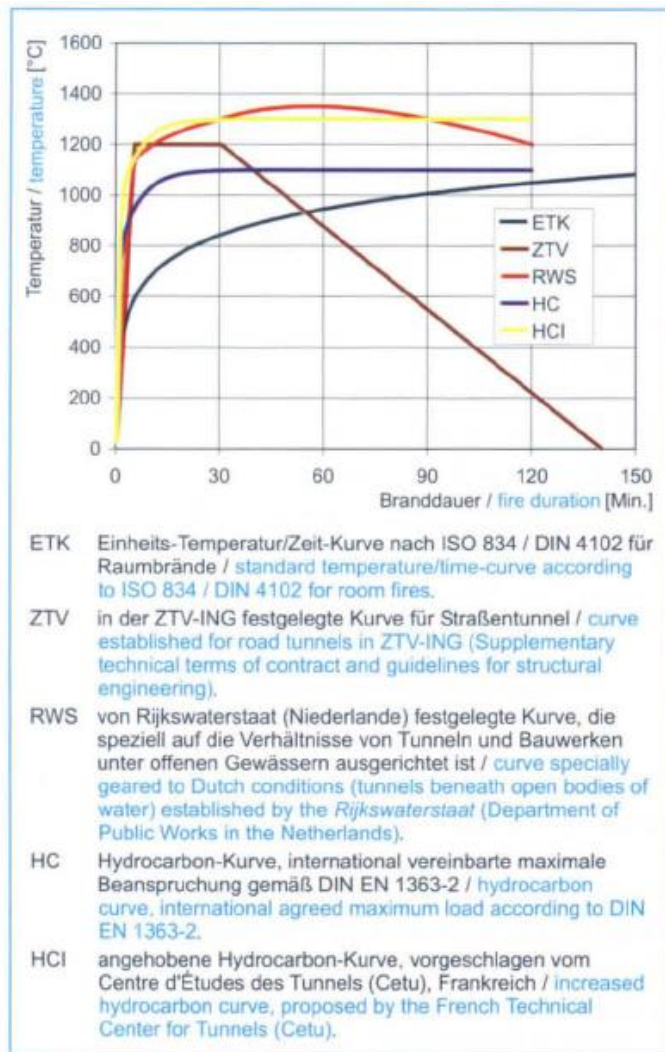


Abbildung 2: Festgelegte Temperatur-Zeit-Kurven für Bemessungsbrände bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen (nach [VDV2005ÖPNV]).

Diese Kurven zeigen allerdings nicht, wie lange es von der Zündung bis zum gezeigten Temperaturanstieg dauert. Zudem wird dargestellt, dass bei Pool-Fires (die Brandquelle ist z. B. Heptan in einer Wanne) die Wärmefreisetzung viel schneller erfolgt als in realen Systemen. In [Welte2011VSS] wird eine Grafik gezeigt, bei der die Entwicklung der Brandleistung bei verschiedenen simulierten LKW-Bränden untersucht wurde. Diese Grafik verdeutlicht, dass die Brandleistung während 2 bis fast 5 Minuten kaum messbar ist, wie aus der folgenden Abbildung zu sehen ist.

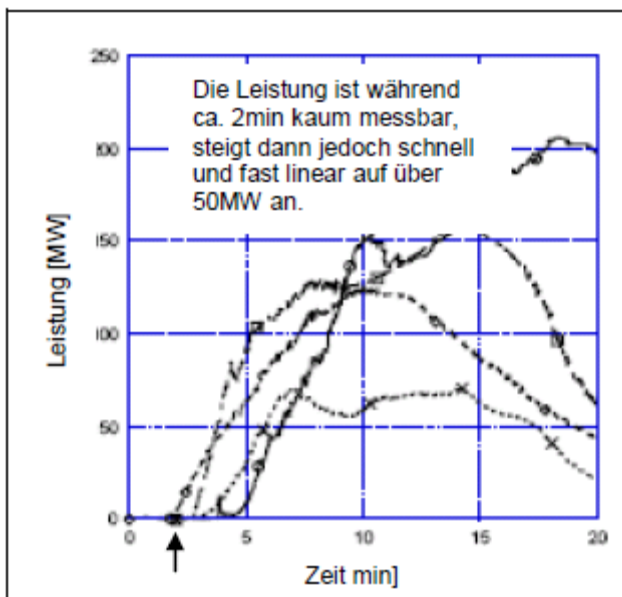


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Brandleistung gemäss [Welte2011VSS].

Oft wird in der Literatur dargestellt, wie sich die Temperatur nicht nur in Funktion der Zeit sondern auch in Funktion der Entfernung zum Brand verhält. Dies ist gerade für Einsatzkräfte sehr wichtig. Ein Beispiel aus [VDV2005ÖPNV] ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

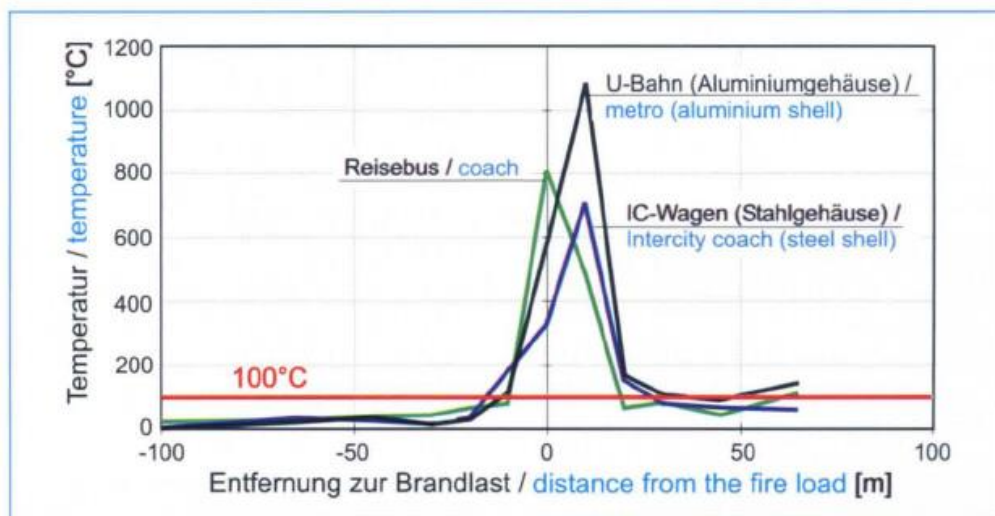


Abbildung 4: Maximaltemperaturen in 2 m Höhe bei Bränden verschiedener Fahrzeuge in Abhängigkeit der Entfernung von der Brandlast (aus [VDV2005ÖPNV]).

Aus den gezeigten Grafiken ist ersichtlich, dass viele Untersuchungen zu den Auswirkungen von Bränden vorhanden sind. In den folgenden Abschnitten sind deshalb Veröffentlichungen dargestellt, die sich etwas allgemeiner mit der frühen Brandentwicklung beschäftigen. In Tunneln scheinen diese Ursachen jedoch kaum untersucht.

Bei einem Mottbrand von Baumwolltüchern, die 15 min auf 450° erhitzt wurden, wurden mittels GC-MS die folgenden Substanzen identifiziert: n-Hexan, n-Heptan, Benzol, Toluol, Xylol, Aceton, 2-Butanon, Ethanol, 2-Methylfuran, Furfural, 5-Methyl-2-Furaldehyd, wobei 2-Methylfuran, Furfural, 5-Methyl-2-Furaldehyd und Benzol am häufigsten vorkamen [Ozawa2005SAB]. [Scorsone2006SAB] nennt als typische Marker für gewissen Feuertypen

Furfural und 2-(3H)-Furanon für mottende Baumwolle; Hexansäure, Heptansäure und Guaiacol für mottendes Holz; Acetohydroxamsäure und Salzsäure für mottendes Papier; Pyridin, Limonen, Nicotin, Isopren und Ammoniak für Zigarettenrauch; sowie Benzonitril, Stickoxid, Lachgas und Blausäure für brennendes Polyurethan.

Eine Studie [Ni2008SAB] über die thermische Zersetzung von Kabelisolationen (PVC, Teflon, Kapton, Silikongummi) bei Überhitzung (Kurzschluss oder Überlastung) listet Zersetzungsprodukte und -mechanismen dieser Polymere auf, die als Frühindikator dienen können. Offenbar unterscheiden sich diese Produkte relativ stark von einer thermischen Zersetzung im Ofen, weil bei der Kabelüberhitzung lokal sehr viel höhere Temperaturen entstehen können.

[Hayes2009APOC] beschreibt detaillierte Reaktionsmechanismen der oxidativen Zersetzung verschiedener Treibstoffe von Methan über Kohlenwasserstoffe und (Hetero-) Aromaten bis hin zu Treibstoffadditiven und Biotreibstoffen. [Kataoka1998ACA] weist eine Anzahl Aldehyde in Räuchen von beispielsweise Zigaretten, Holz, Gummi und Plastik nach.

Was die Wärmefreisetzungsraten und erreichte Temperaturen bei Tunnelbränden angeht, beschreibt [Lönnermark2005FSJ] eindruckliche Zahlen: Bei gross angelegten Testbränden ganzer Lastwagenladungen erreichten die Wärmefreisetzungsraten 66 bis 202 MW und die Temperaturen an der Tunneldecke 1281 bis 1363°C. Interessant ist auch die Feststellung, dass die Temperaturverläufe dieser authentischen Ladungen überraschend nahe denen von Petrolwannenfeuern sind.

In [Ingason2005FSJ] wird die Wärmefreisetzung (Heat Release Rate, HRR) in Funktion der Windgeschwindigkeit untersucht und mit Literaturwerten verglichen. Für diese Schätzung wurden Temperaturen, CO₂, CO und O₂ gemessen. Maximale HRR von 66 bis 202 MW wurden in einer Zeit von 7 bis 18.5 Minuten gemessen.

2.1.2 Tunnelluftanalyse

Ziel des Abschnitts: Sind Tunnelluftanalysen in der Literatur beschrieben? Was kommt in Strassentunneln in der Abluft vor? Welche Verbrennungsprodukte kommen im Abgas von Verbrennungsmotoren, Benzin wie Diesel sowie neuere Biotreibstoffe, vor?

[Aralt2009TUST] erwähnt typische Staubkonzentrationen im Bereich 40 – 600 ug/m³, maximal 2000 ug/m³ und legt die Alarmgrenze für Rauchmelder bei 3000 ug/m³ fest. Die Konzentrationen an CO sind wegen Abgasen schon bei starkem Verkehr höher als bei einem Brand, typischerweise wird ab 20-30 ppm die Ventilation verstärkt, bei 100 ppm wird der Tunnel gesperrt (Norwegen).

[Bari2010TUST] nennt maximale Massanteile durch Abgase bei Stau von 0.16 O₂, 0.14 CO₂ und 0.002 CO. Fällt die Lüftung aus, können die Werte auch 0.05, 0.18 bzw. 0.0028 betragen.

[Litton1981SIC] beschreibt ein Brandexperiment in einer Mine und geht dabei vor allem auf die unterschiedlichen Schadstoffausbreitungen zwischen Schwelbränden und flammenden Feuern ein. Er kommt zum Schluss, dass in diesem Fall ein CO-Sensor alle 100 m ein geeignetes Warnsystem bildet im Gegensatz zu Temperatursensoren, die nur sehr nah am Brandherd reagieren und daher sehr eng platziert werden müssten. Ein gross angelegtes Brandexperiment mit Bränden in der Grössenordnung von Lastwagenladungen beschreibt [Ingason2005FSJ], wo Wärmefreisetzungsraten, Temperaturen, CO, O₂ und CO₂ in Abhängigkeit der Brandzeit und der Luftströmungsgeschwindigkeit gemessen wurden. Die maximalen Konzentrationen von CO₂ und CO erreichten 12.2 % und 0.27 %.

2.1.3 Sensorik für Brände

Ziel des Abschnitts: Welche Sensoren gibt es für Brandprodukte (Forschung, Labor, Markt)? Gassensoren? Funktionsweise? Spezifität, Empfindlichkeit?

Die Zeitdauer vom Anfang des Feuers, im Experiment die Zündung, bis zum Ansprechen des Sensors, rangieren je nach Ausgestaltung des Experiments beträchtlich, zum Beispiel von 3 min (conducting polymer Sensor) [Scorsone2006SAB] über 15 min (CO Gas) bis 76 min (Rauch nach einem Schwelbrand) [Ozawa2005SAB], obwohl der Europäische Standard eine Anzahl Standardfeuer definiert (EN 54) [Jackson1994FSJ]. Brandversuche auf einem stillgelegten Marineschiff zeigen die Verkürzung der Meldezeit beim Einsatz von Gassensoren gegenüber herkömmlichen Rauchmeldern von ca. 7 min auf 3:45 min bei offenen Feuern, und 7:44 min statt ca. 15 min bei Schwelbränden [Hammond2008SAB]. Ein Brandexperiment in einem Holzhaus erreichte mit Gassensoren eine Meldezeit von 13 min beim Gassensor gegenüber 15 min vom frühesten herkömmlichen Feuermelder [Amamoto1990SAB].

Aufgrund der unterschiedlichen Feuersignaturen schlägt [Milke1999FT] vor, die Sensor-Aktivität als flammende Feuer, schwelende Feuer und Störquellen (und keine Aktivität) zu klassifizieren. Die Verwechslung von flammenden Feuern und schwelenden Feuern wird dabei toleriert, da beide Situationen einen Alarm auslösen sollen. Er erreicht durch eine trainierte Multisensortechnologie im Schnitt einen Vorsprung von 45 s auf herkömmliche Brandmelder oder 57 % Verbesserung für flammende Feuer, und 245 s Vorsprung bei Schwelbränden. Die Zuverlässigkeit der richtigen Erkennung der Klasse konnte von 97 % auf 100 % bei offen Feuern, von 25 % auf 88 % bei Schwelbränden, und von 27 % auf 73 % gesteigert werden. Es bleibt anzumerken, dass das System auf ebendiese Situationen trainiert wurde.

Der Einsatz von Gassensoren wurde schon oft vorgeschlagen, um die Nachteile bisheriger Branddetektion (Temperatur und Rauch, ionisierend oder photoelektrisch, relativ langsam) zu beseitigen. Konkrete Untersuchungen beziehen sich meist auf den Haus- und Wohnbereich, aber auch auf Industrie und Schiffe [Hammond2008SAB], Flugzeuge [Chen2007FSJ, Blake2008FSJ] und Kohleminen [Litton2002FSJ].

Ebenfalls prominent ist das Problem Fehlalarme und der Störquellen, die einen Fehlalarm auslösen können. Im Wohnbereich sind dies neben Zigarettenrauch beispielsweise Gasherde, Kerzen, angebrannte Toasts oder gebratener Speck [Gottuk2002FSJ]. Im Industriebereich können Schweißbrenner, Metallsägen, Schleifen, Abgase oder Heizungen Störquellen sein [Hammond2008SAB]. Die Unterschiede sind gross: Was an einer Stelle Alarm auslösen soll, kommt anderswo im Normalbetrieb vor. [Litton2002FSJ] beschreibt diesbezüglich detailliert das Problem von Dieselabgasen in Kohleminen, zieht aber zur Unterscheidung von tatsächlichen Feuern nur photoelektrische und ionisierende Rauchsensoren bei. In einer Folgestudie [Litton2009FSJ] zieht er zur Vermeidung von Störungen Partikelfilter bei, die Staub und Nebel vor dem photoelektrischen Sensor abfangen sollen, während der Vergleich zum Ionisationssensor die Diskriminierung von Dieselabgas erlaubt.

Interessant ist der Artikel von [Blake2008FSJ], der die Simulation der Brand- und Rauchausbreitung im Frachtraum von Flugzeugen beschreibt, um die Anzahl der teuren (regulatorisch vorgeschriebenen) Flugexperimente zu reduzieren. Dabei ist auch ausdrücklich die Identifizierung von optimalen Sensorstandorten die Rede, neben der Lokalisierung besonders heikler Brandausbruchsorte und der Optimierung der Sensoreinstellung. Allerdings kommen auch hier nur Rauchmelder und Temperaturfühler zum Einsatz. Die herkömmlichen Systeme liefern hier 100 mal häufiger einen Fehlalarm, als tatsächlich ein Brand im Frachtraum auftritt.

Als Sensortechnologie werden Metalloxid-Halbleiterdetektoren, Edelmetall-Mikrokalorimeter, leitende Polymere [Scorsone2006SAB], IR-Laser-Absorptionsmeter [Nebiker2001FSJ] sowie sogenannte Cermet-Sensoren (eine Kombination von keramischen und metallischen Komponenten, die wie elektrochemische Zellen funktionieren) [Hammond2008SAB] genannt. Auffallend häufig kommen Zinnoxid-Gassensoren (SnO_2), auch Taguchi-Sensoren genannt, zum Einsatz [Sawada2008SAB, Korotchenkov1999SAB, Tomchenko2003SAB, MousaBahia1994SAB], die relativ breit auf reduzierende Gase ansprechen, was bei der Vielzahl von Brandtypen durchaus praktisch sein kann. In der Praxis werden allerdings meist Sensoren verwendet, die auf CO, CO₂, Stickoxide, Ammoniak, Schwefeldioxid [Tomchenko2003 SAB, Pohle2007SAB] Blausäu-

re, Methan [Nebiker2001FSJ] Acetylen, Wasserdampf [Chen2007FSJ] reagieren. [Amamoto1990SAB] identifiziert einen H₂ Sensor als besonders früher und empfindlicher Brandanzeiger und stellt fest, dass als CO-Sensoren vertriebene Teile ebenfalls auf andere Brandgase wie H₂ oder VOC ansprechen, im Einklang mit [MousaBahia1994SAB], die zudem auf das Problem der Vergiftung (Beschädigung der aktiven Zone) der Sensoren hinweisen, insbesondere nachdem sie Räuchen von Polyurethan und PVC ausgesetzt waren.

Gassensoren können sehr empfindlich sein, [Nebiker2001FSJ] nennt einige ppm als Messgrenze, [Hammond2008SAB] gibt ebenfalls den tiefen ppm-Bereich für Cermet-Sensoren an. In [Amamoto1990SAB] ergeben schon 10 ppm eines Gases wie H₂, CO oder Methan deutliche Sensorausschläge.

Um die Robustheit gegenüber Störquellen zu vergrößern, werden neben absoluten Schwellwerten auch schnelle Zunahmen des Messwerts verwendet sowie Kombinationen davon [Chen2007FSJ]. Häufig kommen auch Kombinationen mehrerer Sensortypen zum Einsatz (Multisensortechnologie), zum Beispiel verschiedene Gassensoren mit Temperatursensoren, wobei mehr oder weniger komplizierte Algorithmen [Hagen2000FSJ, Tomchenko2003SAB, Ni2008SAB, Gottuk2002FSJ, Milke1999FT], Mustererkennung und Neuronale Netze [RosePehrsson2000SAB, Derbel2004FSJ] zum Einsatz kommen. Fertige Kombinationen mehrerer Sensortypen werden auch als e-Nasen vertrieben [Scorsone2006SAB].

Eher akademisch mutet im Weiteren der Anspruch an, aufgrund von so genannten Brandfingerabdrücken oder Feuersignaturen die Brandquelle, das Material und den Brandzustand (mottend oder flammend) zu erkennen.

Geschmälert wird die Aussagekraft der Experimente neben der Schwierigkeit, repräsentative Testfeuer zu reproduzieren, von der Abhängigkeit der Raumgeometrie, der Sensorplatzierung und allfälliger Luftströmung, die je nach dem einen Brand anfachen kann oder die Rauchprodukte verdünnt. Die brennbaren Materialien, Brandtemperaturen, Sauerstoffzufuhr und auch die Brandgrösse (Hitzeentwicklung) wie auch die möglichen Störquellen und Umwelthintergründe (ambient background) sind zu vielfältig und teilweise widersprüchlich. Daher gibt es die allgemein funktionierende, zuverlässige, störsichere Branderkennung nicht. Die Branderkennungsmethode muss daher spezifisch auf die jeweilige Situation abgestimmt werden [Gottuk2002FSJ, Litton2002FSJ].

In [Pohle2007SAB] wird aufgrund einer Signalanalyse zuerst ein Feuer detektiert und danach der Feuertyp bestimmt, wobei hauptsächlich die Komponenten CO, NO₂ und CO₂ analysiert werden, da diese in höheren Konzentrationen auftreten. Diese Signale der Komponenten werden aufgezeichnet und mit kommerziellen Rauchdetektoren verglichen. Als Brandquelle wurden die Feuertypen gemäss Europastandard EN54 verwendet. Sogar in einer frühen Phase der Feuer konnte eine Sensorantwort beobachtet werden, sodass ein Feuer früher erkannt werden kann als mit herkömmlichen Rauchdetektoren. Zudem konnten offene Feuer von einem Schmelbrand unterschieden werden, wenn die Signale von zwei Sensoren simultan interpretiert wurden.

In [Wiegler1994SAB] wird ein Sensor mit „thick-film“ und „thin-film“ Technologie vorgestellt, um einen selektiven Sensor für CO und NO₂ zu testen.

Bei [Haak2000STUVA] werden in einer Diskussion die Brandmeldeeinrichtungen diskutiert. Dabei wird erwähnt, dass bei Linienbrandmeldern teilweise Probleme auftraten, Brände rechtzeitig zu erkennen. Dies gilt insbesondere für Pkw-Brände, da der Temperaturanstieg relativ gering ist. Zudem wird erwähnt, dass die derzeit üblichen Temperatur- und CO₂-Sensoren nicht geeignet sind, um einen Brand frühzeitig zu erkennen. Die Sichttrübung zeigt dagegen eine schnelle Reaktion, wobei die Abstände zwischen den Messgeräten oft zu gross sind. Es wird gesagt, dass vermutlich eine Kombination von Sichttrübungsmessung und Videotechnik eine vielversprechende Einrichtung für die Zukunft darstellen. In Australien wurde die Detektionsmöglichkeit basierend auf der Lichtwellenleitertechnik getestet, wobei jedoch im Bericht keine Ergebnisse aufgezeigt werden.

In [Welte2011VSS] werden diverse Sensoren und Detektionsmöglichkeiten analysiert. Zudem wird die Detektionszeit für verschiedene Brände angegeben. Feuer 1-7 sind offene Flüssigkeitsfeuer („Pool-Fire“, Heptan), Feuer 8 ist ein PKW Brand, bei dem der Brand auf dem Fahrersitz entfacht wurde (Türen geschlossen, Fenster leicht geöffnet).

Tabelle 4: Detektionszeiten für zwei Linienbrandmelder

Feuer Nr.	Feuerleistung, Luftlängsgeschwindigkeit	Detektionszeit [min:sek] Rauchmelder	
		Typ A	Typ B
1	0.1 MW, 1.1-1.2m/s	1:26	1:23
2	0.1 MW, 1.6m/s	2:24	2:30
3	0.5 MW, 1.1-1.2m/s	1:27	0:53
4	0.5 MW, 1.6m/s	1:07	1:12
5	1.0 MW, 1.1-1.2m/s	0:33	0:25
6	1.0 MW, 1.6m/s	0:38	0:34
7	3.0 MW, 1.8m/s	0:31	0:25
8	Brand PW, 1.5-1.6m/s	3:19	2:52

Die folgende Tabelle zeigt die Detektionszeiten eines Rauchmelders bei unterschiedlicher Distanz zum Feuer. Da die Heptanfeuer wenig Rauch entwickeln, sind die Detektionszeiten relativ hoch.

Tabelle 5: Detektionszeiten eines Rauchmelders bei unterschiedlicher Distanz zum Feuer

Feuer Nr.	Feuerleistung, Luftlängsgeschwindigkeit	Detektionszeit [min:sek] Rauchmelder	
		62.5 m	125 m
1	0.1 MW, 1.1-1.2m/s	6:34	8:20
2	0.1 MW, 1.6m/s	2:13	2:54
3	0.5 MW, 1.1-1.2m/s	2:28	3:35
4	0.5 MW, 1.6m/s	2:56	3:52
5	1.0 MW, 1.1-1.2m/s	1:33	2:26
6	1.0 MW, 1.6m/s	1:34	2:14
7	3.0 MW, 1.8m/s	0:55	1:35
8	Brand PW, 1.5-1.6m/s	1:23	1:59

2.1.4 Warnsysteme

[Aralt2009TUST] gibt einen Überblick über moderne Sensorsysteme und prüft deren Leistung im Norwegischen Runehamar Test Tunnel. Die Experimente beinhalteten Testfeuer mit 0.2 bis 2.4 MW Brennleistung, bemerkt aber, dass ein Bus oder Lieferwagen 10 – 20 MW erreichen kann. Lastwagen, oder wenn das Feuer auf mehrere Fahrzeuge übergreift, erreichen 100 bis 200 MW – in solchen Fällen kann auch keine Rettungs- oder Löschkraft mehr erfolgen. Bei einem Auto wird die maximale Hitzefreisetzung nach 3 bis 8 Minuten erreicht, wobei als Feuerbeginn erste Flammen angesehen werden, nicht ein möglicherweise vorausgehender Schwelbrand. Es kamen Temperatursensoren (mit Alarm bei schneller Erwärmung) sowie verschiedene Fabrikate von Rauchmeldern zum Einsatz. Die besten Reaktionszeiten der Sensoren lagen je nach Feuergroße zwischen 2:13 min und 25 s, wobei der Autor anmerkt, dass die verwendeten Heptan-Wannenfeuer sehr schnell grosse Mengen an Wärme entwickeln, was nicht unbedingt der Charakteristik eines Autobrandes entspricht. CO-Sensoren eignen sich wegen den Abgasen nicht, HCl-Sensoren würden nur auf Brände von PVC-haltigen Kabeln ansprechen. Optische

Flammen- oder Rauchererkennung auf Videoaufnahmen steckt noch in den Kinderschuhen.

[Han2009FSJ] beschreibt eine Methode, auf Videoaufnahmen Flammen und Rauch zu erkennen, die auf die Szenerie in Tunneln ausgelegt ist. Selbst wenn sich die Methode als praxistauglich erweisen sollte, reagiert sie erst auf direkt sichtbare Flammen und Rauch.

Eine Fallstudie [Chow2001TUST] beschreibt einen eher harmlosen Fall eines Fahrzeugbrands in einem Tunnel in Hong Kong. Erst nach 12 Minuten wurde der Brand auf dem Videoüberwachungssystem erkannt, als der Fahrer bereits erfolglos versuchte, selber den Brand zu löschen. Nach weiteren 30 Minuten konnte der Brand durch die angerückte Feuerwehr gelöscht werden.

Nicht direkt Brände, sondern Dämpfe potentiell gefährlicher Substanzen bei Grossveranstaltungen standen im Fokus einer Studie von [Becher2010SAB]. Dabei wurde ein Netz aus Gas-Sensoren untersucht, um gefährliches Material zu identifizieren, wobei Metall-Oxid Sensoren eingesetzt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass chemische Kontamination in einer Gruppe von sich bewegenden Personen identifiziert werden konnte. Um die Sensorsensitivität zu testen, wurden verschiedene Substanzen wie Ethanol, Methanol, Diesel, Benzin, Waschbenzin und Farbverdünner eingesetzt. Unter Laborbedingungen war es möglich, eine Konzentration von 5 ppmV oder weniger zu detektieren. Auch als Personen durch einen Demonstrator durchgingen konnte in 95% der Fälle die gefährliche Substanz detektiert werden.

In [Schneider2006BPT] wird schematisch der Brandverlauf und der Ansprechbereich von Löschanlagen gezeigt. Daraus ist ersichtlich, dass Löschanlagen in der Frühphase der Entwicklung des Vollbrandes eingreifen, beim Entwicklungsbrand aber machtlos sind.

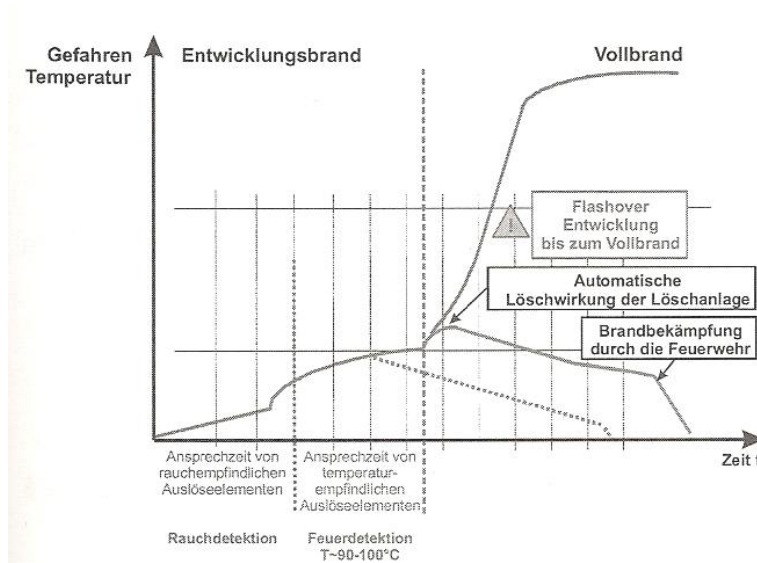


Abbildung 5: Schematischer Brandverlauf mit Ansprechbereich von Löschanlagen (aus [Schneider2006BPT]).

Simulationen

Rauchausbreitung und Feuerdynamik in Tunneln mittels Simulation wurde bereits vereinzelt angewendet. Der Schwerpunkt liegt in der Entrauchung und Lüftungssteuerung, damit Hitze und Giftstoffe möglichst entfernt oder verdünnt werden können [Hu2010IJHMT].

[Bari2005TUST] berichtet von einer aufwendigen Simulation eines Tunnelbrandes unter Berücksichtigung von Ventilation, Stau und Abgasen. Dabei dringt die Rauchfront bis 55 m gegen den Ventilationsluftstrom vor, die Gefahr erstreckt sich allerdings bis 150 m aufgrund der Wärmeentwicklung und giftiger Gase, wobei hier allerdings die Abgase der an

der Weiterfahrt gehinderten Fahrzeuge den Hauptbeitrag liefern. [Wang2009JHM] untersucht die Wirkung von Dachentlüftungen in Tunneln ohne forcierte Ventilation mit Brandexperiment und Simulation. Ein interessantes Resultat hier ist, dass der sich anfänglich heisse Rauch an der Decke entlang ausbreitet und nach ca. 10 min abkühlt und sedimentiert, so dass auch die unteren Luftschichten kontaminiert werden und Flucht und Rettung behindern.

[Nilsen2009FSJ] stellt fest, dass mit einfachen Formeln und Faustregeln ohne grossen Aufwand ähnliche Aussagen wie komplexe CFD-Berechnungen möglich sind.

2.1.5 Fahrzeugabgase

[Baral2011SAE] zeigt auf, dass die Partikel und die Emissionen von Polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) von Motoren ähnliche Trends für verschiedene Lastpunkte und Motoreinstellungen und daher eine enge Korrelation aufweisen. Der Testmotor wurde allerdings ohne Katalysator vermessen. Ein Vergleich mit der Literatur zeigt jedoch einen vergleichbaren Trend über die verschiedenen PAH-Emissionen, der Absolutwert ist jedoch deutlich höher bei der vorliegenden Untersuchung.

Ein Vergleich zwischen Benzin und Erdgas wurde von [Czerwinski2010SAE] durchgeführt. Dabei wurde auch das Rohgas – also vor Katalysator – aufgezeichnet. Es hat sich gezeigt, dass sehr tiefe Werte für Aromaten insbesondere für Erdgasbetriebe gemessen wurden. Es konnte gezeigt werden, dass sobald der Katalysator anspringt, alle Komponenten effizient oxidiert werden.

In [Li2009SAE] wurden Emissionen mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) analysiert. Es wurde gezeigt, dass unter ganz speziellen Bedingungen („Ultra-High EGR“) die aromatischen Komponenten kaum mehr effizient vom Katalysator reduziert werden. Unter diesen Bedingungen konnten Aldehyde und Benzen bis 50 ppm gemessen werden. Auch hier zeigt sich, dass eine Korrelation mit den unverbrannten Kohlenwasserstoffen (THC) besteht, die in den gesetzlichen Emissionsgrenzwerten definiert sind.

Ein Vergleich zwischen einem Heavy-Duty Diesel Motor von 2004 und 2007 wurde in [Liu2009SAE] gezogen. Es hat sich gezeigt, dass der neuere Motor nicht nur bei den limitierten sondern auch bei den unlimitierten Emissionen besser abschneidet.

2.2 Zusammenfassung Literaturstudie

Zur Branddetektion werden vier Sensortypen eingesetzt:

- Klassische Rauchsensoren mittels Lufttrübung oder Partikeldetektion in Ionisationskammer
- Temperaturmessung, ein rascher Anstieg löst Alarm aus
- Gassensoren auf Brandprodukte
- Optische Verfahren mittels Auswertung von Kamerabildern (Flammen- und Rauchschwadenerkennung)

Brandfrühdetektion mittels Gassensoren ist ein vielbeachtetes Thema, wobei meist Brand-Endprodukte wie CO₂, CO und gelegentlich frühe Zwischenprodukte wie H₂ oder reduzierende Moleküle detektiert werden. Als Technologie kommen dabei primär Halbleiteroxid-Sensoren vor, die in der Praxis auf wenige ppm der Gaskonzentration ansprechen können.

Die Zuverlässigkeit der Sensorik bei Störquellen wurde primär im häuslichen und industriellen Bereich untersucht. Dabei kommt vorherrschend die kombinierte Auswertung mehrerer Sensortypen zum Einsatz. Die Einsatzsituationen sind dabei so unterschiedlich, dass individuelle Kombinationen und Algorithmen unerlässlich sind. Die Situation in Strassentunneln wurde bisher nicht bearbeitet.

Die Resultate der Literaturstudie bzgl. Substanzen in der Tunnelluft oder Motorabgasen

generell, die die im vorliegenden Vorhaben vorgesehene Sensorik stören könnte, sind eher dürftig und wenig spezifisch. Sie beschränken sich weitgehend darauf, was der Fachmann annehmen kann.

Ebenso gibt es keine schlüssigen Antworten auf die Frage, wo und wie Fahrzeugbrände ausbrechen. Die meisten Untersuchungen betrachten die Temperatur-Zeit-Kurven und die resultierende Wärmefreisetzungsrate, was eine Folge der Brände ist. Es bleibt dem Projektteam die Annahme, dass die Ursachen breit gefächert sind und kaum Einschränkungen in den Brandsubstanzen möglich sind. Auch über Warnsysteme in Tunneln schweigt sich die wissenschaftliche Literatur weitgehend aus.

Generell bleibt das Bild lückenhaft, weil die Situationen kompliziert sind und meist nur wenige Aspekte punktuell beleuchtet und untersucht wurden. In der Phase 2 soll aber weiterhin projektbegleitend Literatur gezielt gesucht und analysiert werden.

2.3 Folgerungen nach der Literaturstudie

Die Unterschiedlichkeit von Feuern, Brandmaterialien und Störquellen läuft dem Ziel zuwider, einen einheitlichen Brandmarker zu finden. Allerdings war das bisher auch kaum ein Thema, und die Brandgasanalysen sind unvollständig und auf wenige Stoffklassen fokussiert. Zudem kamen bisher keine hochspezifischen, hochempfindlichen molekulare Sensoren zum Einsatz. Ein Ausweg könnten auch Breitband-Gassensoren sein, wobei die bisher genannten Typen durch die Hintergrundabgase in Tunneln wohl von vornherein nicht in Frage kommen. Die zu erwartenden Empfindlichkeiten lassen die Früherkennung prinzipiell zu.

Wegen der fehlenden Angaben zu Brandursachen und Brandanfängen und deren beteiligten Brandsubstrate kann eine breitere Simulationsstudie durchgeführt werden, die die Lücken in Bezug auf die Bedürfnisse für dieses Projekt schliessen kann.

Deutlich wird auch das Potential der angestrebten Brandfrüherkennung, die genau genommen auf die Detektion der Brandauslösung fokussiert, statt des Brandausbruchs. Je nach Verlauf des Feuers nach der Brandauslösung sind mehrere Minuten Zeitgewinn in Aussicht.

3 Brandanzeiger und Ersatzbrandstoff

Der **Brandanzeiger** ist ein (flüchtiger) Stoff, allenfalls ein Partikel, welcher in der Frühphase eines Brandes in messbaren Konzentrationen entsteht, aber nicht in den gewöhnlichen Abgasprodukten der Verbrennungsmotoren und allfälligen späteren Reaktionsprodukten in der Tunnelluft vorkommt. Darauf soll der Zielsensor ausgerichtet werden.

Der **Ersatzbrandstoff** ist ein leicht erhältlicher und brennbarer Stoff, der bei der Verbrennung den obgenannten Brandanzeiger zuverlässig und in messbarer Konzentration freisetzt. Er dient im Experiment zur Erzeugung der Brandabgase, auf die die Sensoren ansprechen sollen.

