

Ausschuß „Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz  
und zivile Verteidigung“ des Arbeitskreises V der Ständigen  
Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder

Forschungsbericht 146

Einfluß der Zusammensetzung von Brandrauch auf die  
Rauchschichtbildung in Räumen –  
Brandversuche zur Validierung von Modellen

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe

Karlsruhe

Dezember 2007

FA: Nr. 189 (3/2003)

193 (3/2004)

ISSN 0170-0060

## BERICHTSKENNBLATT

<b>Nummer des Berichtes:</b>  146	<b>Titel des Berichtes:</b>  Einfluß der Zusammensetzung von Brandrauch auf die Rauchschiechtbildung in Räumen Brandversuche zur Validierung von Modellen	<b>ISSN:</b>  0170-0060	
<b>Autoren:</b>  Dipl.-Ing. Hermann Schatz Dipl.-Ing. Dieter Brein		<b>durchführende Institution:</b> Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Hertzstr. 16 D-76187 Karlsruhe	
<b>Nummer des Auftrages:</b>  189 (3/2003) 193 (3/2004)		<b>auftraggebende Institution:</b> Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung des Arbeitskreises V der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder	
<b>Abschlußdatum:</b>  Dez 2007			
<b>Seitenzahl:</b>  91	<b>Bilder:</b>  50	<b>Tabellen:</b>  3	<b>Literaturverweise:</b>  /

### **Kurzfassung:**

Ziel dieser Arbeit war es, Kenntnisse darüber zu erlangen, unter welchen Umständen bei Bränden stabile Rauchsichten gebildet werden können bzw. wann sich ausgehend von stabilen Verhältnissen instabile einstellen. Verschiedene Einflüsse wie die Zusammensetzung der Rauchschiecht, die Luftfeuchtigkeit und/oder die Rekondensation von Wasserdampf, wurden in theoretischen Überlegungen dargelegt und in ihren Bedeutungen abgeschätzt mit dem Ergebnis, daß diese Einflüsse von untergeordneter Bedeutung für die Stabilität von Rauchsichten sind und allenfalls in extremen Grenzbereichen ausschlaggebend sein können. Einflüsse der Rauchschiechttemperatur sowie strömungstechnische Effekte sind im Vergleich dazu sicherlich als wesentlich höher zu bewerten. Durch Untersuchungen in einem Versuchsraum wurden die theoretischen Ausführungen ergänzt und die Ergebnisse aus den Versuchen den Simulationsmodellrechnungen gegenübergestellt.

Dabei kann festgestellt werden, dass Simulationsrechnungen in den untersuchten Grenzen Abweichungen von den Ergebnissen bei realen Bränden beinhalten. Da es im Grenzbereich sehr schwierig ist, Untersuchungen eines realen Brandes so durchzuführen, dass sich einerseits überhaupt eine Rauchschiecht ausbildet und diese außerdem bestehen bleibt und sich nicht sofort wieder auflöst und andererseits eine Simulation annähernd die gleichen Ergebnisse bringen soll wie diejenigen eines realen Brandes, ist es wegen der Vielzahl von Möglichkeiten notwendig sowohl noch weiterführende reale Untersuchungen als auch Simulationsrechnungen mit zusätzlichen bzw. geänderten Parametern durchzuführen, um umfassendere und besser übereinstimmende Ergebnisse zu erzielen. Hier konnten nur einzelne Schritte in dieser Richtung simuliert werden.

Bei der Entwicklung von Brandschutzkonzepten und Risikobeurteilungen kommt der Lage und Stabilität einer Rauchschiecht in einem Raum eine besondere Bedeutung zu, weil davon die Beurteilung für eine gefahrlose Benutzung von Rettungswegen abhängt.

Bleibt der Rauch in Deckennähe oder verteilt er sich im gesamten Raum? Um diese Frage zu beantworten, sollten grundsätzlich zu den Simulationsberechnungen immer praxisnahe Tests durchgeführt werden. Zusätzlich sind in einem Brandfall die Sichtverhältnisse im Raum und die Toxizität des Brandrauches bzgl. der zur Verfügung stehenden Fluchtzeit und Fluchtweglänge mit zu berücksichtigen und in die Beurteilung einzubeziehen.

### **Schlagwörter:**

FDS, Brandsimulation, Simulationsrechnung, Dekalin, Verbrennung, Rauchschiecht, Brandleistung, Brandausbreitung, Brandgas, Wärmefreisetzung, Rußbildung, Wasserdampf, Kohlenstoffanteil, Plume, Rauchschiechtbildung, Luftzufuhr, Validierung

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
1	Einleitung	1
2	Verbrennung, Wärmefreisetzung, Massenstrom	2
2.1	Stöchiometrie der vollständigen Verbrennung	7
2.2	Stöchiometrie der unvollständigen Verbrennung	7
2.3	Luftfeuchtigkeit	9
2.4	Dichtedifferenz – Virtuelle Temperaturdifferenz	11
3	Einflüsse bei der Verbrennung	12
3.1	Wasserdampf, Luftfeuchtigkeit	13
3.2	Unvollständige Verbrennung bei variabler Wärmefreisetzungsrate	13
3.3	Unvollständige Verbrennung bei konst. Wärmefreisetzungsrate	14
3.4	Kohlenstoffanteil mit Einfluß auf die Wärmefreisetzungsrate	15
3.5	Kohlenstoffanteil ohne Einfluß auf die Wärmefreisetzungsrate	16
3.6	Ausgangstemperatur	17
3.7	Rekondensation von Wasserdampf	18
4	Versuchsraum, -aufbau, -parameter	20
5	Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	23
5.1	Dekalin, Rauchpulver, Disconeibel	23
5.2	Temperaturmessung	28
5.3	Druckmessung	44
5.4	Rauchdichtemessung	51
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	58
7	Simulationsmodell, Raummodell	59
7.1	Simulation FDS (Fire Dynamics Simulator)	61
7.2	Rauchsicht und Temperatur	62
8.	Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Parametern	75
9.	Zusammenfassung	90

## 1 Einleitung

Ein Brand ist ein Schadensereignis, das ohne oder mit Fremdverschulden sowohl in der freien Natur als auch innerhalb von Gebäuden auftreten kann. In beiden Fällen können zahlreiche Personen davon betroffen sein. Während im Freien die Fluchtmöglichkeiten meist gegeben sind, müssen in Gebäuden die Flucht- bzw. die Rettungswege bereits bei der Planung der Gebäude mit berücksichtigt werden und die Auslegung derart erfolgen, dass zu jeder Zeit ein Verlassen des betreffenden Gebäudes im Zuge der Selbstrettung ohne Gefährdung möglich und somit auch der Personenschutz gewährleistet ist. Bei diesen Überlegungen sollten jedoch die Fremdrettung und der Sachwertschutz nicht vernachlässigt werden.

Bei Bränden in Gebäuden werden bei den betroffenen Personen sowohl die Verletzungen als auch die Todesfälle in den meisten Fällen nicht durch das Feuer selbst, sondern durch den bei einem Schwelbrand bzw. beim Verbrennen von Materialien verschiedener Zusammensetzung entstehenden toxischen Brandrauch sowie durch die Verminderung des Sauerstoffanteils in der Atemluft verursacht. Aufgrund dieser Tatsache ist es nicht nur erforderlich, die Entstehung und die Ausbreitung eines Brandes, sondern auch die Bildung und die Ausbreitung des entstehenden Brandrauches näher zu untersuchen.

In diesem Brandrauch sind unterschiedliche Anteile von Rußpartikeln, Asche und Kondensaten vorhanden. Bei unvollständiger Verbrennung sind einerseits die Partikelanteile höher, aber andererseits die freigesetzte Wärmeenergie geringer, so dass in diesen Fällen meist keine sichtbaren Flammen zu erkennen sind. Die Toxizität des Brandrauches nimmt aufgrund der unverbrannten Anteile entsprechend zu. In einem Raum entsteht bei einer geringen Wärmeentwicklung eines Brandes auch nur eine entsprechend geringe Dichtedifferenz, so dass sich der Brandrauch bereits in Bodennähe ausbreiten kann und nicht notwendigerweise aufsteigt und somit unterhalb der Raumdecke eine stabile Rauchsicht bildet. Bei einem Brand mit größeren Dichteunterschieden zur Umgebung steigt der Brandrauch direkt über dem Brandherd nach oben und bildet meistens in den oberen Teilen eines Raumes eine Rauchsicht aus. Um den sich möglicherweise im Raum befindlichen Personen genügend Zeit zur Rettung aus der

Gefahrenzone geben zu können, darf diese Rauchsicht während eines Brandereignisses nicht in den eigentlichen Fluchtbereich absinken.

Die Stabilität von Rauchsichten in Räumen kann durch unterschiedliche Einflüsse sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden. Daher ist es von besonderem Interesse, derartige Einflüsse aufzugreifen bzw. Grenzwerte zu bestimmen, die die Stabilität einer Rauchsicht gewährleisten können. Mit derartigen Kenntnissen ist es möglich, Abweichungen bei realen Bränden zu vorhandenen Rechenmodellen bei der Bewertung besser berücksichtigen und auf diese Art und Weise Verbesserungen im Brandschutz bezüglich der Aussagefähigkeit von Rechenmodellen (Zonen-, Feldmodelle) bei der Bestimmung der Rauchfreihaltung von Rettungswegen erzielen zu können.

Eine Erhöhung der Rauchdichte, d.h. eine Einschränkung der Sichtweite, aber auch die Toxizität der Brandgase ist vordringlich bei der Planung von Rettungswegen in Gebäuden besonderer Art und Nutzung wie z. B. in Hallen und Versammlungsstätten zu berücksichtigen. Entsprechend hoch ist der Stellenwert, den die Entrauchung in modernen Brandschutzkonzepten für den Personenschutz einnimmt.

Zur besseren Beurteilung dieser Thematik wurden sowohl theoretische Überlegungen angestellt als auch praktische Untersuchungen in einem Brandraum an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden visuelle Beobachtungen durchgeführt und die optische Dichte des Rauches, die Temperatur- und die Druckverhältnisse im Raum während der gesamten Versuchsdauer bestimmt.

## **2 Verbrennung, Wärmefreisetzung und Massenstrom**

Bei einem Brand in einem Gebäude steigen aufgrund des Auftriebes und der geringeren Dichte gegenüber der Umgebung die Brandgase bzw. der entstehende Brandrauch über dem Brandherd nach oben und werden durch die Decke als Hindernis in eine waagrechte Strömung umgelenkt bis sie an seitliche Begrenzungswände stoßen. Durch die geringere Dichte des heißen Brandrauches bildet sich meistens unterhalb der Decke eine Rauchsicht aus, die auf der vorhandenen kühleren Luftschicht „aufschwimmt“.

Strömen während eines Brandereignisses kontinuierlich heiße Brandgase nach oben, so bildet sich nach und nach eine den Umgebungsbedingungen entsprechend dicke Rauchschiicht in Deckennähe aus. Die Dicke dieser Rauchschiicht hängt von vielen Parametern wie z.B. von der Wärmefreisetzung und der Dauer eines Brandes, der Temperatur, dem Druck und/oder den Ventilationsbedingungen im betreffenden Raum ab. Leckageöffnungen oder auch bereits installierte Zu- und Abluftöffnungen beeinflussen diese Rauchschiichtbildung ebenso.

Je nach Brandverlauf erfolgt die Verbrennung von Materialien entweder vollständig oder unvollständig, was von verschiedenen materialspezifischen und äußeren Einflüssen abhängt. Es kann allgemein davon ausgegangen werden, dass eine Verbrennungsreaktion oft nur teilweise vollständig abläuft. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden die Faktoren  $a_v$  (prozentualer Anteil des vollständig verbrannten Brandstoffes) und  $a_u$  (prozentualer Anteil des unvollständig verbrannten Brandstoffes) eingeführt. Zusammen ergeben diese Anteile 100 Prozent.

$$a_u + a_v = 1 \quad (1)$$

Bei der Verbrennung von flüssigen bzw. festen Brandstoffen findet ein Verdampfungs- bzw. ein Zersetzungs Vorgang statt. Als Bestandteile derartiger Pyrolysereaktionen entstehen gasförmige und/oder feste Stoffe wie z. B. Kohlenmonoxid CO, Kohlendioxid CO<sub>2</sub>, Wasserdampf H<sub>2</sub>O und Kohlenstoff C (Rußpartikel). Die entstandenen Gase besitzen jeweils andere molare Massen als Luft und haben bei Anwendung des idealen Gasgesetzes auch unterschiedliche Dichten (ein Mol eines Gases hat bei ein und derselben Temperatur das gleiche Volumen). Im Gegensatz dazu ist das Volumen von Partikeln in einer Rauchschiicht vernachlässigbar gering. Diese Partikel können aufgrund ihrer höheren Dichte bei sonst gleichen Randbedingungen nach unten absinken.

Um die quantitative Zusammensetzung einer Rauchschiicht in einem Raum bestimmen zu können, benötigt man zunächst Kenntnis über die einzelnen Verbrennungsprodukte. Mit Hilfe der Stöchiometrie ist es anschließend möglich, die Massenanteile  $\dot{m}_b$  der einzelnen Bestandteile des jeweiligen Brandstoffes zu berechnen und eine Gleichung für die Gesamtreaktion anzugeben. Die Berechnung des Massenstromes bei Flüssigkeiten

ergibt sich aus der brennenden Fläche, der jeweiligen Dichte der Flüssigkeit und deren Abbrandgeschwindigkeit. Die Wärmefreisetzung eines Brandes wird mit der Brennstoffmasse  $m$  und dem effektiven unteren Heizwert  $H_{u,eff}$  des verwendeten Brennstoffes ermittelt.

Mit rechentechnischen Verfahren, wie z. B. Zonenmodellen, ist es bei entsprechenden Annahmen möglich, einen Brand in einem vorgegebenen Raum zu simulieren, um die für die Auslegung und Dimensionierung von anlagentechnischen Maßnahmen zur Abführung von Brandrauch aus Gebäuden notwendigen Maßnahmen zu erreichen. Als Mindeststandard gelten Berechnungsverfahren nach DIN 18232. Zusätzlich wird häufig eine Überprüfung der Rechenergebnisse als notwendig angesehen und diese bei der Abnahme am jeweiligen Objekt real durchgeführt.

Bild 1 zeigt einen Modellraum (ohne Öffnungen) mit einer vorgegebenen Höhe von 3 m und der Angabe der Zusammensetzung der möglichen einzelnen Massenströme. Dabei werden stark vereinfacht die obere Rauchschiicht und die untere Luftschicht als komplett getrennte Systeme betrachtet, die sich gegenseitig nicht beeinflussen. Die Rauchschiicht stellt sich nach dieser Modellvorstellung aufgrund der Massen- und Energiebilanz in einer bestimmten Höhe ein.

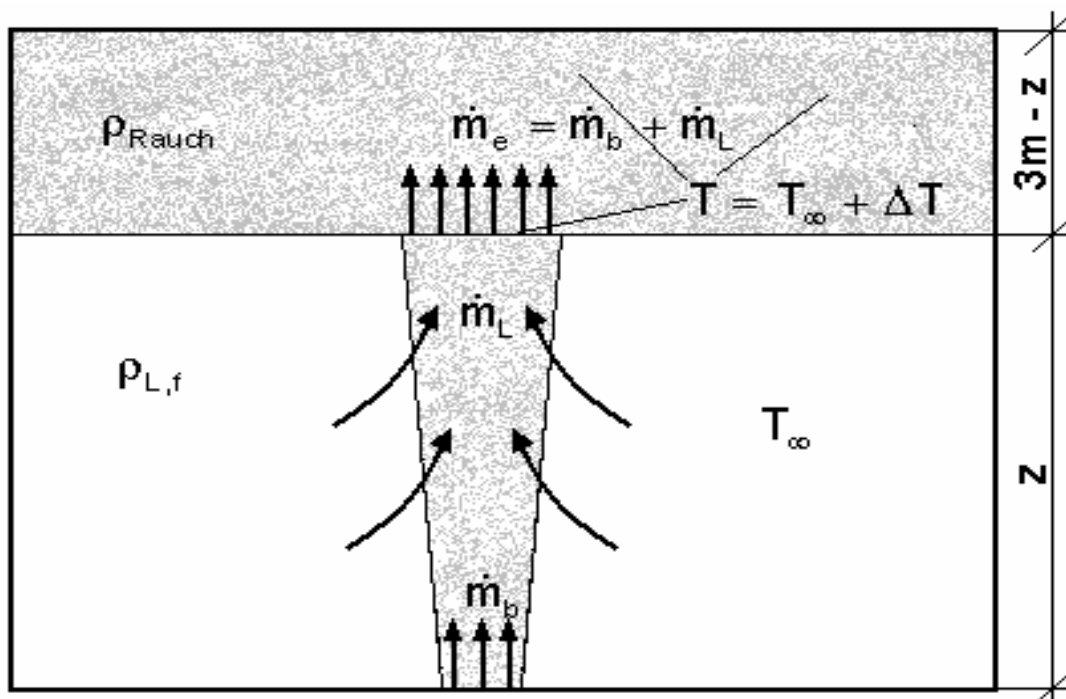


Bild 1. Modellraum: Zusammensetzung der Massenströme.

