

## **Zusammenfassung zum Forschungsvorhaben**

### **Quantifizierung von Brandrauch als Grundlage für simulationsbasierte Brandschutz- und Entrauchungskonzepte**

im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“

<b>Aktenzeichen</b>	VII.39 / VH 7340
<b>Ausfertigung</b>	1/3
<b>Auftraggeber</b>	BBR Deichmanns Aue 31-37 53179 Bonn
<b>Zuwendungsbescheid vom</b>	10.09.2009
<b>Zeichen</b>	SF-10.0818.7-09.20
<b>Projektleiter</b>	Dr. -Ing. Anja Hofmann-Böllinghaus
<b>Bearbeiter</b>	Nils Monreal, M. Eng.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt-, und Raumforschung gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

### **Inhaltsverzeichnis**

<b>Ziel der Forschungsaufgabe .....</b>	<b>2</b>
<b>Durchführung der Forschungsaufgabe .....</b>	<b>2</b>
<b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>	<b>4</b>

Diese Zusammenfassung besteht aus Seite 1 bis 8

## Ziel der Forschungsaufgabe

Ziel dieses Projekts war die chemisch-analytisch Untersuchung der Zusammensetzung von Brandrauch, der bei der Verbrennung von Baustoffen und Einrichtungsgegenständen entsteht. Dabei wurden speziell die Ventilationsbedingungen berücksichtigt. Angaben aus der Fachliteratur sind zumeist nur qualitativ und beschränken sich entweder auf toxische Bestandteile des Brandrauchs oder die Rauchdichte. Die Schwierigkeit bei der quantitativen Untersuchung des Brandrauchs ist, dass Menge und Zusammensetzung des Rauchs nicht nur von den Materialien abhängen, sondern auch in starkem Maße von den Belüftungsbedingungen (Sauerstoffangebot), dem Wärmeeintrag und der Art der Zündquelle. Die Untersuchungsergebnisse hängen damit stark von der verwendeten Prüfeinrichtung ab. Daher war es notwendig die Untersuchungen in verschiedenen Prüfeinrichtungen durchzuführen, die es ermöglichen sowohl verschiedene Materialien zu untersuchen als auch den Wärmeeintrag und das Sauerstoffangebot zu variieren. Die Verwendung verschiedener Prüfeinrichtungen hatte außerdem den Vorteil, dass verschiedene Zündquellen zum Einsatz kamen. Es wurden im Forschungsprojekt Brandversuche unter Verschmelzungsbedingungen in der Rauchdichtekammer (SDC) und im DIN-Rohr sowie mit offener Flamme in der Single Burning Item Apparatur (jeweils bei kontrollierter Luftzufuhr) durchgeführt.

Die aus den Messungen erhaltenen Daten wurden verwendet, um den empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen dem zur Verfügung stehendem Sauerstoff und der Rauchproduktion zu ermitteln. Die gewonnenen Daten wurden genutzt um sie in das numerische Modell einzubringen.

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

## Durchführung der Forschungsaufgabe

Bei der Identifikation von repräsentativen Brandszenarien war es wichtig, eine Auswahl von Brandszenarien zusammenzustellen, die die Einflussgrößen Material, Wärmeeintrag bzw. Art der Zündquelle und Sauerstoffangebot berücksichtigen und Variationen dieser Einflussgrößen erlauben. Damit konnte die Rauchproduktion in Abhängigkeit von den ausgewählten Materialien, der Größe des Wärmeeintrags bzw. der Art der Zündquelle und vom Sauerstoffangebot untersucht werden. Dabei sollte die Rauchproduktion zum Einen über die Extinktion bestimmt werden können, aber zum Anderen auch die Partikelanzahl und -größe untersucht werden können. Daher wurden die Rauchkammer, das DIN-Rohr und das Kalorimeter ausgewählt. Rauchkammer, DIN-Rohr und Kalorimeter wurden umgebaut um die für die Entwicklung des numerischen Modells notwendigen Daten gewinnen zu können. Die beiden Prüfeinrichtungen mussten so umgebaut werden, dass zusätzlich zu der standardmäßig vorgesehenen Versuchsdurchführung eine definierte Sauerstoffzufuhr möglich wurde und die Rauchgasmenge und -zusammensetzung unter verschiedenen Prüfbedingungen erfasst werden konnte. Danach konnten die zeitlichen Raten der Freisetzung von Rauch und von einzelnen Bestandteilen der zur Verfügung stehenden Menge an(Luft-)Sauerstoff genau zugeordnet werden. Die Versuche

wurden mit unterschiedlichem Wärmeeintrag unter Verwendung unterschiedlicher Zündquellen wiederholt. Damit konnten beide Einflüsse qualitativ und quantitativ erfasst werden.