Der Brandanzeiger und der Ersatzbrandstoff sollen aufgrund der in der ersten Arbeitspackung gewonnen Erkenntnisse und mit Hilfe von chemischer Reaktionssimulation ermittelt und evaluiert werden. So können die Reaktionsprodukte bei thermischer Spaltung oder oxidativ-radikalischer Behandlung der Ausgangsstoffe kontrolliert und ohne aufwendige Experimente und Analysen ermittelt werden.

3.1 Literatur und chemische Grundlagen

Die Literaturstudie hat bereits auch Erkenntnisse zu diesem Themenfeld geliefert. Eine separate Tabelle wurde erstellt über die Brandprodukte einer Reihe von Substraten, von Treibstoffen, Zusätzen, Zigaretten über Kunststoffe und Werkstoffe bis hin zu ganzen Autos. Anzumerken ist, dass in den wenigsten Fällen der Anspruch war, eine vollständige Analyse der Brandprodukte zu liefern, sondern meist nur gesundheitsgefährdende Stoffe oder eine bestimmte Stoffklasse gesucht wurden, um beispielsweise ein neues Messverfahren zu demonstrieren. Die Tabelle gab einen umfangreichen Einblick in die Vielfalt der Rauchgaskomponenten – und zeigte auch deutlich die Lücken auf.

Vereinzelt gehen die Autoren auch auf die chemische Dynamik des Brandprozesses ein. In der Praxis ist die vollständige Verbrennung – zu Wasser und Kohlendioxid – selten. Man spricht in diesem Fall von Pyrolyse – der Zersetzung unter Feuereinwirkung. Diese kann wiederum aufgeteilt werden in Thermolyse – der Zersetzung durch hohe Temperatur ohne Sauerstoffbeteiligung, und der unvollständigen Verbrennung [Prado1978FSJ], sowie der Rekombination von reaktiven Zwischenprodukten zu mehr oder weniger stabilen Substanzen. Eine gefürchtete Klasse – weil oft hochgiftig und krebserregend – stellen die sog. Polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) dar [Pasternak1981SIC]. Obwohl diese Moleküle strukturell kompliziert aussehen, sind sie chemisch derart stabil, so dass sie bei Gelegenheit fast zwangsläufig entstehen.

Hawley et al. liefern in einer Reihe von Kunststoff-Verbrennungsstudien [HawleyFedder1984JCA1, HawleyFedder1984JCA2, HawleyFedder1984JCA3, HawleyFedder1987JCA] neben umfangreichen Tabellen der Brandprodukte auch für diese Studie wesentliche Folgerungen:

- Trotz flammender Verbrennung unter Sauerstoffzufuhr kommen in den Brandprodukten kaum sauerstoffhaltige Substanzen vor (oder sie sind derart flüchtig, dass sie nicht in den verwendeten Kältefallen aufgefangen wurden). Das heisst, dass Sauerstoff für die gesuchten Brandanzeiger nicht zwingend nötig ist und damit sowohl Mott- und Schwelbrände unter Sauerstoffmangel wie auch flammende Feuer erfasst werden können.
- Ähnliches gilt für chlorhaltige Produkte, die bei der Verbrennung von PVC gefürchtet sind: Sie wurden kaum nachgewiesen, Chlor entweicht hauptsächlich in Form von Chlorwasserstoff. Ein chlorhaltiger Brandanzeiger kommt daher auch nicht in Frage.
- Brennen Gemische von Kunststoffen [HawleyFedder1987JCA], so entsprechen die Verbrennungsprodukte im Wesentlichen der Summe der Produkte, die bei der Verbrennung der reinen Kunststoffe entstehen. Als Brandanzeiger bietet sich daher eine Substanz an, die als Verbrennungsprodukt von allen Kunststoffen vorkommt; auf spe-

zielle Mischbrände, wie sie bei Fahrzeugbränden wohl die Regel sind, braucht keine Rücksicht genommen zu werden.

- Schwerere Verbrennungsprodukte, wie mehrringige PAH und Kohlenwasserstoffe ab ca. Molekulargewicht 200, tendieren dazu, ausschliesslich in der verwendeten Glasfiltern hängen zu bleiben und nicht bis zur Kältefalle vorzurücken. Das bedeutet, dass diese Substanzen sich eher an Russ- und Rauchpartikeln sowie kühleren Oberflächen ablagern, statt in der Gasphase der Gasanalytik zugänglich zu sein. Sie kommen also als Brandanzeiger kaum in Frage.

3.2 Simulationsstudie

3.2.1 Absicht

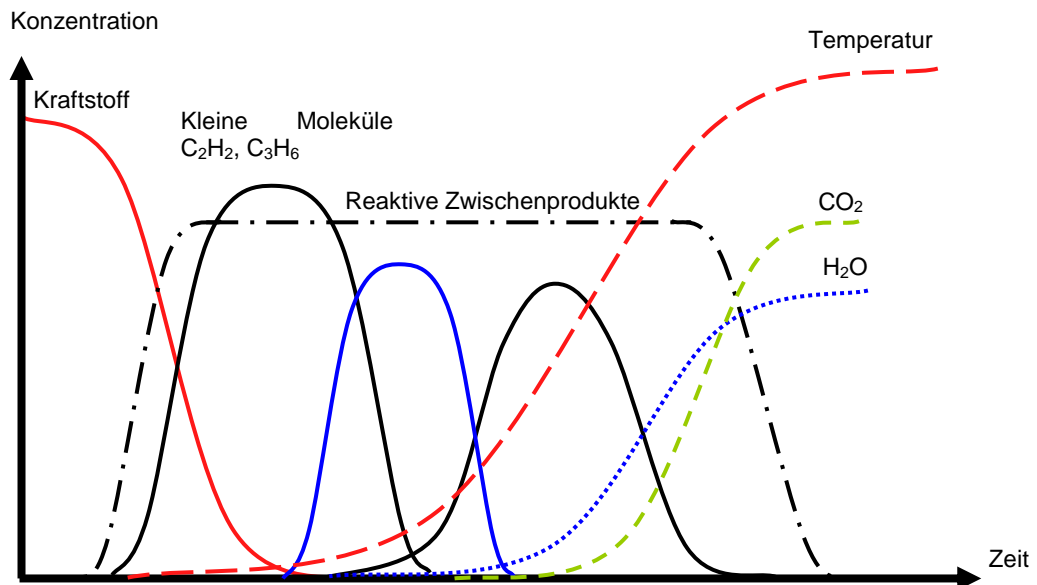


Abbildung 6: Kraftstoff-, Zwischenprodukte- und Endprodukte-Konzentration sowie Temperatur im Lauf der Zeit bei einem Brand [Boulouchos2012LN].

Die Graphik – obwohl einer Treibstoffverbrennung entnommen – zeigt, dass nach kleinen Molekülen und reaktiven Zwischenprodukten gesucht werden muss. Auch wenn die Graphik von einer Kraftstoffverbrennung stammt, ist die Situation bei Bränden qualitativ dieselbe. Es gilt also, diese Moleküle für verschiedene brennbare Stoffe zu identifizieren. Ziel ist also, innerhalb diesem Pool an Molekülen jene auszuwählen, die bei allen Brandsubstraten vorkommen und so als Brandanzeiger im Sinne des Projektes in Frage kommen.

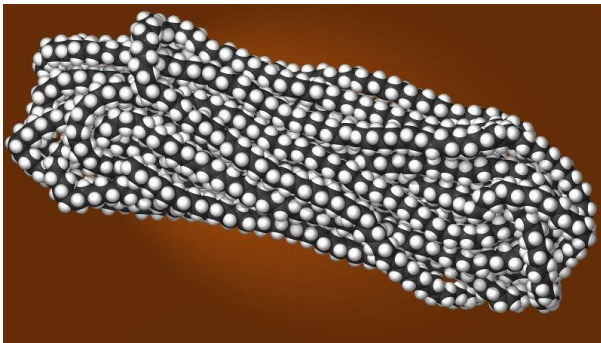
Experimentell sind diese Moleküle wegen den hohen Temperaturen und Drücken und der geringen Konzentration allerdings nur schwer zu bestimmen. Zudem wird ein relativ grosser Satz an Brandsubstraten benötigt, da die Brandherde aufgrund der Literaturstudie nicht eingeschränkt werden konnten. Glücklicherweise hat sich kürzlich die chemische Computersimulation so weit entwickelt, dass diese Experimente im digitalen Labor durchgeführt werden können. Dabei können auch hohe Temperaturen und Drücke problemlos untersucht werden und auch reaktive, kurzlebige Zwischenprodukte als Einzelmoleküle identifiziert werden.

Die Absicht ist also, die während der Verbrennungssimulationen entstehenden Zwischenprodukte minutiös zu erfassen und als Katalog abzulegen. Diese Zwischenprodukte kommen als spezifische Brandanzeiger prinzipiell in Frage. Ein universeller Brandanzeiger kommt darüber hinaus in den Verbrennungssimulationen zwischenproduktkatalogen aller möglichen Brandsubstrate und allen Brandbedingungen aus (Temperaturen, Sauerstoffzufuhr). Daher sollen die Zwischenproduktkataloge nach gemeinsamen Substanzen untersucht werden. Die Fortschritte in der Chemoinformatik erlauben es, diese Aufgaben

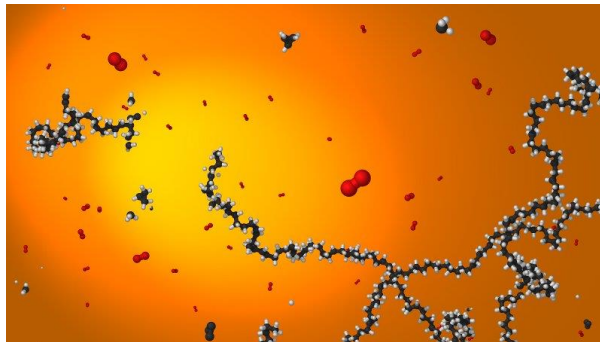
umfassend und weitgehend automatisiert ablaufen zu lassen. Der Arbeitsaufwand hält sich dabei auch bei zunehmendem Untersuchungsumfang in Grenzen – abgesehen von den Computer-Ressourcen, die für die Simulationen und Auswertungen eingesetzt werden.

Auf die hoffentlich gemeinsam vorkommenden Zwischenprodukte können dann weitere Kriterien angewendet werden: Häufigkeit des Vorkommens, Stabilität, Abwesenheit in normaler Tunnelluft, Detektionsfähigkeit. Allenfalls kann auch auf eine grössere Anzahl von Zwischenprodukten ausgewichen werden, die in ihrer Gesamtheit in allen Brandsituationen erwartet werden können.

Die folgenden Bilder illustrieren den Simulationsablauf. In den Bildern wurden in der Chemie übliche Modelldarstellungen verwendet: Einerseits das Kalottenmodell, in welchem die einzelnen Atome ungefähr in ihrer Grösse als überlappende Kugeln, eben Kalotten, dargestellt werden. Diese Darstellung zeigt besonders die Raumfüllung der Moleküle deutlich. Andererseits kommt das Kugel-Stäbchen-Modell zum Einsatz, bei welchem die Atome als kleinere Kugeln dargestellt werden, verbunden mit Stäbchen, die chemische Bindungen darstellen. In diesem Modell kommen insbesondere die Konnektivitäten der Atome zum Ausdruck. In allen Modelldarstellungen bedeuten die Farben folgende chemischen Elemente: Kohlenstoffatome schwarz, Wasserstoff weiss und Sauerstoff rot. Teilweise sind Mehrfachbindungen durch zwei Stäbchen verdeutlicht.



Ausgangspunkt: Ein Klümpchen von Polyethylen. Deutlich ist die Polymerkette zu sehen, die ähnlich einem Schnurbündel aufgeknäuel ist. Nebenbei sieht man den semikristallinen Aufbau dieses Kunststoffes: Die Ketten verlaufen in der Mitte nahezu parallel, also kristallin, sind aber an den Enden ungeordnet (amorph).



Schnappschuss während der Pyrolyse: Die Kette fächert auf, zerreist, kleinere Teile formieren sich, reagieren mit Sauerstoff, und schliessen sich neu zusammen.

Die statistische Auswertung der während der Pyrolyse beobachteten Fragmente, Moleküle und Radikale liefert die am häufigsten beobachteten Verbrennungsprodukte. Der auffällige Dreiecksring (2. rechts oben), Cyclopropan, taucht auch wieder auf (im vorherigen Bild Mitte links).

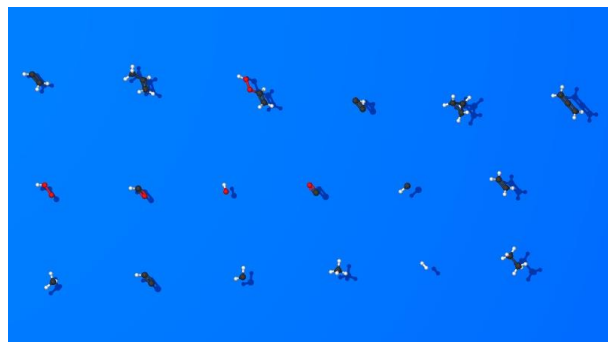


Abbildung 7: Symbolbilder aus der Chemischen Simulation. Ausgangskunststoff-Klümpchen (auf braun), Schnappschuss während der Verbrennung (auf gelb), Auswahl von beobachteten Kleinmolekülen (auf blau). Bedeutung der Farben der Atome: Schwarz Kohlenstoff, weiss Wasserstoff, rot Sauerstoff).

3.2.2 Chemische Simulation

In der klassischen chemischen Moleküldynamik-Simulation werden die Atome durch Kugeln repräsentiert, die einander nach den physikalischen Grundlagen der van-der-Waals-Wechselwirkung anziehen und abstossen. Typisch chemische Konzepte wie chemische Bindungen, Bindungswinkel und Bindungstorsionen werden durch Federn modelliert, die die Struktur der Moleküle reproduzieren (Molekülmechanik). Die Atomkugeln werden unter der Vielzahl der auftretenden Wechselwirkungen einer Newtonschen Dynamik unterworfen, um das System in der Zeit voranzutreiben. So erhält man neben realistischen Strukturen auch eine realistische Zeitentwicklung, was für die Bestimmung von beispielsweise Diffusion oder Viskosität unerlässlich ist.

Die Vielfalt der chemischen Einzelteile bedingt eine grosse Menge an Parametern wie Atomgrösse, Stärke der Interaktion, Bindungslängen oder Kraftkonstanten der Federn. Diese Parameter werden anhand kleiner prototypischen Moleküle an Messwerte (Struktur, Spektroskopische Daten, aber auch thermodynamische Grössen wie Verdampfungsenthalpie) angepasst. In typisch chemischer Manier werden diese Parameter dann innerhalb chemischer Funktionen als unveränderlich angesehen und auf grössere Moleküle übertragen und verallgemeinert. Die Gesamtheit der zur Verfügung stehender Parameter wird als Kraftfeld bezeichnet [Scott1999JPCA, vGunsteren1998ECC, vGunsteren1996GROMOS, Schuler2001JCC, Oostenbrink2004JCC]. Die Zuweisung der Parameter gemäss chemischer Struktur ist normalerweise fixiert. So sind innerhalb dieses Modells keine chemischen Reaktionen möglich.

Eine erst kürzlich entwickelte Erweiterung des Modells ersetzt nun diese fixe Zuweisung durch eine flexible, die sich der jeweiligen Entwicklung der Struktur im Laufe der simulierten Zeit anpasst. So wird beispielsweise eine gedehnte Bindung als brechende Bindung erkannt und das Modell entsprechend ersetzt. Reaktive Zwischenprodukte entstehen, die bei Annäherung wieder neue Bindungen bilden können. So wird die Simulation der chemischen Reaktionsdynamik möglich [vDuin2001JPCA, Chenoweth2008JPCA, Zhang2009JPCA]. Die Umstellung zwischen Modellen erfolgt dabei so geschickt, dass physikalische Vorgaben wie Energieerhaltung nach wie vor eingehalten werden. Die Abstimmung dieser Parameter ist sehr viel Arbeit, deshalb liegen nicht für alle Fälle Kraftfelder vor. Beispielsweise fehlen in der vorliegenden Implementation Chlor und Fluor, was die Verbrennungssimulation von PVC (Chlorhaltig) oder PTFE (Fluorhaltig) vorerst vereitelt.

3.2.3 Gedankenfolge



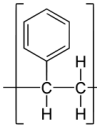
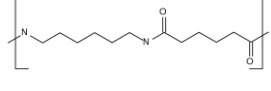
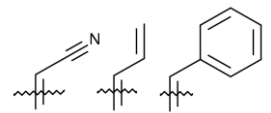
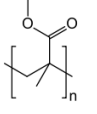
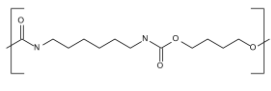
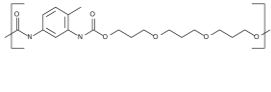
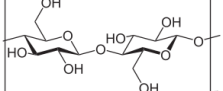
Da die als Brandherd in Frage kommenden Materialien anfänglich nicht klar eingegrenzt werden konnten, wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe in die Simulationsstudie einbezogen. Neben des erwarteten Vorkommens in Fahrzeugen und Ladung wurde auch auf eine chemische Diversität geachtet, um die Vielfalt der Kunststoffe einigermassen abzubilden.

Die in der Brandforschung übliche Unterscheidung zwischen Schwelbrand und Flammenbrand wurde durch zwei Linien von digitalen Experimenten repräsentiert:

- Schwelbrand als Thermolyse: Zersetzung des Polymers durch Temperatureinwirkung alleine (unter Luftausschluss)
- Flammenbrand als Pyrolyse: Zersetzung des Polymers durch Temperatureinwirkung kombiniert mit Sauerstoffgas

Darüber hinaus wurden pro Polymer und Simulationslinie mehrere Brandtemperaturen simuliert, um die Palette von schwelendem Kleinbrand bis zur vollentwickelten Feuerhölle zu erfassen. Die Spannbreite betrug 800 K, 1000 K, 1200 K und 1500 K, also in Celsiusgraden ca. 527°, 727°, 927° und 1227°.

Tabelle 6: Aufstellung der untersuchten Polymere

Kürzel	Polymer	Chemische Struktur	Beispiele für den Einsatz	Polymerisationsgrad / Molmasse
PE	Polyethylen		Gehäuse, Rohre, Verschalungen	660 / 18516.4
PP	Polypropylen		Innenausstattungen, Armaturen Bretter, Crashabsorber	190 / 7997.3
PS	Polystyrol		Gehäuse, Däm- mungen	336 / 34997.1
PA	Polyamid 6.6 (Nylon)		Ansaugsysteme, Kraftstoffleitungen, Motorabdeckungen, Isolationen	110 / 25333.6
ABS	Poly (Acrylnitril- Butadien-Styrol)		Autoteile, Gehäuse, Abdeckungen, Verschalungen	480 / 33733.8
PMMA	Polymethyl- methacrylat (Plexiglas)		Blinker- und Rück- leuchtgläser, Reflektoren, Licht- leiter, Tür- und Säulenverkleidun- gen	220 / 22027.9
PURL	Polyurethan- Lack		Lack, Dichtungen	240 / 62955.1
PURS	Polyurethan- Schaum		Schaumstoffe, Polsterungen	180 / 66674.2
CLL	Cellulose		Papier, Baumwolle, Holz	9x20 / 29187.8

Während sich bei den einfachen Polymeren PE, PP, PS und PMMA nur die Frage des Polymerisationsgrades stellt, legen die Kürzel Polyamid und Polyurethan nur die Art der Polymerisationsverbindung fest, und die verwendeten Monomere unterliegen mehr oder weniger Variation, insbesondere bei Polyurethanen. So wurden als Polyamid das gebräuchlichste Nylon verwendet, und bei Polyurethan zwei unterschiedliche Auswahlen: Der Polyurethan-Lack stellt einen relative simplen Vertreter dar, während beim Polyurethan-Schaum neben der Urethan-Funktion weitere chemische Funktionen wie substituierte Aromaten und Etherverbindungen vorkommen. ABS ist ein Copolymer aus drei Monomeren, deren Anteile variieren können und so die Eigenschaften beeinflussen. Hier

kamen die folgenden Mol-Anteile zum Einsatz: 30 % Acetonitril, 40 % Butadien, 30 % Styrol. Die Reihenfolge der Polymerisierung erfolgte wie in Realität zufällig. Cellulose schliesslich ist aus Glucose-Einheiten aufgebaut, wobei allerdings die Orientierung der Glucoseringe abwechself. Cellulose kann daher als Polymer aus der in der Tabelle gezeigten Cellobiose (ein Glucose-Dimer) aufgefasst werden. Als einziger Fall wurde Cellulose nicht als einzelnes Polymer, sondern als Bündel von 9 kürzeren Polymeren aufbereitet.

Auf die Simulation des bekannten PVC (Polyvinylchlorid) und Teflon (Polytetrafluorethylen, PTFE) oder andere chlor- oder fluorhaltige Kunststoffe oder bromhaltige Brandhemmer musste aus technischen Gründen verzichtet werden, da Chlor, Fluor und Brom für die chemische Simulation noch nicht zur Verfügung standen. Das typische Zersetzungsprodukt von PVC – Salzsäure HCl – eignet sich als Brandanzeiger nicht, da es ausschliesslich bei chlorhaltigen Brandsubstraten entstehen kann.

Zusammenfassend wurden also 9 Polymere untersucht, für jedes davon Thermolyse und Pyrolyse separat, und für jede Kombination 4 Temperaturpunkte. Das ergibt also 72 Einzelsimulationen.

3.2.4 Durchführung

Polymere, die als Brandsubstrate dienen sollen, wurden für das digitale Experiment hergestellt. Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wurden relativ niedrige Polymerisationsgrade (Kettenlängen) verwendet. Wesentlich ist dabei nicht der in Realität vorkommende Polymerisationsgrad, sondern dass numerische Artefakte wegen kurzen Kettenlängen ausgeschlossen werden können, und dass die Ausgangssubstanz Feststoffcharakter hat.

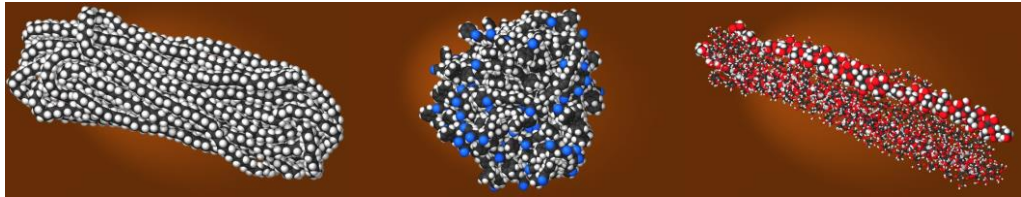


Abbildung 8: Kalottenmodelle von Klümpchen aus Polyethylen, ABS und Cellulose als Ausgangspunkte der Thermolyse-Simulationen. Bei der Cellulosefaser sind zwei Stränge mit dicken Kalottenmodellen dargestellt, die restlichen in einem feineren Kugel-Stäbchen-Modell. Kohlenstoffatome schwarz, Wasserstoff weiss, Stickstoff blau und Sauerstoff rot.

Die Polymere wurden zum gewünschten Polymerisationsgrad digital hergestellt und mit einer kurzen klassischen Moleküldynamik-Simulation [Hess2008JCTC, vdSpoel2005JCC, Lindahl2001JMM, Berendsen1995CPC] aus ihrer anfänglich ungefähr linearen Struktur zu einem Knäuel verklumpt, welcher als Prototyp des Kunststoffs und Ausgangspunkt für die folgenden Verbrennungssimulationen dient. Es wurden zwei Linien von digitalen Experimenten durchgeführt:

- Thermolyse: Zersetzung des Polymers durch Temperatureinwirkung alleine (unter Luftausschluss)
- Pyrolyse: Zersetzung des Polymers durch Temperatureinwirkung kombiniert mit Sauerstoffgas

Für die Pyrolyse-Simulation wurde der vorhin hergestellte Polymerklumpen in einem Kästchen Sauerstoffgas unter Normalbedingungen suspendiert und so der Simulation zugeführt.

Jede Linie wurde an verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Die während der Zersetzungssimulation entstehenden Substanzen wurden periodisch aufgezeichnet und analysiert.

3.2.5 Methodendetails

Für die Simulation der Verbrennung wurden virtuelle Proben der Polymere hergestellt. In der Praxis sind das Dateien mit den Koordinaten der vorkommenden Atome. Im Hinblick auf eine für die Simulation vernünftige Systemgrösse – die zum Einsatz kommende reaktive Moleküldynamik stellt die zweit-aufwendigste Simulationsmethode nach Quantenchemischen Berechnungen dar – wurden die Polymerisationsgrade (Anzahl Monomere) je nach Kunststoff von 110 bis 660 festgelegt. Diese sind im Vergleich zu realen Kunststoffen eher geringe Polymerisationsgrade, aber wesentlich ist hierbei die Eliminierung von Grösseneffekten, die bei sehr kleinen Polymerisationsgraden auftreten könnten, nicht die Repräsentierung realistischer Kunststoffe. Im Verlauf der Verbrennung ist die Spaltung der Polymerketten einer der ersten Schritte, wie in der Visualisierung des Zerfallprozesses bereits dargestellt wurde. Entscheidend dabei ist, dass diese ersten Fragmente nicht durch eine zu geringe Kettenlänge künstlich vorausbestimmt werden.

Die anfänglichen Polymere wurden in einer ersten, rein klassischen Simulation (ohne Reaktionsmöglichkeit) zu Klumpen oder Knäueln gefaltet, um einigermaßen die Form eines Kunststoffkörpers zu repräsentieren. Für den Aspekt der Verbrennung genügt das, und auf den Einsatz mehrerer separater Molekülketten kann verzichtet werden. Einzig im Fall der Cellulose hat sich die Einzelkette nicht vernünftig verknäuelte, worauf manuell ein 3x3-Stapel von kürzeren Polymerketten hergestellt wurde.

Für die reaktiven Simulationen wurden alsdann zwei Linien verfolgt: Die thermische Zersetzung (Thermolyse) unter Sauerstoffausschluss, sowie eine Verbrennung (Pyrolyse) in Sauerstoffatmosphäre. Dazu wurde das im vorherigen Vorbereitungsschritt hergestellte Polymerklümpchen in Sauerstoffgas unter Normalbedingungen getaucht.

Für jede Simulationslinie wurden 4 Temperaturpunkte berechnet: 800 K, 1000K, 1200K und 1500K, für welche eine reaktive Zersetzungsdynamik [vDuin2001JPCA, Chenoweth2008JPCA, Zhang2009JPCA] während einer Nanosekunde verfolgt wurde (2 Millionen Einzelzeitschritte à 0.5 Femtosekunden). Alle 20 Schritte, also alle 10 Femtosekunden, wurde ein Schnappschuss für die Fragmentevaluation aufgenommen. Der Reaktionsverlauf wurde in Form von Koordinatendateien in regelmässigen Abständen festgehalten und im Anschluss nach entstandenen Molekülen und Molekülfragmenten untersucht. So konnten Zeitverläufe der entstehenden Substanzen sowie auch Totale der vorkommenden Substanzen erhalten werden. In der Praxis werden dazu aufgrund der Atomkoordinaten die möglichen Bindungslängen zwischen Atomen evaluiert und zu Molekülfragmenten zusammengefasst. Für die automatische eindeutige Bezeichnung der vorkommenden Substanzen bietet sich der kanonische SMILES-String [Weininger1988JCICS, Weininger1989JCICS] an, welcher eine eindeutige Benennung chemischer Verbindungen anhand der Atome und deren Bindungen darstellt. Katalogdateien der auftretenden Substanzen wurden mittels dieser Benennung erstellt und schliesslich auf gemeinsam vorkommende Substanzen untersucht.

Die Systemgrössen reichten von 1712 Atome (Thermolyse PP) bis 13090 Atome (Pyrolyse PUR-Lack). Die dazu benötigten Rechenzeiten reichten von 3 Tagen bis 4 Wochen, wobei die höheren Temperaturen schneller liefen, da durch die zunehmende Vergasung des Kunststoffs die Anzahl der zu evaluierenden Bindungen abnimmt, was eine wesentliche Komponente der Reaktionsdynamik darstellt. Die Dateien der Koordinaten erreichten im Lauf der Zeit bis 33 GB für eine einzelne Simulation, wovon ja 72 durchgeführt wurden.

3.2.6 Resultate

Die virtuell beobachteten Brandzwischenprodukte-Katalog pro Simulation wurden untereinander abgestimmt. Einerseits soll der gesuchte Brandmarker in möglichst vielen Einzelsimulationen – besser allen! – vorkommen. Andererseits sollte der gesuchte Brandmarker auch in möglichst allen Situationen – Brandsubstrat wie auch Temperatur und mit/ohne Sauerstoffzutritt – in ausreichenden Mengen vorkommen, damit der Brandmarker möglichst universell funktioniert.

Die folgenden Tabellen zeigen nun jene Moleküle, die in den meisten Simulationen vor-

kommen (Spalte „Sim“ benennt die Anzahl der einzelnen Simulationslinien, in denen das besagte Molekül gefunden wurde). Sie sind rangiert nach der Häufigkeit der Beobachtung. Die Häufigkeit setzt sich dabei zusammen aus der Anzahl der beobachteten Moleküle sowohl im simulierten Raum, wie auch in der simulierten Zeitspanne der Verbrennung. Als Mass für die Universalität des Brandmarkers je nach Brandsituation ist auch die Anzahl Beobachtungen in der Simulationslinie angegeben, in der das Molekül am wenigsten häufig (Spalte „min“) und am häufigsten (Spalte „max“) beobachtet wurde.

Tabelle 7: Anzahl der Beobachtungen von Molekülen in den meisten Simulation

Molekülname	Sim	Anzahl Beobachtungen		
		total	min	max
Wasserstoffatomradikal	71	370213207	313370	19289435
Ethan	71	85592707	2	3709164
Methan	71	63333104	405	2846341
Wasserstoff (H ₂)	64	42111632	2249	2562434
Methylradikal	69	16311892	283	1665331
Methenylradikal	71	15480582	3255	804816
Methinyltriradikal	71	14295543	8380	651374
Ethen (Ethylen)	70	12234447	1	1497467
Ethinylradikal	71	6954675	359	408842
Ethin (Acetylen)	71	683658	60	147950
Ethenylradikal	71	504444	20	51736
Ethenylradikal	71	481434	158	32818
Propenyltriradikal	67	386037	1	113484
Propenylradikal	68	371560	1	39187
Cycloethinylradikal	64	287912	105	27161
Cyclopropan	64	178739	105	11282
Propadien	70	140790	2	27973
Propan	65	43306	20	2016
Propenylradikal	69	41004	2	5926
Cyclopropinylradikal	64	32516	23	1494
Propinylradikal	71	22994	4	4242
Cyclopropenylradikal	64	16400	11	3312
Propinylradikal-1	71	6768	4	1131
Propinyltriradikal	71	6143	2	1096
Cycloethenylradikal	64	5497	1	381
Propenyltriradikal	68	4638	1	1118

Butenin	65	4547	1	2756
Cycloethenyldiradikal	64	4193	2	234
Cyclopropenyldiradikal	64	3457	4	168
Propinyldiradikal-3	70	2491	1	143

Die Tabelle zeigt die in den meisten Simulationen auftretenden Moleküle mit den Häufigkeiten. Es sind nur Moleküle eingetragen, die in mindestens 64 von 72 Simulationen beobachtet werden konnten (dies ist eine willkürliche Grenze, um die Tabellengröße einzuschränken). Diese Tabelle zeigt die Gemeinsamkeiten über sämtliche Simulationen. Es fällt auf, dass keine sauerstoffhaltigen Moleküle vorkommen. Dies liegt in der Versuchs- und Auswertungsanlage: Da bei der Verschmelzung von Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol völlig sauerstofffreie Systeme vorkommen, können sauerstoffhaltige Moleküle niemals das geforderte Quorum von 64 Simulationen erreichen. Deshalb wurde die Auswertung wiederholt, in der nur die Simulationen mit Sauerstoffzutritt Einfluss fanden. Hier ergab bereits das Quorum von 34 von 36 Simulationen eine lange Liste.

Tabelle 8: Auswertung für Simulationen mit Sauerstoffzutritt

Molekülname	Sim	Anzahl Beobachtungen		
		total	min	max
Wasserstoffatomradikal	35	226127271	313370	19289435
Ethan	35	49461613	2	3709164
Methan	35	39641093	405	2846341
Kohlenmonoxid	35	31283231	18568	3230202
Wasserstoff	35	22950761	2249	2562434
Formyldiradikal	35	18424660	189	5684746
Methylradikal	35	10059645	283	1665331
Formaldehyd	35	8119438	22	1695465
Methylendradikal	35	8094582	3255	804816
Hydroxylradikal	35	7107732	2607	1334956
Methylentriradikal	35	6940655	8380	651374
Ethen (Ethylen)	34	6417011	1	1497467
Ethinyldiradikal	35	3799485	359	408842
Kohlendioxid	35	2336099	19	481323
Ethylperoxid	35	330144	4	38154
Ethanol	35	279797	9	20326
Ethenyldiradikal	35	261073	20	51736
Peroxyradikal	35	247319	1	30286
Ethenylradikal	35	108358	158	32818
Cycloethinyldiradikal	35	105175	105	27161

Cyclopropan	35	96052	105	11282
Ethin (Acetylen)	35	76054	60	147950
Cycloethoxid	35	62058	10	5228
Propadien	34	42881	2	27973
Wasserstoffperoxydiradikal	35	34182	4	4994
Propan	35	22506	20	2016
Cyclopropinylradikal	35	17859	23	1494
Ethylcycloperoxid	35	11376	14	888
Cyclopropenylradikal	35	10418	3	3747
Methylperoxid	35	10418	1	8593
Propinylradikal	35	9512	4	4242
Cyclopropenylidiradikal	35	7770	11	3312
Methanolydiradikal	34	7401	5	38544
Methylcycloperoxid	35	3827	1	418
Methanol	35	3575	8	7024
Cycloethenylradikal	35	3072	1	381
Kohlenstoffdiperoxid	34	2733	1	816
Cycloethylperoxid	35	2614	1	140
Cyclopropin	34	2550	5	473
Cycloethenylidiradikal	35	2296	2	234
Cyclopropen	34	2032	1	296
Cyclopropenylidiradikal	35	2019	4	168
Dimethylether	35	1761	1	148
Propenylradikal	34	1678	2	5926
Cyclomethoxyradikal	35	1664	1	226
Propinyltriradikal	35	1527	2	1096
Methylcyclopropan	34	1448	1	283
Propinylidiradikal-1	35	1074	4	1131
Propinylidiradikal-3	34	1052	1	143
Methylperoxydiradikal	34	932	1	237
Methenylperoxydiradikal	34	458	1	2039
Cyclopropencyclohydridiradikal	34	313	1	34
Propenyltriradikal	34	306	1	1118

Die Mehrheit der gefundenen Moleküle sind Radikale, was in einem Flammen-Umfeld

nicht weiter überrascht. Daneben kommen auch einige abenteuerliche, wenig bekannte Verbindung wie stark gespannte dreigliedrige Ringe mit Mehrfachbindungen, verbrückte Hydride und Peroxide vor. In einem ersten Schritt wurden diese als kurzlebig eingestuft Verbindungen von der Kandidatenliste der Brandmarker gestrichen (hellgrau hinterlegt). Sie würden wohl nicht die Zeitdauer von der Freisetzung am Brandzentrum bis zur Erfassung in einem Sensor am Tunnel überdauern.

Weitere Streichkandidaten, die nicht als Brandmarker taugen, sind bekannte Abgaskomponenten aus den Verbrennungsmotoren. Diese Verbindungen sind dunkelgrau hinterlegt. Zusammenfassend ergibt sich also die folgende Tabelle.

Tabelle 9: Resultat gefiltert nach Kurzlebigkeit und Vorkommen in Abgasen

Molekülname	Sim	Anzahl Beobachtungen		
		total	min	max
Alle Simulationslinien				
Wasserstoff (H ₂)	64	42111632	2249	2562434
Ethin (Acetylen)	71	683658	60	147950
Cyclopropan	64	178739	105	11282
Propadien	70	140790	2	27973
Propan	65	43306	20	2016
Butenin	65	4547	1	2756
Pyrolyse-Simulationslinien				
Wasserstoff (H ₂)	35	22950761	2249	2562434
Ethanol	35	279797	9	20326
Cyclopropan	35	96052	105	11282
Ethin (Acetylen)	35	76054	60	147950
Propadien	34	42881	2	27973
Propan	35	22506	20	2016
Methanol	35	3575	8	7024
Cyclopropan	34	2032	1	296
Dimethylether	35	1761	1	148
Methylcyclopropan	34	1448	1	283

Werden in dieser Tabelle jene Substanzen markiert, die nur in einer der beiden Kategorien kommen, stellt man fest, dass diese gleichzeitig sehr geringe Minimalwerte aufweisen. Somit ergibt sich konsolidiert und mit einer verfeinerten Rangierung die folgende Liste potentieller Brandmarker:

Tabelle 10: Liste potentieller Brandmarker

Molekülname	Sim	Anzahl Beobachtungen		
		total	min	max

Ethin (Acetylen)	71	683658	60	147950
Propadien	70	140790	2	27973
Propan	65	43306	20	2016
Wasserstoff (H ₂)	64	42111632	2249	2562434
Cyclopropan	64	178739	105	11282

Es sei nochmals betont, dass die Häufigkeit der Beobachtungen nicht als Hinweis für die Menge freigesetzter Brandgase herangezogen werden kann, weil sie auch die Zwischenprodukte enthält, die gerade weiter reagieren. Die genaue absolute Zahl ist zudem wenig aussagekräftig, da sie von nicht normierten Systemgrößen abhängt.