Zunächst wird für eine vorgegebene Brandquelle der Massenstrom des aufsteigenden Brandrauchs und dessen Zusammensetzung ermittelt. Die prozentualen Anteile der einzelnen Bestandteile (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Luft) stellen sich ebenfalls in der vorhandenen Rauchschrift ein. Ist die Temperatur der Rauchschrift  $T$  sowie die der Umgebung  $T_\infty$  bekannt, so kann die Differenz der Brandrauchdichte  $\rho_{\text{Rauch}}$  und der Umgebungsdichte  $\rho_{L,f}$  ermittelt werden.

Unter Verwendung der Stöchiometrie der unvollständigen Verbrennung und der Kenntnis der molaren Massen der Verbrennungsprodukte ist es möglich, den Massenstrom  $\dot{m}_b$  anteilig für die verschiedenen Brandprodukte, hier CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, C, zu bestimmen. Bei bekannter Abbrandgeschwindigkeit  $v_{a,\infty}$  des Brandstoffes können die pro Zeiteinheit verbrannten mol-Anteile ermittelt und über die Stöchiometrie die entstehende Abgasmenge sowie die der einzelnen Produktanteile bestimmt werden. Da weiterhin  $\dot{m}_e$  bekannt ist, kann nun der Massenstrom  $\dot{m}_L$  mit Gleichung (5) berechnet werden. Der Massenstrom  $\dot{m}_L$  besteht nur aus der in die Brandrauchsäule (engl.: plume) eingemischten Umgebungsluft. Damit sind die Zusammensetzung der Bestandteile im Plume sowie die der entstehenden Rauchgasschicht bekannt.

Um verschiedene Einflüsse (z. B. Brandquelle, Rauchgaszusammensetzung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wasserdampf-Rekondensation) auf die Stabilität von Rauchschriften beurteilen zu können, wurden verschiedene Parameter berücksichtigt und damit die Auswirkungen auf die Dichtedifferenz einer Rauchschrift zur Umgebung abgeschätzt. Mit derartigen Rechenmodellen können durch Variation verschiedener Parameter die realen Verhältnisse eines Brandes annähernd wiedergegeben werden.

Bild 1 stellt eine Momentaufnahme dar, die folgende Vereinfachungen zugrund legt:

- Die Temperaturen in der jeweiligen Schicht sind homogen ( $T_\infty$ ,  $T$ ) und ergeben sich aus der Vorgeschichte (Massen- und Energiebilanz).
- Die Temperatur  $T$  der Rauchschrift entspricht der Temperatur im Plume in der Höhe  $z$  über dem Brandherd.
- Zwischen den Schichten finde kein Austausch von Wärmeenergie durch Strahlung oder Konvektion statt.



- Ein real vorhandener allmählicher Temperaturanstieg von  $T_\infty$  und  $T$  wird nicht berücksichtigt.
- Die Unterkante der Schicht liegt auf der Höhe  $z$ .
- Die Gas- und Rauchkonzentration sind jeweils als homogen angenommen

Sowohl für eine beispielhafte Berechnung als auch für die praktischen Untersuchungen wurde wegen seiner starken Rußbildung als Brandstoff Dekalin ( $C_{10}H_{18}$ ) gewählt, wobei folgende Daten zugrunde gelegt wurden.

Dekalin ( $C_{10}H_{18}$ )			
Dichte	$\rho =$	0,87	kg/l
Heizwert	$H =$	25000	kJ/kg
Abbrandgeschwindigkeit	$v_{a\infty} =$	2	mm/min
Molare Masse	$M =$	138	g/mol

Mit Hilfe der Fläche  $A$  eines Brandherdes, der Kenntnis der Abbrandgeschwindigkeit  $v_{a\infty}$ , der Dichte  $\rho$  und des Heizwertes  $H$  des Brandstoffes (Dekalin) kann der Massenstrom und die Wärmefreisetzung wie folgt ermittelt werden.

$$\dot{m}_{\text{Dekalin}} = v_{a\infty} \cdot A \cdot \rho_{\text{Dekalin}} \quad [\text{kg/s}] \quad (2)$$

$$\dot{Q}_P = \dot{m}_{\text{Dekalin}} \cdot H \quad [\text{kW}] \quad (3)$$

Der Massenstrom  $\dot{m}_e$  im Plume setzt sich zusammen aus den Verbrennungsprodukten  $\dot{m}_b$  und der während des Aufsteigens in den Plume eingemischten Luft  $\dot{m}_L$ . Der Massenstrom und die Temperatur sind von der Aufstiegshöhe  $z$  abhängig, da mit zunehmender Höhe immer mehr Luft in die Rauchgassäule eingemischt wird. Dadurch steigt der Massenstrom an und der Plume kühlt langsam ab.

Für den Plume gelten im Ähnlichkeitsbereich der Rauchströmung näherungsweise folgende Gleichungen (4) und (6).

$$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_P^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} \quad (4)$$

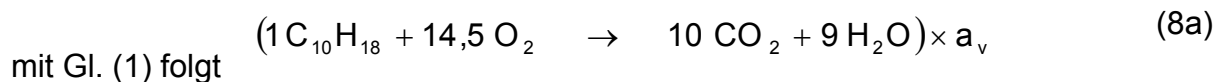
$$\dot{m}_e = \dot{m}_b + \dot{m}_L \quad (\text{s. Bild 1}) \quad (5)$$

$$\Delta T_0 = 9,1 \cdot \left[ \frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2} \right]^{1/3} \cdot Q_c^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \quad (6)$$

$$T = T_\infty + \Delta T_0 \quad (\text{s. Bild 1}) \quad (7)$$

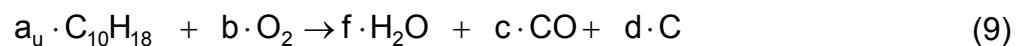
## 2.1 Stöchiometrie der vollständigen Verbrennung

Bei der vollständigen Verbrennung von Dekalin reagieren dessen Dämpfe mit Sauerstoff  $O_2$  zu Kohlendioxid  $CO_2$  und Wasserdampf  $H_2O$ , wobei 1 mol Dekalin mit 14,5 mol Sauerstoff zu 10 mol Kohlendioxid und 9 mol Wasserdampf verbrennt, wie die Gleichungen zeigen.



## 2.2 Stöchiometrie der unvollständigen Verbrennung

Bei der unvollständigen Verbrennung reagieren  $a_u$  mol Dekalin mit  $b$  mol Sauerstoff  $O_2$  zu  $f$  mol Wasserdampf  $H_2O$  sowie zu  $c$  mol Kohlenmonoxid  $CO$  und  $d$  mol Kohlenstoff  $C$ , wie in folgender Gleichung zu ersehen ist. Sonstige Komponenten werden vernachlässigt



Der Kohlenstoffanteil eines Dekalinmoleküls oder auch anderer stark rußender Brandstoffe, bei deren Verbrennung C-Atome entstehen können, kann erfahrungsgemäß zwischen 20% und 60% liegen. Um dies zu berücksichtigen enthalten die nächsten beiden Gleichungen den Faktor  $X$ .

$$C_{10} \cdot X = d \cdot C \quad (10a)$$

$$10 \cdot C \cdot X = d \cdot C \quad (10b)$$

Im Folgenden werden die Bilanzen für die einzelnen Atome nach Gleichung (9) aufgestellt. Dies führt zu einem linearen Gleichungssystem, mit dem die Unbekannten b, c, d und f berechnet werden können.

Der Kohlenstoffanteil des Dekalinmoleküls kann wie folgt beschrieben werden:

$$I: \quad \boxed{d = 10 \cdot X} \quad (11a)$$

Die Kohlenstoffbilanz ergibt sich entsprechend zu:

$$[10 \cdot C] \cdot a_u = [c + d] \cdot C$$

$$II: \quad \boxed{c + d = 10 \cdot a_u} \quad (11b)$$

Die Wasserstoffbilanz ergibt sich entsprechend zu:

$$[18 \cdot H] \cdot a_u = [2 \cdot H] \cdot f$$

$$III: \quad \boxed{f = 9 \cdot a_u} \quad (11c)$$

Die Sauerstoffbilanz ergibt sich entsprechend zu:

$$[2 \cdot O] \cdot b = c \cdot O + f \cdot O$$

$$IV: \quad \boxed{2 \cdot b - c - f = 0} \quad (11d)$$

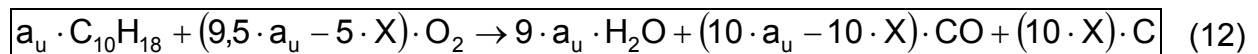
Aus den Gleichungen I bis IV lässt sich folgende Matrix ableiten:

$$\begin{bmatrix} b \\ c \\ d \\ f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \cdot X \\ 10 \cdot a_u \\ 9 \cdot a_u \\ 0 \end{bmatrix}$$

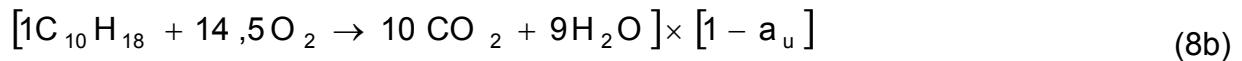
Mit der Lösung dieser Matrix

$$\begin{aligned} b &= 9,5 \cdot a_u - 5 \cdot X \\ c &= 10 \cdot a_u - 10 \cdot X \\ d &= 10 \cdot X \\ f &= 9 \cdot a_u \end{aligned}$$

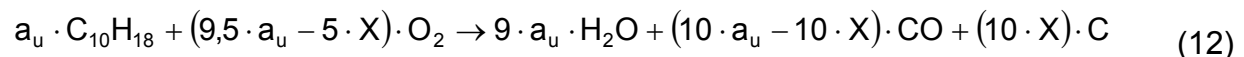
ergibt sich somit folgende Gleichung:



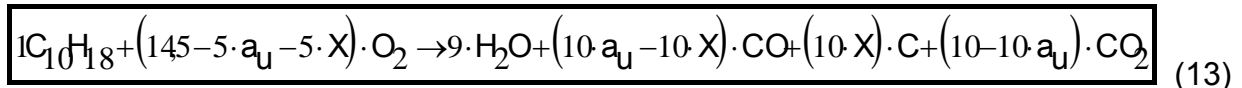
Da die Verbrennungsreaktionen teilweise vollständig und teilweise unvollständig ablaufen, kann durch Addieren beider Anteile die Gesamtreaktion angegeben werden:



addiert



ergibt als Gesamtreaktion



### 2.3 Luftfeuchtigkeit

In der natürlichen Umgebung ist immer eine gewisse Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  vorhanden, die sowohl bei Versuchen unter realen Bedingungen als auch bei Berechnungen berücksichtigt werden sollte. Diese feuchte Luft setzt sich zusammen aus trockener Luft und dem darin enthaltenen Wasserdampf, so dass der Gesamtdruck aus der Summe der Partialdrücke angegeben werden kann:

$$p_{\text{Luft,feucht}} = p_{\text{Luft,trocken}} + p_{\text{Wasserdampf}} \quad (14)$$

(mit  $p_{\text{Luft,feucht}}$  = absoluter Atmosphärendruck)

Unter Einbeziehung der spezifischen Gaskonstanten von Wasserdampf und trockener Luft

$$R_w = 462 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (15a)$$

$$R_L = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (15b)$$

und unter der Annahme, dass sich beide Gase in den betrachteten Temperatur- und Druckbereichen nahezu wie ideale Gase verhalten, kann für die weitere Berechnung das ideale Gasgesetz angewendet werden:

$$\frac{m}{V} = \rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (16)$$

Die Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  geht hierbei als messbare Größe in die Berechnung ein. Sie ist definiert als der Quotient des vorhandenen Wasserdampfpartialdruckes und des Sättigungsdampfdruckes:

$$p_w = \varphi \cdot p_s \quad (17)$$

Da die Dichte der feuchten Luft, die in den Plume eingemischt wird, berechnet werden kann, ist es außerdem möglich, die Zusammensetzung der vorhandenen Rauchsicht zu ermitteln und somit auch ihre Dichte im Vergleich zur Umgebungsdichte zu bestimmen.

*Nachfolgend wird in einem Beispiel die Berechnung der Dichte von feuchter Luft durchgeführt. Als Parameter wurden dabei eine Raumtemperatur von 20°C, eine Luftfeuchtigkeit von 50% und ein Atmosphärendruck von 10<sup>5</sup> Pa angenommen.*

Gegeben:  $t = 20^\circ \rightarrow T_\infty = 273,16\text{K} + 20\text{K} = 293,16\text{K}$   
 $\varphi = 50\%$   
 $p = 100000\text{ Pa}$  (Umgebungsdruck)

Gesucht:  $\rho_{\text{Luft,feucht}}$

Ergebnis:  $p_s(t = 20^\circ) = 2340\text{ Pa} \rightarrow$  (aus Tabelle in DIN 4108)

$$p_w = \varphi \cdot p_s = 50\% \cdot 2340\text{ Pa} = 1170\text{ Pa} \rightarrow \text{Partialdruck des Wasserdampfes}$$

$$\rho_w = \frac{p}{R_w \cdot T} = \frac{1170\text{ Pa}}{462 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293,16\text{ K}} = 0,008638 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$p_{\text{Luft}} = p_{\text{absolut}} - p_w = 100000\text{ Pa} - 1170\text{ Pa} = 98830\text{ Pa} \rightarrow \text{Partialdruck der Luft}$$

$$\rho_L = \frac{p}{R_L \cdot T} = \frac{98830 \text{ Pa}}{287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293,16 \text{ K}} = 1,17463 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{Luft, feucht}} = \rho_W + \rho_L = 0,008638 + 1,17463 = \underline{\underline{1,183 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

## 2.4 Dichtedifferenz – Virtuelle Temperaturdifferenz

Bei dieser Untersuchung wurden einzelne Einflüsse auf die Dichtedifferenz einer vorhandenen Rauchschrift zur umgebenden Atmosphäre abgeschätzt. Da Dichtedifferenzen in der physikalischen Einheit  $\text{kg}/\text{m}^3$  sehr schwer zu erfassende Meßgrößen sind, wurde die Dichtedifferenz in eine virtuelle Temperaturdifferenz umgerechnet. Diese Temperaturdifferenz sagt aus, um wieviel Kelvin man trockene Luft erwärmen bzw. abkühlen müsste, um dieselbe Dichtedifferenz zu erhalten.

In trockener Luft beträgt der Umgebungsdruck  $p = 101300 \text{ Pa}$ , das Volumen  $V_0 = 22,414 \text{ l/mol}$ , die Masse  $m = 28,966 \text{ g/mol}$  und die Umgebungstemperatur  $T_0 = 273 \text{ K}$ . Daraus ergibt sich die Dichte der Umgebung zu:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} = \frac{28,966 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{22,414 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} = 1,292 \frac{\text{g}}{\text{l}} \quad (18)$$

Nach dem Gasgesetz von Gay-Lussac hängt bei konstantem Druck das Volumen linear

$$\text{von der Temperatur ab. } V_1 = V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad (19)$$

Daraus folgt für die Dichte:

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1} = \frac{m}{V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0}} = m \cdot \frac{T_0}{V_0} \cdot \frac{1}{T_1} = 28,966 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{273 \text{ K}}{22,414 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} \cdot \frac{1}{T_1}$$

$$\rho_1 = f(T_1) = \frac{352,8 \cdot \text{kg} \cdot \text{K}}{T_1 \cdot \text{m}^3} \quad (20)$$

Aus dieser Gleichung (20) ist zu erkennen, dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen der Dichteänderung und der Temperaturänderung gibt. Betrachtet man die Funktion jedoch für den interessierenden Temperaturbereich zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $40^\circ\text{C}$  für kleine Dichtedifferenzen, aus denen instabile Rauchschriften resultieren können in

diesem Raum, so lässt sich feststellen, dass die Funktion in diesem Bereich nahezu ein lineares Verhalten aufweist, was in Bild 2 anschaulich dargestellt ist.

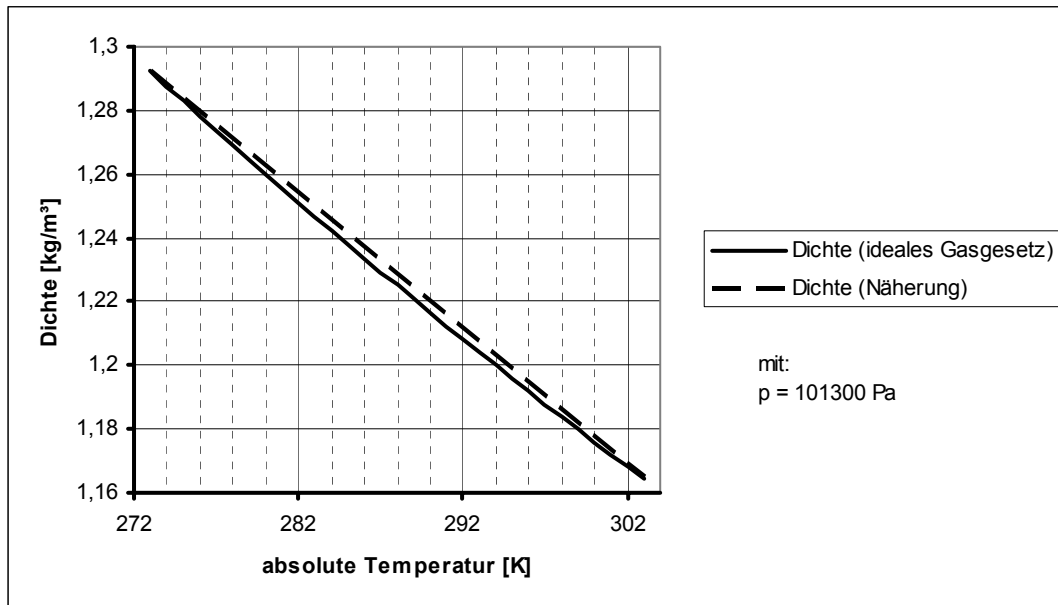


Bild 2. Dichte von trockener Luft in Abhängigkeit von der Temperatur.