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

Mittels Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie wurden die Volumenkonzentrationen der im Brandrauch enthaltenen gasförmigen Bestandteile online gemessen. Zusätzlich wurde die optische Dichte des Brandrauches mittels Infrarotlicht-Abschwächung sowie die Partikelbeladung mittels eines gravimetrischen Verfahrens ermittelt.

Die Rauchkammer bildet in der Standardanwendung den Übergang von der flammenden Verbrennung in die verschwelende Verbrennung ab. Das wird erreicht indem die Kammer luftdicht verschlossen wird und während der Verbrennung kein Sauerstoff zugeführt wird. Die Rauchkammer wurde genutzt, um die Bedingungen für die Rauchproduktion von ausgewählten Materialien gezielt anzupassen. Als repräsentative Materialien wurden ausgewählt:

- Material A: PUR3554 (repräsentativ für Gebrauchsgegenstände: Matratze Polstermöbel)
- Material B: PUR3045SE (schwer entflammbar; Bauprodukt)

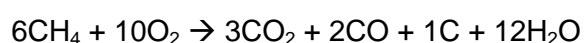
In der Rauchkammer wurden verschiedene Strahlungsstärken verwendet. Zusätzlich wurde die Rauchkammer so umgebaut, dass Zuluft definiert gesteuert werden kann. Die Einflüsse der Einstrahlung und der Zuluft-Bedingungen bei den verschiedenen Materialien wurden untersucht. Es wurde eine zusätzliche Rauchentnahmestelle eingebaut, um die Menge und Größe der während des Versuchs entstehenden Rauchpartikel zu messen. Aufgrund der aufwändigen Umbauten konnten nicht alle geplanten Versuche in der Projektzeit durchgeführt werden. Die umgebaute Rauchkammer ermöglicht im Nachgang des Projekts weitere Versuche. Zusätzlich wurden Versuche im ebenfalls umgebauten DIN-Rohr durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass das Variieren der Belüftungsbedingungen (Sauerstoffangebot) im DIN-Rohr experimentell einfacher zu realisieren war als in der Rauchkammer, so dass diese Daten gut für die Entwicklung des numerischen Modells verwendet werden konnten. Der Einfluss größerer Probengeometrien unter gut ventilierten Bedingungen wurde im Kalorimeter untersucht (umgebaute Single Burning Item Test-Apparatur). Sowohl das DIN-Rohr als auch das Kalorimeter wurden so modifiziert, dass auch die Rauchgaszusammensetzung gemessen werden konnte. Die zunächst geplante Messung des Massenverlustes im DIN-Rohr, wie sie in der Rauchkammer und im Kalorimeter realisiert wurde, ließ sich experimentell nicht realisieren. Der Massenverlust konnte nicht bestimmt werden da das Probengewicht sehr gering ist und die Versuchsanlage in sich geschlossen und sehr schwer ist. So war weder der Einbau einer Waage in die Apparatur, noch ein sinnvolles Messen von Gewichtsunterschieden der gesamten Apparatur möglich..

Es wurden Versuche in der Rauchkammer, in der Single Burning Item Test-Apparatur (standardmäßig nach DIN EN 13823) und im Kalorimeter (umgebaute Single Burning Item Test-Apparatur) (AP 2.1, AP 2.2, AP 2.3) und im DIN-Rohr durchgeführt. Die Daten der durchgeführten Versuche sind im Abschlussbericht detailliert dargestellt. Eine Auswahl der Daten der durchgeführten Versuche wird im nächsten Abschnitt gegeben.

Auf Grundlage der experimentell ermittelten empirischen Zusammenhänge zwischen Temperatur, Sauerstoffkonzentration und Rauchproduktion bzw. Rauchgaszusammensetzung wurde ein numerisches Modell entwickelt, das in bestehenden CFD Programmen genutzt werden kann.