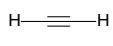



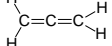

Die Auswertung zeigt, dass es für als Brandanzeiger in Frage kommenden Moleküle sogar mehrere Kandidaten gibt. Das stimmt zuversichtlich, dass dieser Sachverhalt auch nach Auswertung der derzeit noch ausstehenden Simulationen und Polymere so bleiben wird. Zudem besteht noch Spielraum bei der Auswahl des zu detektierenden Brandmarkers je nach Stabilität, Kompatibilität mit der Ausschlussliste der Abgase und Tunnelluft, Detektierbarkeit, Verfügbarkeit eines geeigneten Detektors und nicht zuletzt einer Validierung im realen Experiment.

3.2.7 Konzentrationen im Brandgas

Die Konzentrationen lassen sich aus den Brandsimulationen genau genommen nicht abschätzen, da die Simulation die Zwischenprodukte im Brandzentrum betroffen hat und keine Aussagen darüber macht, wie diese Zwischenprodukte allenfalls ins Abgas kommen. Diese Situationen können sehr unterschiedlich sein und betreffen die Luftzufuhr, die Temperaturprofile am Brandrand, die beteiligten Stoffen, um nur ganz wenige Einflussgrößen zu nennen. Dieser Sachverhalt wird auch durch die sehr unterschiedlichen Konzentrationen der Zwischenprodukte je nach Brandsubstrat und Brandtemperatur unterstrichen (Differenz Maximal/Minimalbeobachtungen).

Unter der gewagten Annahme, dass sämtliche Zwischenprodukte unverändert ins Abgas übertreten würden, und ohne Verdünnung durch Umgebungsluft, können Gaskonzentrationen ermittelt werden, die als absolutes Maximum zu verstehen sind. Eher verlässlich könnten die individuellen Verhältnisse zwischen den einzelnen Brandgasen sein. Aus diesem Grund ist in der folgenden Tabelle ebenfalls Ethen eingetragen. Der in den Brandversuchen zum Einsatz kommende Wasserstoffsensor hat eine Querempfindlichkeit auf Ethen, deren Einfluss somit ungefähr abgeschätzt werden kann.

Tabelle 11: Masseanteile der Zwischenprodukte unterschiedlicher Ersatzbrandstoffe

Masse-ppm	Acetylen	Wasserstoff	Propan	Cyclopropan	Propadien	Ethen
						
ABS	1085.17	2927.85	187.21	630.73	324.53	227.44
CLL	184.14	5126.64	35.65	138.94	4.39	3.08
PE	383.01	6656.24	96.09	417.18	204.92	253.26
PP	470.89	10531.93	194.48	726.97	525.93	358.39
PS	4311.94	1479.27	102.71	419.48	27.11	15.58
PA	373.63	7254.90	83.23	335.50	232.98	163.31
PURL	234.73	3706.26	46.85	184.22	231.84	168.08

PURS	200.66	2497.03	71.44	353.11	2261.78	262.97
PMMA	69.93	4182.43	86.85	327.24	129.71	90.92
Schnitt	812.68	4929.17	100.50	392.60	438.13	171.45

3.3 Ersatzbrandstoff

Die ursprünglich vorgesehene Evaluation eines Ersatzbrandstoffs entfällt: Es kann einfach einer der obgenannten Kunststoffe verbrannt werden. Dennoch kann aufgrund der erwarteten Mengen, die auf die potentiellen Brandanzeiger fallen, und deren Verteilung eine Rangierung erstellt werden.

Tabelle 12: Rangierung der Ersatzbrandstoffe

Rang	Acetylen	Wasserstoff	Propan	Cyclopropan	Propadien	alle
ABS	2	7	2	2	3	2
CLL	8	4	9	9	9	9
PE	4	3	4	4	6	3
PP	3	1	1	1	2	1
PS	1	9	3	3	8	5
PA	5	2	6	6	4	4
PURL	6	6	8	8	5	8
PURS	7	8	7	5	1	6
PMMA	9	5	5	7	7	7

In der Tat sticht Polypropylen (PP) als Ersatzbrandstoff heraus, da er bei 3 der potentiellen Brandmarker die Bestnote erreicht hat und auch in den andern beiden möglichen Brandmarkern gut abschneidet. Aus diesem Grund – und weil Polypropylen auch im Fahrzeugbau prominent zum Einsatz kommt – wurde Polypropylen als Brandverschwelsubstanz ausgewählt.

3.4 Zusammenfassung Simulationsstudie

Die Simulationsstudie ergab, dass bei der Verschmelzung und Verbrennung verschiedenartiger Kunststoffe und Polymere mehrere gemeinsame Zwischenprodukte vorkommen, die als universeller Brandanzeiger in Frage kommen. Es besteht sogar ein gewisser Spielraum bei der Auswahl des geeignetsten Brandanzeigers nach weiteren Kriterien, wie der Verfügbarkeit von Sensoren.

Als Ersatzbrandstoff erwies sich Polypropylen als vielversprechend.

4 Folgerungen der Phase 1

Das Studium der Literatur und Einblick in Ergebnisse von Forschungsprojekten im Bereich Tunnelbrand und -sicherheit geben ein übersichtliches Bild über den heutigen Wissensstand bezüglich Brandentwicklung, aktiver und passiver Brandschutztechnologien, Brandbekämpfung sowie wissenschaftlicher Ansätze bei der Simulation von Bränden.

Sie zeigen aber auch Lücken auf: All diese Überlegungen setzen allerdings frühestens bei der Brandentwicklung an (um in einer Vielzahl an Brandkurven zu enden), ohne aber den Auslöser und die Entstehung des Brandes genauer unter die Lupe zu nehmen. Eine wesentliche Erkenntnis der Literaturstudie ist also die Tatsache, dass die tatsächlichen Brandursachen bis dato sehr wenig bis gar nicht erforscht wurden.

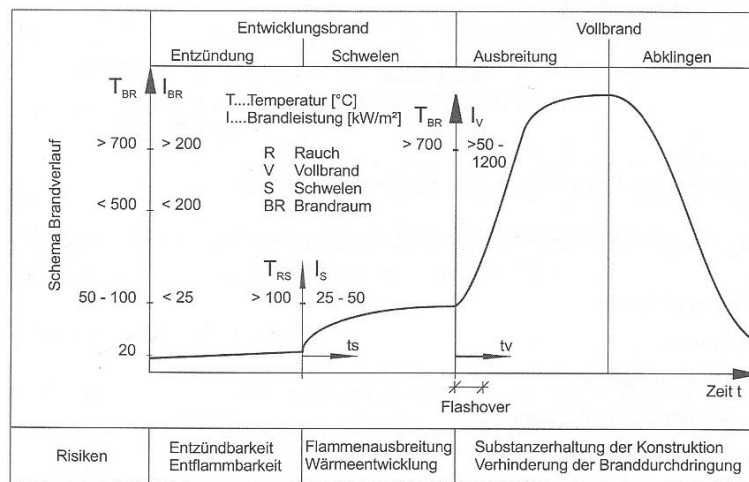


Abbildung 9: Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers nach [Schneider2006BPT]

Die Unterscheidung, ob ein Brand im Fahrgastraum, im Motorraum oder an der Ladung entsteht, ist zwar sicher hilfreich, das vorliegende Projekt setzt jedoch vor dieser Unterscheidung an – und zwar in dem Zeitraum, in dem Temperatur ansteigt (z. B. in einem Bauteil durch Reibung oder Überlastung), aber noch keine Flammen oder Rauch entstanden sind.

Auf Basis der dargestellten Literaturstudie war es schwer bis unmöglich einzugrenzen, welche Materialien zuerst in die Brandentstehung involviert sind, was zahlreichere Simulationen (als ursprünglich geplant) notwendig gemacht hat. Dennoch konnten mehrere Brandanzeiger identifiziert und vorläufig evaluiert werden.

5 Strömungssimulation der Brandgasausbreitung

Die CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulationen wurden im ersten Schritt eingesetzt, um ein Gefühl für die zu erwartenden Konzentrationen im Tunnel zu erhalten, damit die Experimente vorbereitet und die Anordnung der Sensoren abgeschätzt werden konnten. Andererseits war das Ziel der Berechnungen, danach die Experimente nachzubilden, um die Annahmen und die Modelle zu validieren, die Interpretationen zu unterstützen und schliesslich auch, um Verkehrssituationen im Tunnel nachbilden zu können, um eine Aussage bei realen Bedingungen zu erhalten.

5.1 Zur Vorbereitung der Brandexperimente

5.1.1 Geometrie

Der Tunnelquerschnitt wurde mittels Daten vom VSH nachgebildet. Die folgende Abbildung zeigt die verwendete Geometrie des Brandstollens für die vorbereitenden Berechnungen. Es wurde angenommen, dass eine Länge von 100 Metern für die Simulation ausreicht. Zudem wurde eine Neigung von 4% berücksichtigt.

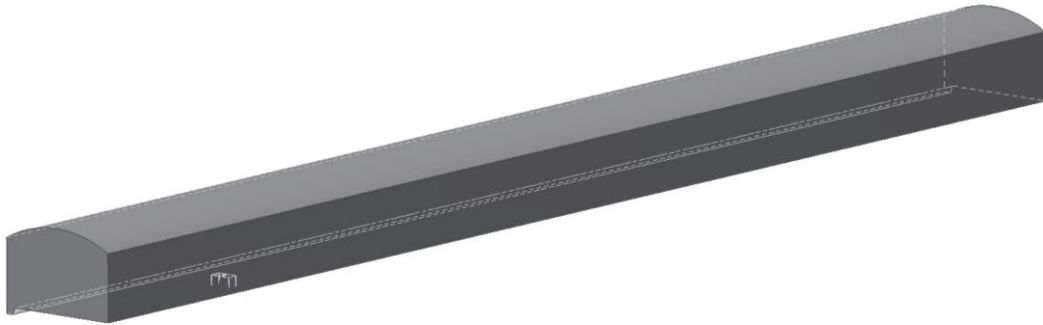


Abbildung 10: Gesamtansicht der Tunnelgeometrie für die vorbereitenden CFD-Berechnungen

Statt eines richtigen Brandes war vorgesehen, Kunststoff mittels einer Heizplatte zu verschwelen. Es war geplant, diese Heizplatte auf einen Tisch zu stellen, der ebenfalls modelliert wurde. Die folgende Abbildung zeigt den Tisch, der 15 m vom Eintritt der Luft entfernt ist, und die darauf befestigte Heizplatte im Brandstollen. Diese 15 m Vorlauf sollen die Simulation einer realistischen Strömung vor dem Brandgaseintrag ermöglichen.

In einer zweiten Simulation wurde eine Wirbelplatte, die an den Tisch geschraubt ist, eingeführt, die dazu dienen sollte, eine Störung vor dem Brandobjekt zu simulieren. Abbildung 12 zeigt den Tisch mit Wirbelplatte.

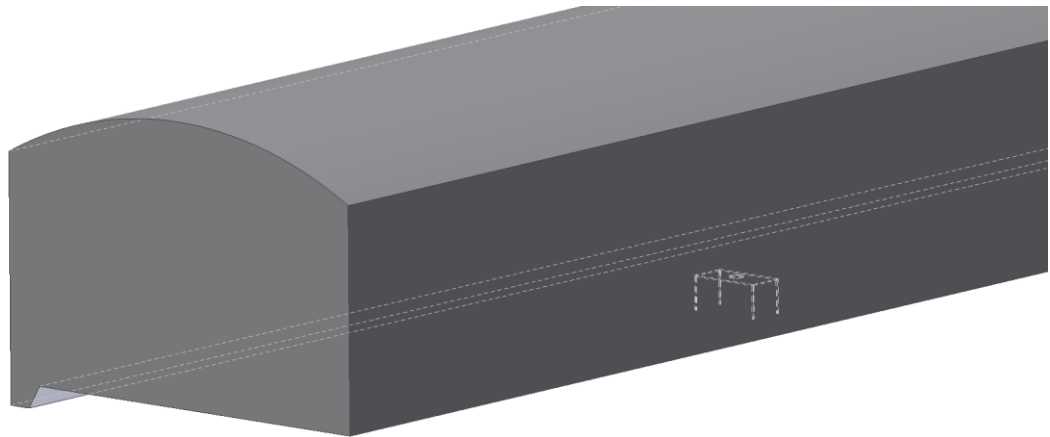


Abbildung 11: Vergrößerung beim Tunneleintritt und Darstellung des Tisches und der Heizplatte

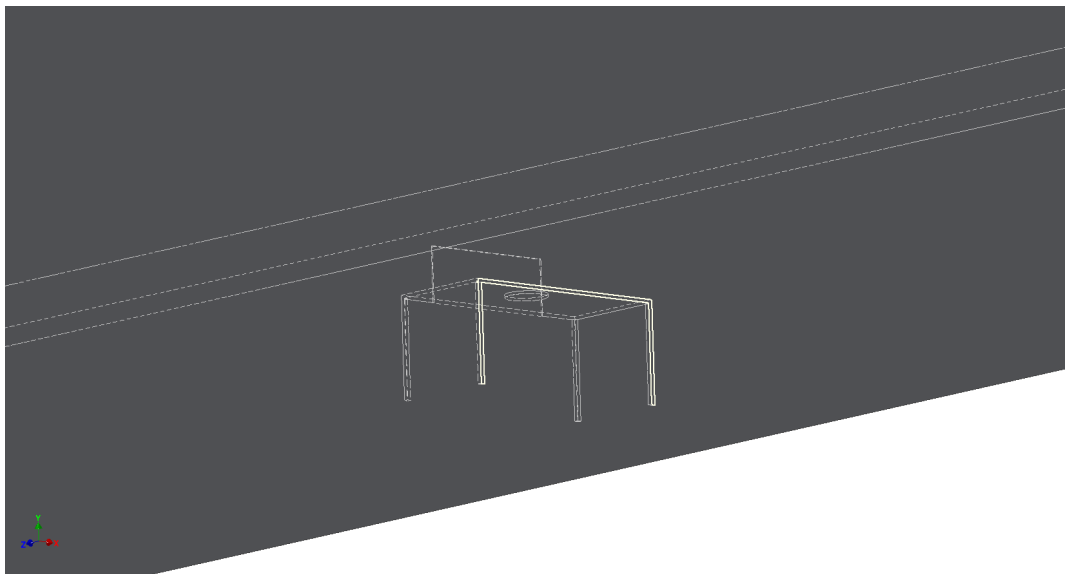


Abbildung 12: Darstellung des Tisches mit Wirbelplatte und der Heizplatte

5.1.2 Netzbildung

Das CFD Netz, oder auch Gitter genannt, besteht aus rund 1.25 Millionen Zellen für beide Geometrievarianten. Für die Berechnung wurde eine Polyeder-Struktur gewählt. Zudem wurden Randzellen eingeführt, damit der Geschwindigkeitsgradient in Wand Nähe sinnvoll abgebildet werden kann. Die folgende Abbildung zeigt einen Schnitt durch das Gitter bei der Variante mit Wirbelplatte.

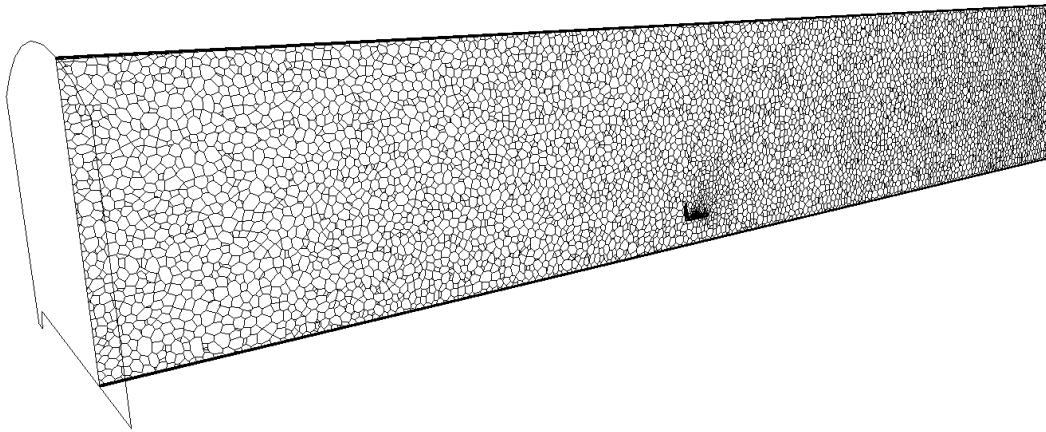


Abbildung 13: Netzstruktur für die CFD-Simulationen

5.1.3 Anfangs- und Randbedingungen

Abbranddauer

Da die Abbranddauer zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt war, wurden verschiedene Branddauern angenommen. Zudem musste der Brennverlauf, die Änderung der Masse als Funktion der Zeit, definiert werden. Vereinfacht wurden drei verschiedene Szenarien mit konstanter Brennrate angenommen, was gemäss der folgenden Abbildung zu einem linear zunehmendem Masseverlauf der chemischen Komponenten führt.

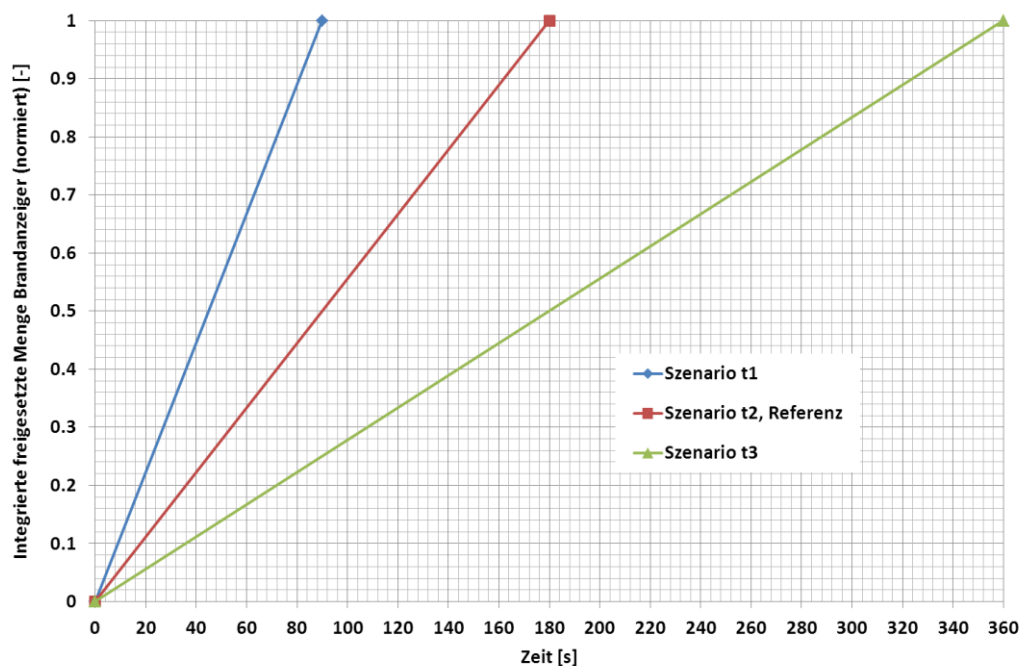


Abbildung 14: Definition der Branddauer und des Brennverlaufs für die vorbereitenden Simulationen

Zusammensetzung und Masse des freigesetzten Gases

Aufgrund der Verdampfung des Kunststoffes werden diverse Gase freigesetzt, die in Kapitel 3.2.7 durch die Moleküldynamik Simulation abgeschätzt wurden. Obwohl die Aussagekraft der Moleküldynamik Simulation bezüglich der Brandgaszusammensetzung gemäss den Vorbehalten in Kapitel 3.2.7 beschränkt ist, wurden diese für die Anfangsbedingungen verwendet.

Aus Kapitel 3.2.7 ist zudem bekannt, dass die Zusammensetzung auch je nach Kunst-

stoff variiert. Da die Versuche sich auf Polypropylen konzentrieren sollen, wurde auch insbesondere PP untersucht. Die folgende Tabelle zeigt die Zusammensetzung der freigesetzten Komponenten in Massenprozenten, die als potenzielle Kandidaten für den Brandanzeiger definiert wurden, sowie die Reaktionsprodukte einer Verbrennung (CO_2 , H_2O).

Tabelle 13: Potenzielle Kandidaten für den Brandanzeiger

Acetylen	Wasserstoff	Propan	Kohlenmonoxid	Kohlendioxid	Wasser
C_2H_2	H_2	C_3H_8	CO	CO_2	H_2O
0.05	0.8	0.015	0.5	70	28.6

Es wurden verschiedene zu verbrennende Massen untersucht. Als Referenzwert wurde 100 g definiert.

Heizplatte

Die Heizplatte wurde als Metallkörper modelliert und als Energiequelle mit 1000 W definiert, um die Aufheizrate und die entstehenden Temperaturen abzubilden.

Belüftung

Die Luft tritt mit 0.5m/s ein, was der angenommenen Belüftungsgeschwindigkeit entspricht. Die Luftgeschwindigkeit beeinflusst die Verdünnung der freigesetzten Gase wesentlich, weshalb diese zuerst möglichst tief angesetzt wurde.

5.1.4 Modellannahmen

Zur Darstellung der turbulenten Strömung wurde ein LES (Large Eddy Simulation) Modell verwendet, damit Schwankungen, die auch im Experiment zu erwarten sind, abgebildet werden können. Um eine vernünftige Endtemperatur der Heizplatte zu erhalten, wurde ein Strahlungsmodell aktiviert.

5.1.5 Ergebnisse

In den folgenden Bildern sind die räumliche Verteilung sowie der zeitliche Verlauf als Konturflächen der verschiedenen chemischen Komponenten dargestellt. Iso-Konturflächen bedeuten, dass die Farben ballonartige 3D-Flächen konstanter Konzentration anzeigen. Es wurden drei Ebenen gewählt und diese transparent dargestellt, damit auch die hohen Konzentrationen sichtbar werden. Der Tunnel ist grau gezeigt.

Die erste Sequenz zeigt Acetylen (C_2H_2) in einer Konzentration von 1 bis 20 ppm. Aus den Bildern ist zu erkennen, dass bereits nach 10 Sekunden ein stationärer Zustand erreicht wird. Acetylen scheint schon nach dieser Zeit die maximale Ausbreitung erreicht zu haben. Natürlich kann es durchaus sein, dass Konzentrationen deutlich unter 1 ppm im Tunnel detektierbar wären. Eine zuverlässige Detektion scheint hier aber schwierig. Konzentrationen von 20 ppm oder höher sind nur in einem sehr kleinen Bereich gleich über der Gasquelle zu sehen.

In der zweiten Sequenz ist Propan (C_3H_8) gezeigt, wobei die Konzentrationen noch geringer sind. Offenbar wird bei der angenommenen Konzentration von Propan bereits nach 5 Sekunden das Gleichgewicht zwischen Freisetzung von Gas und Verdünnung erreicht. Zudem zeigen die Bilder, dass die Penetration von Propan unter den angenommenen freigesetzten Konzentrationen sehr klein ist.

Die dritte Bildersequenz zeigt CO , das grundsätzlich als Brandanzeiger ausgeschlossen wurde, aber für Validierungsversuche im Brandstollen durchaus interessant sein könnte. Es zeigt sich, dass deutlich höhere Konzentrationen in weiten Bereichen vorhanden sind. Nach rund 60 Sekunden ist auch hier der stationäre Zustand erreicht. Zudem ist erkennbar, dass die 1-ppm- CO -Wolke keine Begrenzungen touchiert. Dies bedeutet, dass Sensoren im freien Querschnitt – und nicht an der Decke oder an einer Wand – montiert werden müssten, sofern angenommen wird, dass 1 ppm zuverlässig detektiert werden kann.

Wasserstoff zeigt die höchste Penetration in der Länge und der Breite. Es ist zu sehen, dass die Strömung die Wolke vergrössert und mittransportiert, bis die Tunnelwände als Begrenzung auftreten, was in der heller werdenden Farbe erkennbar ist. Falls Sensoren mit einer Detektionsgrenze von 1 ppm verfügbar sind, könnte Wasserstoff tatsächlich detektiert werden. Auch hier zeigt sich jedoch, dass die Wände erst weit vom Brandherd entfernt erreicht werden, sodass zusätzlich nahe der Brandquelle im Tunnelquerschnitt Sensoren angebracht werden müssten.

Diese Berechnungen zeigen, dass Sensoren mit einer Nachweisgrenze von 1 ppm oder weniger nötig sein werden, um den Brandanzeiger zu detektieren. Zudem hat sich gezeigt, dass die Lüftungsgeschwindigkeit erwartungsgemäss einen grossen Einfluss hat. Wird die Belüftungsgeschwindigkeit erhöht, wird der „Kegel“, der die 1 ppm Grenze anzeigt, schmaler. Ein ähnlicher Effekt konnte durch die Verringerung der angenommenen Masse von verbranntem Kunststoff oder reduzierter Konzentration der jeweiligen chemischen Spezies beobachtet werden. Dadurch sinkt, bei angenommener gleicher Branddauer, die pro Zeiteinheit freigesetzte Menge an Gas, was zu einer schnelleren Verdünnung führt.

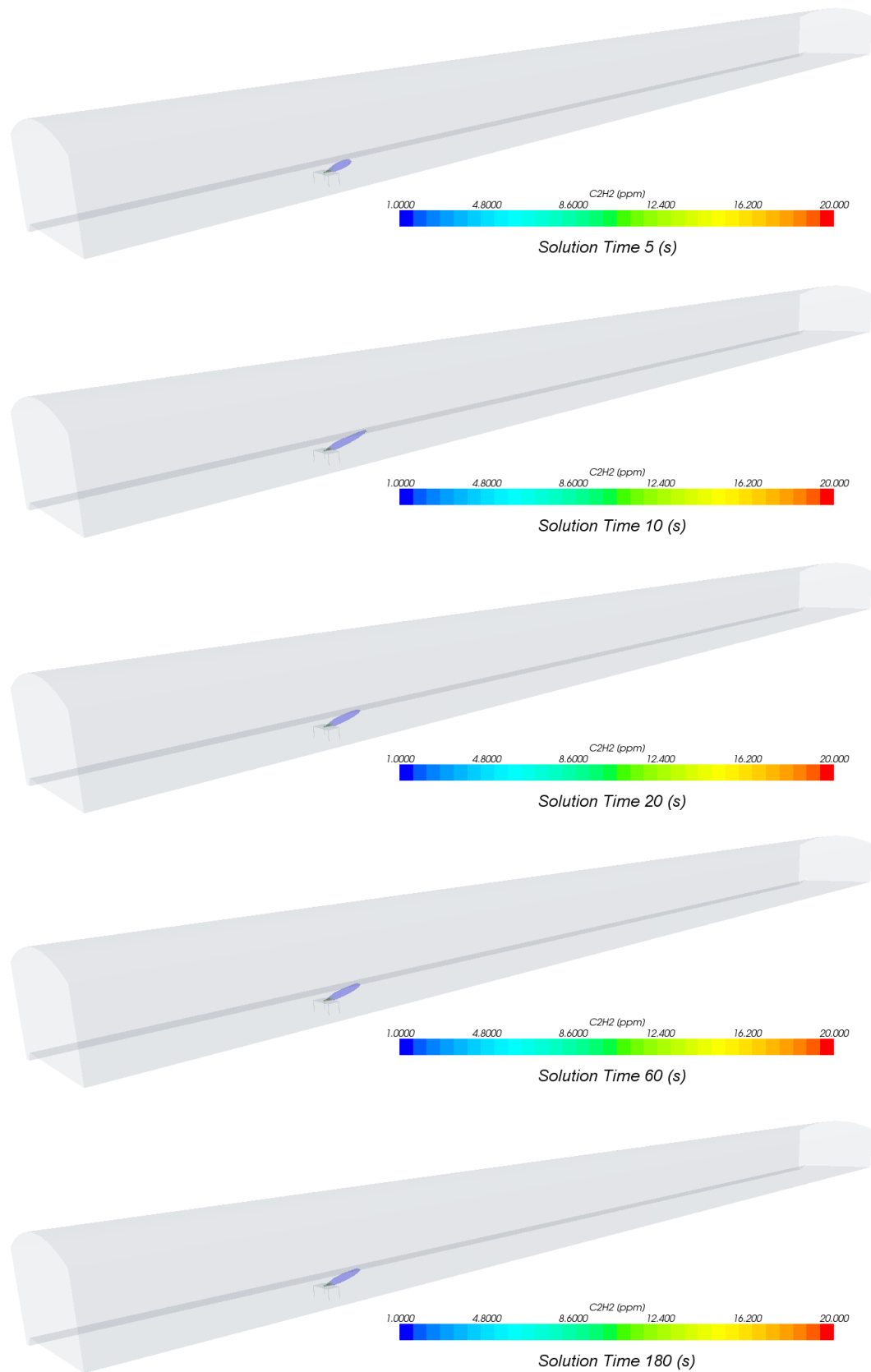


Abbildung 15: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der C_2H_2 -Konzentration zu verschiedenen Zeitpunkten

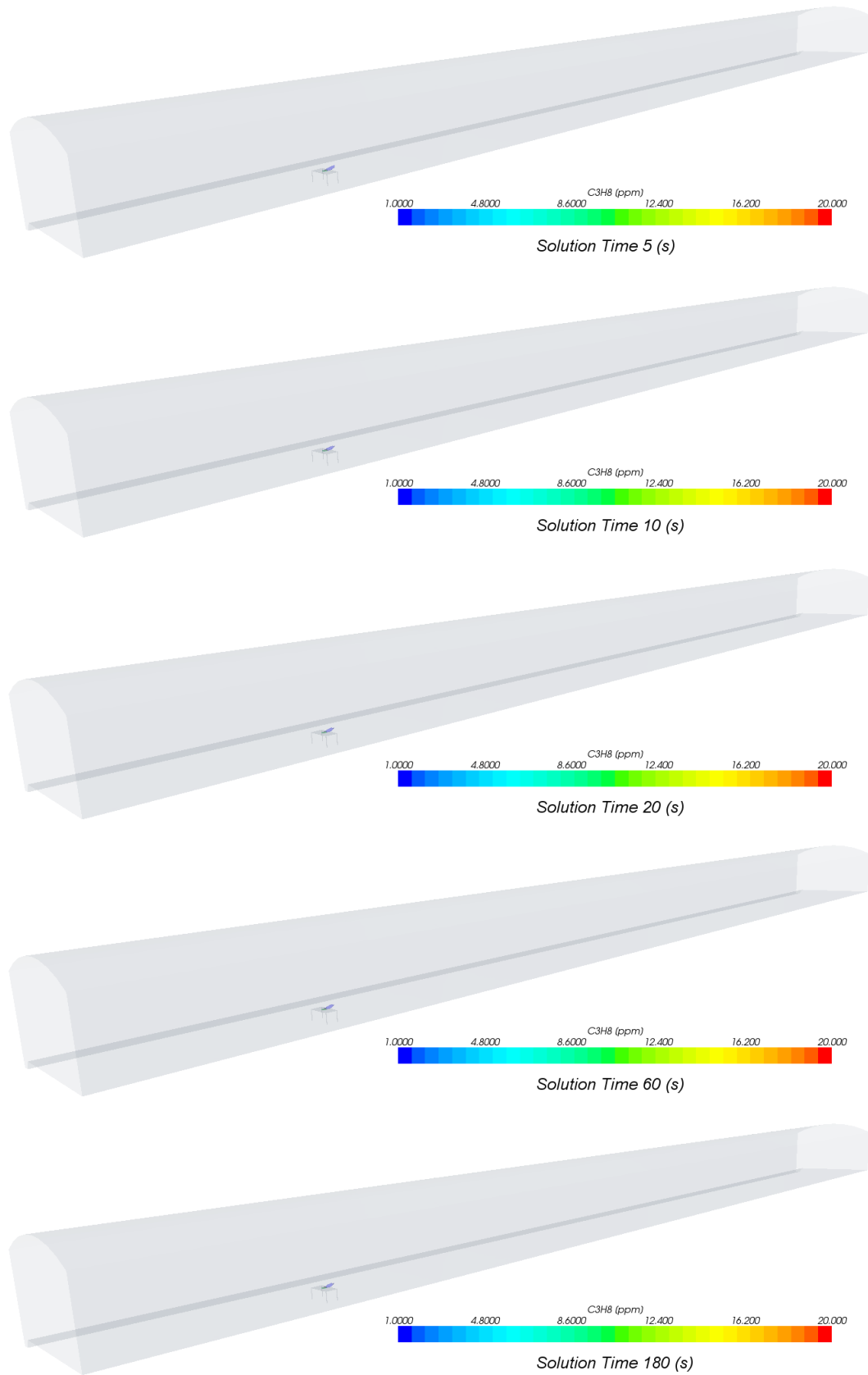


Abbildung 16: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der C_3H_8 -Konzentration zu verschiedenen Zeitpunkten

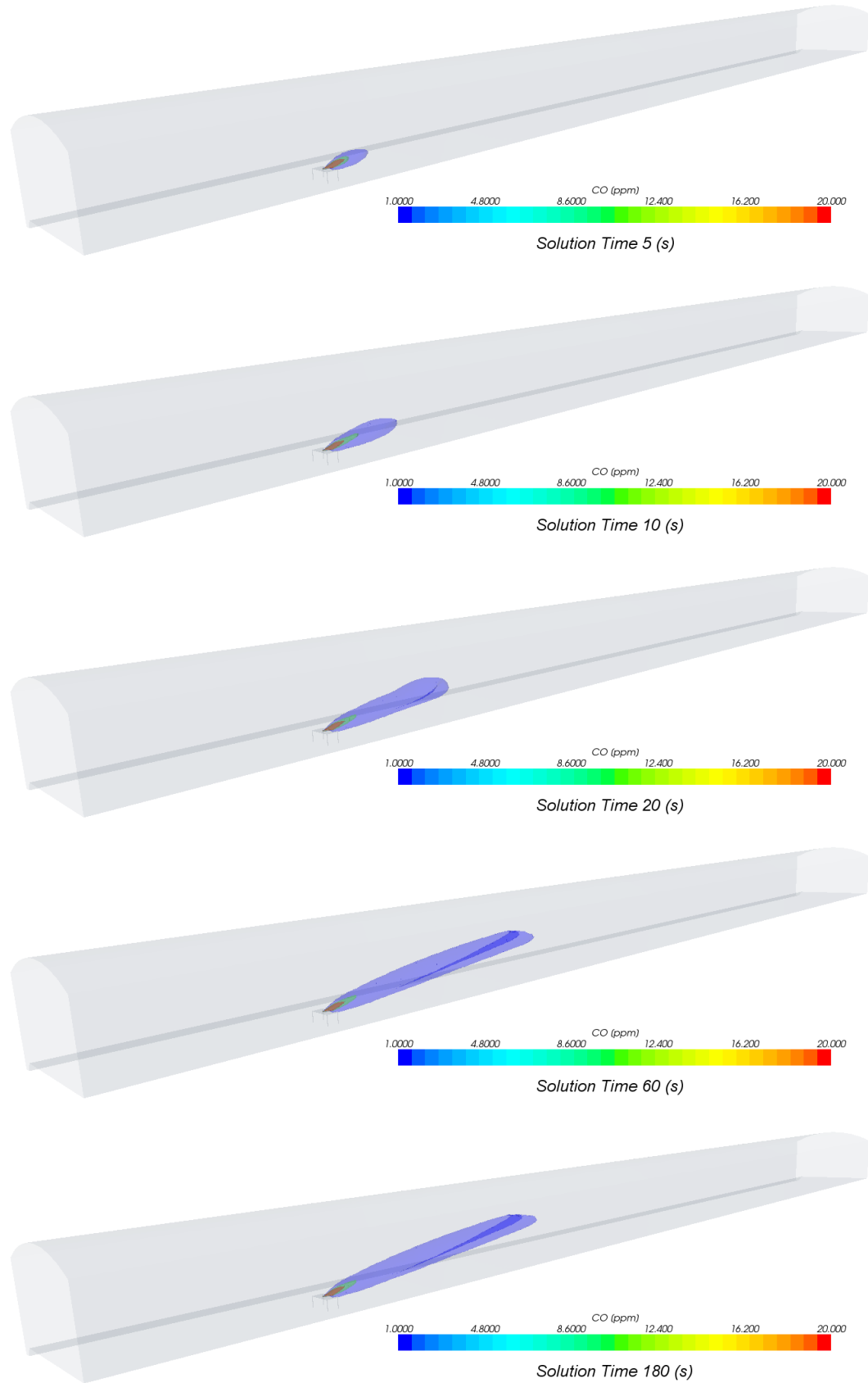


Abbildung 17: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der CO-Konzentration zu verschiedenen Zeitpunkten

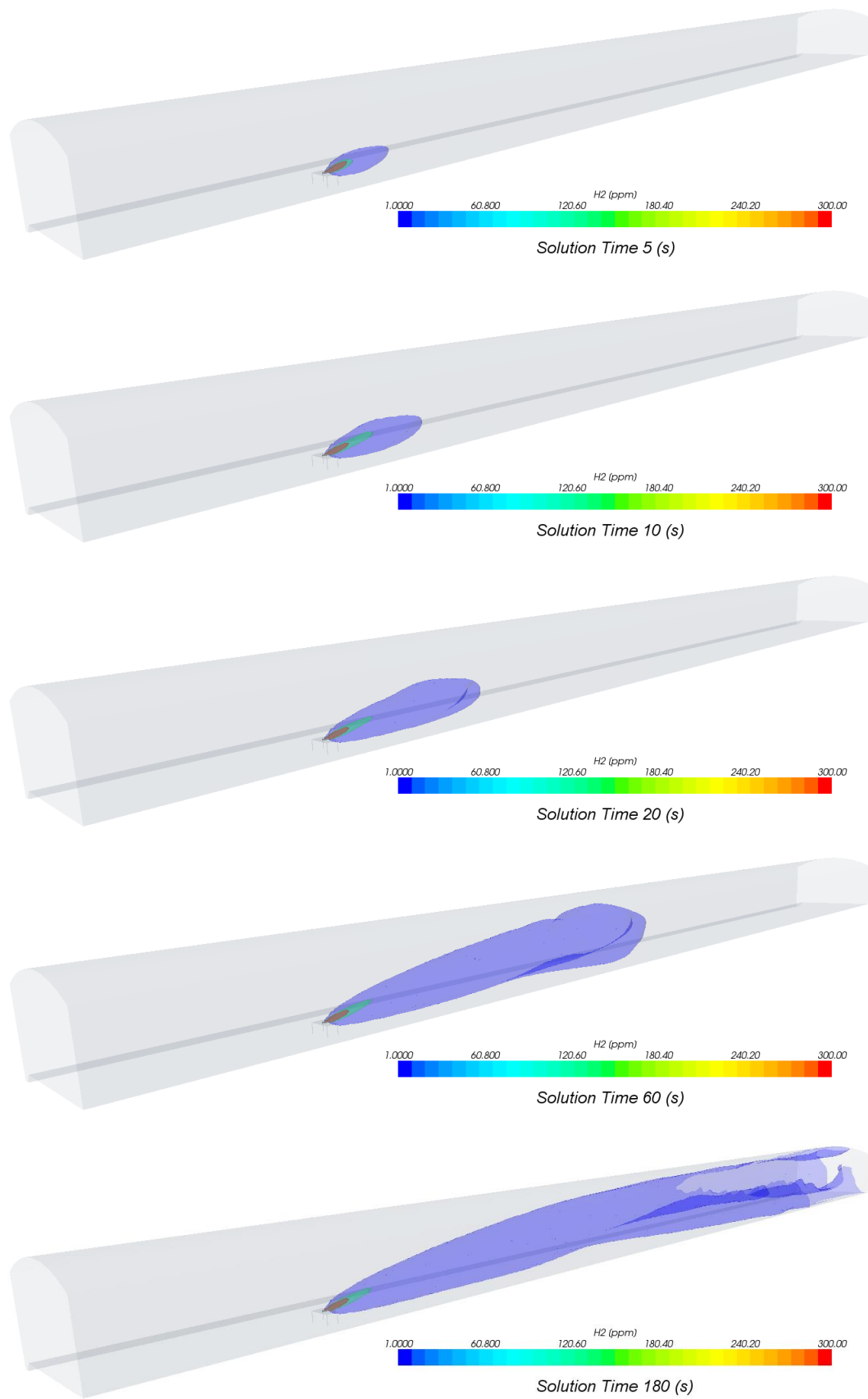


Abbildung 18: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der H₂-Konzentration zu verschiedenen Zeitpunkten

In Realität sind statt der ruhigen Rauchfahnen vermehrt Verwirbelungen durch die bewegten Fahrzeuge zu erwarten. Daher sind im Anschluss für zwei Zeitpunkte die Ausbreitungen der Komponenten mit der erwähnten Wirbelplatte dargestellt. Der Einfluss dieser Störung ist deutlich zu erkennen. Während bei allen Spezies eine Verbreiterung der „Wolke“ zu sehen ist, verringert sich die Penetration in Längsrichtung gerade bei C_2H_2 . Dies ist darauf zurückzuführen, dass hinter der Wirbelplatte ein grosses Rückströmgebiet entsteht und die Spezies dieser Wirbelströmung folgen. Bei CO und H_2 , die in höheren Konzentrationen aus dem Brandgut austreten, ist eine Wellenbildung zu sehen, die aufgrund von kleinen Fluktuationen in der Strömung entstehen.