Diese Näherung zeigt, dass eine Temperaturänderung von 1 Kelvin eine Dichteänderung von  $0,00425 \text{ kg/m}^3$  zur Folge hat. Daraus ergeben sich für die Dichte bzw. die Temperatur folgende Näherungsgleichungen:

$$\text{Dichteänderung} \quad \Delta \rho (\Delta T) = 0,00425 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \Delta T \quad (21)$$

$$\text{Temperaturänderung} \quad \Delta T (\Delta \rho) = \frac{\Delta \rho}{0,00425} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (22)$$

### 3 Einflüsse bei der Verbrennung

In den folgenden Abschnitten werden unterschiedliche Einflüsse auf die Dichtedifferenz aufgezeigt. Dabei wurde der Nullpunkt der virtuellen Temperaturdifferenz (s. Abschnitt 2.4) mit den jeweiligen Eingabeparametern auf den jeweils kleinsten ermittelten Wert gesetzt.

### 3.1 Wasserdampf / Luftfeuchtigkeit

Bild 3 zeigt den Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Dichtedifferenz. Die Werte wurden dabei in eine virtuelle Temperaturdifferenz umgerechnet. Bei Kurve A betrug die Ausgangstemperatur 20°C und bei Kurve B 30°C. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturdifferenz mit steigender Luftfeuchtigkeit abnimmt. Deshalb ist eine hohe Luftfeuchtigkeit von negativem Einfluss auf die Stabilität einer Rauchschiicht. Werte unter 0,1 K weisen jedoch auf die geringe Bedeutung der Luftfeuchtigkeit hin.

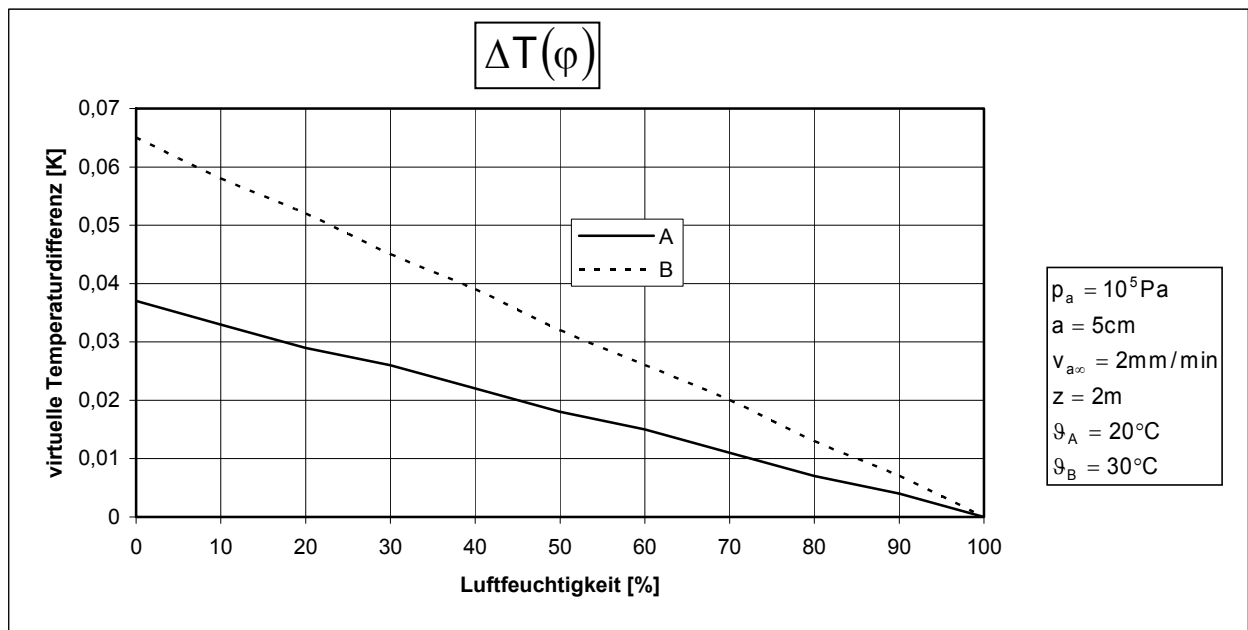


Bild 3. Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Dichtedifferenz.

### 3.2 Anteil der unvollständigen Verbrennung $a_u$ bei variabler Wärmefreisetzungsrates $\dot{Q}_p$

In Bild 4 ist die Dichtedifferenz (virtuelle Temperaturdifferenz) in Abhängigkeit des unvollständigen Anteils der Verbrennung aufgetragen. Die Dichtedifferenz wird kleiner bei größer werdendem Anteil der unvollständigen Verbrennung. Für die Zusammensetzung der Rauchschiicht bedeutet eine Erhöhung von  $a_u$  eine Zunahme der CO- und C-Konzentration bei gleichzeitiger Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Der große Einfluss auf die Dichtedifferenz ist jedoch weniger auf die Rauchgaszusammensetzung als vielmehr auf den Einfluss des unvollständig verbrannten Anteils  $a_u$  auf die Wärmefreisetzungsrates des Brandes zurückzuführen. Wenn der Anteil  $a_u$  ansteigt, kann durch die



schlechtere Verbrennung nicht mehr dieselbe Wärmemenge freigesetzt werden. Dies führt zu einer Abkühlung der Rauchgasschicht und dementsprechend zu einer verminderten Dichtedifferenz.

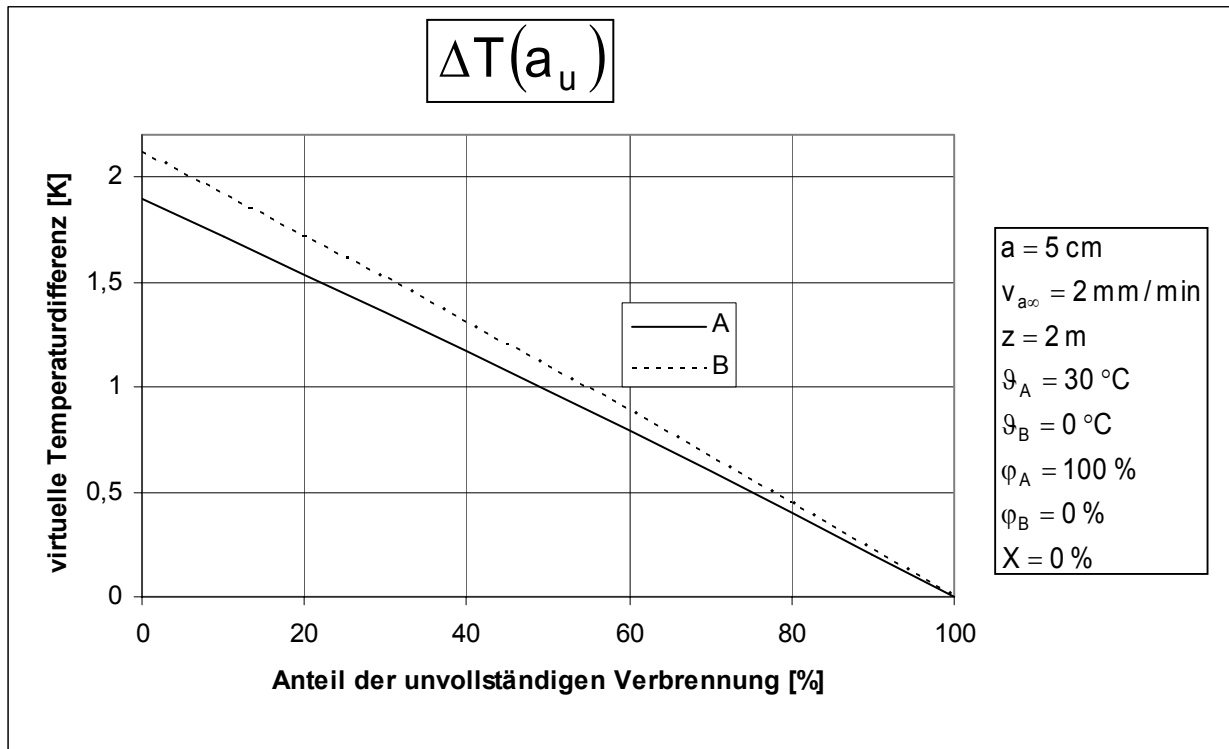


Bild 4. Einfluss der unvollständigen Verbrennung auf die Dichtedifferenz.

### 3.3 Anteil der unvollständigen Verbrennung $a_u$ bei konstanter Wärmefreisetzungsrates $\dot{Q}_p$

Da der Einfluss des Anteils  $a_u$  auf die Wärmefreisetzungsrates den Einfluss der Rauchzusammensetzung überdeckt, wurde bei gleichem Anteil von  $a_u$  eine konstante Wärmefreisetzungsrates beibehalten. Dabei wurde festgestellt, dass eine Erhöhung des Anteils  $a_u$  ebenfalls eine Erhöhung der Dichtedifferenz bewirkt. Dies kann mit der kleineren molaren Masse von CO gegenüber  $\text{CO}_2$  erklärt werden (gleiche Molmengen - gleiche Volumina). Deshalb nimmt die Rauchschieht immer weiter ab, wenn sich die  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu einer höheren CO-Konzentration hin verschiebt. Der beschriebene Effekt bewegt sich jedoch in einem Temperaturbereich von 0,1 K und ist damit vernachlässigbar gering, wie in Bild 5 zu ersehen ist.

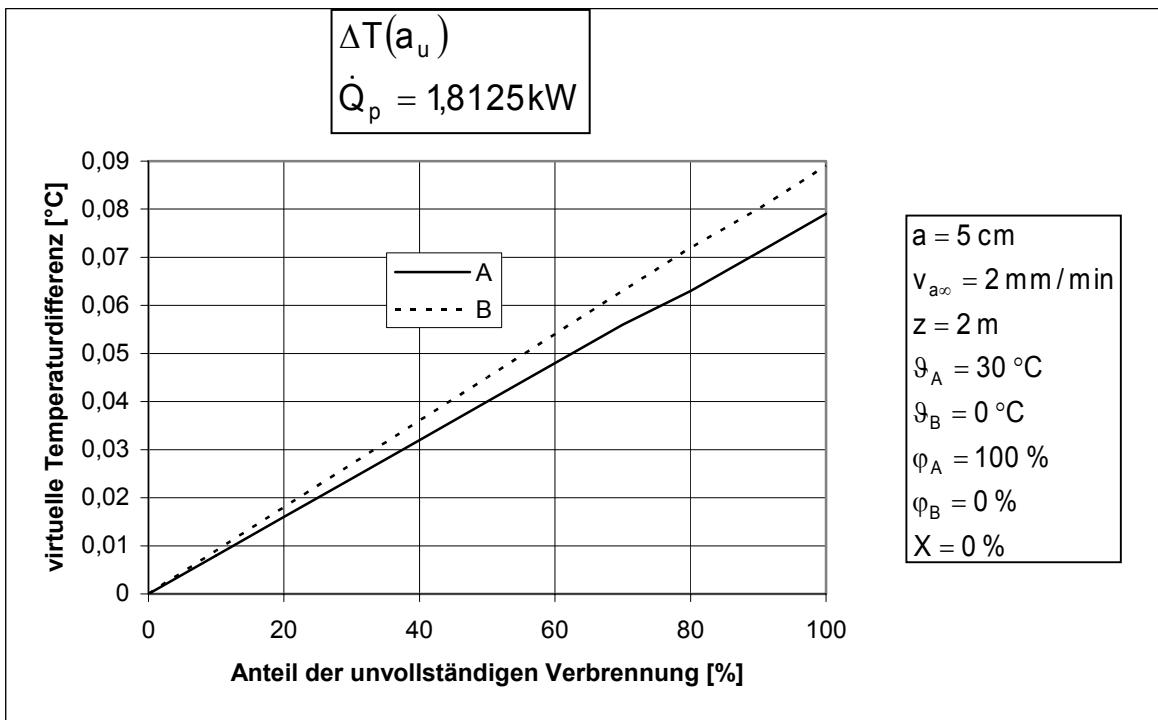


Bild 5. Einfluss der unvollständigen Verbrennung auf die Dichtedifferenz bei konstanter Wärmefreisetzungsrate.

### 3.4 Anteil des Kohlenstoffs X mit Einfluss auf $\dot{Q}_p$

In Bild 6 ist der Anteil des nicht verbrannten Kohlenstoffs in Abhängigkeit der Dichtedifferenz (virtuelle Temperaturdifferenz) dargestellt. Die Dichtedifferenz nimmt bei größer werdendem Anteil des nicht verbrannten Kohlenstoffs ab. Für die Zusammensetzung der Rauchschiicht bedeutet dies bei einer Erhöhung des Anteils X eine Zunahme der C-Konzentration bei gleichzeitiger Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration. Der große Einfluss auf die Dichtedifferenz ist jedoch weniger auf die Rauchgaszusammensetzung als vielmehr auf den Einfluss des Anteils X auf die Wärmefreisetzungsrate zurückzuführen. Wenn der Anteil X ansteigt kann durch die schlechtere Verbrennung nicht dieselbe Wärmemenge freigesetzt werden. Dies führt zu einer Abkühlung der Rauchschiicht und deshalb zu einer geringeren Dichtedifferenz.

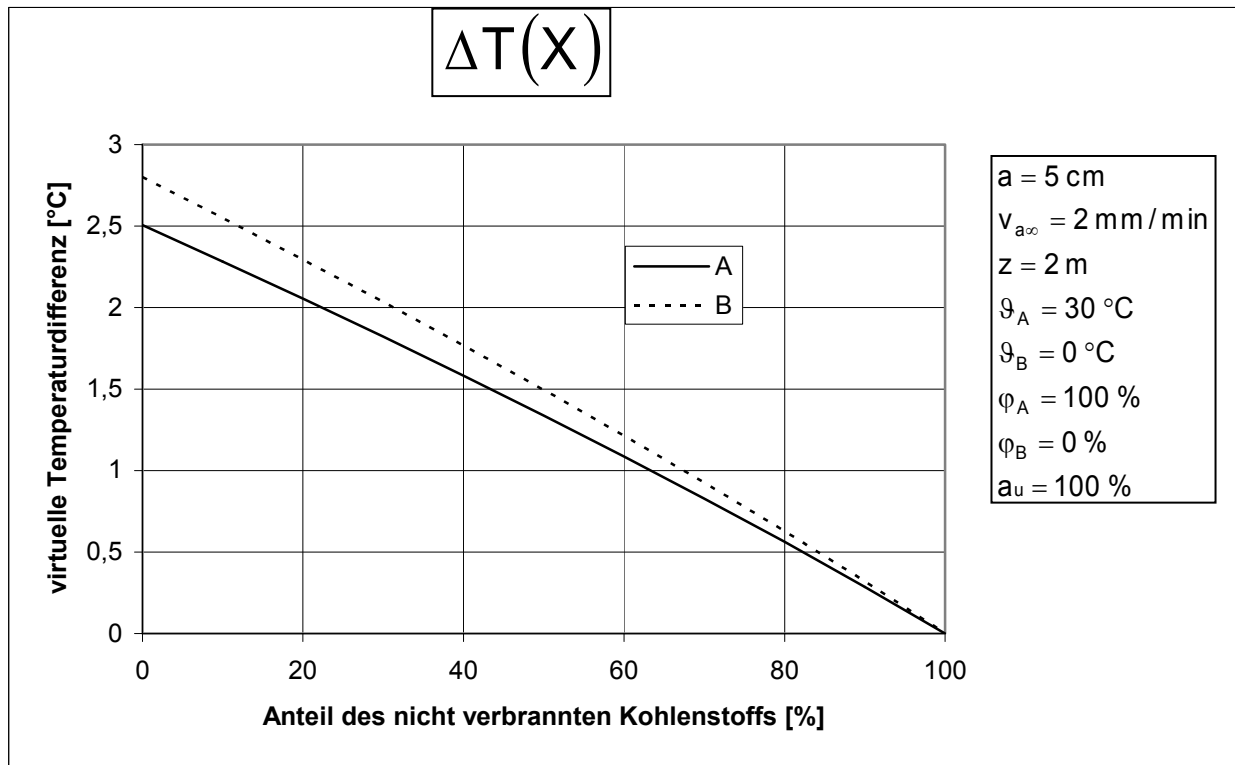


Bild 6. Einfluss des Anteils des nicht verbrannten Kohlenstoffs auf die Dichtedifferenz.