### Mischungsbruch

Als Grundlage für die Implementierung eines neuen Rauchmodells, dient das Mischungsbruchmodell. Das Mischungsbruchmodell rechnet mit einer Reaktionsgleichung, bei der die stöchiometrischen Koeffizienten fest gewählt werden müssen. Das heißt, dass immer ein festes CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnis bzw. CO<sub>2</sub>/C (Ruß)-Verhältnis. Für eine Methan Sauerstoffreaktion könnte die Reaktionsgleichung z.B. so aussehen:



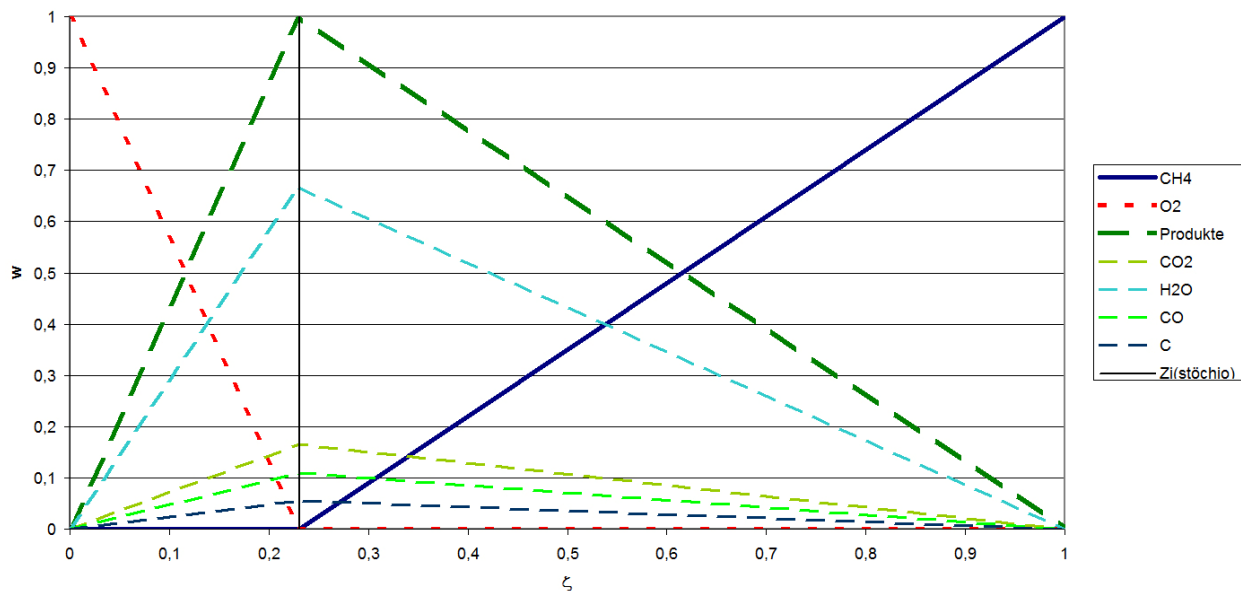


Abbildung 1: Mischungsbruch am Beispiel einer Methan-Sauerstoffreaktion

Die Stoffanteile lassen sich übersichtlich darstellen, siehe Abbildung 1. Die linke Seite steht für reinen Sauerstoff, die rechte Seite für reinen Brennstoff. Bei 0,23 liegt ein stöchiometrisches Gemisch vor und Sauerstoff sowie Brennstoff reagieren vollständig zu den Produkten ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}$  und  $\text{H}_2\text{O}$ ).