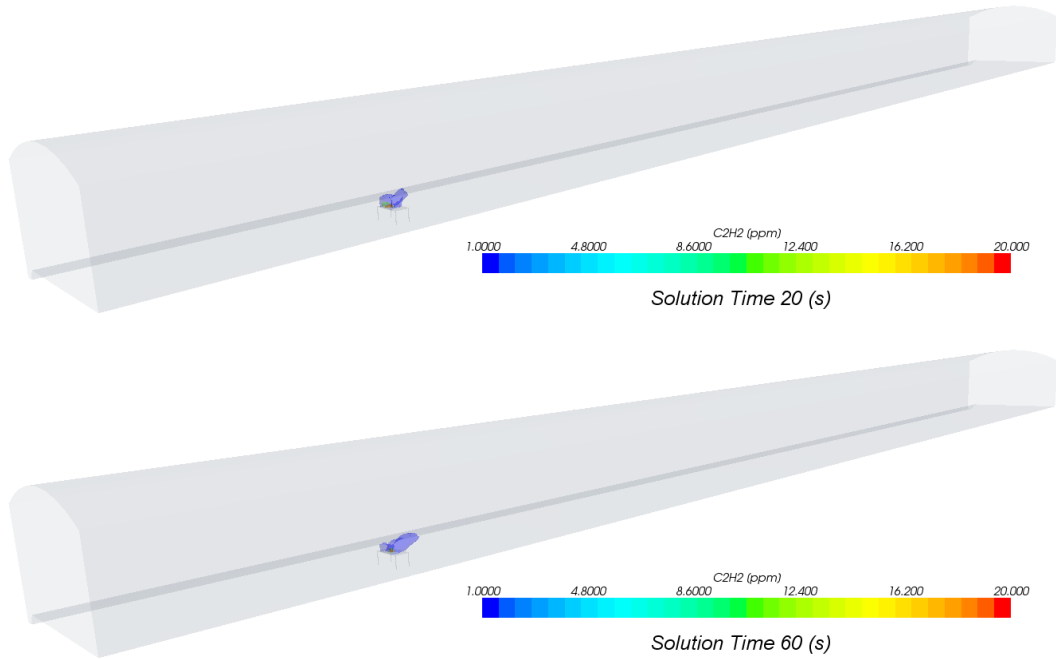


Abbildung 19: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der C_2H_2 -Konzentration mit Wirbelplatte zu zwei Zeitpunkten

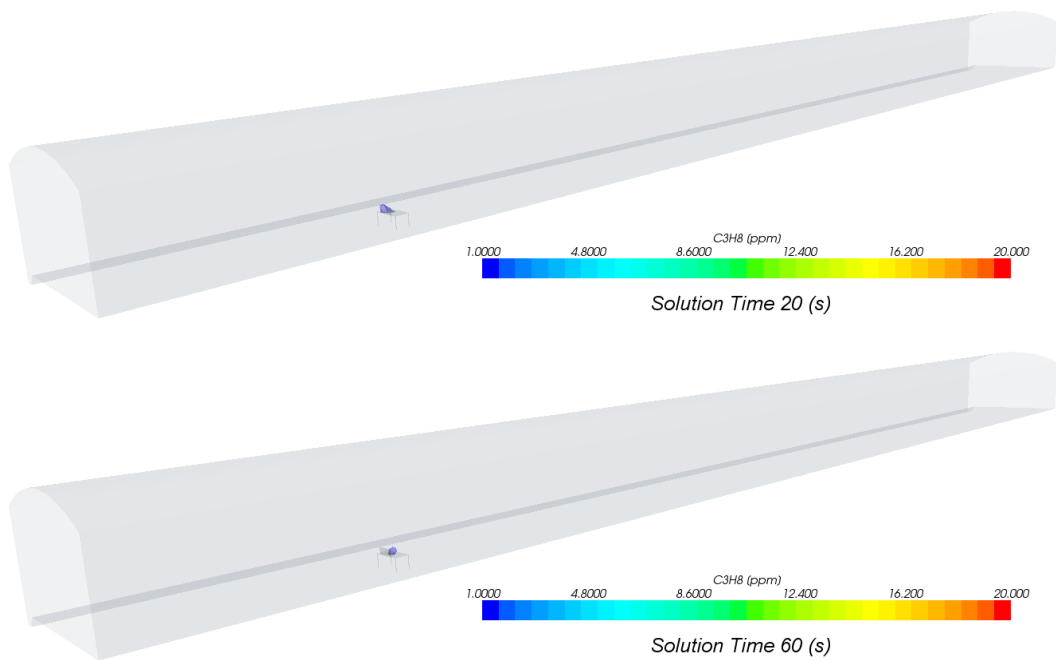


Abbildung 20: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der C_3H_8 -Konzentration mit Wirbelplatte zu zwei Zeitpunkten

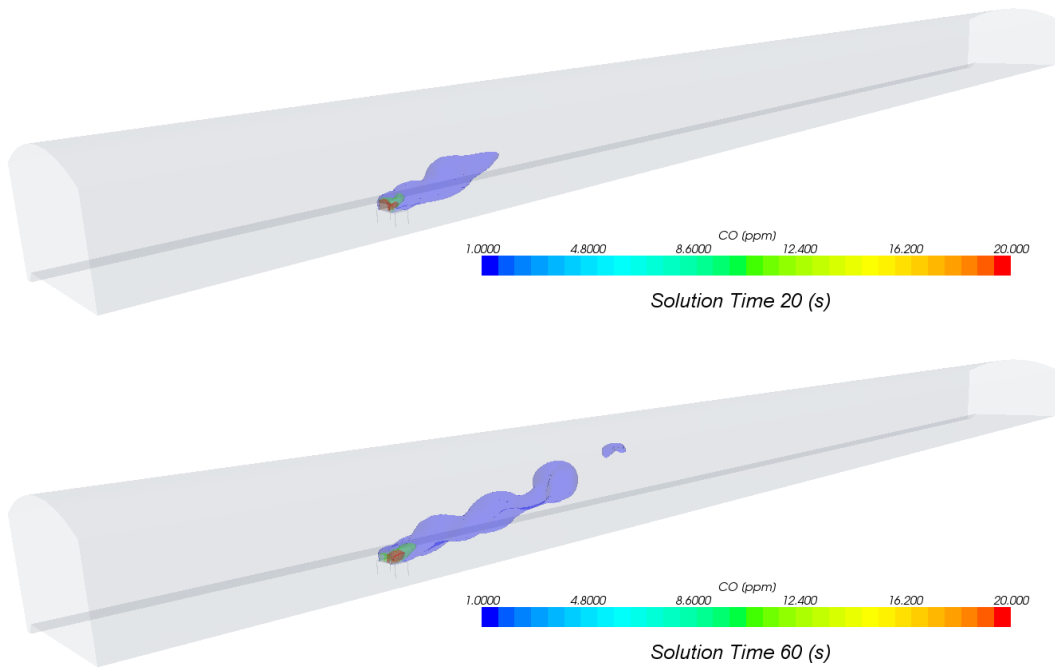


Abbildung 21: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der CO-Konzentration mit Wirbelplatte zu zwei Zeitpunkten

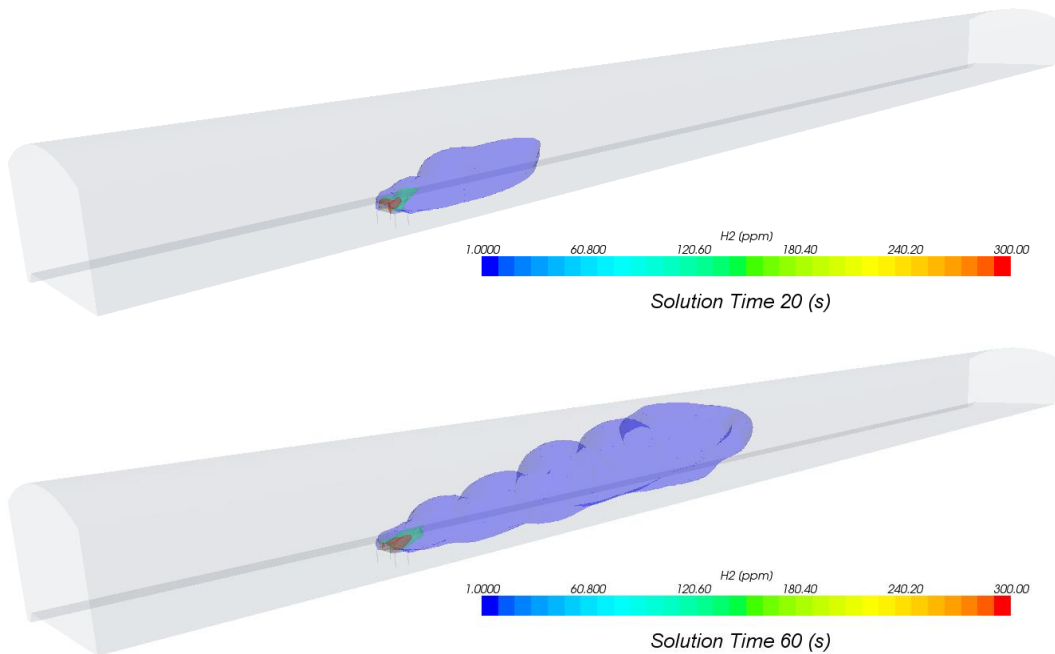


Abbildung 22: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der H₂-Konzentration mit Wirbelplatte zu zwei Zeitpunkten

5.2 Reproduktion der Brandexperimente

Zum Zeitpunkt der ersten Gasausbreitungsberechnungen stand die genaue experimentelle Anordnung noch nicht fest. Wie in Kapitel 8 beschrieben ist, wurden die finalen Schwelversuche in einem vereinfachten System durchgeführt. Die Erkenntnisse aus den eben gezeigten Simulationen, erste Vorversuche mit Verschwelung und eine Diskussion mit der Begleitkommission haben zu der Erkenntnis geführt, die experimentelle Anordnung zu vereinfachen.

Die Brandexperimente werden in Kapitel 8.5 ausführlich erläutert. Deren Analyse durch die Simulation ist bereits hier aufgeführt, um die Kapitel thematisch zusammen zu halten.

5.2.1 Geometrie

Auch hier wurde die Geometrie mittels Daten vom VSH nachgebildet, die in der folgenden Abbildung gezeigt ist. Es wurde angenommen, dass eine Länge von 10 Metern für die Simulation ausreicht und der Raum geschlossen ist. Die Heizplatte ist in Längsrichtung mittig angeordnet.

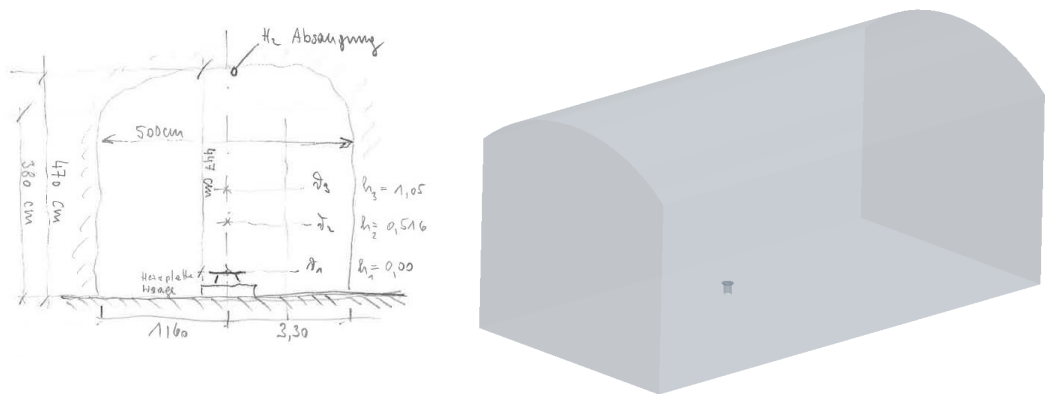


Abbildung 23: Gesamtansicht der Tunnelgeometrie für die Validierungsrechnungen

An derselben Position wie im Experiment wurde die Heizplatte modelliert, wobei das Gestell vereinfacht abgebildet wurde. Die Heizplatte selbst wurde als Metallkörper berücksichtigt.

5.2.2 Anfangs- und Randbedingungen

Heizplatte

Analog zum Experiment wurde die Platte mit einer Leistung von 1500 W beaufschlagt. Dadurch konnte das Aufheizverhalten und dessen Einfluss auf die Auftriebsströmung mitmodelliert werden.

Belüftung

Für die Berechnung wurde analog zum Experiment angenommen, dass keine Belüftung eingeschaltet ist. Damit wird eine Strömung nur durch die natürliche Konvektion – infolge Aufheizung der Heizplatte – erzeugt. Kleine Störungen, wie sie im Experiment auftreten können, sind damit jedoch nicht berücksichtigt. Es hat sich aber gezeigt, dass diese auch im Experiment kaum abschätzbar sind. Der Druck beträgt 1 bar, die Anfangstemperatur wurde als 20°C definiert.

Verschmrauchdauer

Aus der manuell erfassten Massenänderung von PP im Experiment wurde eine Änderungsrate der Masse für die Simulation abgeschätzt. Es hat sich jedoch während der Experimente gezeigt, dass die Genauigkeit relativ tief ist, da schon kleine Störungen zu großen Schwankungen in der Massenanzeige bei der Waage führten.

Ferner wurde angenommen, dass die chemischen Komponenten analog der Massenänderung des Kunststoffes in den Tunnel freigesetzt werden. Dies ist eine grobe Vereinfachung, da der Kunststoff eine Temperaturhistorie durchläuft und deshalb die Zusammensetzung der freigesetzten chemischen Komponenten sich stark ändern kann. Diese Änderung der Zusammensetzung ist aber bis zum heutigen Zeitpunkt nicht bekannt und konnte im Rahmen dieses Projektes nicht mehr untersucht werden.

Aus den Messdaten des Masseverlaufes ist zu erkennen, dass grundsätzlich verschiedene Freisetzungsraten abgeleitet werden können. Deshalb wurden – gerade auch im Sinne einer Sensitivitätsanalyse – zwei Freisetzungsraten untersucht. Im Folgenden werden diese als „Konstante Freisetzungsrates“ während 7 Minuten und „Lineare Freisetzungsrates“ bezeichnet. Eine konstante Freisetzungsrates bedeutet, dass die Konzentration im Raum linear ansteigt. Eine lineare Freisetzungsrates bedeutet, dass die Konzentration der chemischen Komponenten quadratisch ansteigt. Die beiden Strategien sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Die lineare Freisetzungsrates beinhaltet die Annahme, dass zum Schluss des Schmauchversuches die höchsten Konzentrationen entstehen. Diese Interpretation erfolgte zusammen mit dem Verlauf der H₂-Konzentrationsmessung (siehe Kapitel 7.3).

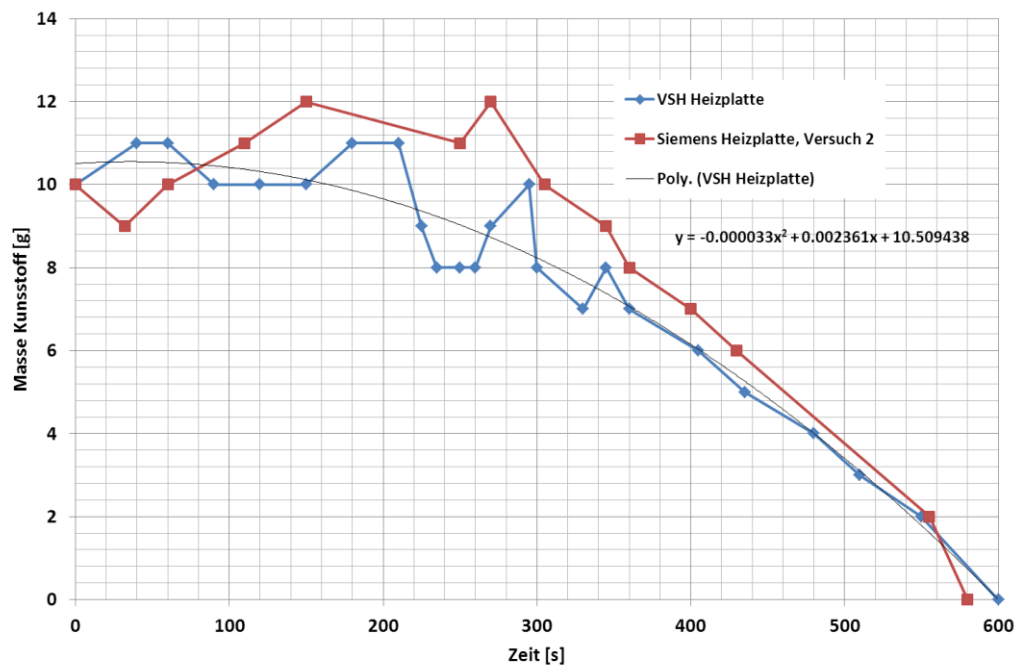


Abbildung 24: Experimentell bestimmte Massenänderung von Kunststoff

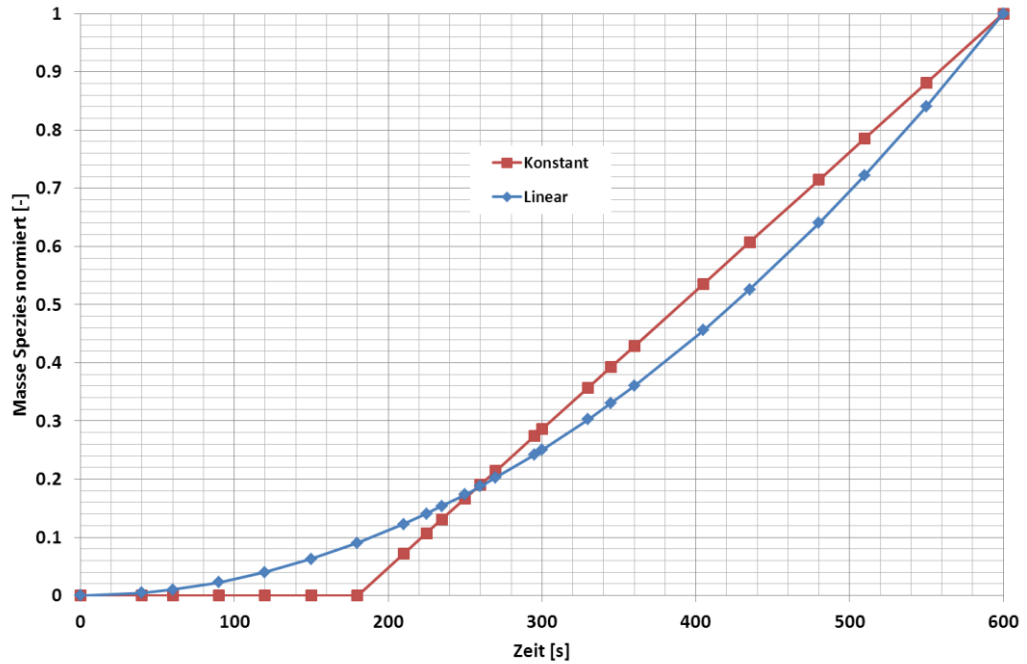


Abbildung 25: Darstellung des Masseverlaufs der chemischen Spezies

Zusammensetzung des freigesetzten Gases

Die Zusammensetzung wurde aus Kapitel 5.1.2 übernommen. Es soll hier nochmals betont werden, dass die Zusammensetzung des Gases während der gesamten Simulationsdauer konstant gehalten wurde, obwohl der Kunststoff eine Temperaturhistorie durchläuft und die Zusammensetzung sich wahrscheinlich ändert – was auch durch sehr unterschiedliche Resultate verschiedener Temperaturen aus der chemischen Simulation nahe gelegt wird.

5.2.3 Modellannahmen

Es wurden dieselben Annahmen getroffen und dieselben Modelle verwendet wie in Kapitel 5.1.4 beschrieben.

5.2.4 Ergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt die Konzentration von Wasserstoff in Funktion der Zeit in drei verschiedenen Höhen über der Heizplatte, die analog dem Experiment gewählt wurden. Die erste Abbildung zeigt den Verlauf für die konstante Freisetzungsrates, das zweite Bild den Verlauf für die lineare Freisetzungsrates. Die Schwankungen, die durch das verwendete Turbulenzmodell entstehen, sind sehr gut zu erkennen. Zudem zeigt sich, dass die Konzentrationen entlang der Höhe abnehmen, was auf die Verdünnung mit Luft zurückzuführen ist. In der Nähe der Decke ist eine konstante Konzentration zu sehen. Der mittlere zeitliche Verlauf der Konzentrationen widerspiegelt den Verlauf der Anfangsbedingungen. Dies deutet darauf hin, dass sich ein Gleichgewicht zwischen Freisetzung und Verdünnung einstellt.

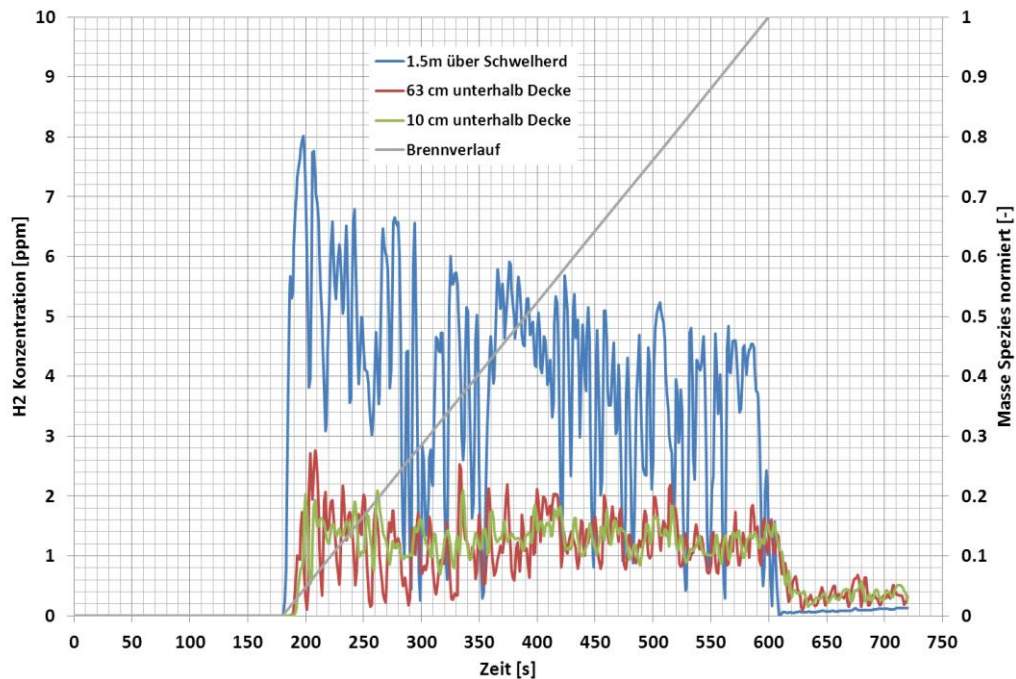


Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der Wasserstoffkonzentration in verschiedenen Höhen für den konstanten Brennverlauf

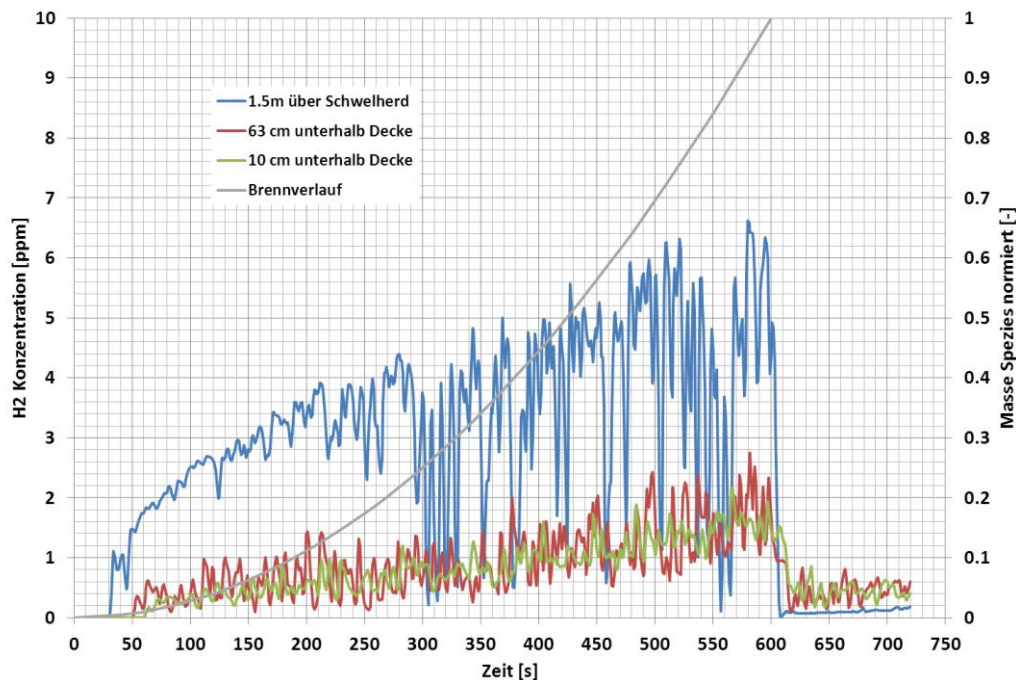


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der Wasserstoffkonzentration in verschiedenen Höhen für den linearen Brennverlauf

Die nachfolgenden Bilder zeigen zuerst für den konstanten, danach für den linearen Brennverlauf die räumliche Verteilung der H_2 -Konzentration zu verschiedenen Zeitpunkten. Es wird hier nur die H_2 -Konzentration gezeigt, da im Experiment H_2 -Sensoren verwendet wurden.

Aus den Bildern ist zu erkennen, dass die H_2 -Säule relativ schmal ist. Die Konvektion führt dazu, dass die Strömungsgeschwindigkeit rund 0.7m/s beträgt, wie aus den nachfolgenden Vektordarstellungen in der Mittelebene zu sehen ist. Sobald die Komponenten die Decke erreichen, wird der Bereich mit konstanten Konzentrationen breiter. Aus den Strömungsbildern erkennt man, dass sich lokal kleine Wirbel bilden, die zu einer perma-

nenten Durchmischung führen. Eine Ansammlung und damit eine Aufkonzentration von Gasen an der Decke konnte bei allen Berechnungen jedoch nicht beobachtet werden.