### 3.5 Anteil des Kohlenstoffs X ohne Einfluss auf $\dot{Q}_p$

Da der Einfluss des Anteils X auf die Wärmefreisetzungsrates den Einfluss der Rauchzusammensetzung überdeckt, wurde bei gleichem Anteil von X eine konstante Wärmefreisetzungsrates beibehalten. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung des Anteils X eine Verringerung der Dichtedifferenz bewirkt. Die Erklärung dafür ist, dass Kohlenstoff lediglich massenmäßig, aber nicht volumenmäßig in die Berechnung der Rauchschichtdicke eingeht. Das Volumen der in Partikelform vorliegenden Kohlenstoffteilchen ist jedoch im Vergleich zu den größeren Volumina der Brandgase vernachlässigbar gering. Wie Bild 7 zeigt, bewegt sich der Einfluss des beschriebenen Effekts auch hier wieder im Bereich von weniger als 0,1 K und kann damit vernachlässigt werden.

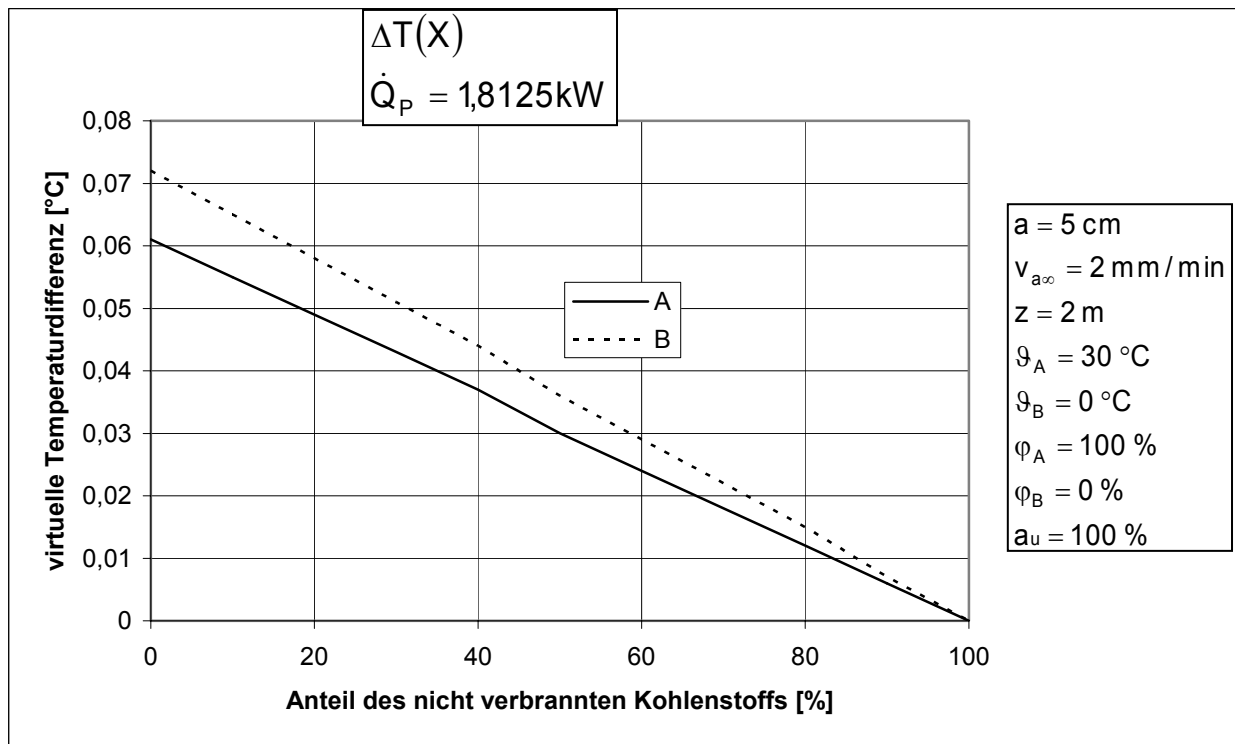


Bild 7. Einfluss des Anteils des nicht verbrannten Kohlenstoffs auf die Dichtedifferenz bei konstanter Wärmefreisetzungsrage.

### 3.6 Ausgangstemperatur

Bild 8 zeigt den Einfluss der Ausgangstemperatur im Bereich von  $0^\circ\text{C}$  bis  $30^\circ\text{C}$ . Es ist deutlich zu erkennen, dass die Dichtedifferenz mit zunehmender Ausgangstemperatur sinkt. Der Einfluss bewegt sich jedoch im Temperaturbereich von  $1\text{K}$ . Die sagt jedoch nichts darüber aus, ob sich der beschriebene Effekt in der Realität auch in dieser Art einstellt. Das Rechenprogramm berücksichtigt hierbei jedoch nicht, dass die Temperatur der in den Plume eingemischten Luft höher ist und somit auch die im oberen Bereich vorhandene Rauchsicht zusätzlich erwärmt und infolgedessen ebenfalls deren Dichte entsprechend verringert.

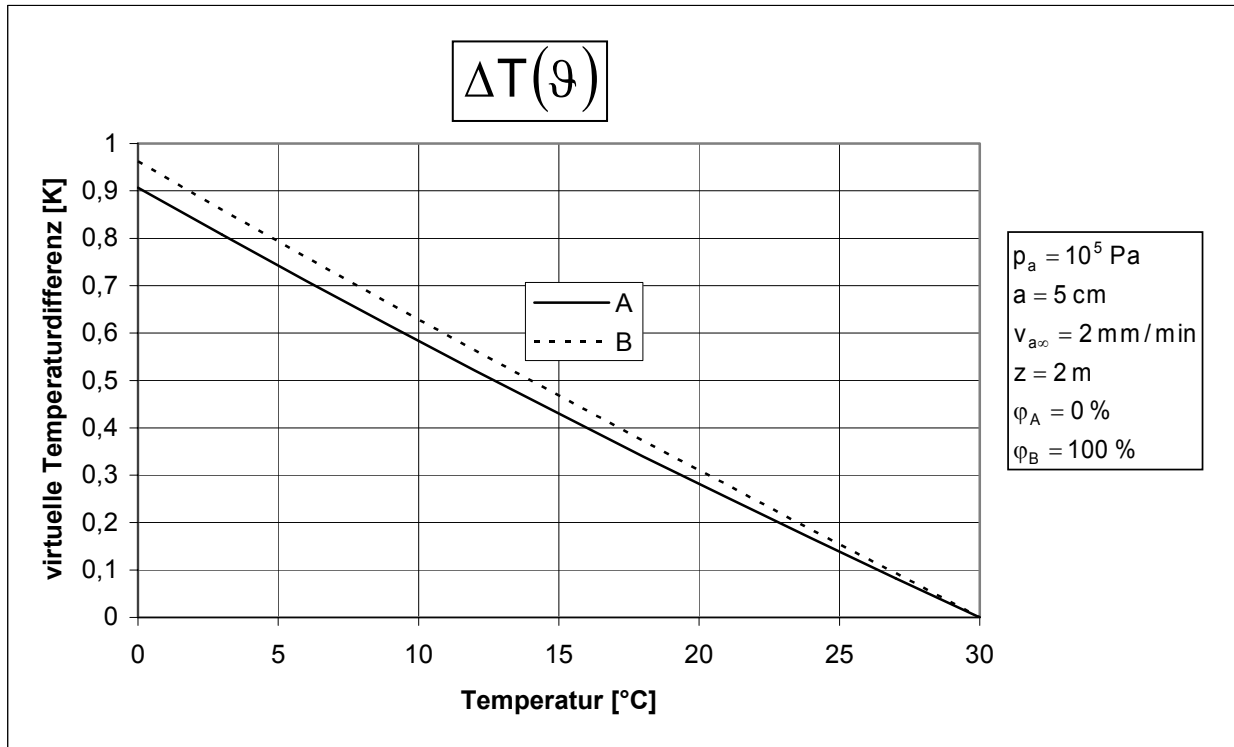


Bild 8. Einfluss der Ausgangstemperatur auf die Dichtedifferenz.

### 3.7 Rekondensation von Wasserdampf

Wasserdampf, der bei einem Brand an den Rußpartikeln einer sich bildenden Rauchsicht rekondensiert, wodurch diese Teilchen agglomerieren, schwer werden und dadurch ausfallen, könnte evtl. die Stabilität von Rauchsichten beeinflussen. Die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft, d. h. der Sättigungsdampfdruck  $p_s$  steigt mit zunehmender Temperatur der Luft an. Eine Kondensation von Wasserdampf an den Rußpartikeln kann deshalb nur dann stattfinden, wenn der Wasserdampfpartialdruck  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  den Wasserdampfsättigungsdruck  $p_s$  der Luft überschreitet, was gleichbedeutend mit einer Überschreitung der relativen Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  von 100% ist.

Bei einer für die Untersuchungen eingesetzten Brandwannengröße von  $50 \text{ cm}^2$  beträgt der Massenstrom  $\dot{m}_b$  beispielsweise nur ca.  $37 \text{ g/min}$ . Im Vergleich zum Massenstrom der in den Plume eingemischten Luft  $\dot{m}_L$  von ca.  $20600 \text{ g/min}$  ist dies ein sehr geringer Wert. Die entstehende Masse des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes

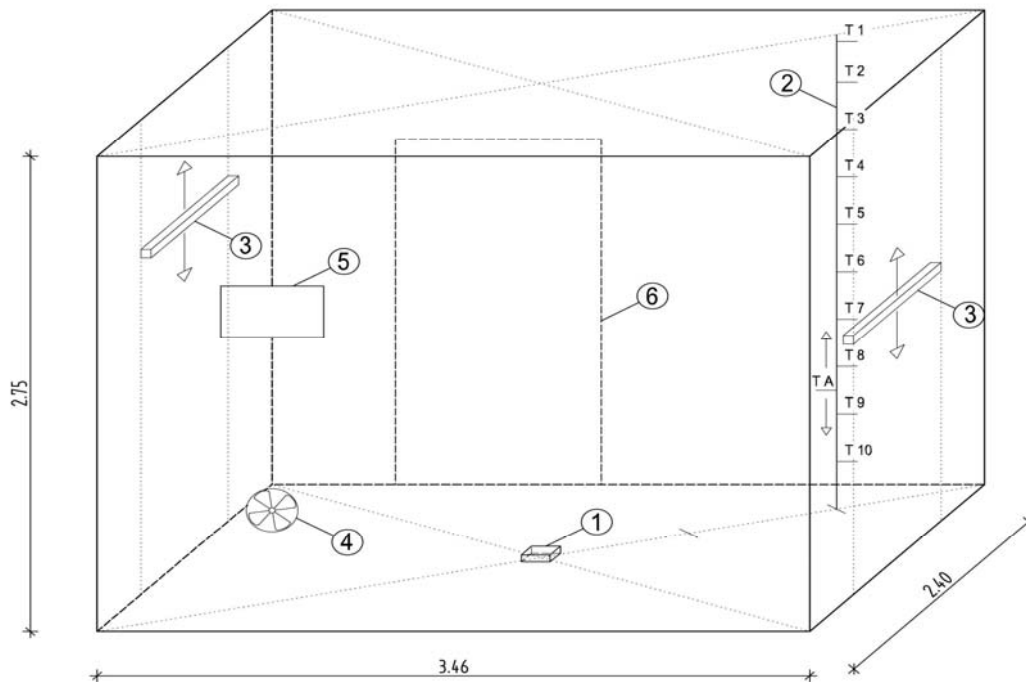
ist wiederum nur ein geringer Teil von  $\dot{m}_b$  und hat deshalb im Hinblick auf die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Raum und damit auf die mögliche Rekondensation von Wasserdampf praktisch keinen Einfluß.

Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt im Normalfall weit weniger als 100%. Entstehender Wasserdampf kann damit selbst ohne Erwärmung der Luft von dieser aufgenommen werden. Bei der Verbrennung wird Umgebungsluft in den Plume eingesaugt und dadurch erwärmt. Diese Erhöhung der Lufttemperatur im Raum hat eine Erhöhung des Wasserdampfsättigungsdrucks zur Folge, was die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Raumluft erhöht und dadurch die Chancen für eine Rekondensation des entstandenen Wasserdampfes senkt. Rußpartikel, die durch den Brand entstehen, besitzen jedoch die gleiche Temperatur wie die Gase der Rauchschiicht, was eine Rekondensation an den Rußpartikeln ausschließt, da der Sättigungsdampfdruck in der Rauchschiicht nicht erreicht wird. In der Nähe kühlerer Oberflächen sinkt der Wasserdampfsättigungsdruck  $p_s$  ab, so dass nur an diesen Stellen, wie z. B. der Raumdecke oder der Wände, eine Wasserdampfrekondensation überhaupt möglich ist. Dort ist eine Rekondensation für die Stabilität der Rauchschiicht jedoch unbedenklich, da auf diese Weise keine Rußpartikel zum Absinken gebracht werden.

Es kann daher angenommen werden, dass eine Wasserdampfrekondensation an Rußpartikeln normalerweise nicht stattfindet und damit für die Stabilität einer Rauchschiicht in einem Raum dementsprechend keine Rolle spielt. Größere Rußpartikel mit höheren Sinkgeschwindigkeiten könnten jedoch die Stabilität einer Rauchschiicht beeinflussen, indem sie Rauch aus einer sich in Deckennähe befindlichen stabilen Rauchschiicht in eine unten im Raum liegende rauchfreie/-arme Luftschicht mitreißen, so dass als Folge davon der gesamte Raum verrauchen könnte. Aufgrund der größeren Dichteunterschiede der einzelnen Partikel und des Brandrauches ist ein Mitreißen jedoch eher unwahrscheinlich und kann somit vernachlässigt werden.

#### 4 Versuchsraum / - aufbau / -parameter

Die Untersuchungen wurden in dem in Bild 9 abgebildeten Versuchsraum durchgeführt. Die Abmessungen des Versuchsraumes betragen 3,45 m mal 2,40 m mal 2,75 m (LxBxH). Die Wände bestehen aus Gipskartonplatten. Der Fußboden aus Stahlblech wurde mit feuerfesten Mineralfaserplatten abgedeckt. Als Zugang zum Raum wurde eine einflügelige Tür eingebaut und mit Dichtungen versehen. Alle im Raum befindlichen Leckageöffnungen wurden mit Silikon abgedichtet. Mehrere Sichtfenster ermöglichten von außen die Beobachtung der Versuche aus verschiedenen Blickwinkeln.



1. Brandherd (z. B. mit Dekalin bzw. Spiritus gefüllte Wanne)
2. Thermoelementkette T1 bis T10 (von oben nach unten bzw. umgekehrt) und fahrbares Thermoelement TA
3. Neonleuchten; höhenverstellbar
4. Ventilator zur Kontrolle der Dichtigkeit des Raumes
5. mehrere Sichtfenster
6. Tür des Versuchsraums (Druckmeßstelle für Dichtheit des Raumes in Türblattmitte)

Bild 9. Skizze des Versuchsraums.

Innerhalb des Versuchsraumes wurden 10 Thermoelemente (T1 bis T10) installiert, beginnend bei T1 unter der Decke, mit denen die Temperaturen in verschiedenen Höhen gemessen wurden. Mit einem variablen, über einen Elektromotor von außerhalb gesteuerten einzelnen Thermoelement (TA) konnten während des Versuchsablaufes Temperaturen in unterschiedlichen Raumhöhen gemessen werden. Durch eine verschließbare Öffnung im Raum konnte mit einem Ventilator Frischluft zugeführt werden.

In diesem Versuchsraum wurden Untersuchungen zur Stabilität von Rauchsichten unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt. Eine Grundüberlegung dabei war, ausgehend von einem klar definierbaren Brandherd, Rauch zur Decke aufsteigen und dort eine Rauchsicht ausbilden zu lassen. Unter Variation der Brandleistung bzw. Wärmefreisetzungsrate, Brandlast, Brandherdabmessung und eventuell weiterer Parameter wurde der Umschlag einer Rauchsicht im Raum von stabilen in instabile Verhältnisse untersucht. Um eine entstehende Rauchsicht qualitativ erfassen und ihre Dicke annähernd bestimmen zu können, wurde die Rauchentwicklung durch Sichtfenster beobachtet. Zunächst wurden die Wände mit weißer Farbe (matt) gestrichen, um den entstehenden Rauch evtl. optisch besser vor diesem Hintergrund wahrnehmen zu können. Die Installation zweier Neonröhren am Boden des Raumes sorgte für eine ausreichende Beleuchtung. Neonröhren wurden wegen ihrer geringen Wärmeentwicklung gewählt, um keine weiteren Temperatureinflüsse zu erhalten.

In Tabelle 1 sind die verwendeten Versuchsparameter von 5 ausgewählten Versuchen (A bis E) aufgeführt. Eine mit Brennstoff gefüllte Wanne hat je nach Größe direkte Auswirkungen auf den Verlauf der Verbrennung und auf die Wärmefreisetzungsrate bzw. Brandleistung. Die Abbrandgeschwindigkeit brennbarer Flüssigkeiten bei einem sogenannten „pool-fire“ (Lachenbrand bzw. Brand in einem mit brennbarer Flüssigkeit gefüllten nach oben offenen Behälter) kann als nahezu konstant angesehen werden. Die Erwärmung der Flüssigkeit und der Wanne wurden aufgrund der geringen Größe der Brandleistung und Kürze der Brenndauer als vernachlässigbar betrachtet und beeinflussen demnach die Abbrandgeschwindigkeit nicht. Wie bereits in Gleichung 2 und 3 erwähnt wurde, kann bei konstanter Abbrandgeschwindigkeit  $v_{a\infty}$  und gleichem Heizwert  $H$  der Flüssigkeit über die Variation der Wannengrundfläche  $A$  die Wärmefreisetzungsrate bzw. Brandleistung  $\dot{Q}_p$  bei bekanntem Massenstrom angegeben werden. Somit



kann über die Füllhöhe der Wanne bei konstanter Abbrandgeschwindigkeit direkt die Branddauer beeinflusst werden.