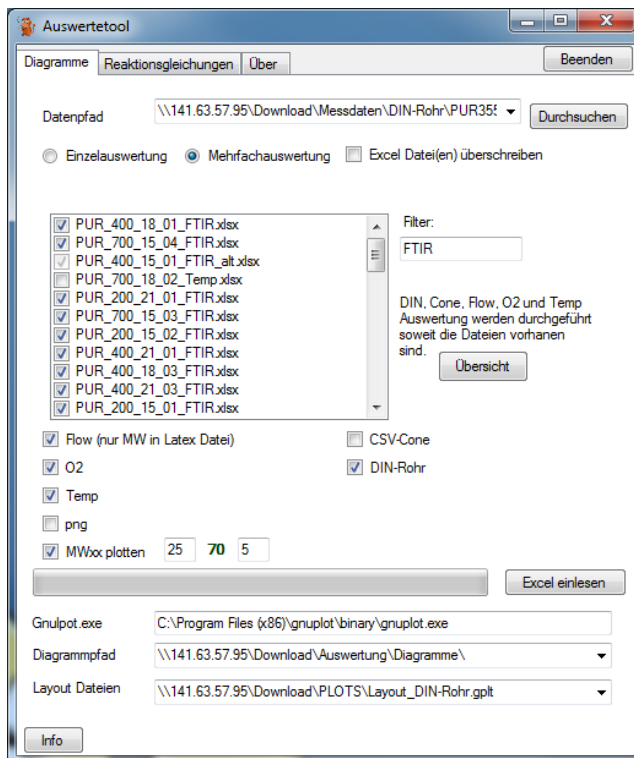
Im nächsten Abschnitt wird anhand eines Materials beispielhaft die Auswertung der Messwerte und Implementierung des Rauchmodells gezeigt. Es wurde eine Auswertetool programmiert, mit dem anhand der Messwerte die chemische Reaktionsgleichung in Abhängigkeit von Temperatur und Sauerstoffkonzentration generiert wird.

## Zusammenfassung der Ergebnisse

Zunächst konnten für die untersuchten Materialien empirische Zusammenhänge für den Einfluss der Temperatur bzw. dem Wärmeeintrag in die Probe als auch auf das Sauerstoffangebot auf die Rauchentwicklung und Rauchgaszusammensetzung beziehen. Die Messwerte sind ausführlich im Abschlussbericht dargestellt. Der Einfluss von Temperatur und Sauerstoffkonzentration unter anderem auf das  $\text{CO}$  zu  $\text{CO}_2$  Verhältnis konnte gezeigt werden.

Anhand der Messwerte unter verschiedenen Belüftungs- und Temperaturbedingungen wurde dann ein numerisches Rauchmodell entwickelt. Das entwickelte Auswertetool ermöglicht hierbei die einfache Generierung von Reaktionsgleichungen für das numerische Modell.

Für die Generierung der Reaktionsgleichungen wurden Messdaten aus den DIN-Rohr Versuchen verwendet. Die Konzentrationen einzelner toxischer Gase wurden aus dem Konzentrationsplateau des jeweiligen Produktes in der Versuchszeit von 25-95% gemittelt. Das Programm erzeugt eine Datei mit den Mittelwerten in dieser Versuchszeit für die Verbrennungsprodukte. Die Mittelwerte können auf Nutzerwunsch im Diagramm geplottet werden. Die Diagramme werden mit „Gnuplot“ automatisch erstellt. Außerdem werden „Latex“-Dateien für jeden Versuch mit allen Diagrammen erstellt. Diese werden automatisch nummeriert und benannt. Mit diesen Dateien lässt sich eine vollständige Versuchsübersicht für alle gefahrenen Versuche erstellen. Für die Materialien liegen jeweils die \*.pdf und auch gedruckte Version aller Messwerte vor.



Versuch	VPara	DIN	O2	Flow	Temp	Cone
PUR_400_18_01_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_700_15_04_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_400_15_01_FTIR_alt.xlsx	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
PUR_700_18_02_Temp.xlsx	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
PUR_200_21_01_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	fehlt	fehlt
PUR_700_15_03_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	fehlt	OK	fehlt
PUR_200_15_02_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_400_21_01_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_400_18_03_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_400_21_03_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_200_15_01_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_400_15_02_Temp.xlsx	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
PUR_200_21_02_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_700_21_01_Temp.xlsx	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
PUR_700_00_02_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	fehlt	fehlt	fehlt
PUR_400_15_04_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_700_15_01_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_700_18_02_FTIR.xlsx	OK	OK	OK	OK	OK	fehlt
PUR_400_18_02_Temp.xlsx	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
PUR_400_21_02_FTIR.xlsx	OK	OK	fehlt	OK	OK	fehlt