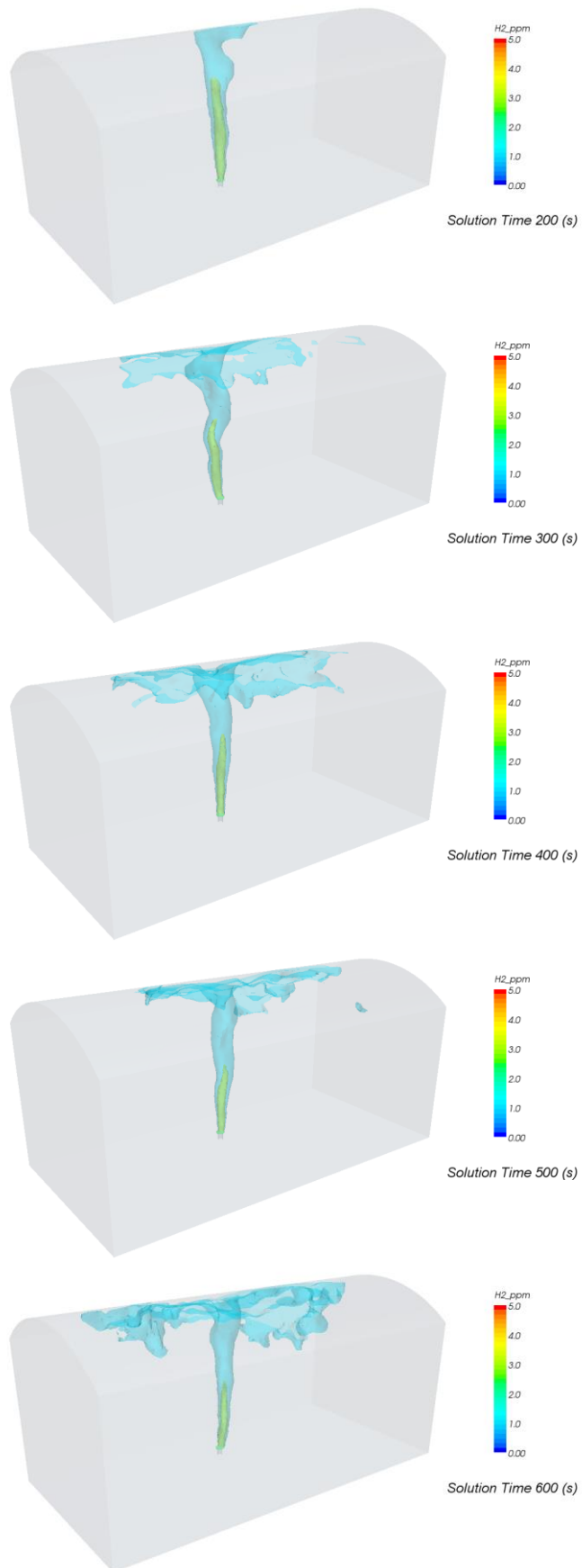


Abbildung 28: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der Konzentration von H_2 als Konturflächen bei konstantem Brennverlauf

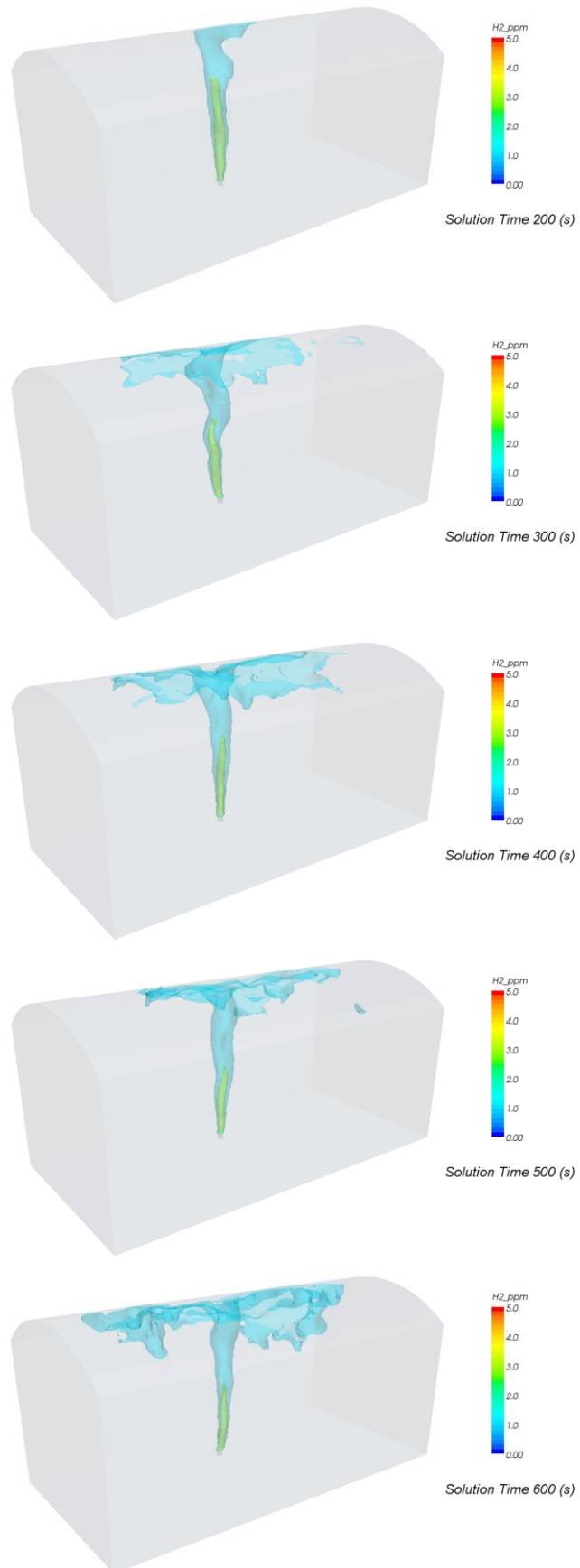


Abbildung 29: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der Konzentration von H_2 als Kontur-Flächen bei linearem Brennverlauf

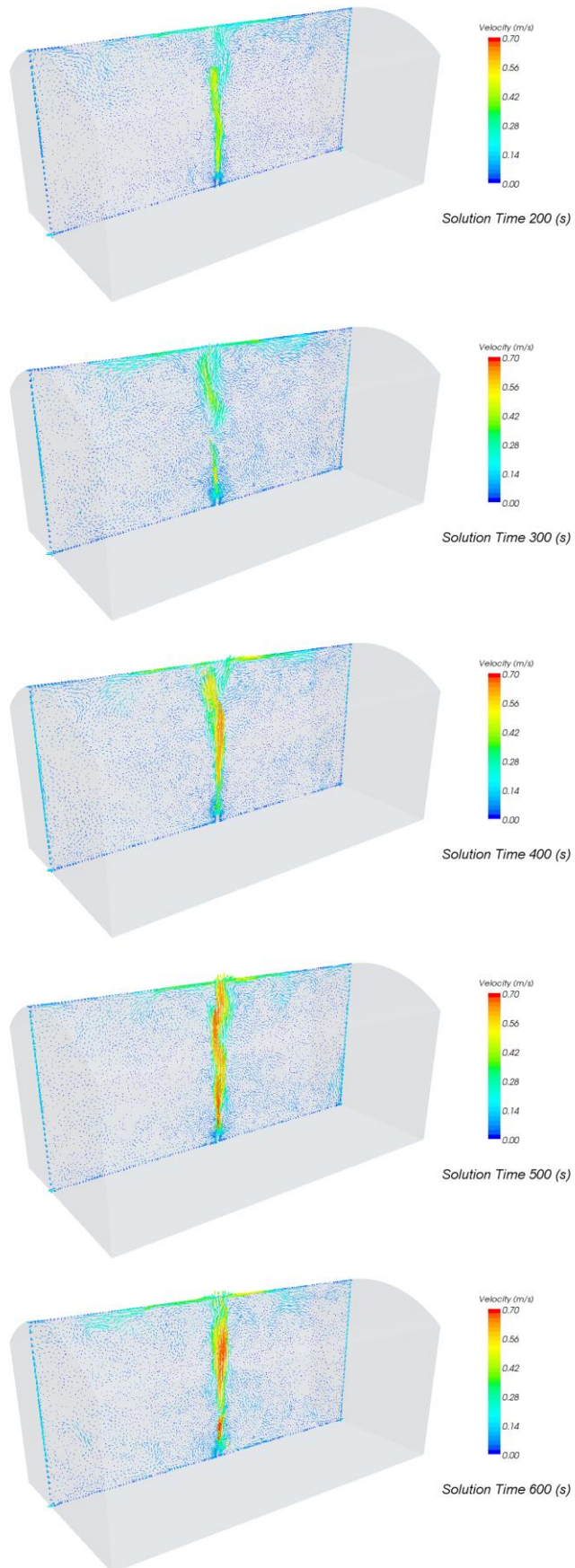


Abbildung 30: Räumliche und zeitliche Geschwindigkeitsverteilung bei konstantem Brennverlauf

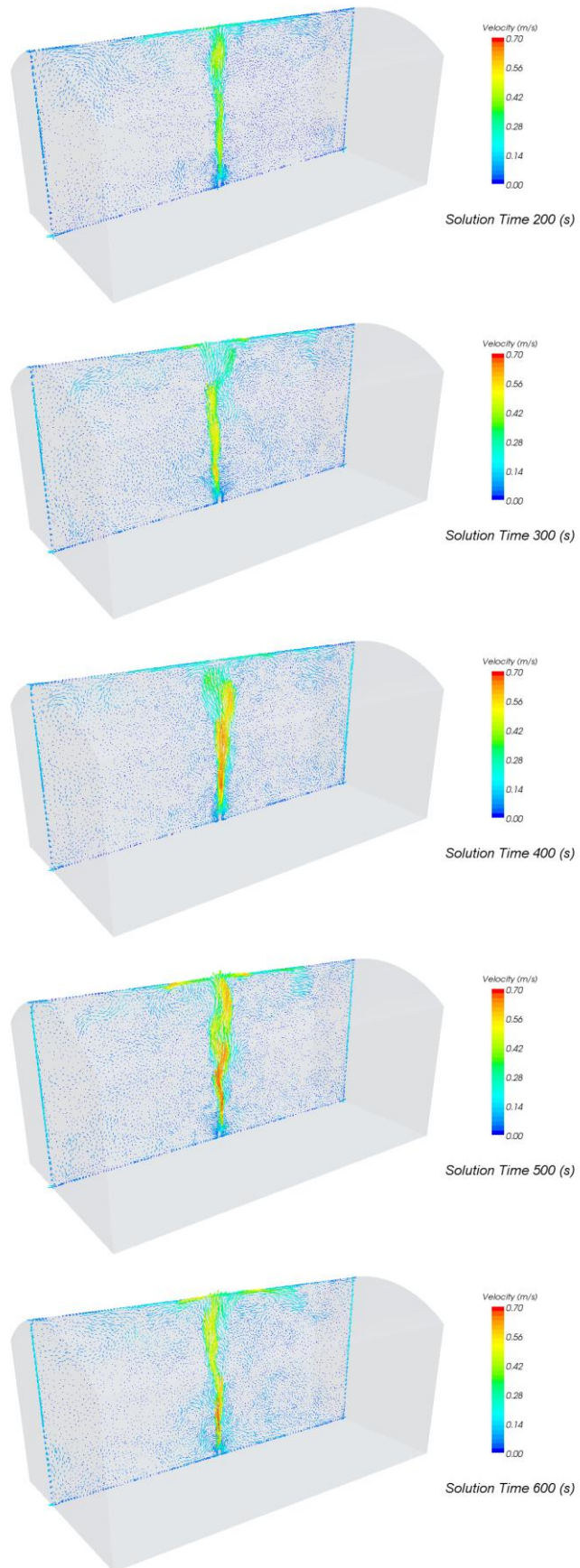


Abbildung 31: Räumliche und zeitliche Geschwindigkeitsverteilung bei linearem Brennverlauf

5.3 Zusammenfassende Diskussion

Die CFD-Berechnungen haben gezeigt, dass die Sensoren eine Nachweisgrenze von 1 ppm oder weniger aufweisen müssen, um die potenziellen Brandanzeiger detektieren zu können. Unter der Voraussetzung, dass die Anfangs- und Randbedingungen vernünftig gewählt wurden, scheint insbesondere Wasserstoff vielversprechend, da die 1-ppm-Wolke relativ gross ist. Für Versuche im Brandstollen, müssten Sensoren vermutlich im Querschnitt – und nicht nur an der Decke oder der Tunnelwand – montiert werden, um auch die aufsteigende Gaswolke zu detektieren.

Die Berechnungen haben zudem gezeigt, dass auch ohne Lüftung im Walserstollen keine Ansammlung von Brandanzeiger an der Decke zu erwarten ist. Die Auftriebsströmung führt dazu, dass auch unterhalb der Decke eine permanente Durchmischung stattfindet. Die Strömungsgeschwindigkeit an der Decke ist jedoch tief, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine Detektion erhöht wird. Zudem spricht die räumlich breitere Ausbreitung für eine Detektion in Deckennähe, wo die genaue Platzierung des Sensors nicht eine so grosse Rolle spielt wie im schmalen aufsteigenden Gasstrom.

Leider bestehen gerade bei der Zusammensetzung des freigesetzten Gases grosse Unsicherheiten. Wird Kunststoff auf eine Heizplatte gelegt, diese erwärmt und dadurch der Kunststoff allmählich verdampft, durchlebt der Kunststoff eine Temperaturhistorie. Dieser Verlauf macht es sehr wahrscheinlich, dass je nach Temperatur die Zusammensetzung der freigesetzten Gase variiert. Interessanterweise konnte diese Frage aus der Literaturstudie nicht annähernd beantwortet werden.

Wie die nachfolgend dargestellten Experimente zeigten, besteht zu der gezeigten Berechnung eine relativ grosse Diskrepanz, die nicht abschliessend geklärt werden konnte.

6 Marktanalyse Sensor

6.1 Anforderungen an den Sensor

6.1.1 Spezifität

Aus den Verbrennungssimulationen ergab sich, dass die in Frage kommenden Sensoren eine hohe Spezifität auf die Gase Ethin (Acetylen), Wasserstoff, Cyclopropan oder Propan aufweisen müssen, und keine Querempfindlichkeiten haben auf typische andere Verbrennungsprodukte, wie sie in der Tunnelluft vorkommen, wie Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Methan, Ethan, Ethen (Ethylen), Formaldehyd, Propen, Wasser, aber auch Stickoxide. Ebenfalls darf die Messung nicht durch allfällig vorhandenen Staub, Feuchtigkeit oder Nebel beeinträchtigt werden.

Für die isolierten Brandversuche im Tunnel könnten allenfalls auch Sensoren zum Einsatz kommen, die weniger spezifisch auf die genannten Brandgase reagieren oder (quantifizierbare) Querempfindlichkeiten aufweisen, da hier die Validierung und Kalibrierung der Strömungssimulationen im Vordergrund stand und nicht die tatsächliche Brandfrühdetektion.

6.1.2 Empfindlichkeit

Ein weiteres entscheidendes Kriterium des Sensors ist seine Empfindlichkeit: Was muss seine Nachweisgrenze sein, welche Konzentrationen an Brandgas müssen gemessen werden können? Mit welcher Auflösung?

Wie bereits ausgeführt, konnten aus den Verbrennungssimulationen die im Brandgas zu erwartenden Konzentrationen nur sehr grob abgeschätzt werden. Wie die Strömungssimulationen in Kapitel 5.3 gezeigt haben, ist durch die Verdünnung in der Luft mit einer Brandmarker-Konzentration von ca. 1 ppm oder weniger zu rechnen.

Interessanterweise sind bei den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) bereits Gasdetektoren zur frühzeitigen Erkennung von brennenden Zügen im Einsatz. Im Vergleich zwischen Branddetektion in Strassentunnels und Eisenbahntunnels gibt es wesentliche Gemeinsamkeiten: Die grossen Räume, in welchen sich das Brandgas verteilen kann (Tunnelquerschnitt, in der Länge unbegrenzt), die bewegte Brandquelle und die starke Verwirbelung, die zu einer weiteren, raschen Verdünnung des Brandgases führt. Andererseits gibt es entscheidende Unterschiede: wegen der weitgehend elektrischen Antriebe der Züge auf dem Schweizer Bahnnetz ist jedes Brandgas als Brandanzeiger tauglich, und wegen der klar definierten Benutzung des Schienennetzes kann die Alarmierung und der Interventionsablauf gezielt gesteuert werden: So kann bei der vereinzelt Durchfahrt einer Diesel-Lokomotive der Alarm ausgesetzt werden, oder bei Gefahrguttransporten die Aufmerksamkeit gesteigert werden.

Daher lieferte uns der Vergleich mit dem SBB-Detektionssystem wertvolle Grundlagen: so wurden bei Experimentalmessungen mit bewegten Brandquellen CO-Konzentrationen am Tunnelboden im Bereich 0.5 bis knapp 3 ppm gemessen, und Alarm wird ausgelöst, wenn die Konzentration nachhaltig um 0.2 ppm ansteigt bei einer Messauflösung von 0.1 ppm [Vouillamoz2006Turin, Koller2011ETR, Koller2011RTR].

Aufgrund dieser Grundlagen ist davon auszugehen, dass auch im Fall der Branddetektion im Strassentunnel Nachweisgrenzen im tiefen ppm-Bereich erreicht werden müssen, besser sogar im sub-ppm-Bereich.

6.1.3 Weitere Kriterien

Für die Brandversuche musste der Sensor periodisch ausgelesen werden können, zum Beispiel im Sekundentakt, und die Daten müssen von mehreren Detektoren synchron aufgezeichnet werden können.

6.1.4 Zusammenfassung Kriterien

Kriterien für den Gassensor für die Brandversuche:

- Gassensor hochspezifisch für Ethan, Ethen (Ethylen), Ethin (Acetylen), Propan, Propen, Cyclopropan, Propedien, Butinen, Wasserstoff oder Kohlenmonoxid
- Empfindlichkeit im tiefen ppm-Bereich, besser sub-ppm-Bereich oder ppb-Bereich
- Unempfindlich auf Feuchtigkeit, oder entsprechende Korrektur
- Betrieb unter Normalbedingungen (Druck, Temperatur)
- Auslesemöglichkeit im Hertz-Bereich
- Messdatensammlung wenn möglich über ein Standard-Bus auf PC mit mehreren Sensoren gleichzeitig

Zusatzkriterien für einen Gassensor als Zielprodukt:

- Gassensor hochspezifisch für Ethin (Acetylen), Propan, Cyclopropan, Propedien oder Wasserstoff
- Keine Kreuzempfindlichkeit auf andere volatile organische Substanzen (VOC) oder Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid, Stickoxide oder Schwefeloxide
- Unempfindlich auf Staub, Russ, Nebel, Temperaturschwankungen

6.2 Marktanalyse

6.2.1 Marktübliche Gassensoren und Gaswarngeräte

Marktübliche Gassensoren konzentrieren sich primär auf den Explosions- und Gesundheitsschutz. Darauf ist auch ihre Empfindlichkeit ausgerichtet. Als Beispiel: Die untere Explosionsgrenze für ein Acetylen-Luft-Gemisch liegt bei 2.3 %. Das heisst, ein Gasgemisch mit dieser oder einer höheren Konzentration kann sich mit einer Zündquelle explosionsartig entzünden. Entsprechende Warnsensoren geben daher häufig die Konzentration in Prozent der unteren Explosionsgrenze an [smartGAS]. Bei der angenommenen Nachweisgrenze von 1 % der unteren Explosionsgrenze ergäbe sich also für den Acetylen-Sensor eine Detektionsgrenze von 230 ppm. Dies ist deutlich zu hoch für die vorliegenden Anforderungen.

Bei giftigen Gasen wie Kohlenmonoxid CO sind die Grenzen tiefer. Die Maximale-Arbeitsplatzkonzentration (MAK) liegt für CO bei 35 mg pro Kubikmeter Luft. Allerdings sind diese Sensoren dann mehr auf den Personenschutz und die Alarmierung (Signalton, Vibration) ausgelegt. Sie bieten nur beschränkt Messungen im tieferen Bereich und verfügen über keine flexible automatische Auslesemöglichkeit [CrowconCO].

Wegen diesen Einschränkungen wurden diese Typen von Sensoren vorerst nicht mehr weiter verfolgt.

6.2.2 Gassensoren in der Brandmelde-Industrie

Wie sich heraus gestellt hat, sind auch seitens der Brandmelde-Industrie Bestrebungen im Gang, die Brandgasdetektion in ihre Brandmeldeprodukte für den Gebäudebereich zu integrieren. Zumeist werden Kohlenmonoxid-Sensoren auf der Basis von elektrochemischen Zellen verwendet. Durch die Integration mehrerer Sensortypen können beispielsweise Temperatureffekte der Sensorantworten automatisch kompensiert werden und Muster in den unterschiedlichen Sensorsignalen erkannt werden.

Die Nachweisgrenze und Auflösung der elektrochemischen Gassensoren für Wasserstoff beträgt ca. 1 bis 2 ppm, für CO sind ca. 0.5 ppm erreichbar.

Ein Nachteil dieser Gassensoren sind bekannte Querempfindlichkeiten auf andere Gase. Die Querempfindlichkeiten werden meist im Datenblatt des Sensors beschrieben, jedoch nicht immer in ausreichender Menge. Sie messen aber im Vergleich zu anderen kostengünstigen Gassensortechnologien (wie z. B. Metalloxid-Gassensoren) selektiver und

können absolute Konzentrationswerte ausgeben mit einer linearen Sensorkennlinie (Sensorstrom ist proportional zur Gaskonzentration). Die elektrochemischen Zellen werden meist für genau ein Zielgas angeboten und mit entsprechend optimierten Sensor-Elektroden und Elektrolyten eingesetzt, sodass eine Selektivitätssteuerung je nach Sensormaterial und Sensorbetrieb möglich ist. Teilweise können aber auch Querempfindlichkeiten zum Beispiel durch Gasfilter verringert oder eliminiert werden, teilweise können sie im Zusammenspiel mit mehreren Sensoren herausgerechnet werden. Aus diesem Grund gibt es eine grosse Auswahl an verschiedenen selektiven elektrochemischen Gassensoren, die aufgrund ihrer Grösse und geringen Leistungsverbrauch sehr beliebt in tragbaren Gasmessgeräten zum Einsatz kommen.

Mit diesen Spezifikationen schienen die Sensoren dieser Klasse für die Brandversuche tauglich zu sein, zumal die Querempfindlichkeiten in dieser Stufe noch keine grosse Rolle spielen.

6.2.3 Hochempfindliche Messgeräte

Da die ermittelten Brandmarker – mit Ausnahme von Wasserstoff – ein sehr ausgeprägtes Absorptionsverhalten im mittleren Infrarot-Spektralbereich (MIR) aufweisen, bietet sich die Detektion mittels MIR-Absorptionsspektroskopie an. Durch den Einsatz von Dauerstrich-Quantenkaskadenlasern für diese Messtechnik können die Zielgase hoch selektiv und mit extremer Empfindlichkeit bis in den tiefen ppb-Bereich gemessen werden. Des Weiteren bieten diese schmalbandigen Lichtquellen eine ultrafeine spektrale Auflösung und gewährleisten damit ein Minimum an Querempfindlichkeiten, welche in der möglichen Überlappung mit Absorptionen durch messfremde Spezies in dem zu untersuchenden Gasstrom begründet liegen. Darüber hinaus wird somit ein zuverlässiges und robustes Konzept zur Behandlung optischer Störungen wie Staub und Feuchtigkeit ermöglicht.

So sind standardmässig Nachweisgrenzen für Acetylen und Ethylen von 4 ppb möglich, für Kohlenmonoxid von 0.7 ppb, für Kohlendioxid sogar 0.2 ppb. Solche Geräte werden beispielsweise von der Firma neoplas control GmbH, Greifswald, Deutschland, hergestellt. Mit den angeführten Spezifikationen wohnt diesen Geräten ein enormes Potenzial für den geplanten Einsatz in der Brandfrüherkennung durch Ausnutzung der Gasströmung für die entfernte, zentrale Probenentnahme.

Das, aufgrund der Neuheit der Technologie und des signifikanten Anpassungsbedarfs für den konkreten Anwendungsfall, hohe Preisniveau der Systeme und die beschränkte Verfügbarkeit – Fertigung nur kundenspezifisch auf Bestellung – stand einer Umsetzung im Rahmen dieses Projekts entgegen. Die Experten der neoplas control GmbH zeigten sich allerdings zuversichtlich, die Herausforderungen der hochempfindlichen, hochselektiven Messung im Tunnelbrand-Umfeld meistern zu können.

6.2.4 Biologisch-Chemische Diagnoseverfahren

In medizinischen Belangen sind teilweise extreme Empfindlichkeiten möglich. Gewisse Hormone im Blut können im ppt-Bereich nachgewiesen werden, für Proteine, Tumormarker oder Wirkstoffe sind ppb-Messungen üblich. Typischerweise wird dazu eine hochselektive Farbreaktion nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip mit dem Zielsubstrat herbeigeführt, die bei Vorhandensein des Zielsubstrats zu einer leicht feststellbaren Farbänderung führt. Typisch für solche Diagnoseverfahren ist der relativ hohe Forschungsaufwand, der dann häufig zu günstigen Einzeltests führt (vgl. Schwangerschafts-Teststreifen).

Für den Einsatz im Tunnel wäre der Einsatz eines solchen „Brand-Teststreifens“ tatsächlich prinzipiell denkbar. Laut Einschätzung von Davos Diagnostics AG, Davos, ist die Extraktion des Zielsubstrats aus Gas eine besondere Herausforderung, aber machbar.“

Die Leistungsfähigkeit biologischer Sensoren wird durch die Nase demonstriert: Die menschliche Nase kann einer der am intensivsten riechenden Stoffe (Skatol) noch in Konzentrationen von 4 Nanogramm pro Kubikmeter Luft wahrnehmen, also im ppt-Bereich. Das Riechorgan des Hundes ist noch wesentlich empfindlicher: es kann bereits Einzelmoleküle in einem Kubikmillimeter Luft wahrnehmen.

7 Vorversuche am Gasmessplatz und in einer Brandkammer

Für den messtechnischen Nachweis der ermittelten Brandmarker aus der Verbrennungssimulation wurde der Fokus auf die Wasserstofferkennung gelegt und ein geeigneter Wasserstoffsensor ausgewählt. Im Folgenden werden die zugehörige Messtechnik und die Qualifikation eines elektrochemischen H_2 und CO Sensors am Gasmessplatz beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse eines Vorversuchs zur Verschmelzung von Polypropylen-Fasern (PP) in einer Brandkammer mit 0.6 m^3 Volumen aufgezeigt, um die Sensorqualifikation für den Hauptversuch im VSH zu garantieren. Die Versuche wurden im Rahmen der Dissertation von Daniel Gutmacher (Lehrstuhl für Gassensoren, Universität Freiburg (IMTEK) bei Building Technologies Division der Siemens Schweiz AG in Zug durchgeführt.

7.1 Messplattform zur H_2 - und CO-Messung

Für den Nachweis und die Messung von H_2 hat man sich für elektrochemische Zellen entschieden, weil diese mit geringem Aufwand und geringen Kosten höhere Selektivität garantieren können als andere Sensorsysteme [Gutmacher2011SAB]. Die elektrochemische H_2 -Zelle besitzt einen guten CO Filter, sodass Querempfindlichkeiten auf CO ausgeschlossen werden können.

Um möglichst die Strömung des aufsteigenden Brandgases nicht zu behindern, wurde eine kleine Sensorplattform verwendet (Abbildung 32), welche verschiedene Gassensoren aufnehmen kann. Des Weiteren messen zwei Thermistoren (Streifen-NTC) die Lufttemperatur und ein SHT21-Sensor misst die relative Luftfeuchte.

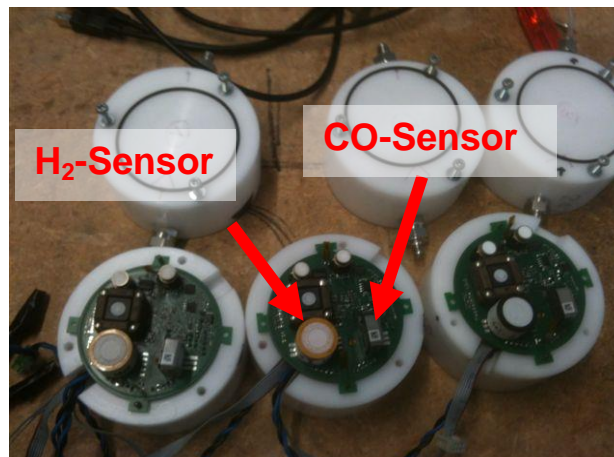


Abbildung 32: Sensorplattform mit diversen Gassensoren und entsprechender Gasmesskammer zur Kalibration am Gasmessplatz

7.2 Sensorkalibration

An einem Gasmessplatz wurden die Sensoren mit H_2 - und CO-Gas kalibriert. Die folgenden Abbildungen zeigen zwei Kalibrationskurven von zwei H_2 -Sensoren mit $49 \text{ ppm } H_2$ Eichgas.

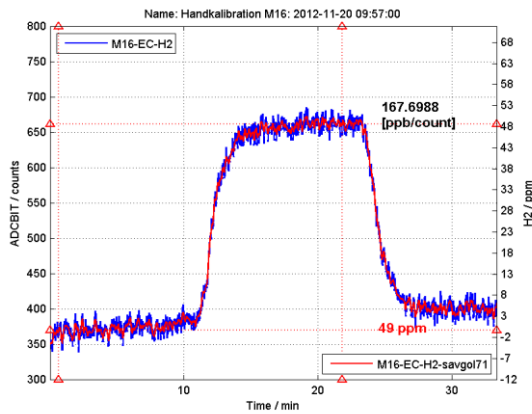


Abbildung 33: Kalibration eines H₂-Sensors auf M16-Plattform mit 0.1677 ppm / count

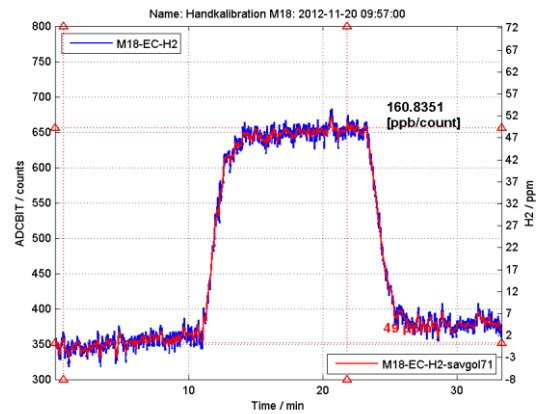


Abbildung 34: Kalibration eines H₂-Sensors auf M18-Plattform mit 0.1608 ppm / count

Beide H₂-Sensoren zeigen innerhalb der Messgenauigkeit die gleiche Empfindlichkeit auf 49 ppm H₂. Durch Filtern lässt sich das Sensorrauschen glätten und somit eine Auflösung von ca. 1 - 2 ppm H₂ erreichen. Weitere Messungen haben ergeben, dass der H₂-Sensor eine hier vernachlässigbare Querempfindlichkeit auf CO zeigt.

Die nächsten Abbildungen zeigen zwei Kalibrationskurven für zwei CO-Sensoren. Kalibriert wurde bei 100 ppm CO am Gasmessplatz.

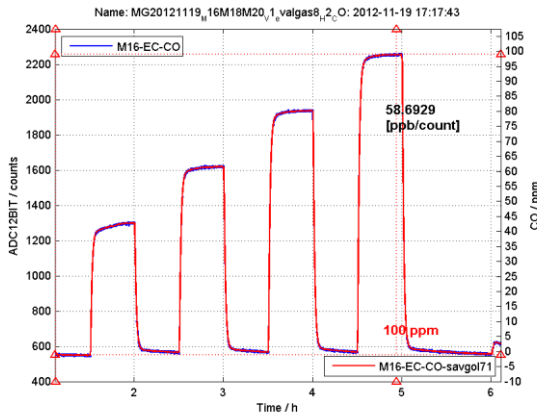


Abbildung 35: Kalibration eines CO-Sensors auf M16-Plattform mit 0.0587 ppm / count

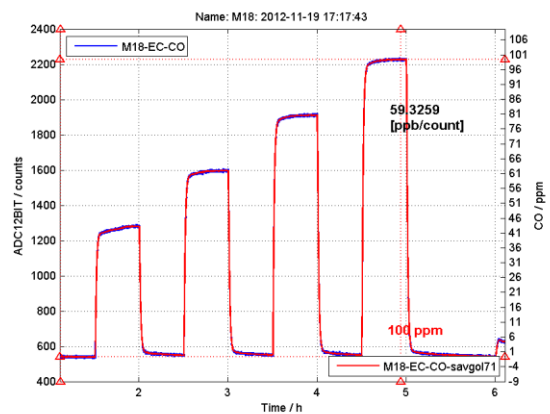


Abbildung 36: Kalibration eines CO-Sensors auf M18-Plattform mit 0.0593 ppm / count

Der CO-Sensor zeigt eine sehr gute Empfindlichkeit auf CO und hat ein geringes Rauschen im Vergleich zum H₂ Sensor, sodass eine sub-ppm Auflösung von ca. 0.5 ppm möglich ist.

Beide H₂- und CO-Sensoren haben in weiteren Versuchen eine Temperaturabhängigkeit aufgezeigt. Beim CO-Sensor ist eine gute Temperaturkompensation bis ca. 50°C möglich und der Sensor selbst reagiert nur gering auf Temperaturschwankungen und Temperaturerhöhungen. Der H₂-Sensor hat bereits bei geringen Temperaturschwankungen von z.

B. +5 °C einen negativen Offset und bei höheren Temperaturen eine positive Signalwende. Aus diesem Grund sollten die Sensoren nicht in die Nähe der Brandquelle platziert werden oder Temperaturschwankungen ausgesetzt werden. Bei schwelenden Bränden in 4 Meter Entfernung wird eine Temperaturerhöhung von max. 1 - 2°C erwartet (Heizplatte bei maximal 2kW und 22cm Durchmesser). Befinden sich die Sensoren in einem Absaugsystem so kann der Temperatureinfluss minimiert oder ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurde in den Hauptversuchen im VSH zusätzlich ein Absaugsystem verwendet, welches die Gase in den Leitungen abkühlt und bei konstanter Temperatur über die Sensoren leitet.

7.3 PP-Verschmelzung in einer kleinen Brandkammer

Für die Voranalyse wurde 1.5 g PP und 8.5 g PP auf einer 2kW-Heizplatte in einer Brandkammer (0.95m x 0.95m x 0.7m) mit einem Volumen von 0.6m³ verschwelt. Die Gassensoren auf einer Messplattform M16 wurden ausserhalb der Brandkammer und hinter einem Absaugsystem mit einer Luftpumpe und einem Aerosolfilter installiert, um nicht der Temperaturerhöhung ausgesetzt zu werden. Die zweite Messplattform M18 wurde direkt in die Brandkammer an der Decke platziert. Hier zeigten die Sensoren ein temperaturabhängiges Signal.



Abbildung 37: 0.6 m³-Brandkammer mit schwelendem PP auf einer Heizplatte mit einer Maximalleistung von 2 kW.

7.3.1 Verschmelzung von 1.5 g Polypropylen

Bei diesem Versuch wurde auf einer Aluminiumfolie 1.5 g PP über einer 2kW Heizplatte verschwelt. Es wurden erhöhte CO- und H₂-Konzentrationen an der Decke der Brandkammer erwartet.

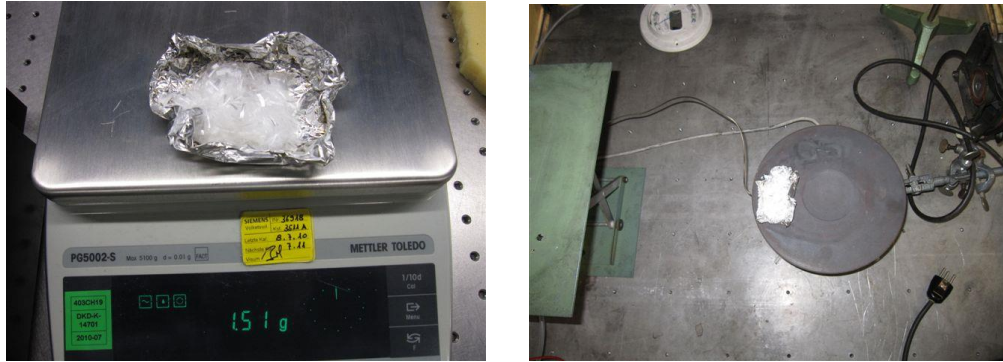


Abbildung 38: (links) 1.5 g Polypropylen vor dem Brandversuch auf der Heizplatte (rechts)

Folgende Messungen zeigen die Sensorantworten auf CO- und H₂-Sensor beim Verschmelzen von 1.5 g PP für M16 (temperaturunabhängig, Abbildung 39) und M18 (temperaturabhängig, Abbildung 40).

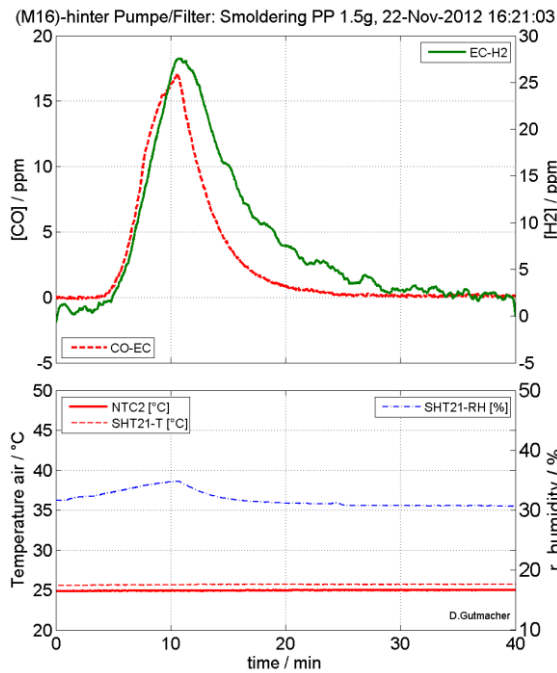


Abbildung 39: Schwelendes PP 1.5 g ohne Temperatureinfluss (an der Decke abgesaugt)

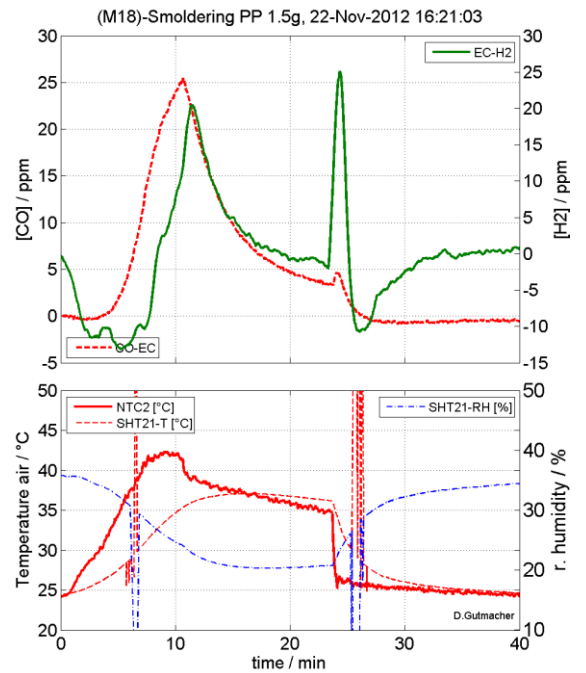


Abbildung 40: Schwelendes PP 1.5 g mit Temperatureinfluss (Lüftung ein ab 25min)

Die Sensoren ohne Temperatureinfluss messen eine Konzentration von 17 ppm CO und 27 ppm H₂ (Abbildung 39). Die Messung zeigt, dass bei der PP-Verschmelzung mehr H₂ als CO an der Decke messbar ist. Andere Brandmaterialien (z. B. Holz) weisen je nach Materialzusammensetzung normalerweise ein Verhältnis von 1 Teil H₂ zu 3 Teilen CO (~1/3) auf, dies wurde zuvor in der gleichen Brandkammer mit schwelendem Buchenholz gemessen. Schwelendes Polypropylen scheint hingegen mehr H₂ als CO zu produzieren. Da die Ethen(quer)empfindlichkeit des H₂-Sensors laut Datenblatt 80% beträgt, sollte im Nachhinein die auftretende Ethen Konzentration untersucht werden (sofern möglich), um einen möglichen Ethen-Anteil am Gesamtsignal einschätzen zu können. Gemäss Ergebnisse in Kapitel 3.2.7 der vorgestellten Verbrennungssimulation von PP und dessen Ethenproduktion im Verhältnis zur Wasserstoffproduktion, kann ein Verhältnis von ca. 3

% angenommen werden. Entsprechend kann eine zu vernachlässigende Menge an Ethen aus der PP-Verbrennung erwartet werden, welches das H₂ Signal des Sensors verfälschen könnte. Des Weiteren wird für diese Phase angenommen, dass weitere, möglicherweise auftretende Querempfindlichkeiten nur wenig Einfluss haben.

7.3.2 Verschmelzung von 8.5 g PP

Ein weiterer Versuch mit einer grösseren Menge an PP sollte nochmals das Ergebnis mit und ohne Temperatureinfluss bestätigen (Abbildung 41, Abbildung 42).