Tabelle 1. Versuchsparameter der Versuche A bis E.

Versuch	K:Kaltrauch, R=Rauchpulver	Propan, Fernzündung	Dekalinmenge	Wanne Abmessungen			Wannentyp A, B	Wannenkühlung	Brandherdhöhe	Branddauer	Position von TA	Kalibrierung	Dichtigkeitsmessung	Rauch / Pulver
				Länge	Breite	Höhe								
				[ml]	[cm]	[cm]								
Versuch A	-	PF	50	7	7	2	B	nein	3	20:30	Kette	ja	ja	
Versuch B	R	PF	25	7	7	2	B	nein	3	09:15	Kette	ja	ja	Rauchpulver
Versuch C	K	PF	40	7	7	2	B	nein	3	14:53	Kette	ja	ja	Kaltrauch
Versuch D	R	PF	30	7	7	2	B	nein	3	10:44	Kette	ja	ja	Rauchpulver
Versuch E	R	PF	30	7	7	2	B	nein	3	11:02	Kette	ja	ja	Rauchpulver

Bei den Untersuchungen wurden sowohl Wannen ohne (Typ A) als auch Wannen mit der Möglichkeit einer Wasserkühlung (Typ B) verwendet. Bei einer Befüllung des Wannentyps A bis in Randnähe gelangte die brennbare Flüssigkeit (Dekalin) über den Rand hinaus und entzündete sich durch die starke Erwärmung auch außerhalb der Wanne. Bei Wannen mit einem Wannenrand aus Rechteckhohlprofilen (Typ B) mit regulierbarer Wasserkühlung verbrannte das Dekalin gleichmäßig. Bei zu starker Kühlung jedoch begann die Flamme mit abnehmender Füllhöhe zu flackern, d. h. das Dekalin wurde teilweise unter seinen Flammpunkt abgekühlt. Deshalb wurden wie in Tabelle 1 erwähnt auch Versuche mit Typ B ohne Wasserkühlung durchgeführt.

Bei den Untersuchungen wurden kleine Laser eingesetzt, um evtl. die bei einem Brand entstehende Rauchschtung im Raum sichtbar zu machen. Durch Aufsetzen einer Streulinse wurde ein Laserband erzeugt, das vom Boden aus an die Decke leuchtete, um so die Lage einer Rauchschtung sichtbar zu machen. Die eingesetzten Laser waren jedoch zu schwach, so dass der Laserstrahl nur bei abgedunkeltem Raum im flachen Winkel entlang des Strahls beobachtet werden konnte. Der Strahl war mit einer Streulinse nur ca. 15 cm und ohne Streulinse ca. 1,5 m von der Laserquelle entfernt zu sehen. Da eine zusätzliche Erwärmung des Raumes durch einen größeren Laser oder

andere Wärmequellen ausgeschlossen werden sollte, wurden keine weiteren derartige Versuche durchgeführt.

In dem bereits erwähnten Versuchsraum wurden Untersuchungen an insgesamt weit über 100 Einzelversuchen durchgeführt, von denen einige in Tabelle 2 erfasst und die unterschiedlichen Parameter in einzelnen Spalten aufgeführt wurden wie z. B. die Position der Brandstelle, der Brandstoff und der geschlossene bzw. mit einer Öffnung (geöffnete Tür) versehene Raum. Die Versuche wurden teilweise wiederholt, um eventuelle Abweichungen bei gleichen Versuchen besser feststellen bzw. ausgleichen zu können.

## **5 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse**

### **5.1 Brand und Rauch**

Um das Brandverhalten von Wannenbränden mit Dekalin als Brandstoff beurteilen zu können, wurden jeweils eine Metallwanne mit 7cm x 7cm (~50cm<sup>2</sup>) bzw. 10cm x 10cm (100cm<sup>2</sup>) Grundfläche mit Dekalin gefüllt und manuell mit einer Zündlanze gezündet. Der Raum wurde nach der Zündung verlassen, die Tür geschlossen und der Versuch durch die Sichtfenster beobachtet. Aufnahmen mit einer Videokamera hatten nicht den erhofften Erfolg.

Versuche mit kleinen Dekalinmengen von ca. 20 ml führten bei Brandbeginn zu keiner nennenswerten Rauchbildung, da die Partikelbildung über dem Brandherd sehr gering war. Eine stark rußende Flamme stellte sich erst ein, als der Brandstoff nahezu verbrannt war. Eine Schichtbildung des Rauches konnte jedoch nicht beobachtet werden.

Bei Versuchen mit Mengen von bis zu 100 ml Dekalin wurde der Raum nach ca. zwei Minuten vollständig verraucht; es konnte auch bei diesen Versuchen keine Rauchsichtbildung beobachtet werden. Die Verrauchung selbst kann dabei als gleichmäßige dunkle Trübung des gesamten Raumes beschrieben werden. Es konnten Rußpartikel von ca. 0,5 bis 1 mm Durchmesser (Schätzwert) beobachtet werden, die sehr langsam in Richtung Boden sanken. Die wahlweise direkte oder indirekte Beleuchtung im Versuchsraum erschwerte die Feststellung einer Rauchsichtbildung.

Tabelle 2. Versuchsparameter.

Versuch	Nr.	1.0	2.0	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	7.3	8.1	8.2	8.3	9.1	9.2	9.3	10.1	10.2	10.3				
Brandstelle	Höhe																																				
Mitte	Boden	x	x	x	x	x	x	x	x											x	x	x	x	x	x												
	1,0 m											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x														
Ecke: 1/6 der Diagonalen	Boden											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x															
	1,0 m											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x															
Material																																					
Brandwanne	Spiritus 50 ml	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																						
	Spiritus 25 ml											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Heizplatte	Sägemehl																																				
Raumlüftung																																					
Tür zu	0 cm	x		x	x	x					x	x	x					x	x	x																	
Tür auf	10 cm		x					x	x	x					x	x	x					x	x	x													
Tür auf	50 cm											x	x	x											x	x	x										
Rauchdichte	Mitte Höhe variabel	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Temperatur	Mitte Höhe T1-T10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Rauchzufuhr (5s Rauch, 10s Pause) - insg. 5 Zyklen	Diskonebel nach 1 min	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	Ecke: Höhe 1 m																																				
Druck	Wand oben/unten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		

Tabelle 2. Forts. Versuchsparameter.

Versuch	Nr.	11.1	11.2	11.3	12.1	12.2	12.3	13.1	13.2	13.3	14.1	14.2	14.3	15.1	15.2	15.3	16.1	16.2	16.3	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28							
Brandstelle Mitte	Höhe																																					
	Boden																																					
	1,0 m	x	x	x	x	x	x															x	x	x								x	x	x				
Ecke: 1/3 der halben Diagonalen	Boden																																					
	1,0 m									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											x	x	x				
Material	Brandwanne	Spiritus 50 ml	x	x	x	x	x	x															x	x	x	x	x	x										
		Spiritus 25 ml								x	x	x	x	x	x																							
	Heizplatte	Sägemehl																				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Raumlüftung	Tür zu Tür auf Tür auf	0 cm	x	x	x								x	x	x								x				x											
		10 cm					x	x	x								x	x	x				x				x											
		50 cm																							x				x				x					
Rauchdichte	Mitte Höhe variabel	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
Temperatur	Mitte Höhe T1-T10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
Rauchzufuhr (5s Rauch, 10s Pause) - insg. 5 Zyklen	Diskonebel nach 1 min	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																			
	Ecke: Höhe 1 m																																					
Druck	Wand oben/unten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						

Aus diesem Grunde wurden zusätzliche Partikel sowohl mit einem Gerät zur Erzeugung von Diskonebel als auch durch das Zünden von Rauchpulver in den Versuchsraum eingebracht. Durch den Anfangsimpuls an der Austrittsöffnung des Nebelgerätes stieg der erzeugte Kaltrauch im Versuchsraum ca. 30 cm hoch und sank durch die höhere Dichte gegenüber der Umgebungsluft unmittelbar danach wieder in Richtung Boden ab. Bei diesem Vorgang konnte vereinzelt beobachtet werden, dass der am Boden befindliche Kaltrauch in Richtung Brandherd strömte und in den Plume eingesaugt wurde, wo er sich aufgrund der höheren Temperaturen zersetzte. Diese Beobachtung ließ darauf schließen, dass sich im Versuchsraum während des Brandes eine walzenartige Strömung ausbildete, die den entstehenden Brandrauch mit der Luft im Versuchsraum vermischte und somit die Ausbildung einer stabilen Rauchschiicht verhinderte. Durch Zuführung des Kaltrauchs in verschiedenen Höhen des Versuchsraumes wurde versucht stabile Schichtungen im Raum nachzuweisen, was aber auch in diesen Fällen nicht gelang.

Bei weiteren Versuchen wurde über dem Brandherd in ca. 15 cm Höhe ein horizontales Gitter mit ca. 10 g Rauchpulver angeordnet, das durch brennendes Dekalin gezündet wurde. Diese Methode hatte den Vorteil, dass zu einem frühen Zeitpunkt viele Partikel freigesetzt wurden, die wegen der geringeren Dichte des heißen Rauchs gegenüber der umgebenden Luft über dem Brandherd aufsteigen konnten. Durch die gelbe Farbe der Rauchpartikel wäre eine eventuell entstehende stabile Rauchschiicht optisch leichter zu erkennen gewesen. Jedoch konnte auch bei den mit Rauchpulver durchgeführten Versuchen die Ausbildung einer stabilen Rauchschiicht – „Aufschwimmen auf der Umgebungsluft“ - nicht einwandfrei festgestellt werden, da sich die Partikel des Rauchpulvers mit Luft verdünnten und deshalb nur schwach zu erkennen waren. Außerdem wurden größere Anteile des Rauchpulvers durch die Hitze der Dekalinflamme zersetzt. Bild 10 zeigt beispielhaft die Anordnung des Versuchsbrandes.

Anstelle des Rauchpulvers wurde zusätzlich mit Polystyrol-Hartschaum oder feuchter Holzwolle experimentiert. Die Ergebnisse waren jedoch ebenso unbefriedigend, da der Partikeleintrag durch diese Stoffe optisch geringer war als bei Rauchpulver. Eine Schichtbildung im Versuchsraum konnte jedoch ebenfalls nicht beobachtet werden.



Bild 10. Versuchsaufbau mit gezündetem Rauchpulver.

Die Brandstelle wurde für die weiteren Untersuchungen im Versuchsraum, wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, an 4 verschiedenen Stellen im Raum angeordnet. Nach Untersuchungen mit mehreren unterschiedlichen Stoffen wurden die Brandmaterialien Brennspritus (Flüssigkeit) bzw. Sägemehl (Feststoff) für weitere Versuche verwendet. Die dabei verwendeten Brandwannen hatten Kantenlängen von 10cm mal 10cm bzw. 15cm mal 15cm. Die Brandstelle selbst befand sich jeweils in der Mitte oder in der Ecke ( $1/3$  der halben ersten Diagonalen) des Versuchsraumes entweder auf dem Boden oder in einer Höhe von 1 m.

In diese Brandwannen wurden jeweils 25 ml bzw. 50 ml Spiritus eingefüllt; beim Sägemehl wurden jeweils 60 g verwendet. Während die Zündung beim Spiritus über eine Flamme erfolgte, wurde das Sägemehl in einer Zündwanne auf einer regelbaren elektrischen Heizplatte angeordnet und erhitzt bis Schwelgase aufstiegen.

Da beim Verbrennen von Brennspritus praktisch keine Rauchentwicklung stattfand, wurde mit einer Rauchmaschine über ein Rohr mit einem Durchmesser von 50 mm in einer Höhe von etwa 1 m in der Ecke (zweite Diagonale) Diskonebel in den Versuchsraum eingebracht, um auf diese Weise evtl. die Bildung einer sichtbaren Rauchsicht zu erhalten. Der Diskonebel wurde mit geringer Austrittsgeschwindigkeit dem Raum zugeführt, so dass der Anfangsimpuls minimiert und somit auch keine Vorzugsströmungsrichtung des Rauches im Raum erzeugt wurde. Die Rauchzuführung erfolgte je-

weils 1 min nach dem Zünden des Brandstoffes in 5 Zyklen wie folgt: 5 s Diskonebel, dann 10 s Pause. Durch Strömungen im Versuchsraum, verursacht durch den Brand bzw. den Plume, wurde der Rauch ohne Bildung einer sichtbaren Schicht im gesamten Raum verteilt.

Beim Brand (Schwelen) mit dem Brandstoff Sägemehl konnte auf die Zufuhr von „Fremdrauch“ verzichtet werden, da der beim Schwelvorgang gebildete Brandrauch ausreichte, eine meist ausreichend sichtbare Rauchverteilung (Schichtbildung) im Brandraum während des Brandes zu erzeugen und nach Erlöschen des Brandes aufrecht zu erhalten. Um Unterschiede bei der Anwendung der unterschiedlichen Parameter zu verdeutlichen, wurden während des Versuchsablaufes Temperatur-, Druck- und Rauchdichtemessungen durchgeführt.

## 5.2 Temperaturmessung

Bei den Untersuchungen wurden zur Messung der Temperatur NiCr-Ni- Mantelthermoelemente eingesetzt. Aus versuchstechnischen Gründen wurden die verwendeten Elemente mit Eiswasser bei 0°C und kochendem Wasser bei 100°C kalibriert, entsprechend einem Thermospannungsbereich von 0 mV bis 4,095 mV.

Die bei den Messungen entstehenden Thermospannungen wurden in Temperaturwerte umgewandelt und in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Bild 11 zeigt als Beispiel die mit einem Thermoelement gemessenen Temperaturwerte, die sich in einem sehr engen Bereich zwischen 16,82°C und 16,92°C befinden. Damit wurde für das verwendete Meßsystem die Meßgenauigkeitsgrenze von ca. 0,1 Grad erreicht.

Die Kenntnis über das Temperaturprofil innerhalb des Versuchsraumes ist zur Beurteilung der Stabilität einer Rauchschiicht von großer Bedeutung, da das Temperaturgefälle einer Rauchschiicht unterhalb der Decke zu der darunter liegenden Luftschicht einen wesentlichen Faktor für den Auftrieb des Rauches darstellt. Je steiler dieses Temperaturgefälle ist, eine desto stabilere Rauchschiicht ist zu erwarten. Um eine derartige Schichtung meßtechnisch erfassen zu können, wurden im Versuchsraum zehn Thermo-

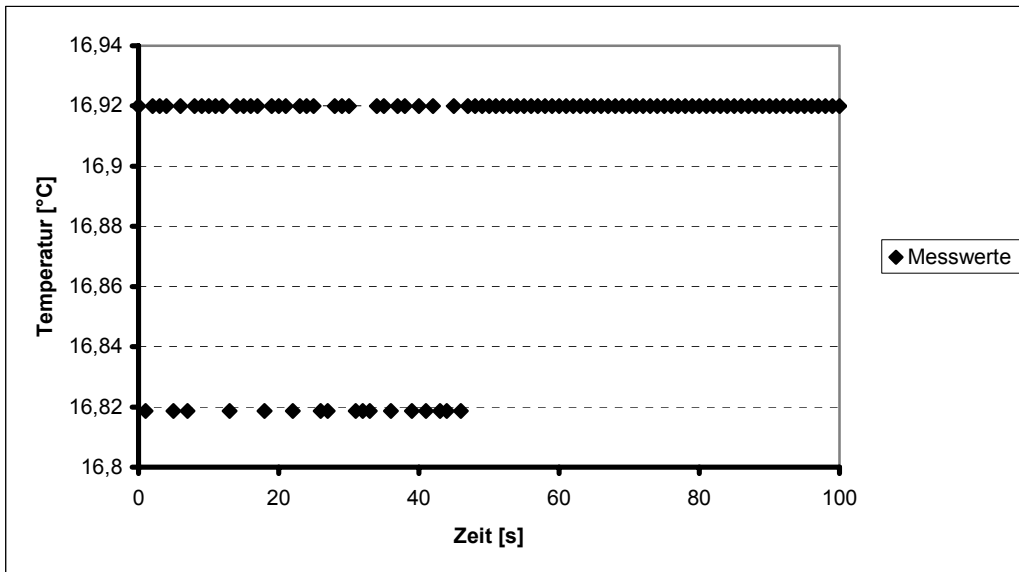


Bild 11. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

elemente als Meßkette vertikal in gleichen Abständen an einer variabel positionierbaren senkrechten Halterung installiert, beginnend beim Thermoelement T1 in einer Höhe von 2,7 m (5 cm unterhalb der Decke). Das Thermoelement T10 befindet sich 27 cm über dem Boden. Bei den durchgeführten Untersuchungen lag der Temperaturbereich im Versuchsraum zwischen 15°C und 40°C.

Nach sorgfältiger Kalibrierung der Thermoelemente wurden Versuche mit Langzeittemperaturmessungen über ca. 20 Stunden durchgeführt. Dabei konnte nicht die erwartete, nahezu lineare Temperaturverteilung im Raum von unten nach oben - von kalt nach warm - festgestellt werden, was die Vermutung nahe legte, dass einzelne Thermoelemente „falsche“ Ergebnisse lieferten. Eine anschließende erneute Kalibrierung bestätigte die Vermutung, dass mehrere Thermoelemente während der langen Versuchszeit geringfügige Abweichungen zur Eichtemperatur aufwiesen.