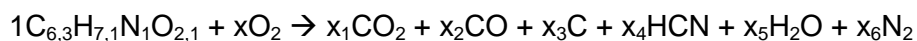
Abbildung 2: Auswertetool - Berechnung der Mittelwerte für die Reaktionsgleichungen und Übersicht über alle Versuchsdateien

Abbildung 2 zeigt das Auswertetool (links) zum Berechnen der Mittelwerte und Erstellen der Diagramme. Es werden die Versuchszeiten für alle Messwerte automatisch angeglich. Es lässt sich eine Übersicht (rechts) anzeigen über alle Daten die mit dem Programm ausgewertet werden können und ob diese Dateien vorhanden sind.

Im nächsten Abschnitt ist das Vorgehen für ein untersuchtes Material exemplarisch dargestellt.

### Reaktionsgleichung für PUR:

Zunächst wird eine generalisierte Summenformel für das entsprechende Material zu Grunde gelegt. Für das untersuchte Material Polyurethan (PUR) wurde die Summenformel für Polyurethan aus dem SFPE-Handbook entnommen:



Die Konzentrationen der Produkte hängen von den Versuchsbedingungen ab und ihr Anteil ändert sich mit veränderlicher Temperatur bzw. Sauerstoffkonzentration. Die Konzentrationen der Produkte wurden in den Versuchen unter den unterschiedlichen Bedingungen ermittelt. Die Versuche wurden mehrmals durchgeführt und die Ergebnisse jeweils über den quasistationären Bereich der Versuchszeit gemittelt. Danach wurden aus den gemittelten Messwerten (ppm) die stöchiometrischen Koeffizienten für die Reaktionsgleichung berechnet. Die Auswertung lässt sich automatisiert mit dem Auswertetool durchführen.

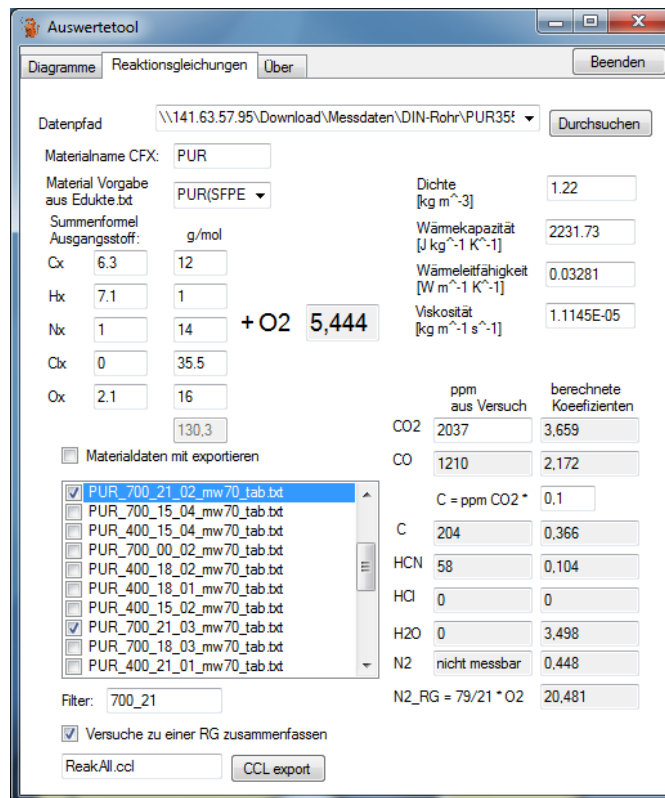


Abbildung 3: Auswertetool - Berechnung der Reaktionsgleichungen

Abbildung 3 zeigt die Berechnung einer gemittelten Reaktionsgleichung für PUR3554 bei den Bedingungen von 700°C und 21Vol% Sauerstoff. Oben sind die Koeffizienten des Eduktes, rechts unten die Konzentrationen der Produkte im Mittel und die dazugehörigen berechneten stöchiometrischen Koeffizienten abgebildet. Die Reaktionsgleichung kann für ANSYS CFX exportiert werden. Es lassen sich auch die Materialdaten exportieren, so dass sie in ANSYS CFX direkt genutzt werden können.