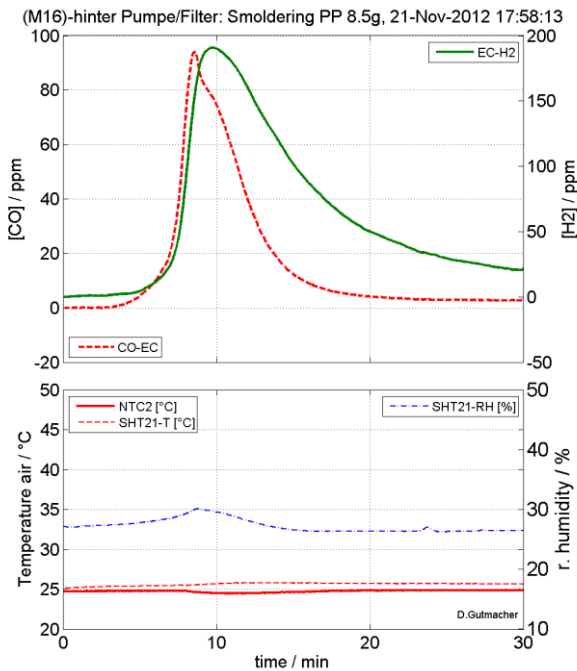


Abbildung 41: Schwelendes PP 8.5 g ohne Temperatureinfluss (an der Decke abgesaugt)

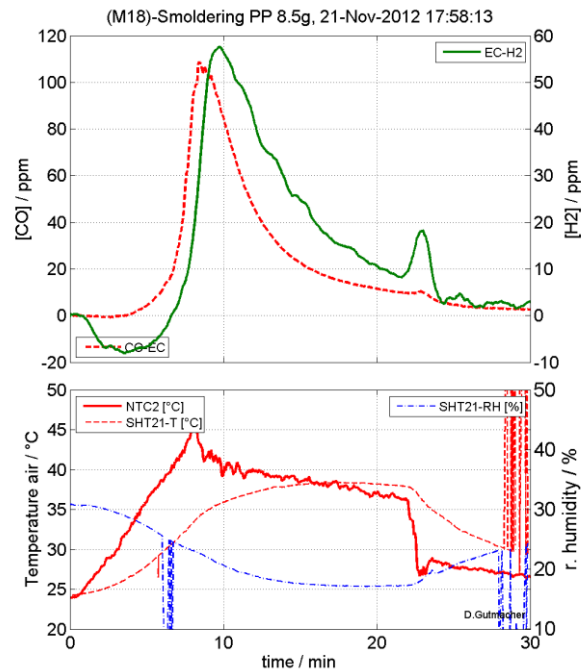


Abbildung 42: Schwelendes PP 8.5 g mit Temperatureinfluss (Lüftung ein ab 22min).

Aufgrund des Absaugens (1.3l/min) in der Nähe der Decke, wird eine höhere H₂ Konzentration für M16 erwartet. M18 befindet sich 10 cm unterhalb der Decke und nicht an der gleichen Position, sodass dieser Sensor geringere H₂ Konzentrationen misst. Ausserdem stört der Temperatureinfluss auf M18 stark (Abbildung 42) und das Ergebnis mit Temperatureinfluss kann so nicht verwendet werden.

7.3.3 Weitere Beobachtungen

- Die Aluminium-Folie ermöglicht einen schnellen Wärmeübertrag von der Heizplatte auf PP.
- PP schmilzt schnell und bildet eine stark dampfende Flüssigkeit
- Es tritt eine starke Rauchentwicklung auf (Abbildung 43)

- Die PP-Flüssigkeit verdampft schliesslich vollständig und restlos



Abbildung 43: Verschmelzen von PP mit starker Rauchentwicklung. Das PP verdampft vollständig und optisch rückstandslos.

7.4 Zusammenfassung der Voranalyse

- Die gewählten H_2 -Sensoren haben eine Auflösung von ca. 1 - 2 ppm und haben bis auf eine Querempfindlichkeit auf Ethen eine gute Selektivität.
- Die H_2 -Sensoren sollten möglichst weit von der Wärmequelle entfernt positioniert werden oder in einer Absaugvorrichtung bei konstanter Temperatur betrieben werden.
- Die gewählten CO-Sensoren haben eine Auflösung von ca. 0.5 ppm und haben eine Querempfindlichkeit zu $\sim 1/3$ auf H_2 .
- Die Messungen haben gezeigt, dass die Verschmelzung von bereits wenig Polypropylen (1.5g) in einem 0.6 m^3 Volumen eine gut messbare Menge H_2 entwickelt.
- Erwartet wird, dass bei ruhiger Luft im Versuchstollen, dass H_2 geradlinig vertikal aufströmen und sich in einer dünnen Schicht an der Decke verteilen wird. Das schwerere CO wird sich eher gleichmässig wie Luft in den oberen wärmeren Luftkissen in einem dickeren Polster verteilen. Das Absaugen in der Brandkammer direkt an der Decke hat höhere H_2 - als CO-Konzentrationen ergeben
- In einer späteren Phase sollte die Querempfindlichkeit des H_2 -Sensors auf Ethen näher untersucht werden.

8 Versuchsbrand im VSH

Ziel der Brandversuche im VSH war, einerseits die in der ersten Projektphase gewonnenen Ergebnisse im Realversuch zu verifizieren und andererseits die Simulation der Gasausbreitung zu begleiten und zu validieren.

Bereits im Vorfeld wurden aufgrund von Erfahrungen mit Grossversuchen und der Diskussion mit Experten Kriterien erarbeitet, die für den Versuchsaufbau, die Rahmenbedingungen und die Versuchsdurchführung bestimmend waren. Während zu Projektbeginn der Brandstollen im VSH als geeigneter Versuchsort erschien, stellte sich im Zuge der Simulationen und im Rahmen der Suche potentieller Messtechnikpartner für die Gasanalyse heraus, dass der grosse Querschnitt im Brandstollen eine zu grosse Verdünnung der Gase bewirken würde, sodass messbare Konzentrationen bereits ohne grosse Luftströmungsgeschwindigkeiten unterschritten würden. Eine Empfehlung der Projektbegleitkommission, die Versuche zunächst ohne Luftstrom durchzuführen, führte zur Wahl eines anderen Versuchsbereiches im VSH. Das Konsortium entschied sich für einen Bereich im Walser-Stollen. Dort waren die Luftströmung und Belüftung am besten kontrollierbar.

In den folgenden Abschnitten werden Methode, Messtechnik sowie Details zur Versuchsanordnung und Durchführung beleuchtet. Dem gasanalytischen Teil der Messtechnik ist das eigene Kapitel 7 gewidmet.

8.1 Methode

Nachdem aus den chemischen Simulationen klar geworden war, dass die Schmauchversuche mit Polypropylen durchgeführt werden sollten, stellte sich die Frage nach Form und Grösse der Kunststoffteile für den Versuch.

Zur Verfügung standen zweierlei Fasertypen, die aufgrund ihrer Grösse und Beschaffung in Frage kamen. In einer kleinen Serie von **zwei Vorversuchen** wurden beide Fasertypen verschmaucht, um erste Erkenntnisse über das Materialverhalten bei Erwärmung sowie die Messbarkeit von Temperaturverteilung und Masseverlust zu gewinnen.



Abbildung 44: Brandversuch im Walser-Stollen des VSH

In den folgenden Versuchen (**Hauptversuche**) kamen Gassensoren zum Einsatz, um die beim Erwärmen der PP Fasern entstehende H_2 -Gaskonzentration zu messen. Dabei wurden Messquerschnitte, die Empfindlichkeit der Sensoren sowie die Örtlichkeit (respektive der Querschnitt des Versuchsraumes, also der „Tunnelquerschnitt“) verändert. Ausserdem kamen verschiedene Wärmequellen zum Einsatz und die Menge der Fasern variierte.

Die Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft wurde so gut wie möglich auf 0 gehalten. Wenn man jedoch in Betracht zieht, mit welchem Aufwand bei Brandlabors jegliche Luftströmung im Brandraum vermieden wird, kann man davon ausgehen, dass bei allen Versuchen zumindest irgendeine Bewegung in der Luft war. Dies ist insbesondere bei der relativ schmal aufsteigenden Rauch- und Abgassäule wesentlich. So können die Messgeräte je nach dem, ob sie gerade die Abgassäule messen, oder gerade daneben, stark unterschiedliche Resultate liefern. Im Vergleich mit der Simulation lässt sich eine kleine räumliche Verschiebung leichter feststellen. Es waren sich jedoch alle Beteiligten (i. e. Simulationspartner, Messtechnikpartner, Versuchsleitung) darüber einig, dass diese Unschärfe keinen signifikanten Einfluss auf das Versuchsergebnis hat bei der Ansammlung der Brandgase an der Tunneldecke.

Zur Übersicht enthält folgende Aufzählung die für die Versuchsdurchführung massgebenden Parameter:

- PP Fasertypen
- Fasermenge
- Energiequelle (Heizplatte)
- Versuchsort (Querschnitt, Lüftungskontrolle)
- Sensoren (Art und Anzahl)
- Messquerschnitte
- Versuchsdauer und Unterbrüche (Beruhigen der Gassensoren)

8.2 Messtechnik

Ziel der Messungen war es, für die Computersimulation relevante Parameter zu gewinnen. Folgende Messgeräte waren im Einsatz.

8.2.1 Waage

Messbereich der Waage: 30 kg; Auflösung: 1 g

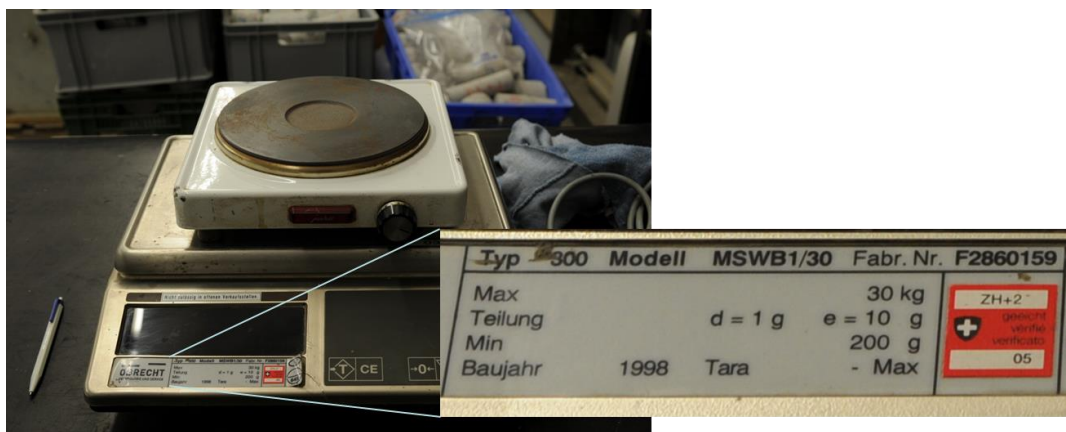


Abbildung 45: Heizplatte auf der Waage

8.2.2 Thermoelemente

Zur Messung der Temperatur kamen Thermoelemente des Types K zum Einsatz. Die

Messdaten wurden alle 5 Sekunden elektronisch mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Die Messprotokolle sind in Anhang I angefügt.

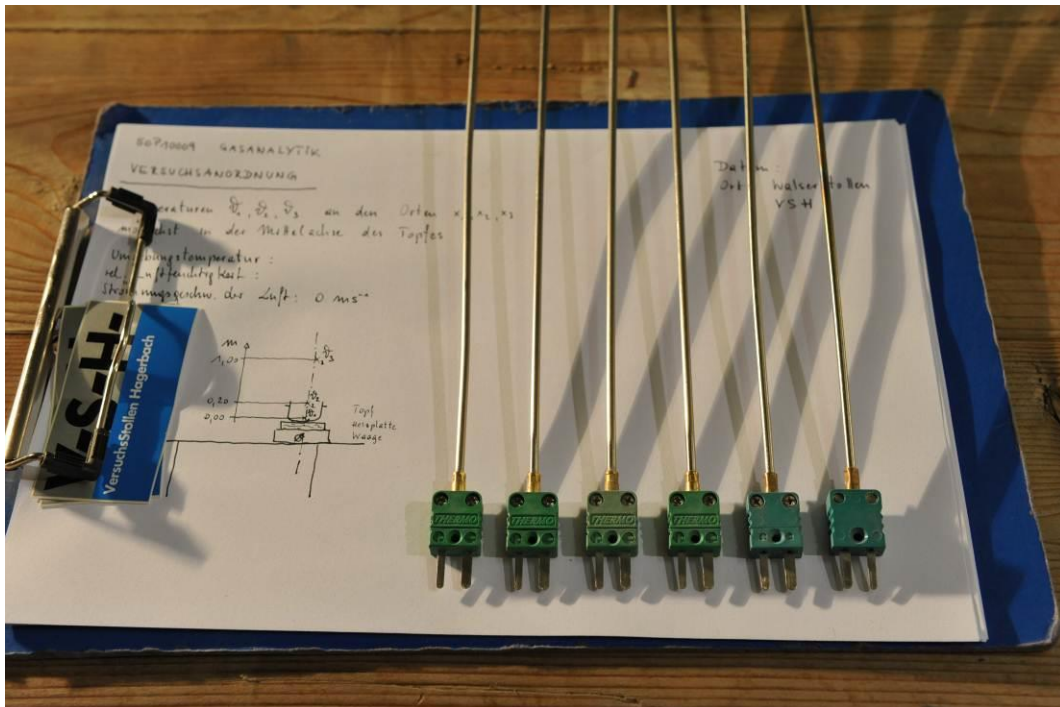


Abbildung 46: Sechs / acht Thermoelemente vom Typ K waren im Einsatz

8.2.3 Gassensoren

Die Gassensoren waren das Kernelement der Schmauchversuche. Daher ist diesem Thema das eigene Kapitel 7 gewidmet.

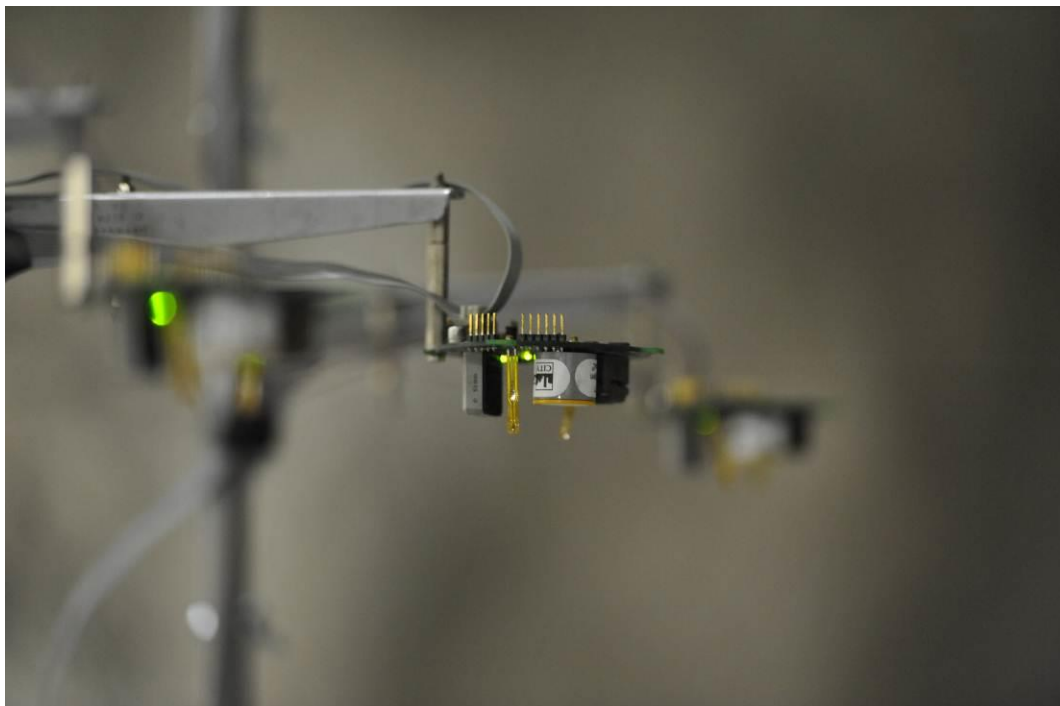


Abbildung 47: Gassensor (Magdalena), Experimentalmodell von Siemens AG

8.2.4 Kameras

Zur Dokumentation und Visualisierung der Rauchschwaden wurden Bilder und Videos aufgenommen. Dabei kamen eine Nikon D700 und eine Nikon D300s zum Einsatz.

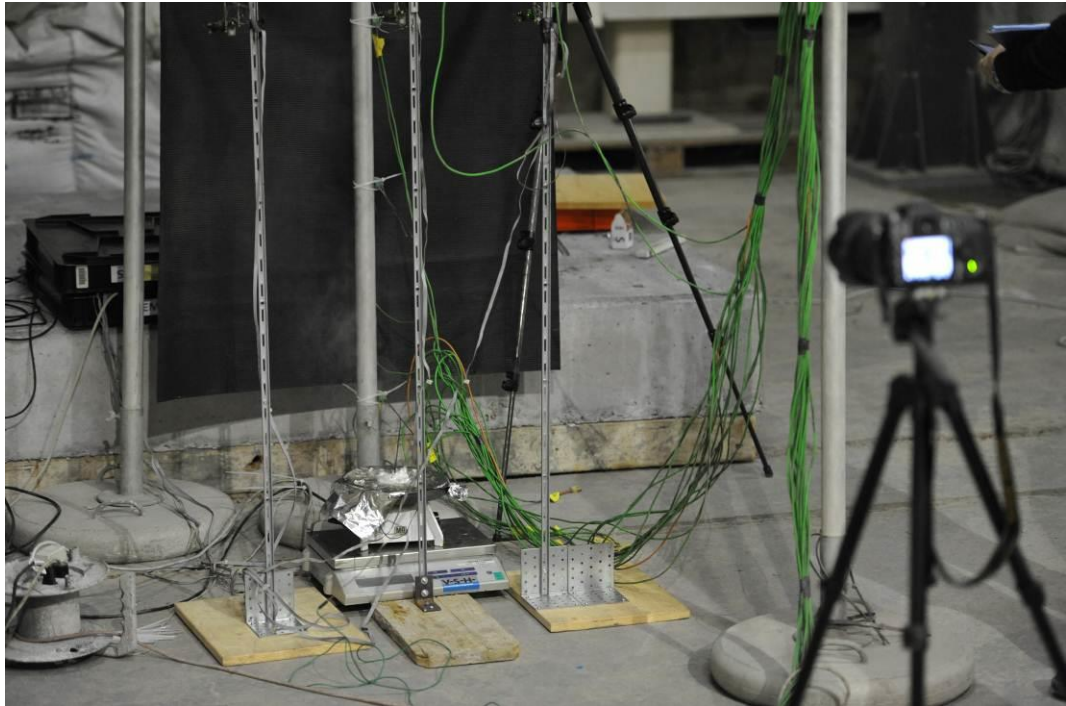


Abbildung 48: Aufnahme der Rauchschwaden mit einer Nikon D300s

8.3 Versuchsanordnung

Der Aufbau aller Versuche erfolgte nach demselben Schema. Eine bestimmte Menge an Polypropylen (PP) Fasern wurde auf einer Herdplatte zum Schmauchen, Schmelzen, und teilweise zum Brennen gebracht. Die Herdplatte stand auf der Waage, um während des Versuches den Masseverlust der PP Fasern überwachen zu können.

Die Temperatursensoren waren in bestimmten Abständen im Lot durch die Mitte der Herdplatte angeordnet, wobei jeder Messpunkt mit zwei Thermoelementen bestückt war. Gemessen wurden die Temperaturen an der Platte, in der Höhe von 58 cm über der Platte und in der Höhe von 100 cm über der Platte.



Abbildung 49: Platzierung der Thermoelemente in 0 cm, 58 cm, 100 cm Höhe

In manchen Versuchsreihen wurde noch ein weiteres Paar Thermoelemente in der Höhe von 250 cm angebracht, um die Temperaturen in der Nähe der oberen Gassensorebene aufzuzeichnen.

Die Gassensoren wurden in einer vertikalen Rasterebene ebenfalls im Lot durch die Herdplatte angeordnet. Die Rasterebene war aus drei Messketten aufgebaut. Eine Messkette – bestehend aus 4 Sensoren – war genau im Lot durch die Herdplatte montiert, die

beiden anderen im Abstand von ca. 30 cm jeweils links und rechts davon. X5 bis X19 bezeichnet den Ort der Gassensoren „Magdalena 5“ bis „Magdalena 19“. Die paarweise angeordneten, kleinen Nullen entlang der Symmetrie-Achse bezeichnen die Lage der Thermoelemente.

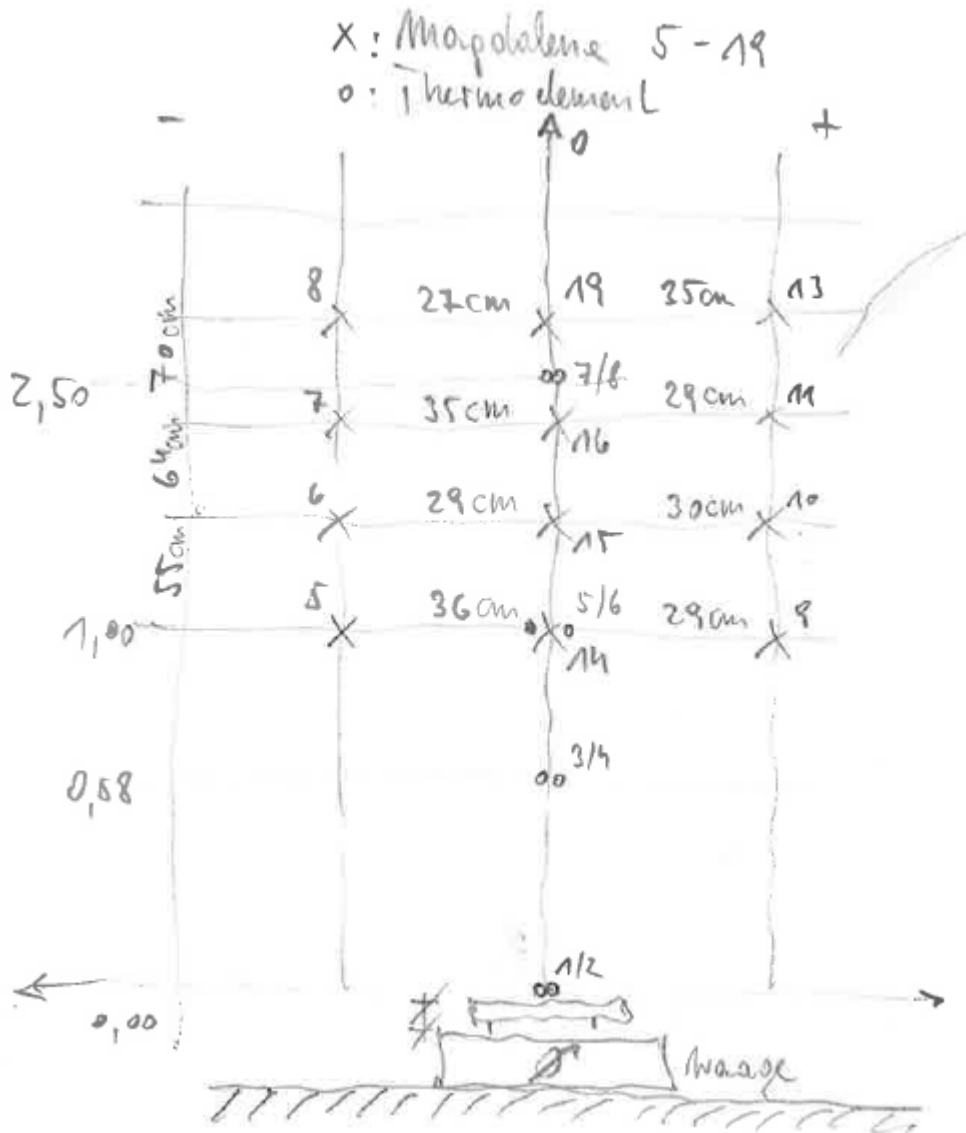


Abbildung 50: Versuchsanordnung bestehend aus Herdplatte, Waage, 8 Thermoelementen und 12 Gassensoren

8.4 Polypropylen-Fasern

Es war ein Resultat der chemischen Simulation und Gesprächen mit Zulieferern der Fahrzeugindustrie, dass Polypropylen das Material sei, das für die Frühphase der Fahrzeugbrand-Entstehung repräsentative Gase freisetzen sollte. Um eine genaue Dosierung zu ermöglichen und eine möglichst homogene Verdampfung sicherzustellen, wurde Polypropylen in der Form von Fasern gewählt. Zwei Arten von PP Fasern standen zur Verfügung, die sowohl in Gewicht und Größe als auch vom Material her sehr unterschiedlich waren. In den Vorversuchen wurde die feinere Faser als die geeignete ermittelt.



Abbildung 51: Polypropylen Fasertypen



Abbildung 52: Feine PP Fasern mit einer Länge von 7 mm für die Schmauchversuche

Aufgrund der leichteren „Verschm Rauchbarkeit“ der feinen Fasern, und aufgrund von Unklarheiten bezüglich der materiellen Zusammensetzung der groben Fasern wurden die feinen Fasern für die Versuche als besser geeignet eingeschätzt.

8.5 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden an 5 Versuchstagen im Zeitraum vom 27. September 2012 bis zum 11. Dezember 2012 an drei verschiedenen Orten in der Stollenanlage des VSH durchgeführt. Durch den Ortswechsel war es möglich, unterschiedliche Raumverhältnisse als

geometrische Randbedingung zu realisieren. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Versuche.

Tabelle 14: Übersicht der Versuche im VersuchsStollen Hagerbach

Datum	Versuch	Zweck	Ort
27.09.2012	Erster Vorversuch	Testlauf der Temperaturmessung, Schmauchverhalten der Fasern	Walser-Stollen Hauptraum
01.10.2012	Zweiter Vorversuch	Testlauf der Temperaturmessung, Schmauchverhalten der Fasern	Betonanlage
28.11.2012	Erster Hauptversuch	Temperaturmessung, Optische Aufzeichnung der Rauchschwaden, H ₂ Detektion	Walser-Stollen Hauptraum
29.11.2012	Zweiter Hauptversuch	Temperaturmessung, Optische Aufzeichnung der Rauchschwaden, H ₂ Detektion	Walser-Stollen Hauptraum
11.12.2012	Dritter Hauptversuch	Temperaturmessung, Optische Aufzeichnung der Rauchschwaden, H ₂ Detektion	Walser-Stollen Zugang

Die folgenden 5 Abschnitte beinhalten eine kurze Zusammenfassung der Versuche. Zusätzliche Informationen finden sich in den handschriftlichen Versuchsprotokollen im Anhang I.1. Ebenso die Temperaturverläufe im Anhang I.2.

8.5.1 Erster Vorversuch

Im ersten Vorversuch bestand das Ziel im Testlauf für die Temperaturmessung in verschiedenen Höhen und dem Abbrennverhalten der PP-Fasern. 35 Gramm Micro Fibers wurden in einer Pfanne auf einer Herdplatte erhitzt. Die bei diesem Versuch verwendete Pfanne wurde bis max. 150 °C heiss, was sich im Nachhinein als zu kühl herausstellte. Die Fasern schmolzen zu einem Gel, es wurde lediglich ein Masseverlust von 2 Gramm gemessen. Die Temperaturmessung verlief unproblematisch.

8.5.2 Zweiter Vorversuch

Der zweite Vorversuch fand bei der Betonanlage statt unter Verwendung eines Gasherdes für die Wärmezufuhr. Abgesehen von der Beeinflussung der geplanten Gasmessung durch die Gasfeuerung war die Wärmezufuhr in diesem Fall in Ordnung. Ein Vergleich der groben mit den feinen Fasern ergab einen eindeutigen Vorteil zugunsten der feinen Fasern.

8.5.3 Erster Hauptversuch

Beim ersten Hauptversuch konnte die Montage der Verkabelung optimiert werden, die bei den ersten Messungen die Gewichtsmessung der PP Fasern beeinflusste. Ebenso lernte das Projektteam mehr über das Strömungsverhalten der Rauchschwaden im Walser-Stollen-Hauptraum. Die visuelle Erfassung der Rauchschwaden war erfolgreich, jedoch konnte kein H₂ detektiert werden.

8.5.4 Zweiter Hauptversuch

Der zweite Hauptversuch war sehr umfangreich und beinhaltete 3 Serien. Der Gewichtsverlust war nun gut messbar und protokollierbar. Das Temperaturverhalten im Raum (Abkühlung nach Ende einer Serie) war bekannt. Es war jedoch nicht möglich, H₂ verlässlich zu detektieren, aufgrund der Temperaturabhängigkeit der H₂ Sensoren und der Verdün-

nung der doch geringen H₂ Konzentration aus 10 g PP (Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55, Abbildung 56)

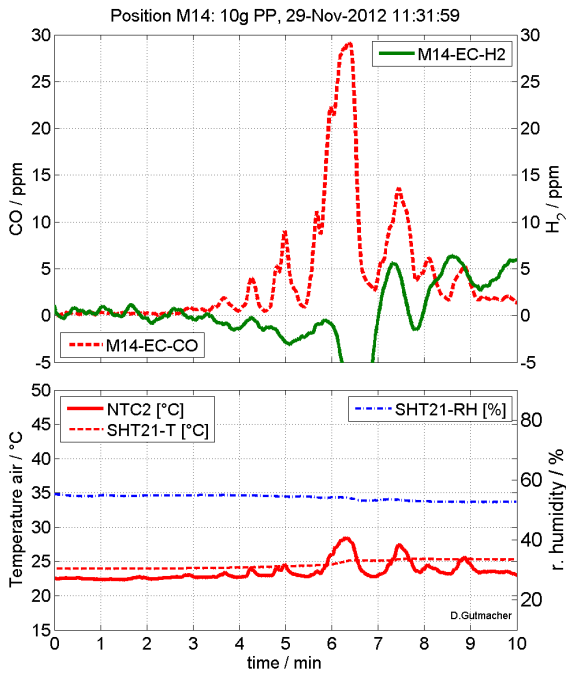


Abbildung 53: Position X14, 1.00 m Entfernung von Heizplatte: Negative Signalrichtung des H₂-Sensors aufgrund von +6 °C Temperatureinfluss. CO hat hier die höchste Konzentration von 29 ppm.

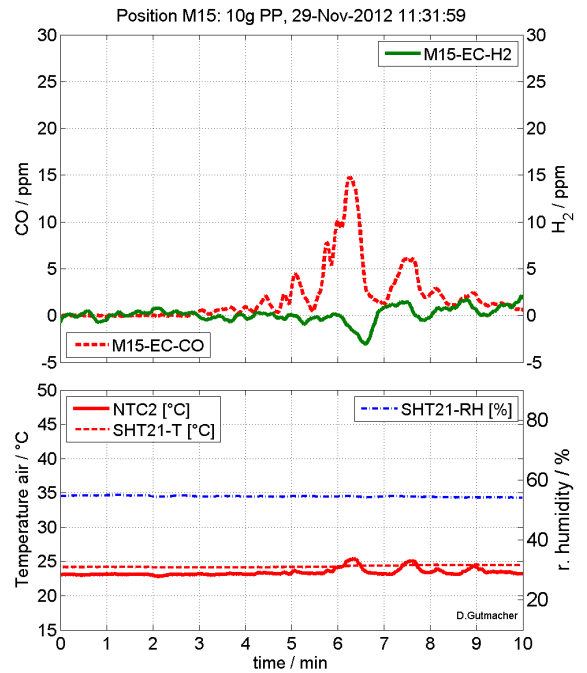


Abbildung 54: Position X15, 1.55 m Entfernung von Heizplatte: CO verdünnt sich wie erwartet und beträgt 15 ppm. H₂ wieder nicht messbar aufgrund des Temperatureinflusses und Verdünnung.

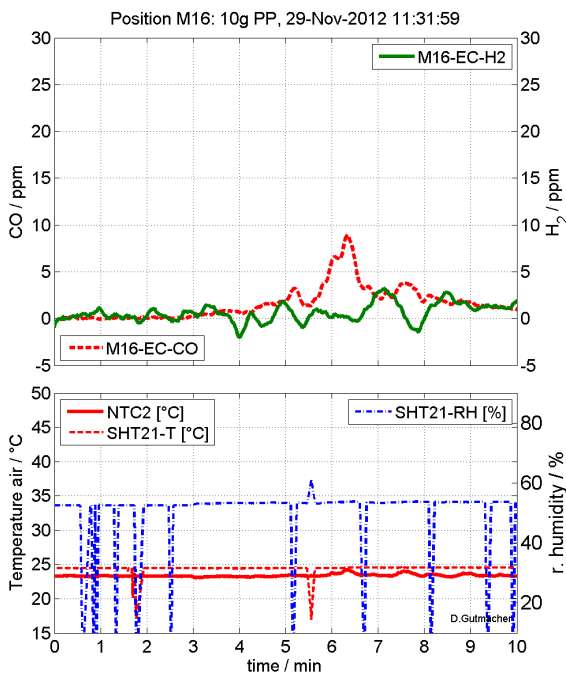


Abbildung 55: Position X16, 2.20 m Ent-

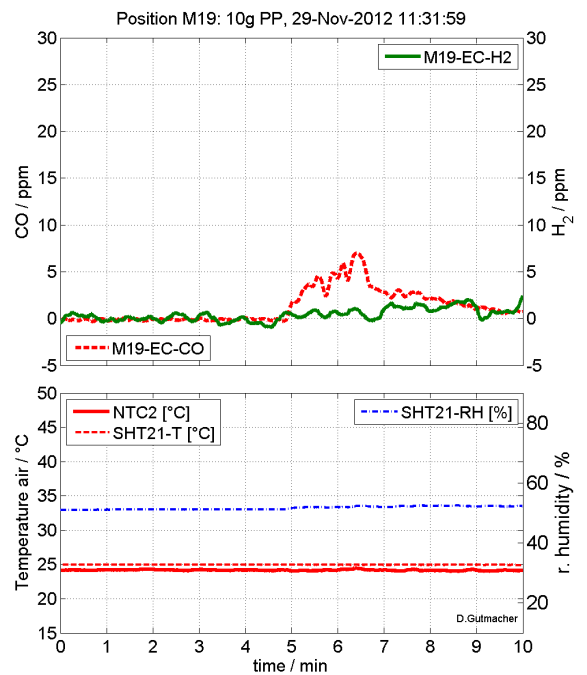


Abbildung 56: Position X19, 2.90 m Ent-

fernung von Heizplatte: CO verdünnt sich wie erwartet weiter. H_2 nicht messbar oder zu geringe Konzentration..

fernung von Heizplatte: Wenig Temperatureinfluss, leichter Anstieg von 1-2ppm H_2 , jedoch im Rauschen.

Mögliche Schlussfolgerungen aus dieser Serie:

- H_2 sammelt sich an der Decke, im aufwärts strömenden Bereich ist die Konzentration zu gering.
- Ein Vergleich mit der Brandkammer (Kapitel 7.3) liess vermuten, dass die Konzentration zu gering ist, um gemessen zu werden.
- Die Temperaturverteilung ist gut messbar
- CO ist messbar, nicht aber H_2

Die nächste Versuchsserie wurde daraufhin mit geänderten Fasermengen und einer Absaugung der Gase unterhalb der Decke zu den Sensoren vorbereitet.

8.5.5 Dritter Hauptversuch

Der 3. Hauptversuch fand im Zugangsbereich zum Walser-Stollen statt, wo ein kleinerer, niedrigerer Querschnitt besteht. Die Absaugung für die Gasanalyse wurde direkt unter der Decke platziert. In diesem Fall wurde erwartet, dass der Wasserstoff unter Absaugung besser zu detektieren ist und dass an der Decke höhere Konzentrationen zu messen sind.