Da die Stabilität einer Rauchsicht von geringen Temperaturschwankungen abhängt, sollte deshalb die jeweilige Temperatur möglichst genau erfasst werden. Aus diesem Grund wurde ein Abgleich der Thermoelemente untereinander durchgeführt. Da ein einzelnes Thermoelement relative Temperaturschwankungen sehr genau erfassen kann, wurden die Messwerte der Thermoelemente T1 bis T10 auf die Messergebnisse eines einzelnen Thermoelementes bezogen. Dies wurde dadurch erreicht, dass das Bezugs-



thermoelement TA in den gleichen Höhen (waagerechter Abstand ca. 2 cm) wie die jeweiligen Thermoelemente T1 bis T10 positioniert wurde. Die Temperatur von TA in der Höhe des jeweiligen Thermoelementes wurde als die tatsächlich vorhandene Temperatur betrachtet und die „abweichenden“ Meßwerte der Thermoelemente T1 bis T10 in der Auswertung darauf bezogen. Auf diese Art war es möglich, die Genauigkeit eines einzelnen Thermoelementes auf die gesamte Meßkette zu übertragen.

Zunächst wurde das Thermoelement TA während des laufenden Versuchs in die entsprechenden Positionen gefahren, die zugehörige Versuchszeit ermittelt und die Messwerte von TA mit den Messwerten von T1 bis T10 verglichen. Diese Vorgehensweise stellte sich jedoch aus technischen Gründen (Dokumentation und Auswertung) als nicht zweckmäßig heraus. Außerdem ist es nicht möglich, bei einer Temperaturdifferenz von 1,3 Kelvin für die Anzeige der „richtigen“ Temperatur innerhalb kurzer Zeit während eines laufenden Versuches das Thermoelement TA lange genug in der jeweiligen Position der Thermoelemente T1 bis T10 zu halten (Bild 12). Um dennoch verwertbare Meßdaten zu erhalten, wurde das Thermoelement TA, beginnend bei T10 im unteren Bereich, stets zwei Minuten auf der Höhe des jeweiligen Thermoelementes positioniert, um es anschließend in die nächste Position zu bringen. Die Differenz der angezeigten Messwerte von TA zum jeweiligen Element wurde ermittelt und der Mittelwert der letzten 30 Sekunden als Kalibrierungswert für das entsprechende Thermoelement der Messkette verwendet. Dadurch ergab sich eine gemessene Temperaturschichtung, die innerhalb des gesamten Versuchsraumes angenommen wurde.

Da mit dieser Temperaturmeßkette horizontal immer nur an einem Punkt gemessen werden konnte, sollte die jeweilige Position soweit vom Brandherd entfernt sein, daß die heiße Flamme keinen Einfluss mehr auf die jeweilige Messung ausübte. Eine Position in Wandnähe war wegen der kühleren Wände ebenso ungeeignet. Eine Position in ca. 2/3 Abstand vom Brandherd im Raummittelpunkt zur Raumecke erfüllte die Anforderungen für diese Untersuchungen.

Um die Ausgangstemperatur im Versuchsraum vor dem Brand zu erfassen, erfolgte die Zündung erst ca. 4 min nach Meßbeginn. Bei den Versuchen wurden die gemessenen

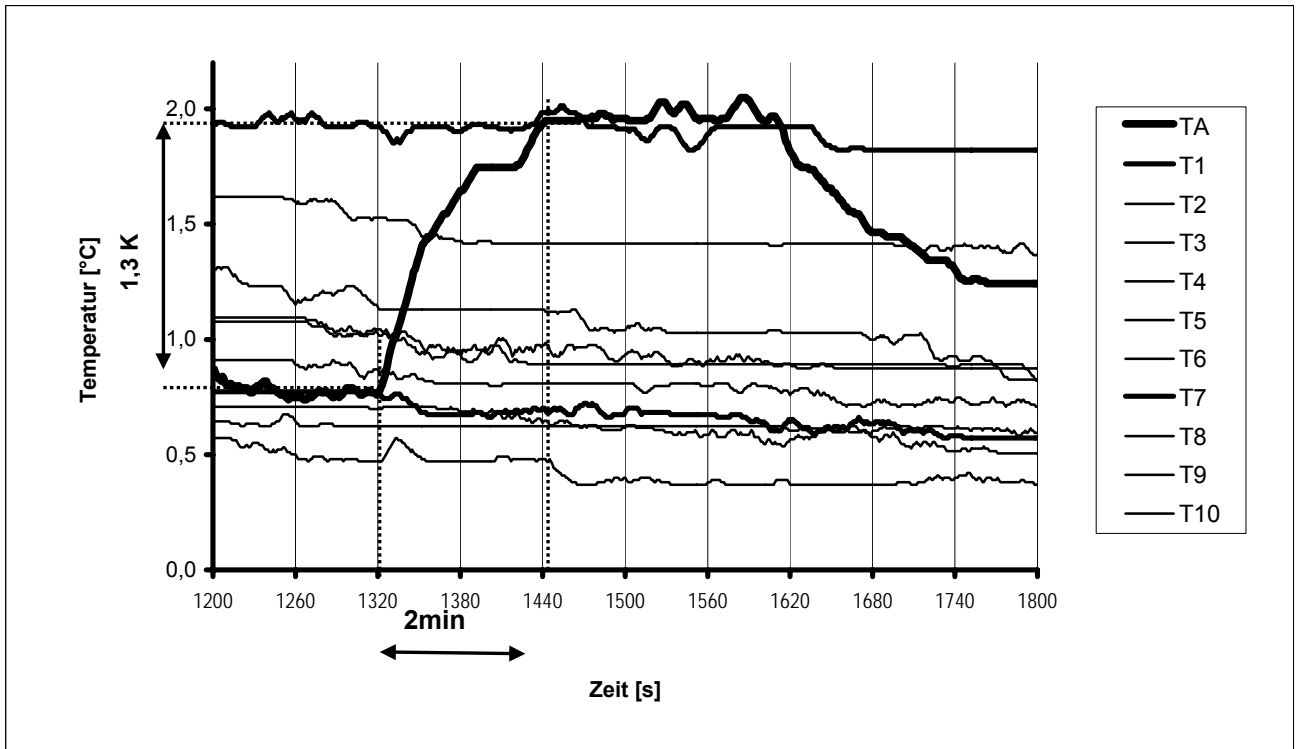


Bild 12. Temperaturverlauf: TA wird von Position T7 auf Position T1 gefahren.

Temperaturwerte der Kalibrierdaten aus dem TA-Abgleich mit berücksichtigt und in Abhängigkeit von der Zeit in Bild 13 aufgetragen. Die niedrigste gemessene Temperatur in Grad Celsius wurde dabei auf 0 Kelvin gelegt. Der Zustand vor Versuchsbeginn wurde durch eine Vorlaufzeit von 1 min mitdokumentiert. Beim Zünden stieg an allen Meßstellen die Temperatur kontinuierlich an und fiel beim Erlöschen der Flammen nach ca. 20 min steil ab. Die Temperaturunterschiede an den Meßstellen T1 bis T10 waren deutlich zu erkennen. Diese Verteilung von kalt (unten) nach warm (oben) blieb bis zum Ende des Versuches erhalten.

Ein Vergleich der Kurven T1 bis T10 untereinander zeigt eine etwas höhere Temperaturdifferenz  $\Delta T_5$  von der Meßstelle T5 zur Meßstelle T6. Dies ist ein Hinweis auf den Übergangsbereich zwischen einer wärmeren brandrauchreicheren Schicht zu einer kälteren brandrauchärmeren Schicht. Nach dem Verlöschen der Flamme wurde die Temperaturmessung solange fortgesetzt, bis sich die gemessenen Temperaturen auf einem stabilen Niveau eingestellt hatten. So konnte das Abkühlverhalten des Rauches nach dem Brand dokumentiert werden.

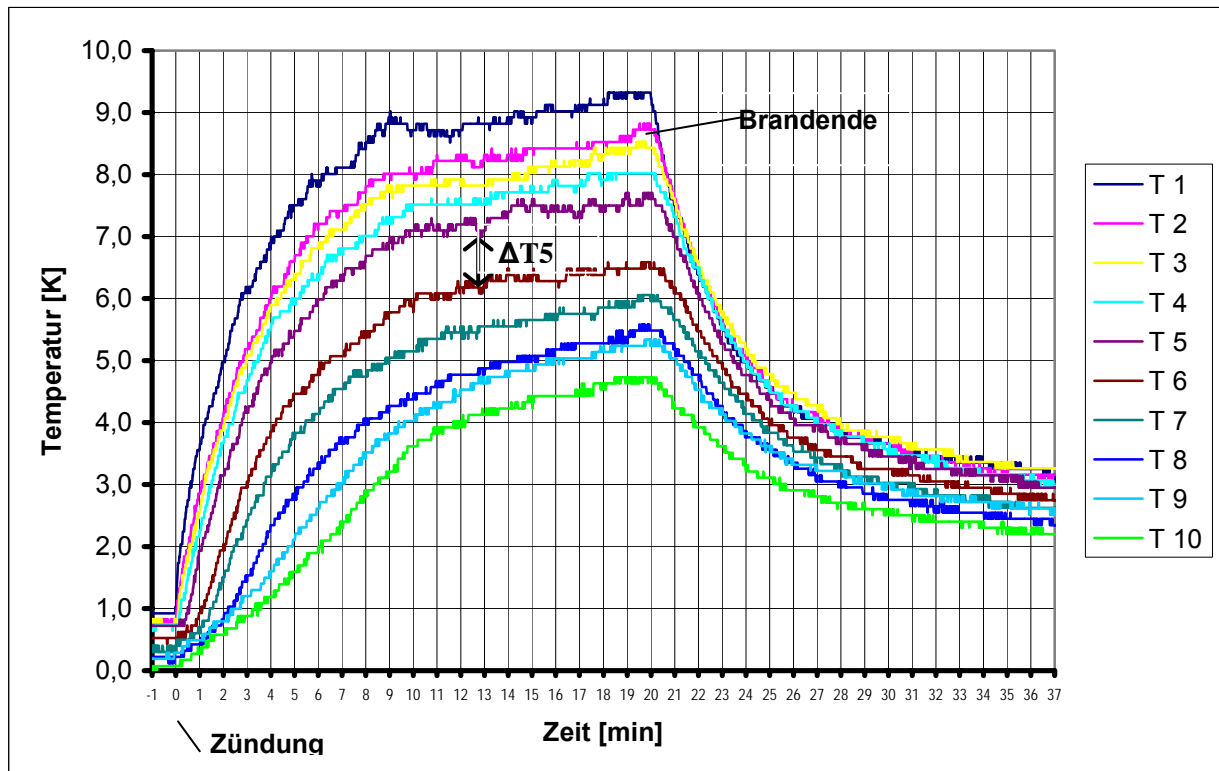


Bild 13. Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit. Versuch A (0 Kelvin  $\equiv$  14,6 °C).

In Bild 14 wurden innerhalb einer Versuchszeit von 10 min und 20 min die gemessenen Temperaturwerte der jeweiligen Position der Messstelle zugeordnet. Auf diese

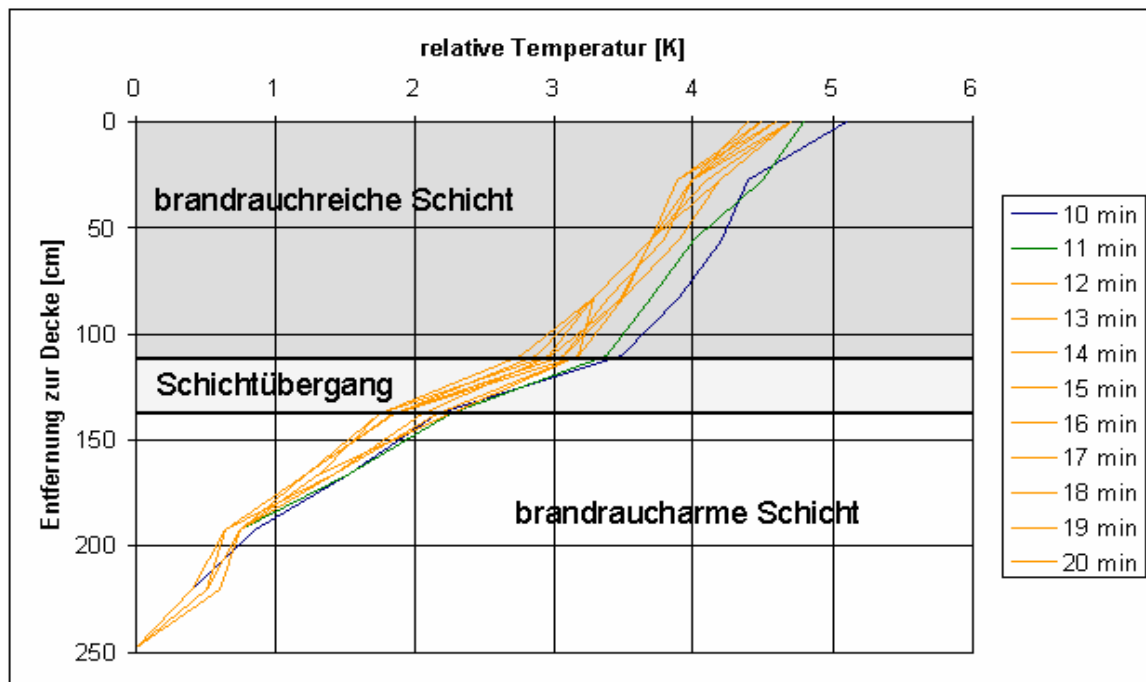


Bild 14. Schichtdicke in Abhängigkeit von der Temperatur im Raum (Versuch A).

Weise wurde ein Temperaturprofil des Versuchsraumes dargestellt, wobei der niedrigste Temperaturwert jeder Kurve auf 0 Kelvin gesetzt wurde.

Der vermutete Schichtübergang (Bereich mit der größten Temperaturdifferenz zwischen zwei Temperaturmeßstellen) im Zeitraum zwischen 1 und 20 Minuten liegt laut Bild 14 in einem Abstand von ca. 125 cm von der Raumdecke, da darüber die Temperatur relativ gleichmäßig bleibt. Um die Position der Rauchsicht, also die Lage der potentiellen Schichtgrenze über der gesamten Zeit zu dokumentieren, wurden die Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich in Höhe der größten Temperaturdifferenz die Schichtgrenze befindet.

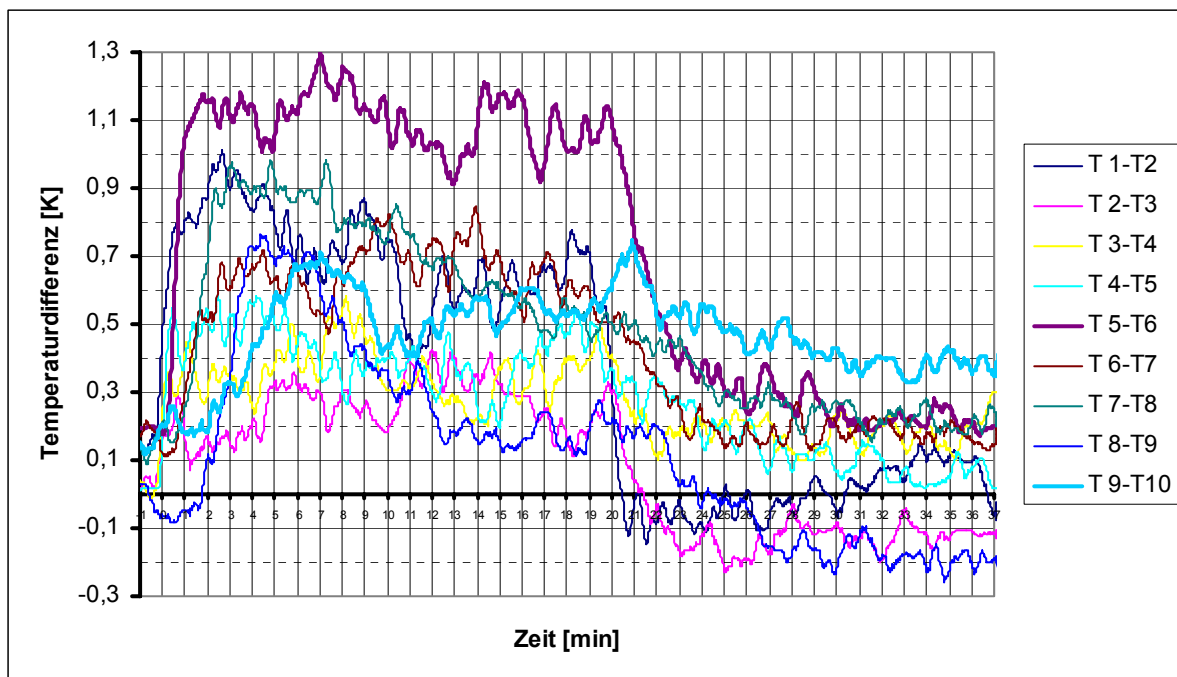


Bild 15. Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Zeit  $\Delta T_1$  bis  $\Delta T_9$  (Versuch A).