In den folgenden Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die stöchiometrischen Koeffizienten für eine Reaktion von PUR3554 und PUR3045SE mit Sauerstoff dargestellt. Die Reaktionskoeffizienten wurden für unterschiedliche Umgebungsparameter ermittelt. Die erste Zahl gibt die Temperatur in °C und die zweite Zahl die Umgebungskonzentration von Sauerstoff in Volumen% an.

Tabelle 1: Gemittelte (über die reproduzierten Versuche) Stöchiometrischen Koeffizienten für die Produkte (x<sub>1</sub>-x<sub>4</sub>) bei einer Reaktion von PUR3554 mit Sauerstoff

Parameter	CO2	CO	C	HCN
400_15	4,1010	1,6782	0,4101	0,1111
400_18	4,8540	0,8848	0,4854	0,0758
400_21	4,9540	0,7988	0,4954	0,0524
700_15	3,6380	2,1673	0,3638	0,1309
700_18	3,7640	2,0371	0,3764	0,1226
700_21	3,6590	2,1723	0,3659	0,1037

**Tabelle 2: Gemittelte (über die reproduzierten Versuche) Stöchiometrischen Koeffizienten für die Produkte ( $x_1$ - $x_4$ ) bei einer Reaktion von PUR3045SE mit Sauerstoff**

Parameter	CO <sub>2</sub>	CO	C	HCN
400_15	5,0510	0,6380	0,5051	0,1063
400_18	5,6040	0,1261	0,5604	0,0104
400_21	4,3930	1,2985	0,4393	0,1697
700_15	4,5170	1,1743	0,4517	0,1571
700_18	4,5680	1,1191	0,4568	0,1558
700_21	4,8560	0,8736	0,4856	0,0855

Für eine Auswahl an Materialien wurden bereits wie beschrieben Versuchsreihen durchgeführt. Die durchgeführten und ausgewerteten Versuche liefern die erforderlichen Daten für die numerische Berechnung der Rauchproduktion und –zusammensetzung. Die Versuche wurden in der modifizierten Rauchkammer, dem modifizierten DIN-Rohr und im halbtechnischen Maßstab (SBI) bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen und Bestrahlungsstärken durchgeführt. Nur dadurch lassen sich Sauerstoff- und Temperaturabhängigkeit der Rauchproduktion in das neu entwickelte numerische Modell einbringen. Die Versuche im DIN-Rohr wurden genutzt, um die chemischen Reaktionsgleichungen für das numerische Modell zu generieren. Für diese Berechnungen wurde ein 'Auswertetool' programmiert. Das Auswertetool bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche und ermöglicht die einfache Generierung der chemischen Reaktionsgleichungen, die in den verfügbaren aktuellen CFD Programmen direkt eingesetzt werden können. Die Rauchkammer wurde für die Überprüfung der Ergebnisse der numerischen Berechnungen im Vergleich mit Experimenten (Validierung) genutzt. Mit den Versuchen im halbtechnischen Maßstab wurde die Qualität der Übertragung von Versuchsergebnissen der kleinmaßstäblichen Versuche zum Realmaßstab abgeschätzt.

Um Messdaten und Reaktionsgleichungen für weitere Materialien zu gewinnen, sind die nötigen Versuchsaufbauten geschaffen worden. Dabei sind das modifizierte DIN-Rohr, die modifizierte SDC und der SBI die benötigten Versuchsstände, um im Verbund mit dem FTIR Daten für eine Erweiterung des Modells zu gewinnen.

Mit der Hilfe des Tools werden gemittelte Gaskonzentrationen über die Versuchszeit zu einer stöchiometrischen Reaktionsgleichung umgerechnet. Außerdem werden alle nötigen Diagramme automatisch erstellt. Dazu sind zwei weitere Programme, Gnuplot und Latex nötig. Die berechneten Reaktionsgleichungen dienen als Eingangsparameter für die Simulationen. Durch die optimierten Simulationen lassen sich Gaskonzentrationen einzelner Gase in den Geometrien verfolgen. Im nächsten Schritt sollen auch Sichtweiten berechnet werden können. Es sind weitere Forschungen geplant, für die dieses Projekt die Initialzündung war. Auch die zukünftigen Forschungsergebnisse werden veröffentlicht und damit zur Verfügung gestellt.