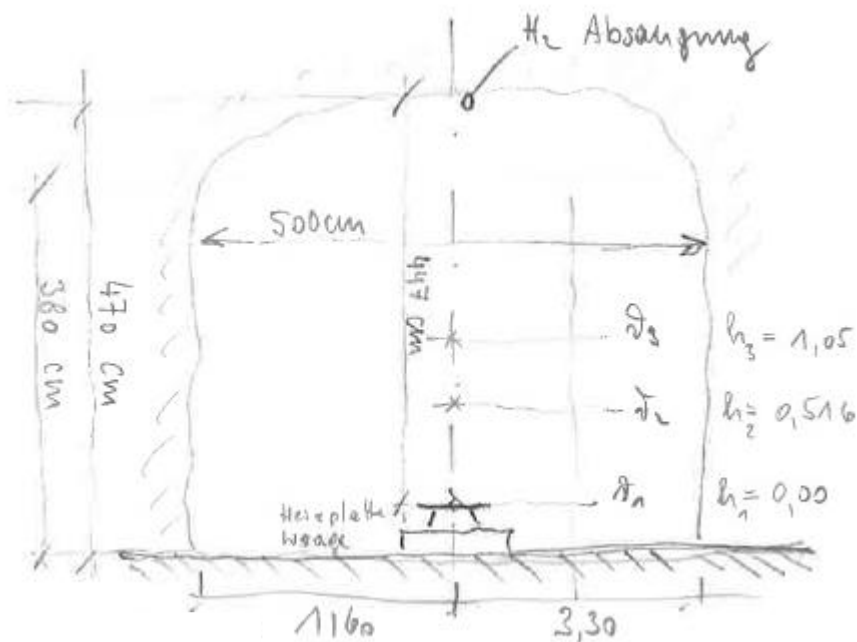


Abbildung 57: Geometrische Verhältnisse im 3. Hauptversuch

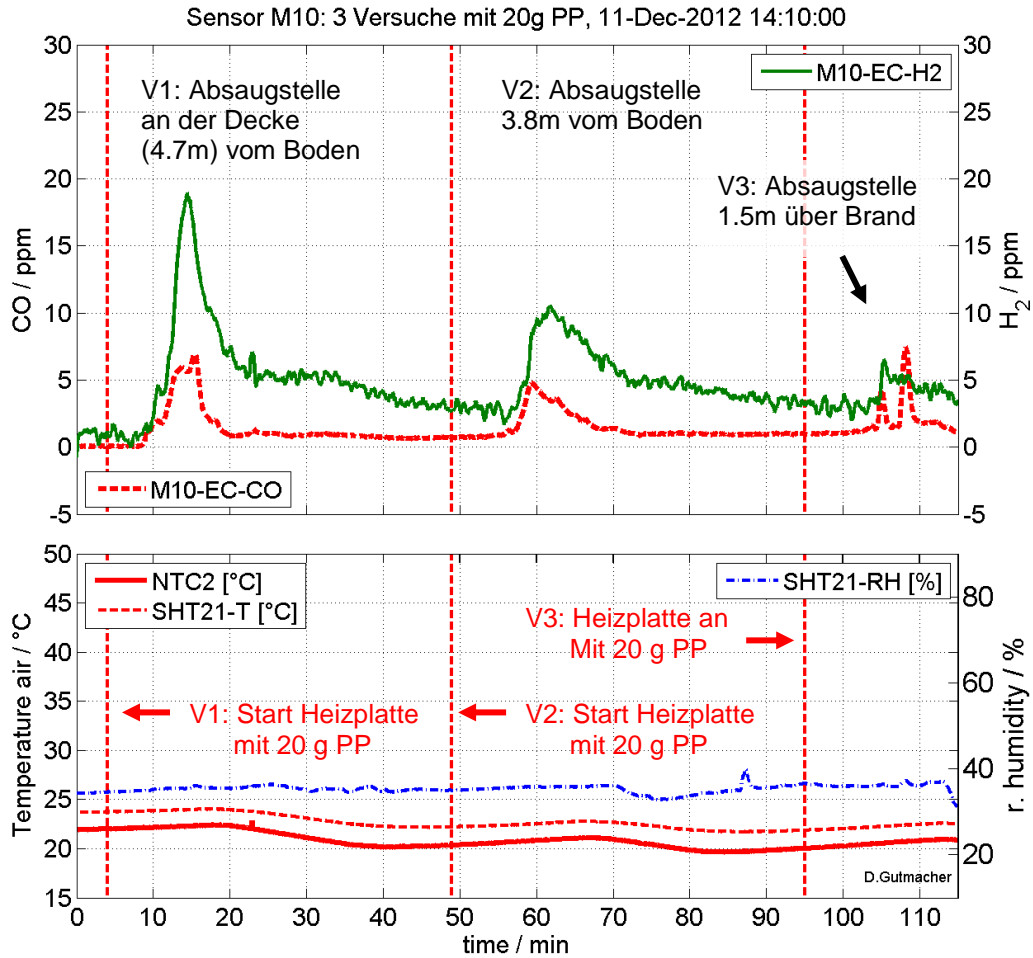


Abbildung 58: Verschmelzung von 20 g PP im 3.Hauptversuch, wobei der gleiche Versuch 3 mal wiederholt wurde mit verschiedenen Absaugstellen ohne die Aufzeichnung zu unterbrechen: V1: Absaugstelle unterhalb der Decke, V2: Absaugestelle 4.05m vom Boden entfernt, V3: Absaugstelle 1.5m von der Brandquelle entfernt. Der Konzentrationsgradient von höheren Konzentrationen an der Decke wurde zuvor nicht erwartet. Ein Grund für die niedrige Konzentration über der Brandquelle, war die unsymmetrische Ausbreitung der Rauchgase (optische Beurteilung).

In vier Versuchsserien an diesem Tag gelang es eindeutig, H₂ zu detektieren. Es wurde beim Verschmelzen von 20 g Polypropylen eine maximale Konzentration von 20 ppm H₂ an der Decke gemessen. Die gemessenen Konzentrationen sowie die geometrischen Rahmenbedingungen belegen aber eindeutig, dass mit dem momentan verfügbaren Setup zur Zeit kein sinnvoller Versuch bezüglich H₂ Detektion in einem Tunnelquerschnitt in der Grösse eines Strassentunnels mit einer einigermaßen realistischen Luftstrombewegung durchgeführt werden kann. Dazu sind die Konzentrationen, wie sie in diesen Versuchsserien verwendet wurden, bei weitem zu gering.

9 Schlussfolgerungen

9.1 Zielerreichung

Die im Projektplan genannten Ziele konnten teilweise erreicht werden. So konnten mehrere potentielle Brandmarker identifiziert werden und einer davon im realen Brandfall validiert werden. Auch die prospektiven Strömungssimulationen der Brandgase lieferten nachvollziehbare Resultate. Die laufenden Ergebnisse ergaben, dass der Projektplan situativ angepasst werden musste. So zeigten die Strömungssimulationen, dass die Brandgaskonzentrationen im ursprünglich geplanten Brandexperiment im Grosstunnel keine mit verfügbaren Sensoren detektierbaren Konzentrationen ergeben würden. Daher wurden die Experimente in einen enger abgeschlossenen Tunnelraum verlegt.

Dennoch konnten die Strömungssimulationen mit den Messergebnissen nicht wirklich in Übereinstimmung gebracht werden. Das lag auch daran, dass die Sensoren nahe an ihrer Nachweisgrenze arbeiteten. Dennoch funktionierte das Konzept des Brandanzeigers prinzipiell, was auch der eigentlichen Auslegung des Sensors entsprach, nämlich der frühzeitigen Branddetektion in Räumen.

Die eingesetzten Sensoren konnten ihren Zweck in den Versuchen befriedigend erfüllen. Als Sensor für den vorgeschlagenen Tunnelleinsatz kommen sie in der vorliegenden Form aber nicht in Frage. Diese Sensoren wurden bisher auch im Hinblick auf andere Kriterien entwickelt.

Aufgrund dieser Resultate konnten die Messungen nicht zur Kalibrierung und Validierung der Simulationen dienen. Auch musste das Ziel der optimalen Ermittlung der Sensorplatzierung, sowie der Extrapolation auf andere Tunnel- und Verkehrssituationen unter diesen Umständen fallen gelassen werden.

Als Ersatzprodukt wurden die technischen Anforderungen an einen Sensor ermittelt, der eine Tunnelbrand-Früherkennung im Sinne des Projekts ermöglichen würde, allerdings noch ohne deren konkrete Integration in einen Tunnel mit seinen Warnsystemen. Ebenfalls wurden Möglichkeiten aufgespürt, derartiger Sensoren habhaft zu werden.

9.2 Offene Fragen

Die Experimente und Simulationen konnten nicht wirklich in gute Übereinstimmung gebracht werden, auch wenn deren Aussagen keineswegs widersprüchlich sind. Die Gründe dafür böten Raum für viele spekulative Interpretationen. Wegen der beschränkten Faktenlage sind kaum gesicherte Aussagen möglich, weshalb wir darauf verzichten.

Als weitere Unbekannte hat sich neben den Konzentrationen der Brandgaskomponenten auch deren Abhängigkeit von der Temperatur und damit vom Brandfortschritt herausgestellt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die Zusammensetzung der entstehenden Gase im Lauf der Temperaturzunahme ändern. Dieser Aspekt wurde bisher noch gar nicht berücksichtigt.

9.3 Ausblick

Das Konzept eines Brandanzeigers bei Tunnelbränden hat sich bisher als gangbar gezeigt und sollte weiter verfolgt werden. Allerdings sind passende Gassensoren nicht leicht verfügbar. Es wäre sicherlich interessant, deren Eignung für das vorgestellte Thema in einer isolierten Versuchsreihe näher zu untersuchen. Unter Umständen liessen sich die ursprünglich vorgesehenen Grossversuche mit Gasmessgeräten dieses Typs wiederholen.

Risikoreicher, aber möglicherweise auf lange Sicht günstiger, könnte die Entwicklung eines spezifischen, hochempfindlichen chemisch/biologischen Gassensors sein. Als Vergleich: einfache Gassensoren auf Halbleiterbasis sind im Elektronikfachhandel bereits für

ca. CHF 50.- erhältlich [Conrad2011Katalog].

Kurzfristig von Interesse wäre sicherlich, die vorgestellten Befunde experimentell weiter zu bestätigen und noch offene Wissenslücken zu schliessen, insbesondere die Menge der freigesetzten entscheidenden Brandgase je nach brennendem oder schwelendem Stoff in Abhängigkeit der Situation und insbesondere der Temperatur.

Danksagung

Für die Bereitstellung der Gassensorik und die zugehörige Auswertung zur Brandgasdetektion bedanken wir uns bei Daniel Gutmacher (Doktorand, Lehrstuhl für Gassensoren, IMTEK Universität Freiburg i. Br.) und Dr. Ulrich Hoefler (Building Technologies Division der Siemens Schweiz AG).

Anhänge

I	Messprotokolle.....	88
I.1	Versuchsprotokolle.....	88
I.2	Temperaturmessprotokolle	93

I Messprotokolle

I.1 Versuchsprotokolle

SOP10009 GASANALYTIK

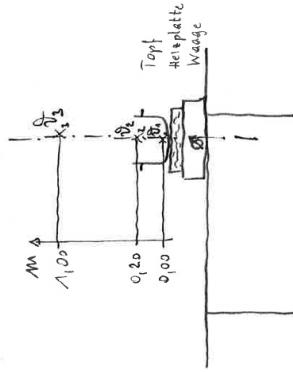
VERSUCHSANORDNUNG

Temperaturen $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ an den Orten x_1, x_2, x_3 möglichst in der Mittelechse des Topfes

Umgebungstemperatur:

rel. Luftfeuchtigkeit:

Strommengen der Luft: $0 \text{ m}^3/\text{s}$



Datum: 27.9.2012
Ort: Walsertal

VSH

Vorversuche: Düngh. 24°C.

(1) - 35g micro fibres

Einschalten der Heizplatte auf Stufe 12

- 11m M: 38

- Filmbild - 9sec

- erste Fasern schmelzen um:

12:40 Stromunterbruch => Waage aus

-> neues TGA: 848g => Flamme nach 815g

- Flamme liegt nicht so weit oben auf Tefle

12:42:20 Waage springt auf 847g

43:00 Fasern bewegen sich

45:00 sichtbare Rauchentwicklung

45:30 Bild M (9227), 846g

48:00 845g/846g: kein wirklicher Masseverlust

- Phasen schmelzen ein wenig fortblöhen gel zusammen

12:57 Messsende, 2g Masseverlust

$T_{max} \approx 150^\circ\text{C}$ in der Flamme

50 P10009 GASANALYTIK

Datum 1.10.2012
Ort: Betonanlage
VSH2. Vorversuch: $T_{\text{Umgeb.}} 17,2^\circ\text{C}$

- 35 g micro fibres

Einschalten des FBK - Gasherdes auf max. Leistung um 09:50

9:58:26: Fasern sind zu farblosem Gel verschmolzen

10:03:00: Entzünden der Brandgase (mit Feuerzeug), danach deutlicher Temp.-Anstieg und sauberere Verbrennung. Fast keine Rauchentwicklung mehr sichtbar

$$T_{\text{max}}^{(10)} = 597,3^\circ\text{C} \quad (\text{bei } 10:26)$$

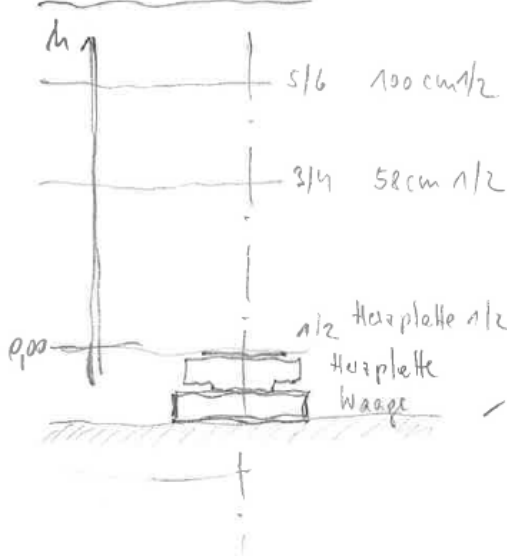
$$T_{\text{max}}^{(15)} = 335,3^\circ\text{C} \quad (\text{bei } 10:05)$$

$$T_{\text{max}}^{(20)} = 27,3^\circ\text{C} \quad (\text{bei } 10:27)$$

- 35 g grobe Fasern ($l = 53 \text{ mm}$): Die groben Fasern verbrennen bei weitem nicht so sauber und rückstandslos wie die PP micro fibres.

Brandversuch ab 10:19:00 (ohne vollständiges Abkühlen der Pflanzen vorher)

Schmuckversuch 3



50P/10008

28/11/12

MWte, D. G. Schneider

TODO:

○ Verkabelung fixieren wg. Gewichtsmessung

7/8: Sensoren am Boden für Umgebungstemperatur

Start: 15:15

Ende: 16:00

Beobachtungen:

- (i) Achtung auf Lüftung: alle vier Türen (2 vorne, 2 hinten) müssen geschlossen sein. Alle Lüfter müssen ausgeschaltet sein
- (ii) Heizplatte ist am Rand heißer als in der Mitte
- (iii) Zum Lüften alle 4 Türen öffnen + fixieren, dann Stroms-lüftung einschalten

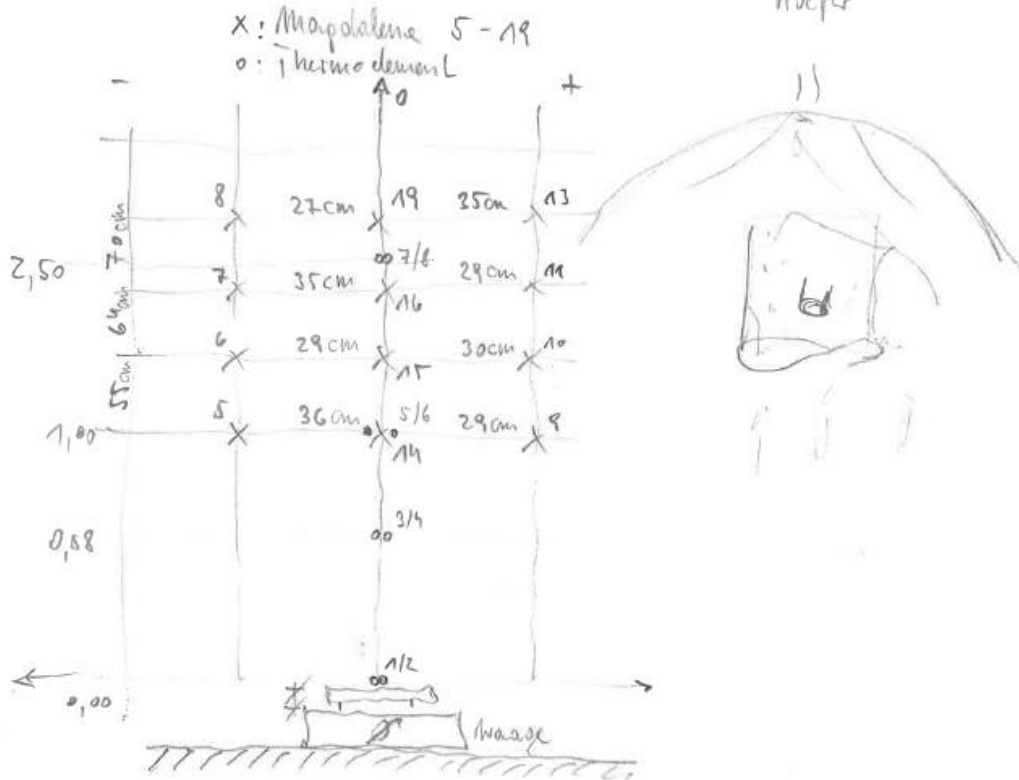
- 2 -

50710009

29/11/12

CL, MWK, D gutm
Hofer

Schmardversuch 4:



Naage VSK: $h = 7 \text{ cm}$

Heizplatte VSK: $h = 7 \text{ cm}$ / Stufe 12

PP Fasern fern: 10g

Filter: D3005

Bohrer: D700

Versuchsbeginn: 11:32:00 /

file: 2012-11-29_ASTRA Gasanalytik_01

Ende: 11:43:00

Geruchsverlust gut messbar

nach dem Versuch: durchlöcher

$\vartheta_{7/8} : 20^\circ \text{C}$

Heizplatte Siemens: $h = 13 \text{ cm}$

10g Fasern

Stufe 3

Versuchsbeginn: 13:44:00

file 2012-11-29_Astro Gasanalytik_02

- u -

Versuchsbeginn: 14:58:00 15:10

file - u - -03

Sensoren 5/6: $h = 106 \text{ cm}$ / Plastikhaube über Sensor M14

kein H_2 messbar

Schlussfolgerungen:

- > H₂ war nicht meßbar mit der heutigen Meßanordnung
- > H₂ sammelt sich ev. an der Decke, Konzentrationen am Meßquerschnitt zu klein.
- > Der Vgl. mit Smokebox (1x1x1 - ca.) läßt die Vermutung zu, daß Konzentrationen << 1 ppm waren
- > O₂ Verteilung gut meßbar, siehe Protokoll
- > CO ist meßbar

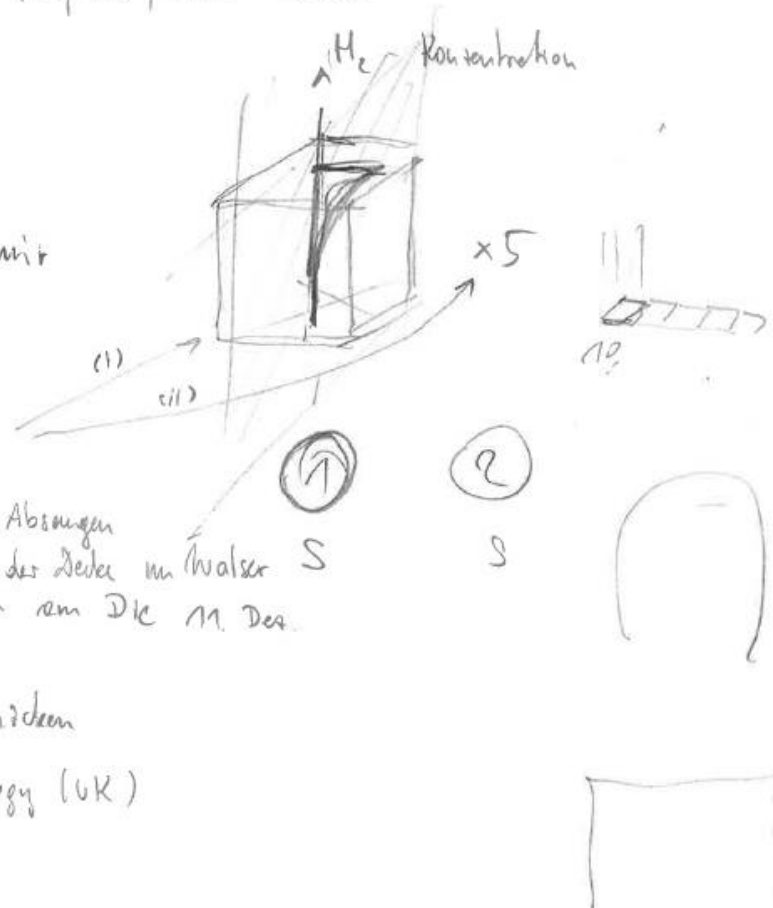
Weiteres Versuchen:
 nächste Simulationen mit folgenden Abmessungen:

- down: 100g in 180 sec
- neu: 10g in 600 sec
- 2,5g in 600 sec

=> nächster Versuch - mit Absaugen
 - unter der Decke mit Wasser
 - Balken um Dicke 11. Des.

To Do:

- o O₂-Verteilung verschärfen
- H₂ Sensor von Citytechnology (UK)



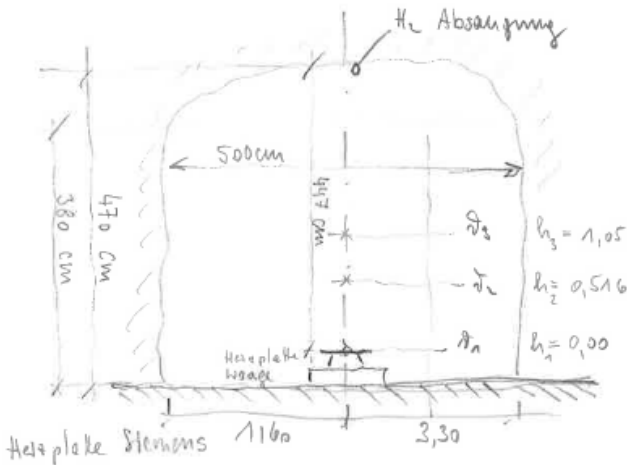
© MWTC
I.2

50P10009 GASANALYTIK

11.12.2012

D Gutmacher
M Nieböhle

Waldershausen VStH



VSH:

D₁ = Sensor 1/2

D₂ = #3/4

D₃ = 5/6



Stromans. CO, H₂, Feuchte

1 Sensor vor Pumpe : M13

1 hinter : M10

Länge des Absaugschlauches : L = m

Innendurchmesser : d =

Raumtemp. vor Versuch D₀ = 23°C

Versuch 1. Start um 13:38

10 g Fasern

Bitol 627: Meßdaten V1

V2 = V1 mit Beschädigung

Start um 14:14:00

20 g Fasern

14:24:26 selbstentzündung

14:25:39 Brand aus

H₂ wurde in höherer Konzentration gemessen (20 ppm)

Sensor brandet ca 30 min, bis er selbst wieder startwert zeigt. (bei laufender Lüftung), ev. steht die H₂ See an der Decke

Frage an CBer:

(i) wie viel g PP Fasern ergeben in welcher Zeit unsere angenommenen Konzentrationen

V4: Gasabsaugung bei +8cm 105 (bei D₀)

20 g Fasern

Versuchsbeginn: 15:45:00

15:57:25 Entflammung

15:58:15 Feuer aus

V3: Gasabsaugung 63cm unter der Decke

20 g Fasern

Versuchsbeginn: 14:58:00

10:30 → 15:11:48 selbstentzündung der Fasersuppe

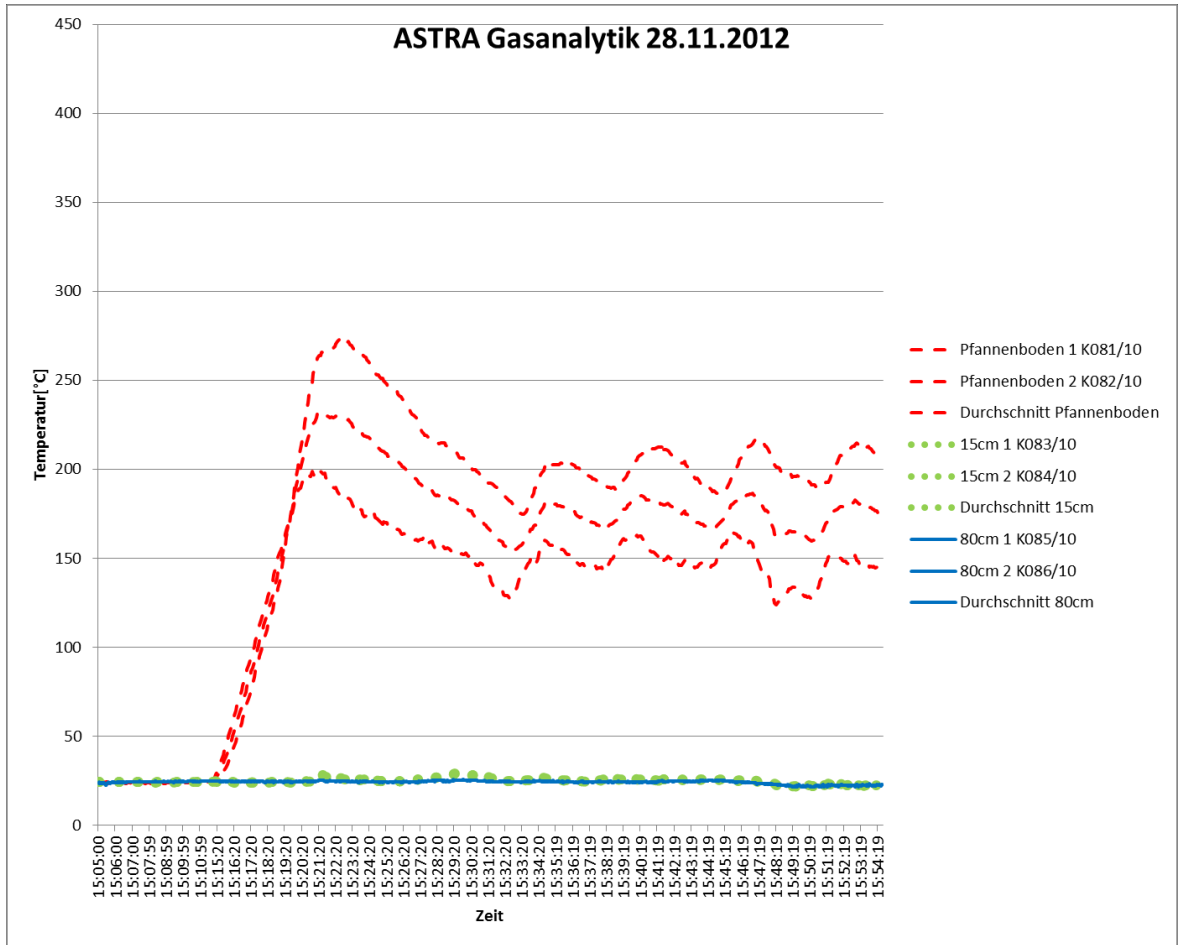
11:10 → 15:12:18 Brand aus

↑ 15:14 Ende

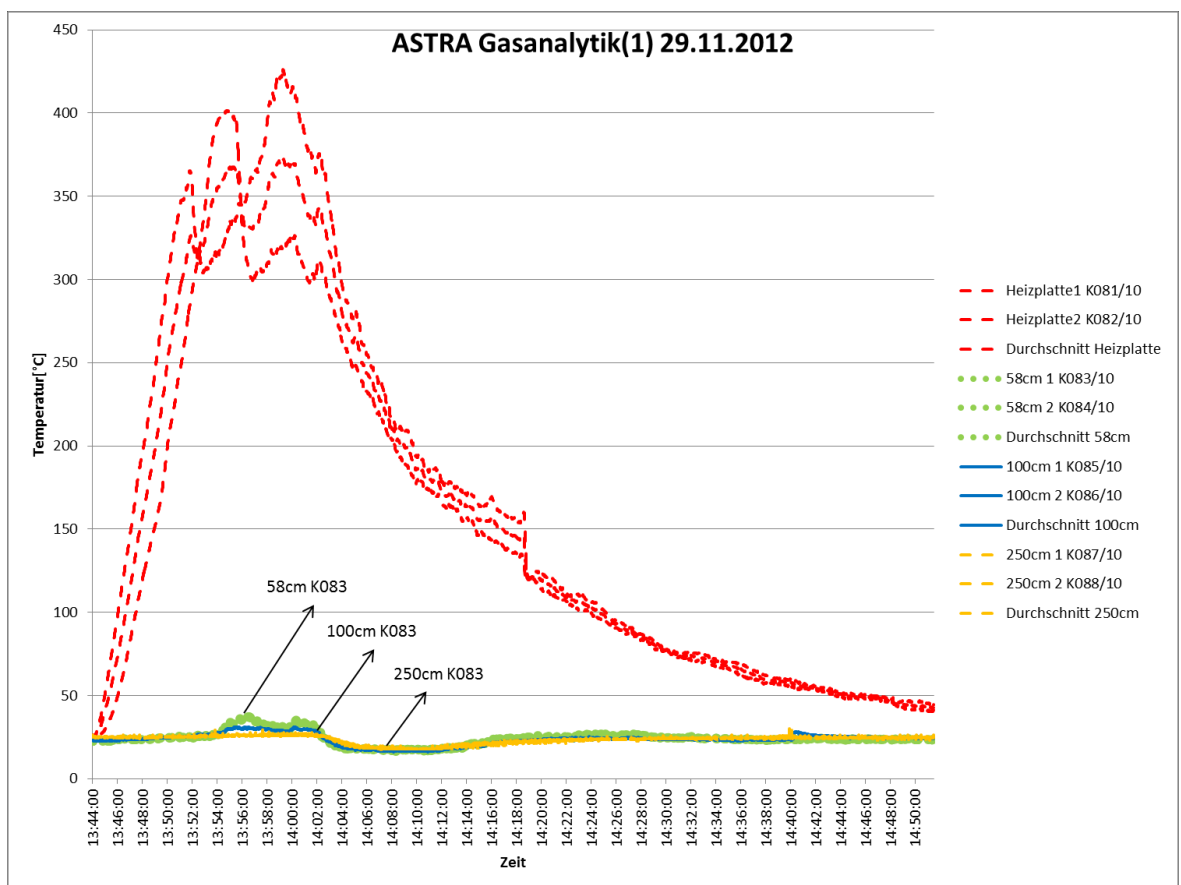
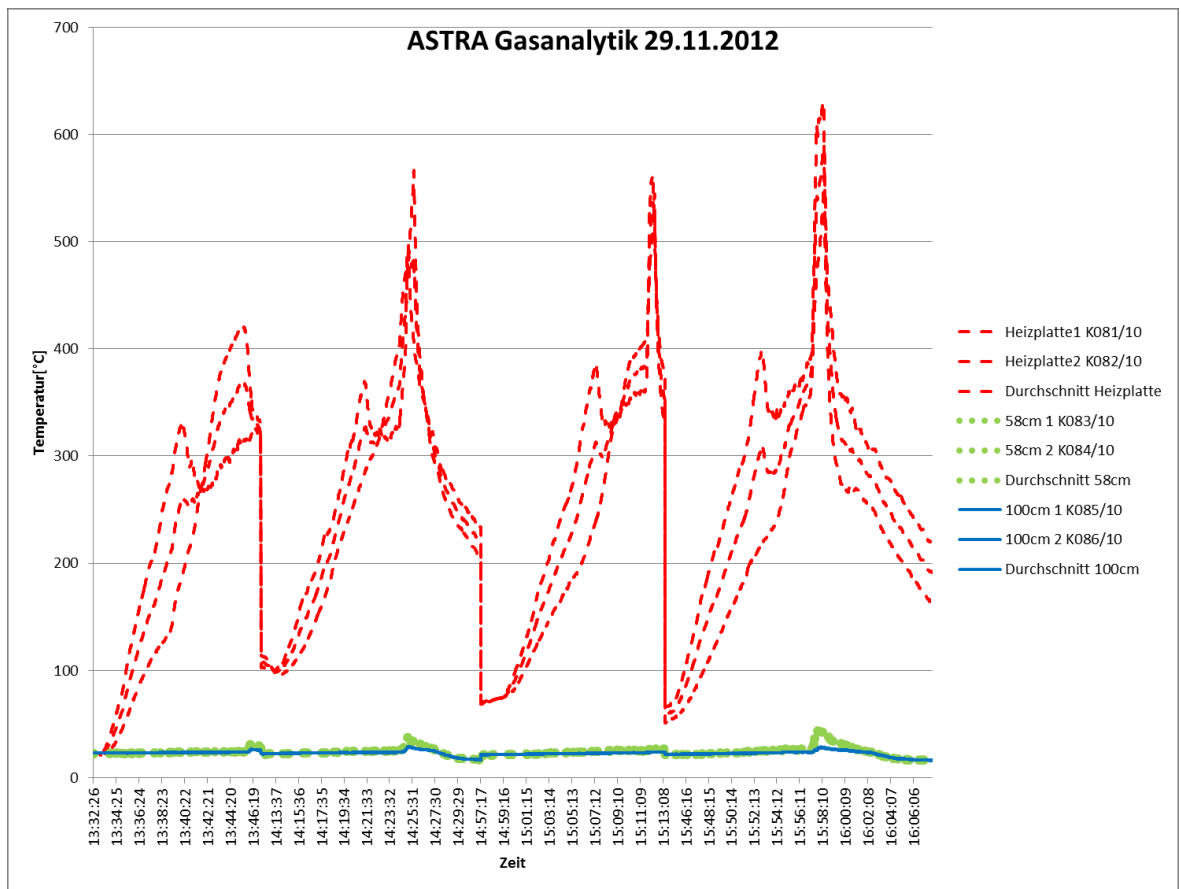
Flam

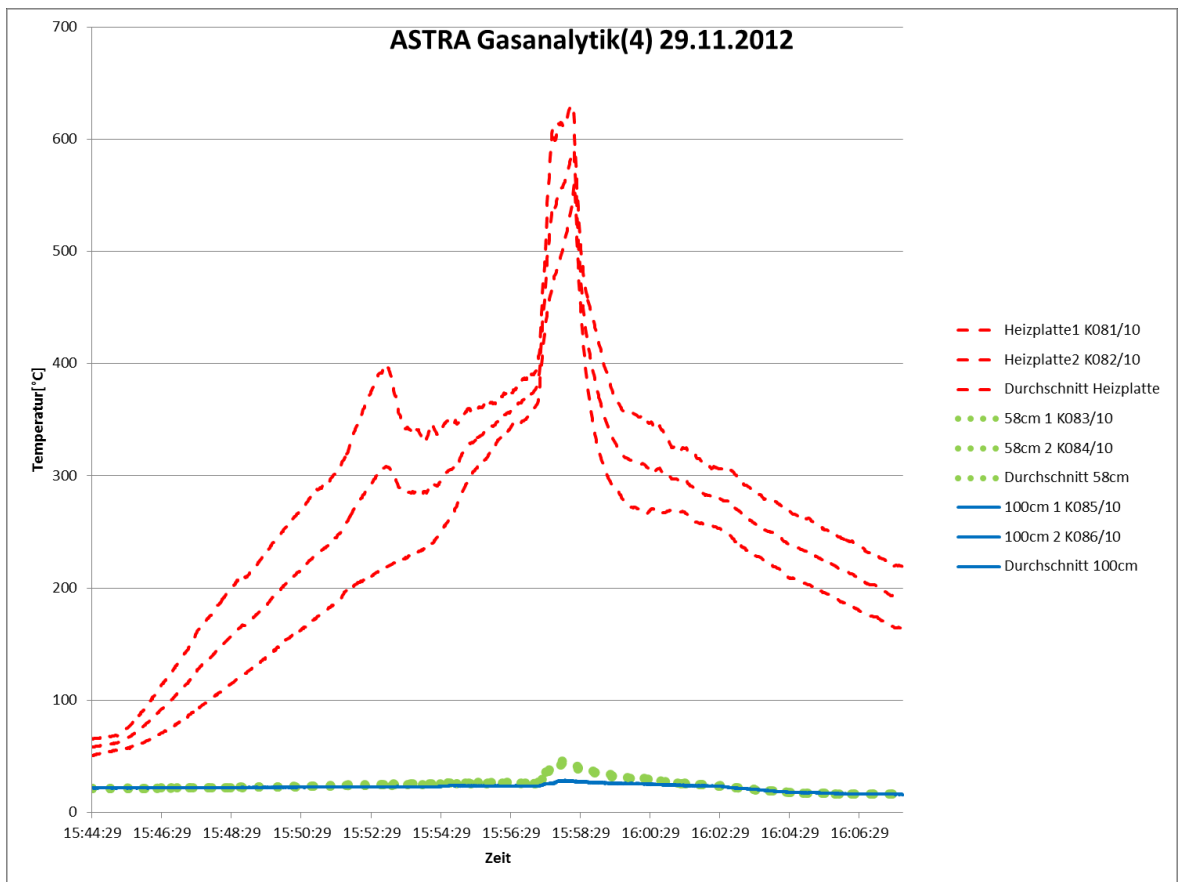
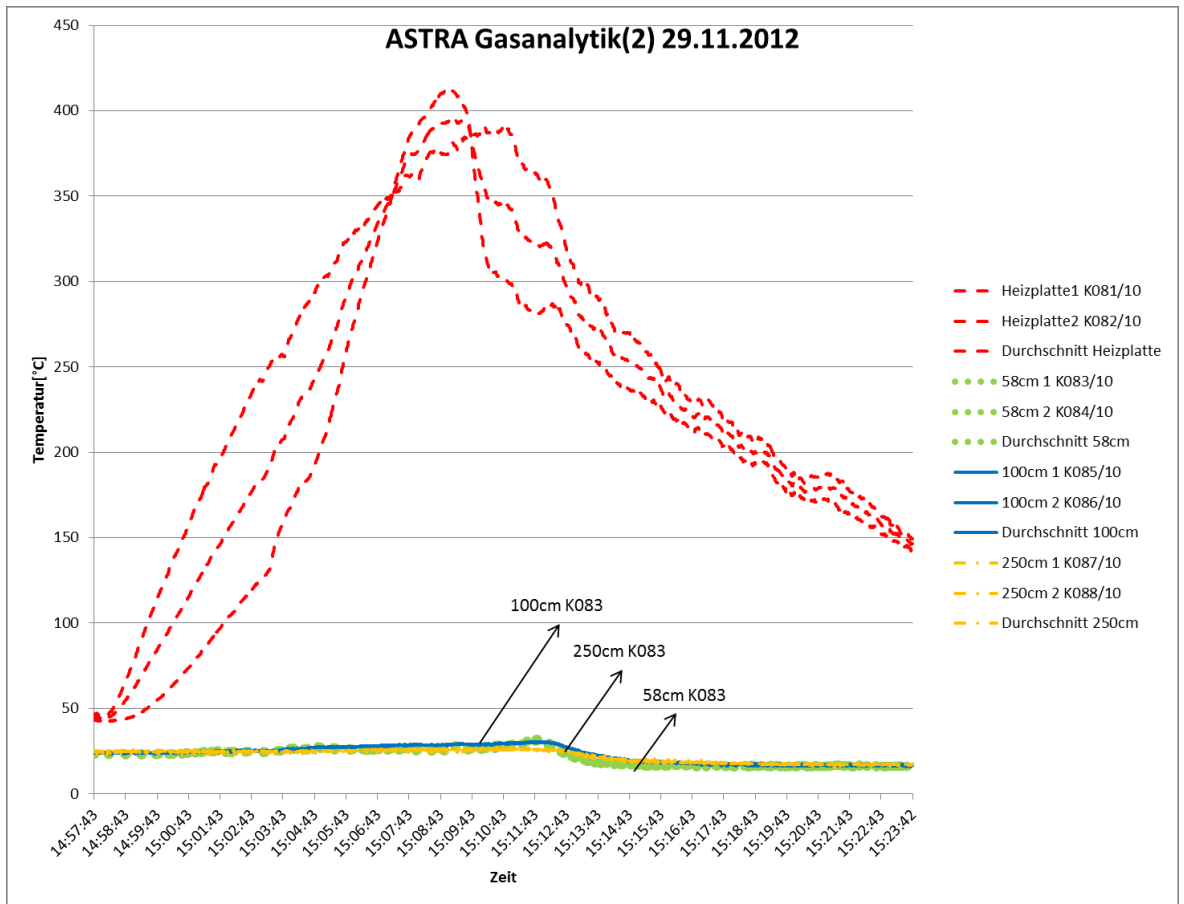
Temperaturmessprotokolle