Wie in Bild 15 deutlich zu erkennen ist, liegt die größte Differenz in den ersten 21 Minuten zwischen den Meßstellen T5-T6 ( $\Delta T_5$ ) und anschließend zwischen T9-T10 ( $\Delta T_9$ ). Das bedeutet, dass die Schichtgrenze der brandrauchreichen zur brandraucharmen Schicht in den ersten 21 Minuten zwischen T5 und T6 liegt, also in einer Höhe von ca. 1,5 m und danach zwischen T9 und T10, also in einer Höhe von ca. 0,4 m. Diese Informationen wurden mit dem Abstand zur Decke in Abhängigkeit von der Zeit beispielhaft in den Bildern 16 und 17 dargestellt.

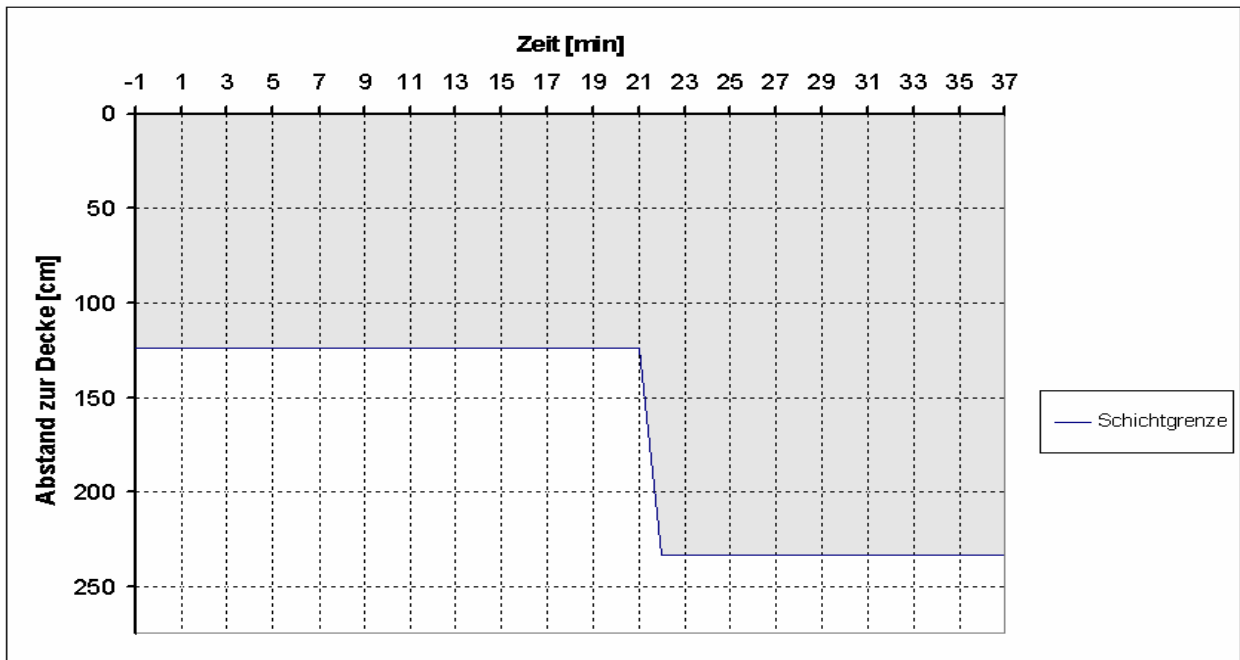


Bild 16. Lage der Übergangsschichtgrenze in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch A).

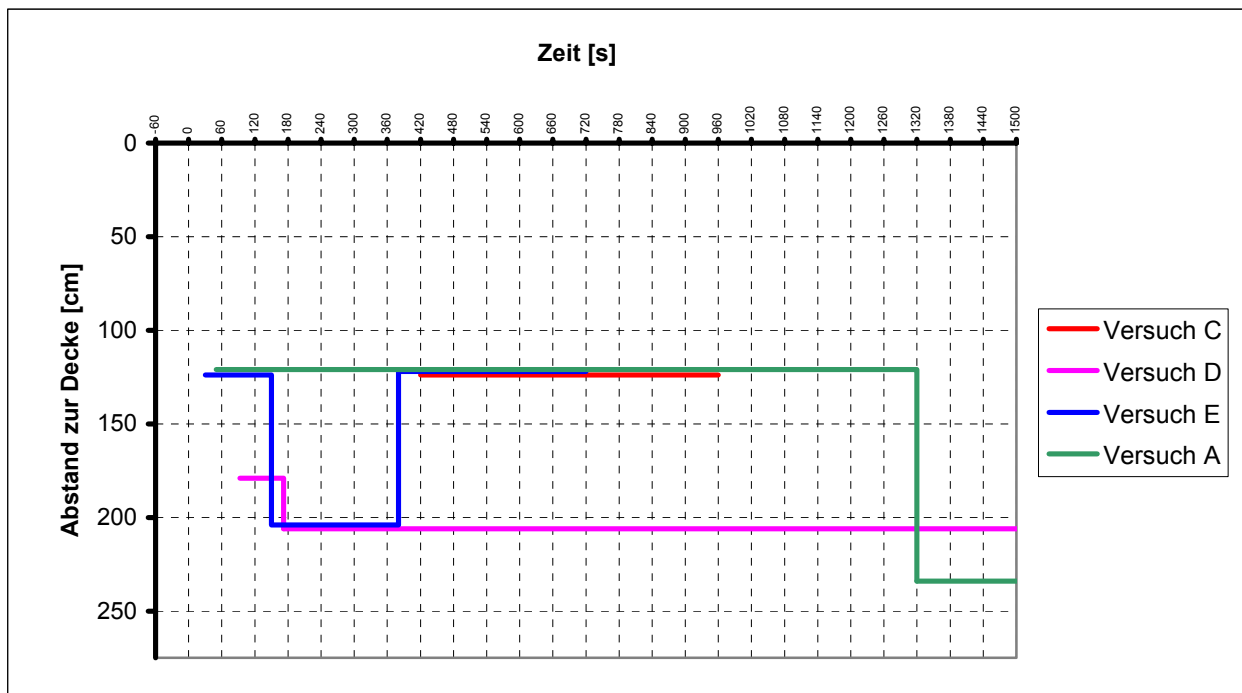


Bild 17. Lage der Übergangsschicht bei 4 verschiedenen Versuchen.

Bei Versuch A stellte sich die Übergangsschicht nach ca. 60 Sekunden bis zum Verlöschen des Brandes stabil in einer Höhe von ca. 1,5 m über dem Boden ein und sank danach auf eine Höhe von ca. 0,35 m ab, wo sie bis zum Ende der Messung (2220 s) blieb (vgl. Bild 40).

Bei Versuch B konnte keine Übergangsschicht mittels Temperaturmessung nachgewiesen werden, weshalb der Versuch nicht in Bild 17 eingetragen wurde. Die Temperaturdifferenzen  $\Delta T_1$  bis  $\Delta T_9$  waren zu wenig unterschiedlich.

Bei Versuch C konnte bis zu einer Versuchszeit von 420 s keine Übergangsschicht beobachtet werden. Danach stellte sich die Übergangsschicht in einer Höhe von ca. 1,5 m ein. Nach mehr als 900 s, also fast zeitgleich mit dem Verlöschen des Brandes, löste sich auch die Temperaturschichtung auf (vgl. Bilder 31 und 39).

Bei Versuch D stellte sich die gemessene Übergangsschicht der Temperatur bereits nach ca. 180 s zwischen den Meßstellen T8 und T9 in einer Höhe von ca. 0,65 m ein und blieb, anders als bei den anderen Versuchen, auch nach Verlöschen des Brandes in etwa gleicher Höhe bestehen (vgl. Bilder 29 und 37).

Bei Versuch E blieb die Lage der Übergangsschicht bis zu einer Versuchszeit von ca. 120 s nach Verlöschen des Brandes stabil in einer Höhe von ca. 1,5 m, von einem Absinken der Übergangsschicht zwischen ca. 150 s bis ca. 360 s auf eine Höhe von ca. 0,75 m abgesehen (vgl. Bilder 30 und 38).

Die Temperaturmessungen der weiteren Untersuchungen wurden jeweils in der Mitte des Versuchsraumes (Schnittpunkt der Diagonalen) durchgeführt. Die Nummerierung der Thermoelemente T1 bis T10 im Versuchsraum erfolgte bei dieser Versuchsanordnung von unten (T1: Höhe 0,27 m) nach oben (T10: Höhe 2,70 m). Bild 18 zeigt Temperaturen in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei den Versuchen V1 bis V28 bei unterschiedlichen Parametern. Beim Vergleich der einzelnen Versuche konnten sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede während des Versuchsablaufes festgestellt werden.

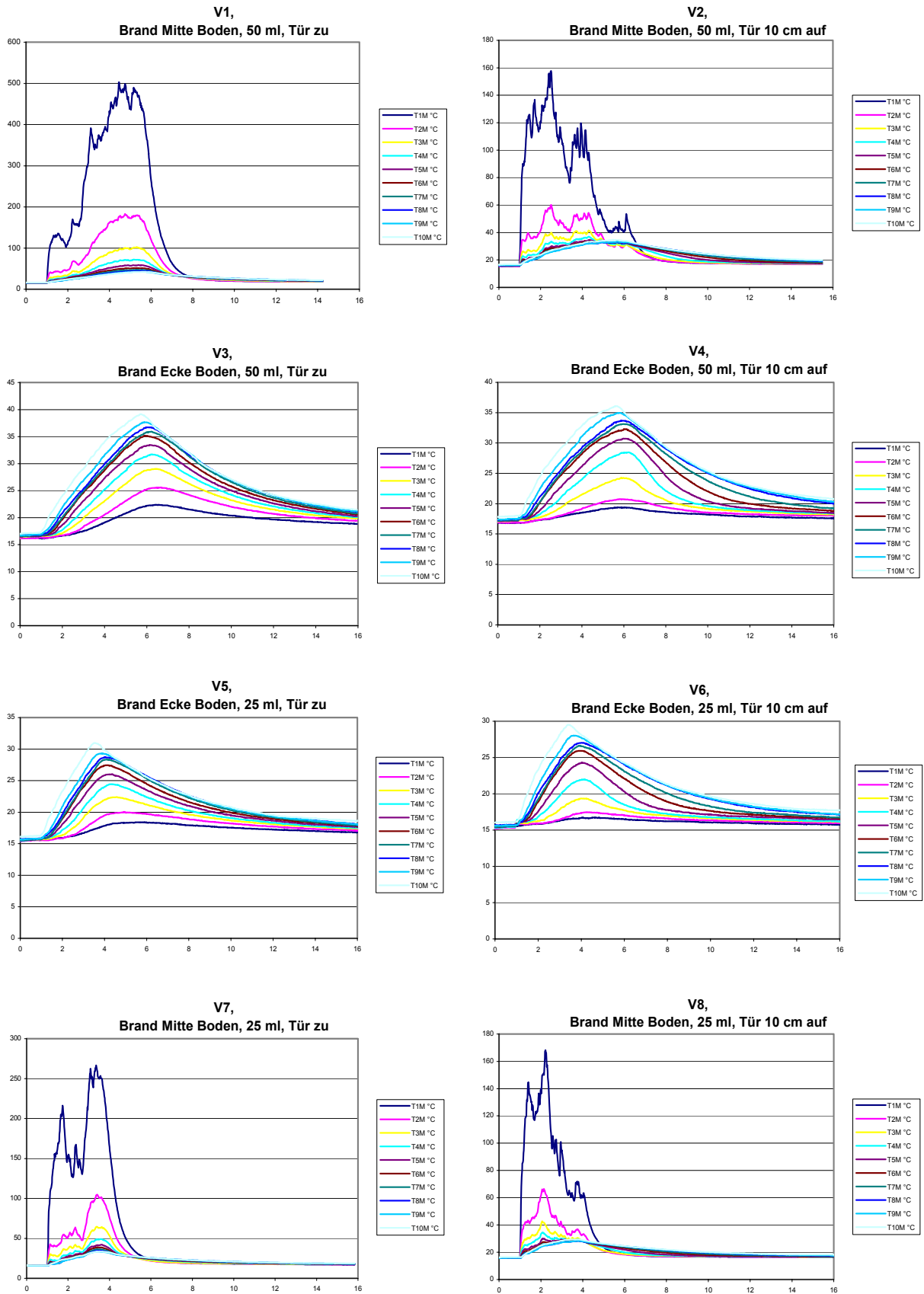


Bild 18. Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlichen Parametern.

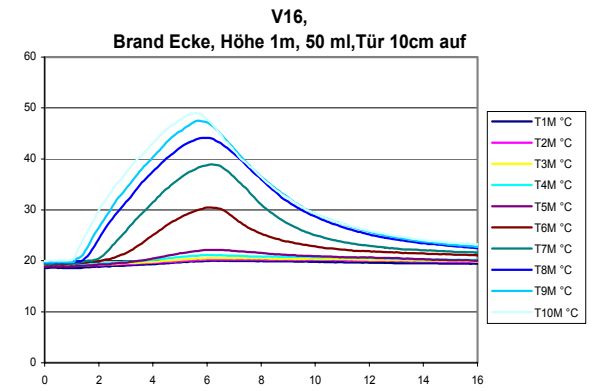
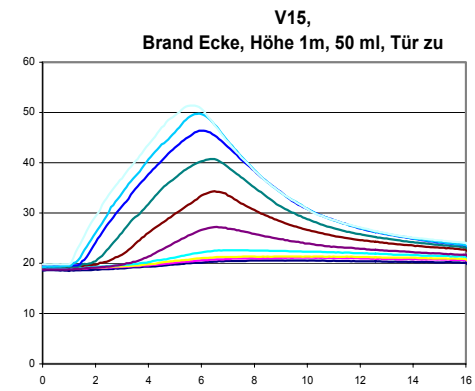
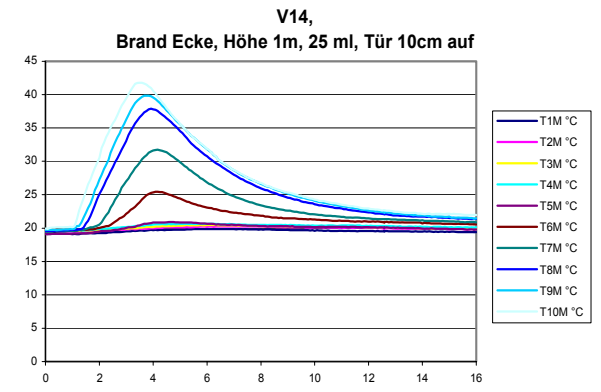
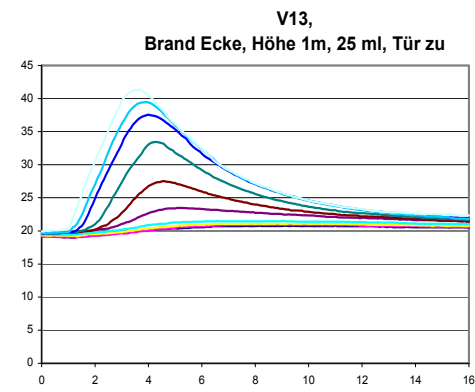
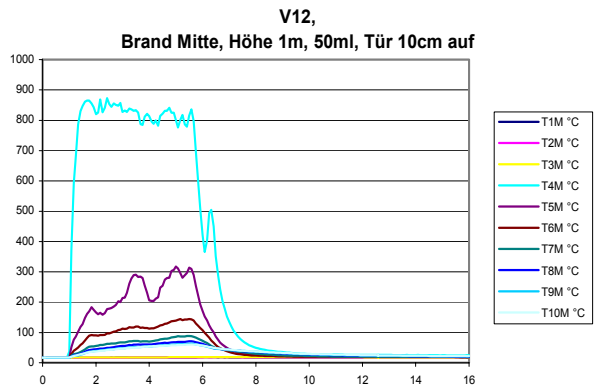
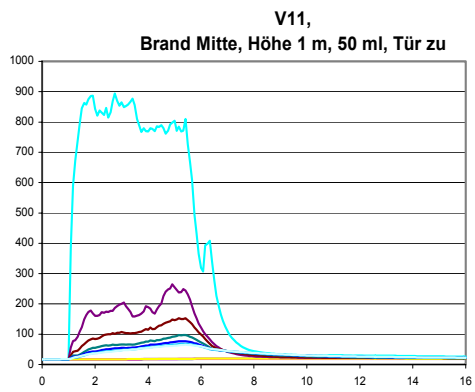
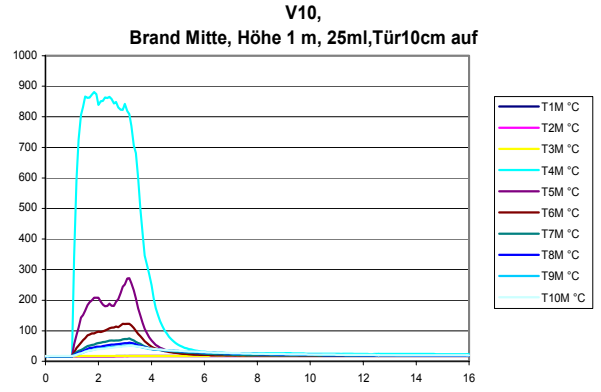
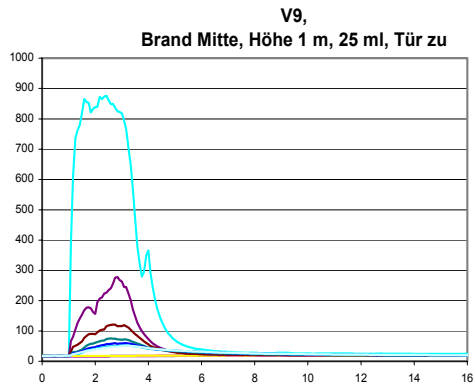


Bild 18. Forts. Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlichen Parametern.