I.2.1 Vom 28.11.2012

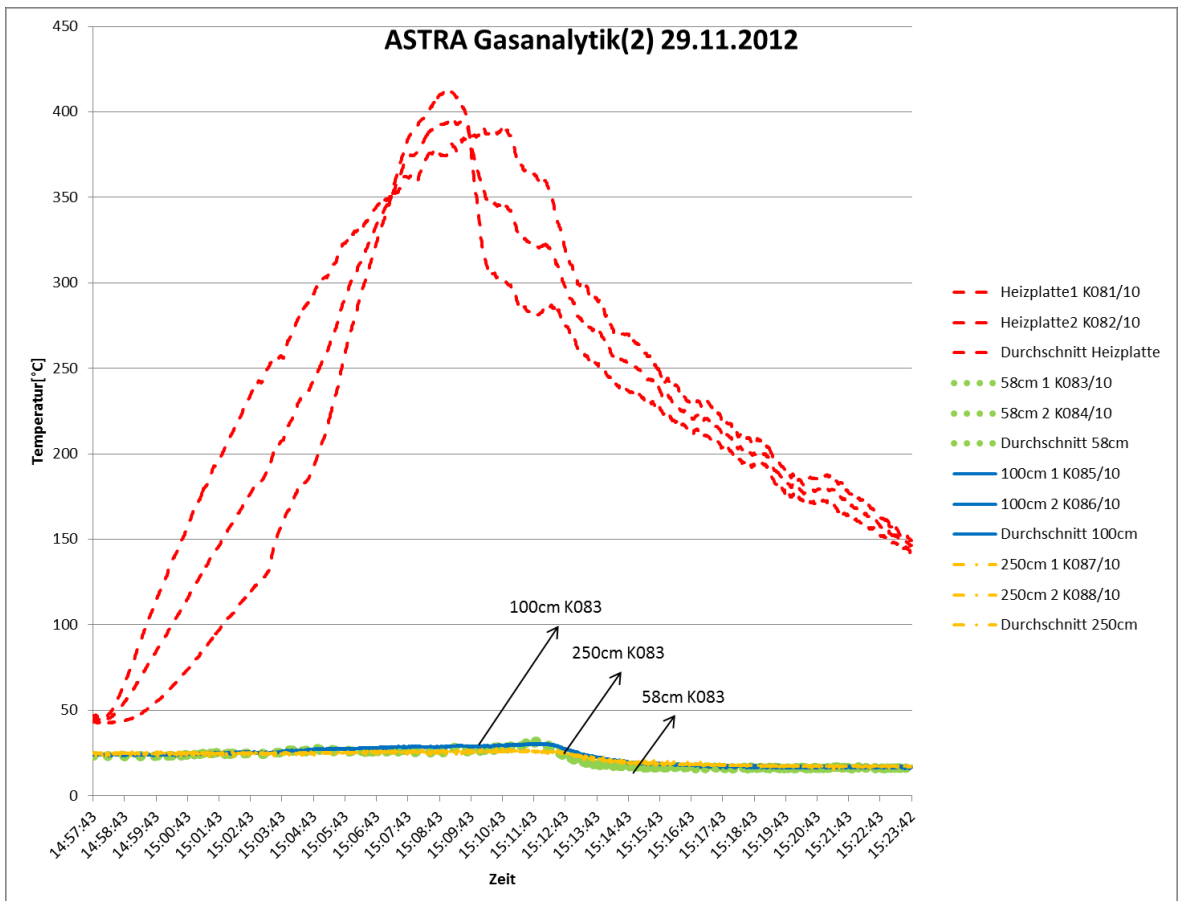
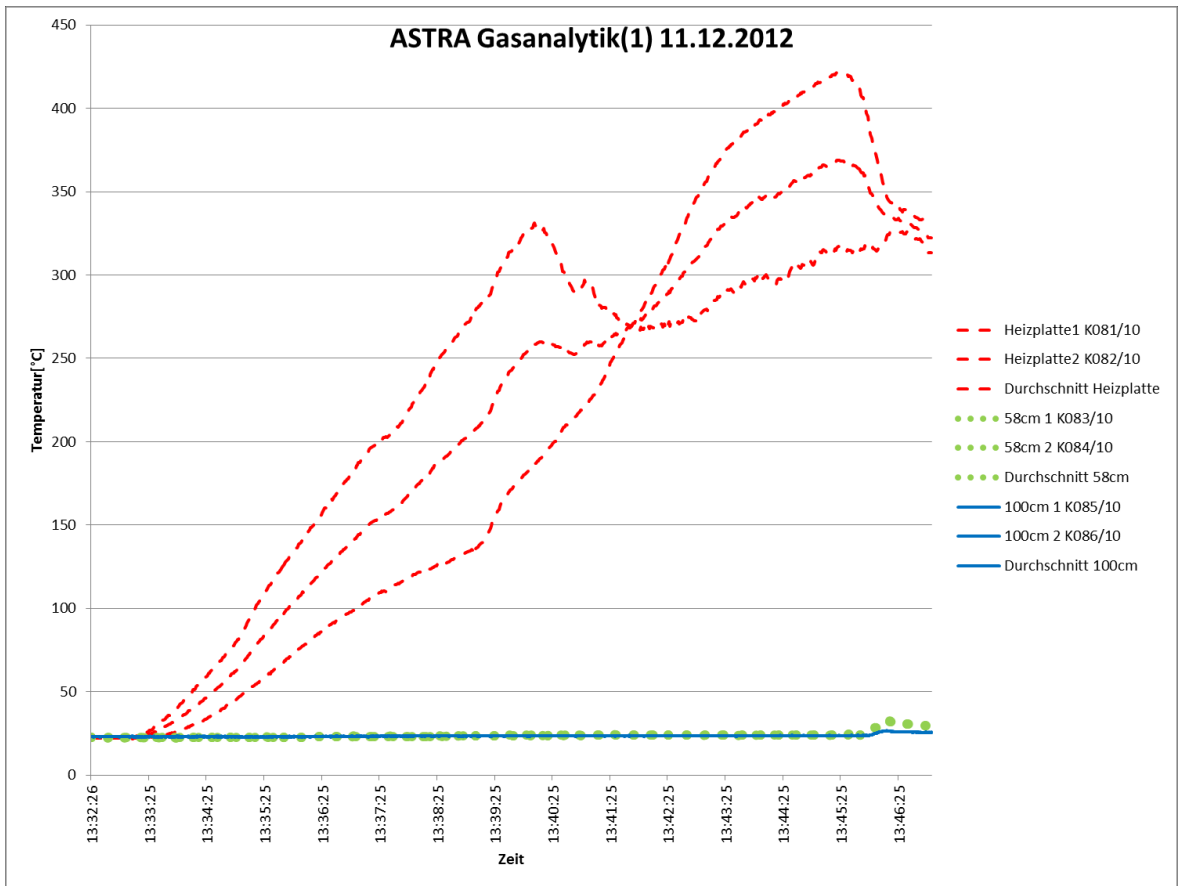


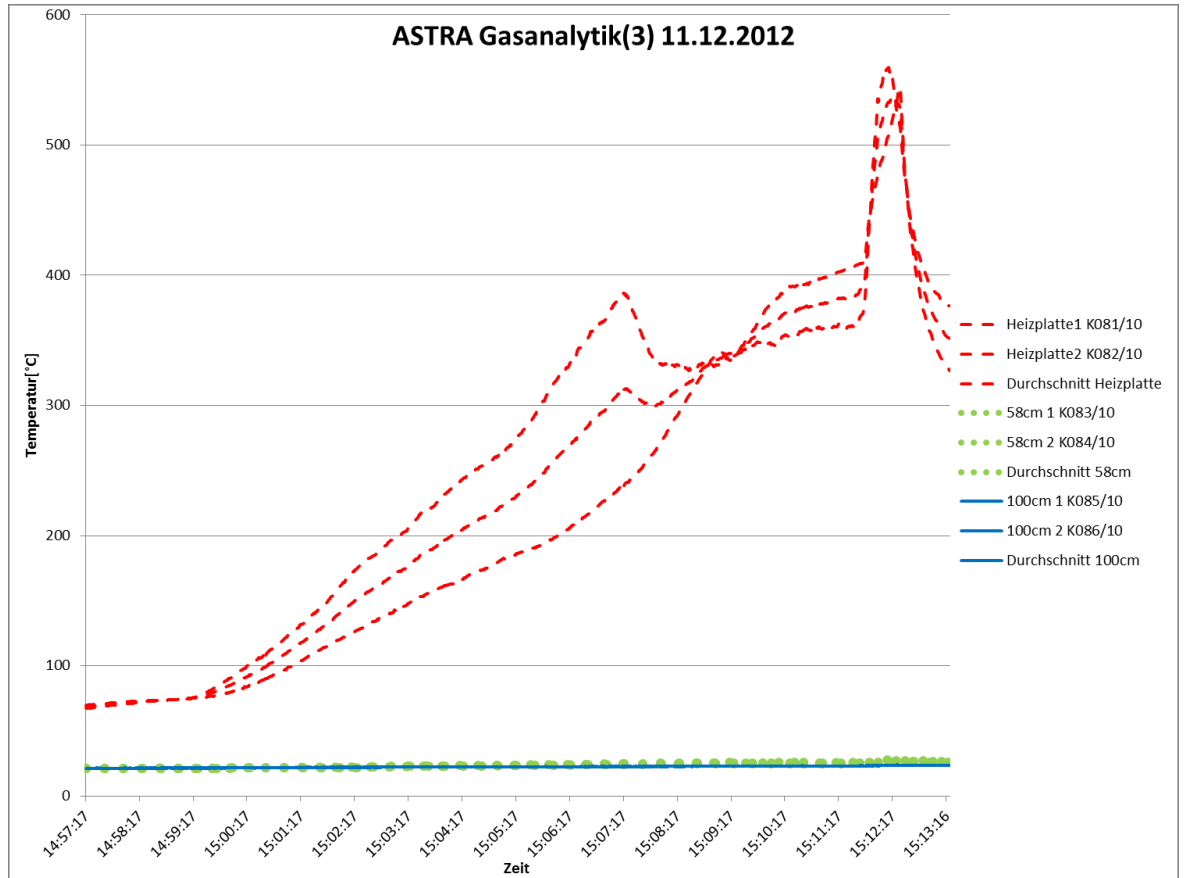
I.2.2 Vom 29.11.2012





I.2.3 Vom 11.12.2012





Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
ABS	Acetonitril-Butadien-Styrol-Polymer, ein Kunststoff
AG	Aktiengesellschaft
BK	Begleitkommission
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLL	Cellulose
CO	Kohlenmonoxid
EGR	Abgasrückführung, von englisch Exhaust Gas Recirculation
EN	Europäische Norm
ETK	Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve
FGU	Fachgruppe Untertagebau
FTIR	Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskop
GB	Gigabyte
GC	Gaschromatograph
GROMACS	GRoningen MACHine for Chemical Simulations (ein Computersimulationsprogramm)
GROMOS	Groningen Molecular Simulation (ein Kraftfeld und Computerprogramm für chemische Simulation)
HCl	Hydrochlorid, Salzsäure
HRR	Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate)
IR	Infrarot
ISBN	International Standard for Book Numbering
LES	In der Strömungssimulation für Large Eddy Simulation
LKW	Lastkraftwagen
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MIR	Mittleres Infrarot (innerhalb des gesamten Infrarot-Spektrums)
MS	Massespektrometer
NO	Stickoxid
PA	Polyamid, ein Kunststoff
PAH	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

PC	Personal Computer
PE	Polyethylen, ein Kunststoff
PKW	Personenkraftwagen
PMMA	Polymethylmethacrylat, Plexiglas, ein Kunststoff
ppb	Parts per billion, ein Milliardstel
ppm	Parts per million, ein Millionstel
ppt	Parts per trillion, ein Billionstel
PP	Polypropylen, ein Kunststoff
PS	Polystyrol, ein Kunststoff
PTFE	Polytetrafluorethylen, ein Kunststoff
PU	Polyurethan, eine Kunststoffklasse
PUR	Polyurethan, eine Kunststoffklasse
PURL	Polyurethan-Lack, eine Kunststoffklasse
PURS	Polyurethan-Schaum, eine Kunststoffklasse
PVC	Polyvinylchlorid, ein Kunststoff
PW	Personenwagen
ReaxFF	Reaktive force field, eine Methode der chemischen Simulation
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SMILES	Simplified Molecular Input Line Entry Specification, eine chemoinformatische Molekül-spezifikation
THC	Total Kohlenwasserstoffe
VOC	Volatile organische Verbindungen
VSH	Versuchsstollen Hagerbach

Literaturverzeichnis

- [Amamoto1990SAB] Amamoto, T., Tanaka, K., Takahata, K., Matsuura, S., Seiyama, T. A fire detection experiment in a wooden house by SnO₂ semiconductor gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* 1, Seiten 226–230, 1990.
- [Aralt2009TUST] Aralt, T., Nilsen, A. Automatic fire detection in road traffic tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24, Seiten 75–83, 2009.
- [Baral2011SAE] Baral, B., Raine, R., Miskelly, G. Effect of Engine Operating Conditions on Spark-Ignition Engine PAH Emissions. *SAE Technical Paper* Seiten 01–1161, 2011.
- [Bari2005TUST] Bari, S., Naser, J. Simulation of smoke from a burning vehicle and pollution levels caused by traffic jam in a road tunnel. *Tunnelling and nderground space technology* 20, Seiten 281– 290, 2005.
- [Bari2010TUST] Bari, S., Naser, J. Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25, Seiten 70–77, 2010.
- [Becher2010SAB] Becher, C., Kaul, P., Mitrovics, J., Warmer, J. The detection of evaporating hazardous material released from moving sources using a gas sensor network. *Sensors and Actuators B: Chemical* 146, Seiten 513–520, 2010. 53
- [Berendsen1995CPC] Berendsen, H., van der Spoel, D., van Drunen, R. GROMACS: A message-passing parallel molecular dynamics implementation. *Computer Physics Communications* 91, Seiten 43– 56, 1995.
- [Blake2008FSJ] Blake, D., Suo-Anttila, J. Aircraft cargo compartment fire detection and smoke transport modeling. *Fire Safety Journal* 43, Seiten 576– 582, 2008.
- [Boulouchos2012LN] Boulouchos, K.: Lecture notes, 2012
- [VDV2005PNV] Blennemann, F., Girnau, G., Grossmann, H. Brandschutz in Fahrzeugen und Tunneln des ÖPNV. *Verband Deutscher Verkehrsunternehmen*, 2005. ISBN 3-87094-664-4.
- [Vouillamoz2006Turin] Vouillamoz (BLS), J., Saputelli (SBB), M., Schlatter (SBB), H. P. Detection of Fires and Leakages on Moving Trains in a Tunnel. In: *Tagungsband Tunnel Protection and Security against Fire an other Hazards*, Seite 11ff. Turin, Italy, 2006.
- [Chen2007FSJ] Chen, S., Hovde, D., Peterson, K., Marshall, A. Fire detection using smoke and gas sensors. *Fire Safety Journal* 42, Seiten 507–515, 2007.
- [Chenoweth2008JPCA] Chenoweth, K., van Duin, A., Goddard III, W. ReaxFF reactive force field for molecular dynamics simulations of hydrocarbon oxidation. *The Journal of Physical Chemistry A* 112, Seiten 1040–1053, 2008.
- [Chow2001TUST] Chow, W., Li, J. Case study: vehicle fire in a cross-harbour tunnel in Hong Kong. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, Seiten 23–30, 2001.
- [Conrad2011Katalog] Conrad Businesskatalog, Band 1. Conrad Electronic AG, 2011/2012.
- [CrowconCO] Gasmessgerät Crowcon Clip+ CO. http://www.pceinstruments.com/deutsch/messtechnik-_im-online-handel/messgeraete-fueralle-parameter/gasmessgeraet-

mobilstationaer-crowcon-detection-instrumentsltd.-gasmessgeraet-crowcon-clip-codet_256521.htm?_list=qr.art&_listpos=1. Abgerufen am 25. März 2013.

[Czerwinski2010SAE] Czerwinski, J., Heeb, N., Zimmerli, Y., Forss, A., Hilfiker, T., Bach, C. Unregulated Emissions with TWC, Gasoline & CNG. SAE International Journal of Engines 3, Seite 1099, 2010.

[Derbel2004FSJ] Derbel, F. Performance improvement of fire detectors by means of gas sensors and neural networks. Fire safety journal 39, Seiten 383–398, 2004.

[Gottuk2002FSJ] Gottuk, D., Peatross, M., Roby, R., Beyler, C. Advanced fire detection using multi-signature alarm algorithms* 1. Fire Safety Journal 37, Seiten 381–394, 2002.

[Gutmacher2011SAB] Gutmacher, D., Hofer, U., Wöllenstein, J. Gas sensor technologies for fire detection. Sensors and Actuators B: Chemical 175, Seiten 40–45, 2012. doi:10.1016/j.snb.2011.11.053.

[Haack2000STUVA] Haack, A., Schreyer, J., Meyeroltmanns, W., Beyer, S. Brandschutz in Verkehrstunneln. Technical report, STUVA, 2000.

[Hagen2000FSJ] Hagen, B., Milke, J. The use of gaseous fire signatures as a mean to detect fires. Fire safety journal 34, Seiten 55–67, 2000.

[Hammond2008SAB] Hammond, M., Rose-Pehrsson, S., Gottuk, D., Lynch, J., Tillett, D., Streckert, H. Cermet microsensors for fire detection. Sensors and Actuators B: Chemical 130, Seiten 240–248, 2008.

[Han2009FSJ] Han, D., Lee, B. Flame and smoke detection method for early real-time detection of a tunnel fire. Fire Safety Journal 44, Seiten 951–961, 2009.

[HawleyFedder1984JCA1] Hawley-Fedder, R., Parsons, M., Karasek, F. Products obtained during combustion of polymers under simulated incinerator conditions: I. Polyethylene. Journal of Chromatography A 314, Seiten 263–273, 1984.

[HawleyFedder1984JCA2] Hawley-Fedder, R., Parsons, M., Karasek, F. Products obtained during combustion of polymers under simulated incinerator conditions: II. Polystyrene. Journal of Chromatography A 315, Seiten 201–210, 1984.

[HawleyFedder1984JCA3] Hawley-Fedder, R., Parsons, M., Karasek, F. Products obtained during combustion of polymers under simulated incinerator conditions: III. Polyvinyl chloride. Journal of Chromatography A 315, Seiten 211–221, 1984.

[HawleyFedder1987JCA] Hawley-Fedder, R., Parsons, M., Karasek, F. Identification of organic compounds produced during combustion of a polymer mixture. Journal of Chromatography A 387, Seiten 207–221, 1987.

[Hayes2009APOC] Hayes, C., Merle, J., Hadad, C. The chemistry of reactive radical intermediates in combustion and the atmosphere. Advances in Physical Organic Chemistry 43, Seiten 79–134, 2009.

[Hess2008JCTC] Hess, B., Kutzner, C., van der Spoel, D., Lindahl, E. GROMACS 4: Algorithms for highly efficient, load-balanced, and scalable molecular simulation. Journal of chemical theory and computation 4, Seiten 435–447, 2008.

[Hosser2009BBT] Hosser, D., editor. Braunschweiger Brandschutz-Tage 2009, Tagungsband zur 23. Fachtagung Brandschutz Forschung und Praxis. 2009.

[Hu2010IJHMT] Hu, L., Tang, F., Yang, D., Liu, S., Huo, R. Longitudinal distributions of CO concentration and difference with temperature field in a tunnel fire smoke flow. International Journal of Heat and Mass Transfer 53, Seiten 2844–2855, 2010.

[Ingason2005FSJ] Ingason, H., Lönnemark, A. Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels. *Fire Safety Journal* 40, Seiten 646–668, 2005.

[Jackson1994FSJ] Jackson, M., Robins, I. Gas sensing for fire detection: Measurements of CO, CO₂, H₂, O₂, and smoke density in European standard fire tests. *Fire safety journal* 22, Seiten 181–205, 1994.

[Kataoka1998ACA] Kataoka, H., Kondo, T., Sumida, A. Gas chromatographic determination of aldehydes in combustion smoke samples. *Analytica Chimica Acta* 358, Seiten 269–275, 1998.

[Koller2011ETR] Koller, S., Schlatter, H. P. Brand und Chemieortung bei der SBB — Zwei Jahre Praxiserfahrung. *ETR Swiss (Eisenbahntechnische Rundschau)* Seiten 68–72, 2011.

[Koller2011RTR] Koller, S., Schlatter, H. P. Fire and Chemistry Indication. *RTR Special (Rail Technology Review)* Seiten 2–6, 2011.

[Korotchenkov1999SAB] Korotchenkov, G., Brynzari, V., Dmitriev, S. SnO₂ thin film gas sensors for fire-alarm systems. *Sensors and Actuators B: Chemical* 54, Seiten 191–196, 1999.

[Li2009SAE] Li, T., Izumi, H., Shudo, T., Ogawa, H. Effect of Exhaust Catalysts on Regulated and Unregulated Emissions from Low Temperature Diesel Combustion with High Rates of Cooled EGR. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 1, Seite 274, 2009.

[Lindahl2001JMM] Lindahl, E., Hess, B., van der Spoel, D. GRO- MACS 3.0: a package for molecular simulation and trajectory analysis. *Journal of Molecular Modeling* 7, Seiten 306–317, 2001.

[Litton2002FSJ] Litton, C. The use of light scattering and ion chamber responses for the detection of fires in diesel contaminated atmospheres. *Fire safety journal* 37, Seiten 409–425, 2002.

[Litton2009FSJ] Litton, C. Laboratory evaluation of smoke detectors for use in underground mines. *Fire Safety Journal* 44, Seiten 387–393, 2009.

[Litton1981SIC] Litton, C., Hertzberg, M., Furno, A. The growth, structure and detectability of fires in mines and tunnels. In: *Symposium (International) on Combustion*, volume 18, Seiten 633–639. Elsevier, 1981.

[Liu2009SAE] Liu, Z., Berg, D., Swor, T., Schauer, J., et al. A Study on the Emissions of Chemical Species from Heavy-Duty Diesel Engines and the Effects of Modern Aftertreatment Technology. *SAE Technical Paper* Seiten 01–1084, 2009.

[Lönnemark2005FSJ] Lönnemark, A., Ingason, H. Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels. *Fire Safety Journal* 40, Seiten 506–527, 2005.

[Milke1999FT] Milke, J. Monitoring multiple aspects of fire signatures for discriminating fire detection. *Fire technology* 35, Seiten 195–209, 1999.

[MousaBahia1994SAB] Mousa-Bahia, A., Coles, G., Gibson, M., Willett, M. The characterization of semiconductor gas sensors II: A critical comparison with respect to products of combustion. *Sensors and Actuators B: Chemical* 19, Seiten 668–674, 1994.

[Nebiker2001FSJ] Nebiker, P., Pleisch, R. Photoacoustic gas detection for fire warning. *Fire Safety Journal* 36, Seiten 173–180, 2001.

[Ni2008SAB] Ni, M., Stetter, J., Buttner, W. Orthogonal gas sensor arrays with intelligent

algorithms for early warning of electrical fires. *Sensors and Actuators B: Chemical* 130, Seiten 889–899, 2008.

[Nilsen2009FSJ] Nilsen, A., Log, T. Results from three models compared to full-scale tunnel fires tests. *Fire Safety Journal* 44, Seiten 33–49, 2009.

[Oostenbrink2004JCC] Oostenbrink, C., Villa, A., Mark, A., van Gunsteren, W. A biomolecular force field based on the free enthalpy of hydration and solvation: The GROMOS force-field parameter sets 53A5 and 53A6. *Journal of computational chemistry* 25, Seiten 1656–1676, 2004.

[Ozawa2005SAB] Ozawa, T., Ishiguro, Y., Toyoda, K., Nishimura, M., Sasahara, T., Doi, T. Detection of decomposed compounds from an early stage fire by an adsorption/combustion-type sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical* 108, Seiten 473–477, 2005.

[Pasternak1981SIC] Pasternak, M., Zinn, B., Browner, R. The role of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the formation of smoke particulates during the combustion of polymeric materials. In: *Symposium (International) on Combustion*, volme 18, Seiten 91–99. Elsevier, 1981.

[Pohle2007SAB] Pohle, R., Simon, E., Schneider, R., Fleischer, M., Sollacher, R., Gao, H., Muller, K., Jauch, P., Loepfe, M., Frerichs, H., et al. Fire detection with low power fet gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* 120, Seiten 669–672, 2007.

[Prado1978FSJ] Prado, G., Jagoda, J., Lahaye, J. Smoke formation by combustion of polymeric materials. *Fire Safety Journal* 1, Seiten 229–235, 1978.

[RosePehrsson2000SAB] Rose-Pehrsson, S., Shaffer, R., Hart, S., Williams, F., Gottuk, D., Strehlen, B., Hill, S. Multi-criteria fire detection systems using a probabilistic neural network. *Sensors and Actuators B: Chemical* 69, Seiten 325–335, 2000.

[Sawada2008SAB] Sawada, A., Higashino, T., Oyabu, T., Takei, Y., Nanto, H., Toko, K. Gas sensor characteristics for smoldering fire caused by a cigarette smoke. *Sensors and Actuators B: Chemical* 130, Seiten 88–93, 2008.

[Schneider2006BPT] Schneider, U., Hobath, J. *Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten*. Bauwerk Verlag, 2006.

[Schuler2001JCC] Schuler, L., Daura, X., van Gunsteren, W. An improved GROMOS96 force field for aliphatic hydrocarbons in the condensed phase. *Journal of Computational Chemistry* 22, Seiten 1205–1218, 2001.

[Scorsone2006SAB] Scorsone, E., Pisanelli, A., Persaud, K. Development of an electronic nose for fire detection. *Sensors and Actuators B: Chemical* 116, Seiten 55–61, 2006.

[Scott1999JPCA] Scott, W. R. P., Hünenberger, P. H., Tironi, I. G., Mark, A. E., Billeter, S. R., Fennen, J., Torda, A. E., Huber, T., Krüger, P., van Gunsteren, W. F. The GROMOS Biomolecular Simulation Program Package. *J. Phys. Chem. A* 103, Seiten 3596–3607, 1999.

[smartGAS] smartModul CONNECT Gassensoren. <http://www.smartgas.eu/de/connect.html>. Abgerufen am 25. März 2013.

[Tomchenko2003SAB] Tomchenko, A., Harmer, G., Marquis, B., Allen, J. Semiconducting metal oxide sensor array for the selective detection of combustion gases. *Sensors and Actuators B: Chemical* 93, Seiten 126–134, 2003.

[vdSpoel2005JCC] van der Spoel, D., Lindahl, E., Hess, B., Groenhof, G., Mark, A., Berendsen, H. GROMACS: fast, flexible, and free. *Journal of computational chemistry* 26, Seite 1701, 2005.

[vDuin2001JPCA] van Duin, A., Dasgupta, S., Lorant, F., Goddard III, W. ReaxFF: a reactive force field for hydrocarbons. *The Journal of Physical Chemistry A* 105, Seiten 9396–9409, 2001.

[vGunsteren1998ECC] van Gunsteren, W., Daura, X., Mark, A. GRO- MOS force field. *Encyclopedia of computational chemistry* 1998.

[vGunsteren1996GROMOS] van Gunsteren, W. F., Billeter, S. R., Eising, A. A., Hünenberger, P. H., Krüger, P., Mark, A. E., Scott, W. R. P., Tironi, I. G. *Biomolecular Simulation: The GROMOS96 Manual and User Guide*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 1996.

[Wang2009JHM] Wang, Y., Jiang, J., Zhu, D. Diesel oil pool fire characteristic under natural ventilation conditions in tunnels with roof openings. *Journal of hazardous materials* 166, Seiten 469–477, 2009.

[Weininger1988JCICS] Weininger, D. SMILES, a chemical language and information system. 1. Introduction to methodology and encoding rules. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences* 28, Seiten 31–36, 1988.

[Weininger1989JCICS] Weininger, D., Weininger, A., Weininger, J. SMILES. 2. Algorithm for generation of unique SMILES notation. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences* 29, Seiten 97– 101, 1989.

[Welte2011VSS] Welte, U., Frey, S., van Linn, A. Ereignisdetektion im Strassentunnel. Technical report, Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute, 2011.

[Wiegleb1994SAB] Wiegleb, G., Heitbaum, J. Semiconductor gas sensor for detecting NO and CO traces in ambient air of road traffic. *Sensors and Actuators B: Chemical* 17, Seiten 93–99, 1994.

[Zhang2009JPCA] Zhang, L., Zybin, S., van Duin, A., Dasgupta, S., Goddard III, W., Kober, E. Carbon cluster formation during thermal decomposition of octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine and 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6- trinitrobenzene high explosives from ReaxFF reactive molecular dynamics simulations. *The Journal of Physical Chemistry A* 113, Seiten 10619–10640, 2009.

Projektabschluss

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: Datum

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU2010-006
 Projekttitel: Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln
 Enddatum: 5.7.2013

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Der vorliegende Bericht stellt eine Grundlagenstudie vor, die den Einsatz von Gasdetektoren als Brandfrühmeldung im Strassentunnelbereich zum Ziel hat. Dazu gehört einerseits die Identifikation von geeigneten Brandgasen, die im abgashaltigen Strassentunnelumfeld dennoch zuverlässig einen beginnenden Fahrzeugbrand anzeigen können; andererseits sollten die Bedingungen geklärt werden, um eine zuverlässige Warnung zu ermöglichen. Eine Validierung des Konzepts im Experiment im Versuchsstollen sowie eine Marktanalyse zu möglichen Sensoren komplettieren die Studie. Eine Literaturstudie bestätigte, dass die Gassensorik als Brandfrüherkennung prinzipiell taugt, zeigte aber auch auf, dass die Situation je nach Brandquelle und Umfeld sehr verschieden sein kann. Insbesondere förderte sie hingegen zu Tage, dass zu hier wesentlichen Fragen, wie der Brandgaszusammensetzung bei verbrannten Kunststoffen, oder den Ursachen von Fahrzeugbränden, nur bruchstückhafte Erkenntnisse vorlagen.

Um ein vollständiges Bild zu erhalten wurde entschieden, die nötigen Informationen aus chemischen Simulationen zu erhalten. Dazu wurde eine Vielzahl brennbarer Substanzen, die im Fahrzeugbau und auch der Ladung bzw. deren Verpackung vorkommen, unter verschiedenen Bedingungen in der Computersimulation verbrannt und die dabei entstehenden Zwischenprodukte aufgezeichnet. Von der Liste wurden kurzlebige, instabile Substanzen entfernt wie auch jene, die bekanntermassen in Fahrzeugabgasen vorkommen, und daher im Normalfall in der Tunnelluft vorkommen würden. Tatsächlich konnten so fünf potentielle Brandanzeiger ermittelt werden: Ethin (Acetylen), Propan, Cyclopropan, Propadien und Wasserstoff.

Als Prototyp eines Fahrzeugbrandes im Frühstadium wurde für die Versuche die Verschmelzung von Polypropylen (PP) unter der Hitzeeinwirkung einer Heizplatte gewählt. Die chemische Simulation hatte gezeigt, dass dieser Kunststoff die meisten Brandmarker in den grössten Konzentrationen freisetzt. In einer zweiten Phase folgte der Praxistest. Mittels einer Strömungssimulation (CFD) wurden in Szenarien die zu erwartenden Brandanzeiger-Konzentrationen im Tunnel abgeschätzt und mit Erfahrungswerten verglichen. Parallel dazu

Zielerreichung:

Ziel 1: Identifizierung einer Substanz, welche in der Frühphase eines Brandes entsteht:
Ergebnis 1: H2 scheint als Brandanzeiger geeignet.

Ziel 2: Identifikation eines Sensors zur zuverlässigen Detektion:
Ergebnis 2: Für den Tunnelleinsatz geeignete Sensoren sind nicht verfügbar.

Ziel 3: Evaluation optimaler Platzierungen der Sensoren im Tunnelquerschnitt:
Ergebnis 3: Die Kriterien zur optimalen Platzierung der Sensoren sind bekannt.

Ziel 4: Evaluation der Möglichkeiten und Überprüfung der Resultate im Pilotexperiment im VSH:
Ergebnis 4: Der im Pilotexperiment im VSH verwendete Sensor bestätigt das Konzept.

Folgerungen und Empfehlungen:

Folgende Schlussfolgerungen und daraus resultierende Empfehlungen wurden gezogen:

- Geeignete Sensoren können entwickelt werden, Ansätze dazu liegen vor, ebenso Interesse seitens der Hersteller
- In Bezug auf die Brandgase, deren Konzentration, Zusammensetzung und zeitlichen Verläufe herrscht noch Unklarheit
- Anfangsbedingungen für chem. Simulation sollten mit Hilfe weiterer Validations-Versuche genauer ermittelt werden.

Publikationen:

keine.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Wietek

Vorname: Maximilian

Amt, Firma, Institut: VersuchsStollen Hagerbach

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 2 / 3

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Schlussfolgerungen und die Beurteilung der Zielerreichung durch die Forschungsstelle sind treffend. Die Projektziele wurden teilweise erreicht indem

- Substanzen identifiziert wurden, die im Brandfall früh entstehen und daher zur frühzeitigen Detektion verwendet werden können,
- die Anforderungen an die Sensoren formuliert wurden und
- die prinzipielle Möglichkeit einer frühzeitigen Branddetektion durch vereinfachte Experimente aufgezeigt wurde.

Allerdings wurde auch gezeigt, dass es praxistaugliche Sensoren noch nicht gibt und dass die Prognosen von Simulationsmodellen noch nicht ausreichend belastbar sind.

Umsetzung:

Eine Umsetzung in der Praxis ist noch nicht möglich, weil die Ergebnisse Grundlagencharakter haben und weiterer Forschungsbedarf besteht.

weitergehender Forschungsbedarf:

Dieser besteht bezüglich der Entwicklung von Sensoren ausreichender Sensitivität, der räumlichen Verteilung und zeitlichen Entwicklung der Konzentration der Brandgase sowie der Modellbildung für Computersimulationen.

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner, weil es sich um eine Grundlagenstudie handelt.

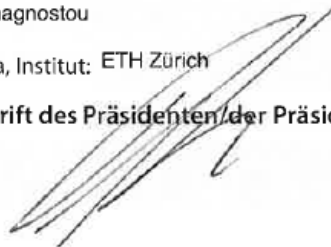
Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Anagnostou

Vorname: Georg

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweißnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'odémètre CRS sur des échantillons intacts	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbaupasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungs- beton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskon-	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		zepts	
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009