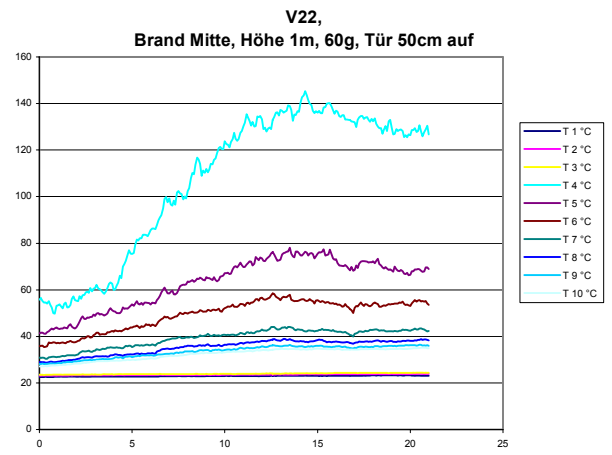
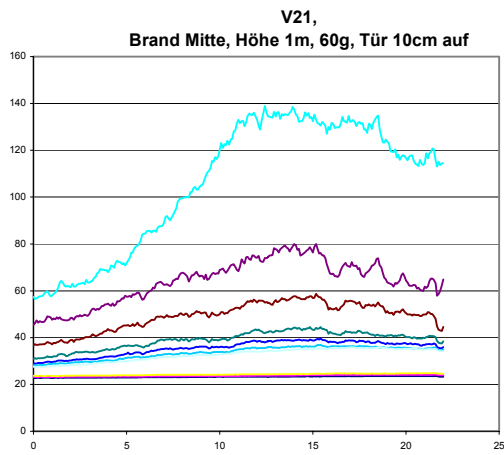
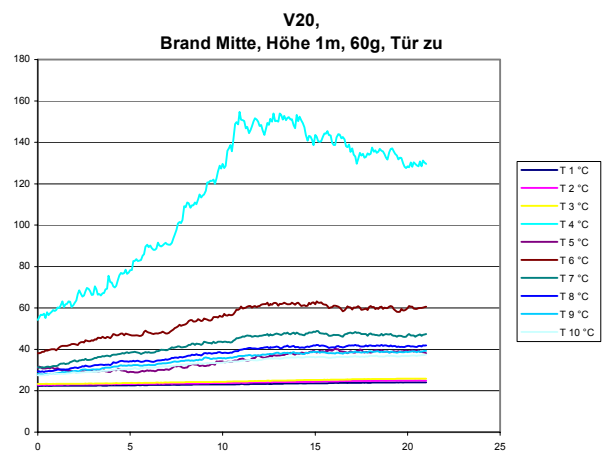
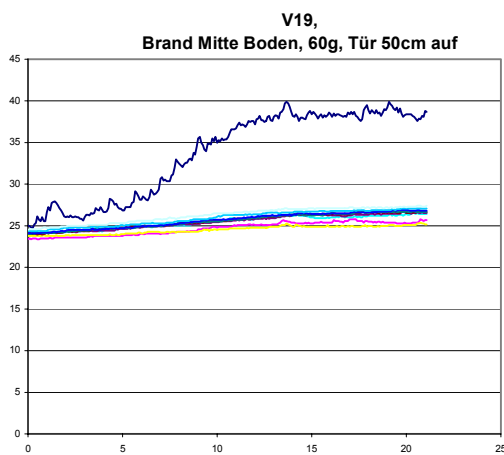
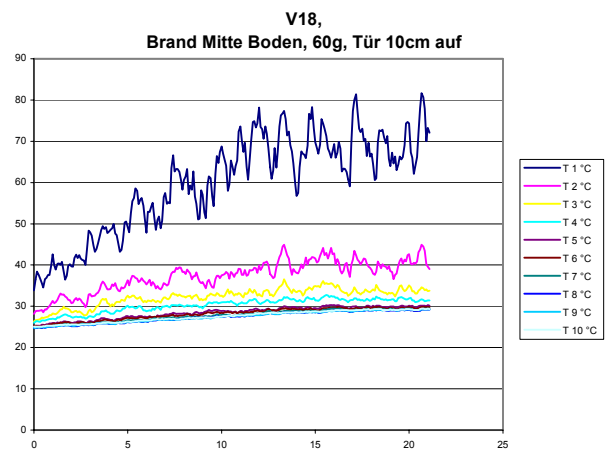
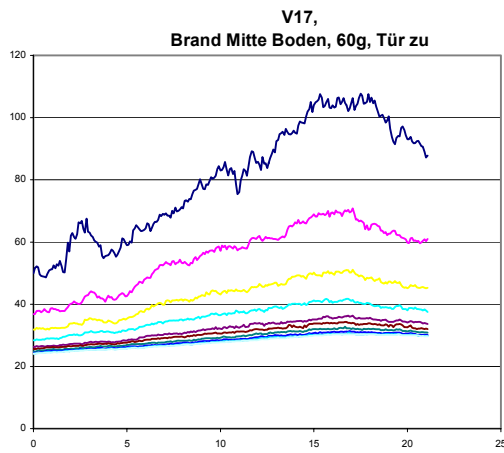


Bild 18. Forts. Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlichen Parametern.

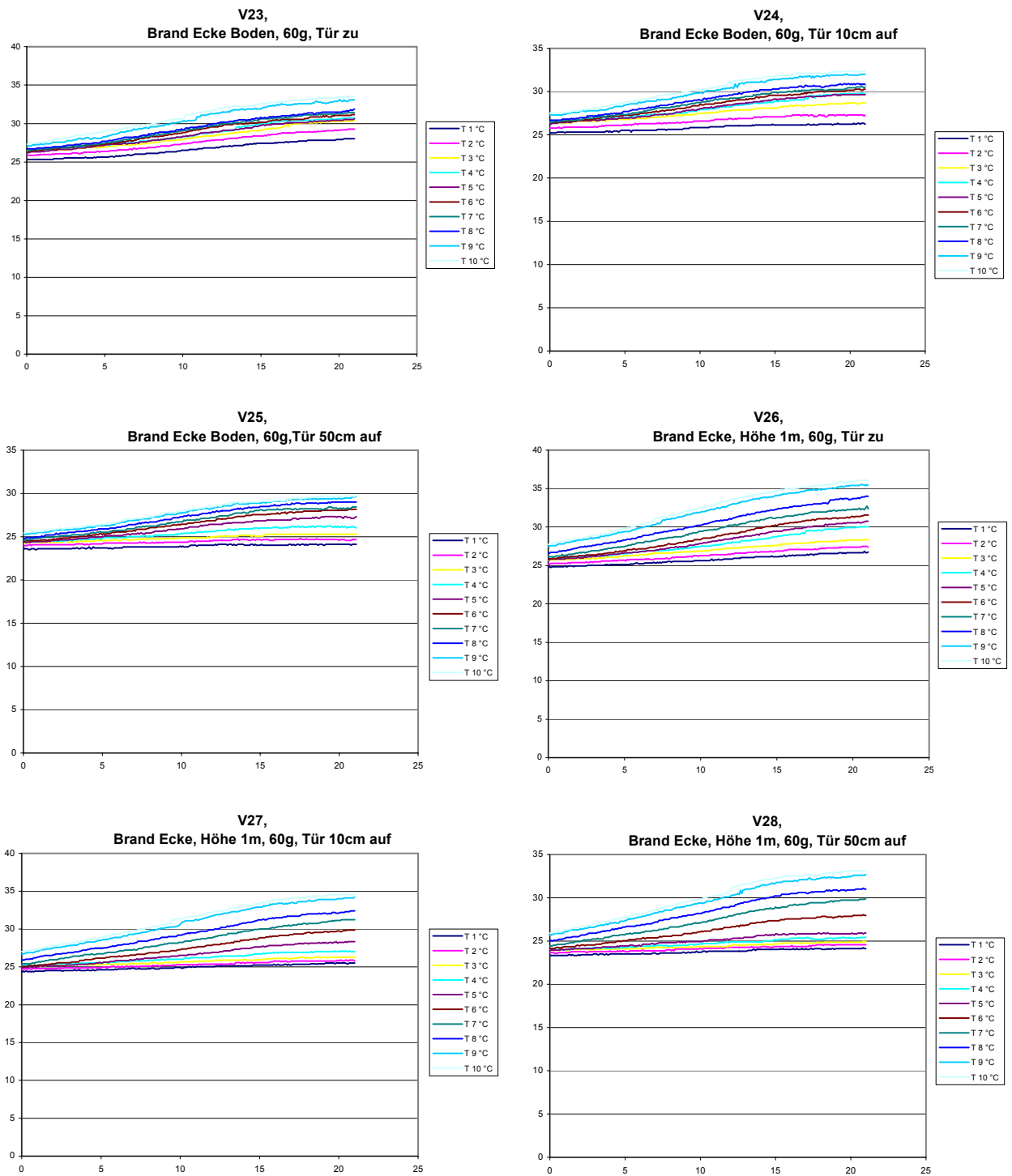


Bild 18. Forts. Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlichen Parametern.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei den Versuchen V1 bis V16 die Temperatur nach der Zündung oberhalb der Zündstelle im Plume jeweils sofort steil ansteigt und nach dem Erlöschen des Brandes wieder absinkt. Außerhalb des Plume verläuft der Anstieg bzw. das Absinken wesentlich langsamer. Bei Verwendung von 25 ml Spiritus erlischt die Flamme im Mittel nach einer Versuchszeit von ca. 3 min 10 s und bei Verwendung von 50 ml Spiritus nach ca. 5 min 30 s. Nach dem Brand gleichen sich die Temperaturen mit zunehmender Versuchszeit wieder an.

Befindet sich die Brandstelle in der Raummitte, ist der Temperaturanstieg wegen der Anordnung der Thermoelemente ebenfalls in Raummitte sehr viel steiler als bei Anordnung der Brandstelle in der Raumecke.

Bei Anordnung der Brandstelle am Boden in der Raummitte bzw. Raumecke (V1 bis V8) ist unabhängig von der geschlossenen oder leicht geöffneten Tür das jeweilige Temperaturmaximum beim Brand der größeren Spiritusmenge von 50 ml höher als beim Brand der kleineren von 25 ml. Die größte Temperaturdifferenz (Maximum bei ca. 500°C) ist beim Brand in der Raummitte mit 50 ml Spiritus bei geschlossener Tür gegenüber der leicht geöffneten Brandraumtür und der geringeren Spiritusmenge von 25 ml festzustellen.

Wie zu erwarten war, steigen die Temperaturen beim Brand in der Mitte an den Meßstellen T1 (Bodennähe) bis T10 (Deckennähe) gleichmäßig an, während es sich beim Brand in der Ecke genau umgekehrt verhält. Dies zeigt deutlich, dass die Temperatur im Plume mit zunehmender Höhe abfällt und sie außerhalb des Plume ein Gefälle von oben nach unten aufweist.

Befindet sich die Brandstelle nicht auf dem Boden, sondern in einer Höhe von 1 m über dem Boden in der Raummitte bzw. in der Raumecke (V9 bis V16), dann ändern sich entsprechend die Temperaturverhältnisse im Raum. Bei dieser Anordnung ist zu erkennen, dass beim Brand in der Mitte bzw. in der Ecke die Temperaturmaxima unabhängig von der Spiritusmenge und der jeweils geschlossenen bzw. leicht geöffneten Brandraumtür nicht wesentlich voneinander abweichen.

Die Temperaturen an den oberhalb der Brandstelle befindlichen Thermoelementen stiegen nach dem Zündvorgang (Brand in der Mitte) sofort an, während sich diejenigen unterhalb der Brandstelle in 1 m Höhe in Abhängigkeit von der Versuchszeit nur minimal erhöhten.

Beim Brand in der Ecke (Temperaturmeßstellen blieben in der Raummitte) stiegen die Temperaturwerte in Deckennähe ebenfalls höher an. Da der Abstand zur Decke durch die Anordnung der Brandstelle auf 1 m Höhe geringer ist, erhöhten sich die Temperaturen im Plume über der Flamme unterhalb der Decke unabhängig von der Spiritusmenge und der geschlossenen bzw. leicht geöffneten Tür auf nahezu 900°C.

Beim Brand in der Ecke (Meßstellen blieben in der Raummitte) wurden außerhalb des Plume noch um ca. 10°C höhere Temperaturen gegenüber denen mit der Brandstelle auf dem Boden gemessen. In Bodennähe dagegen stiegen die Temperaturen bei erhöht angeordneter Brandlast während der gesamten Versuchszeit nur geringfügig an. Bei allen Versuchen ist anhand der Kurven sehr deutlich die gleichmäßige Temperaturverteilung über der Höhe während der gesamten Versuchsdauer zu erkennen.

Bei den Versuchen V17 bis V28 mit dem Brandstoff Sägemehl stellen sich im Versuchsraum andere Temperaturverhältnisse ein. Da bereits zu Beginn eines jeden Versuches die zur Zündung (Schwelvorgang) notwendige elektrische Energie vorhanden war, lagen die Temperaturen in der Nähe der Brandstelle etwas höher als die Raumtemperatur. Bei Beginn der Messung erfolgte der weitere Anstieg langsamer als bei einem offenen Brand mit Spiritus. Der jeweilige Versuch wurde nach Überschreiten des Temperaturmaximums nach einer Versuchszeit von ca. 20 min abgebrochen. Das Restgewicht des Brandrückstandes betrug bei Versuchsende noch etwa 4 g.

Die Temperatur im Versuchsraum wurde bei der Anordnung der Brandstelle in der Mitte des Versuchsraumes in Bodennähe durch die unterschiedliche Luftzuführung (Tür zu - Tür 10 cm auf - Tür 50 cm auf) wesentlich beeinflusst. Mit zunehmendem Öffnungsquerschnitt wurde die Temperatur an den Meßstellen im Versuchsraum geringer (V17 bis V19). Naturgemäß strömt mit zunehmendem Öffnungsquerschnitt mehr kühlere Luft in den Versuchsraum. Die Temperaturen im Plume wurden deshalb stromab in Richtung Decke immer geringer.

Wenn sich die Brandstelle am Boden in der Ecke (V23 bis V25) befand, dann lagen die Temperaturwerte (Temperaturmessstellen blieben in Raummitte) beim größeren Öffnungsquerschnitt nur wenige Grad Celsius unter denen, wie sie bei geschlossenem Versuchsraum gemessen wurden. Auch hier, außerhalb des Plume, liegen die niedrigeren Temperaturen in Bodennähe und die höheren an der Decke.

Eine erhöhte Position der Brandstelle bei 1 m, sowohl in der Brandraummitte als auch in der Ecke, zeigte bei diesen Versuchen (V19 bis V22 und V26 bis V28) nur eine geringe Abweichung, wenn der Öffnungsquerschnitt vergrößert wurde. Die Temperaturen unterhalb der Brandstelle blieben etwa bei den zuvor ermittelten Werten. (Anm.: T5 bei "Tür zu" defekt). Beim Brand in der Ecke (Messung in der Mitte) stieg die Temperatur von unten nach oben an (wie beim Spiritus), was mit der Ausbreitung des Plume im Raum erklärt werden kann. Die Brandgase im Plume stiegen auf, stießen an Grenzen (Decke, Wände) und begannen sich zu sammeln. Es bildete sich eine Schichtung aus. Wenn keine weitere Energiezufuhr stattfand, kühlen sich die Gase und Partikel ab und begannen nach unten abzusinken. Bei allen Versuchen war eine gleichmäßige Verteilung im gesamten Versuchsraum festzustellen. Die Meßkurven lagen jeweils in Abhängigkeit von der Höhe des Versuchsraumes „parallel“ zueinander, was auf eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung hinwies.

Um die Temperaturverhältnisse im Versuchsraum mit den unterschiedlichen Parametern zu verdeutlichen, wurden in Bild 19 beispielhaft für die Meßstelle T10 unterhalb der Decke Mittelwerte der gemessenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragen. Anhand dieser Bilder ist deutlich die längere Branddauer und das höhere Maximum bei einer größeren Spiritusmenge zu erkennen (V1 bis V4). Dabei wird jeweils bei geschlossener Tür gegenüber der leicht geöffneten bei den gleichen Parametern eine etwas höhere Temperatur erreicht. Nach einer Versuchszeit von ca. 20 min war die Temperatur im Versuchsraum an den Meßstellen wieder ausgeglichen. Bei der erhöhten Brandstelle in einer Höhe von 1m haben die Kurven bis auf die etwas höheren Temperaturen oberhalb des Brandes einen ähnlichen Verlauf wie zuvor.

Beim den Versuchen mit Sägemehl (V17 bis V28) ist mit fortschreitender Versuchsdauer zu erkennen, dass bedingt durch die bessere Luftzufuhr bei geöffneter Tür die Temperaturen etwas geringer sind als bei geschlossener Tür.

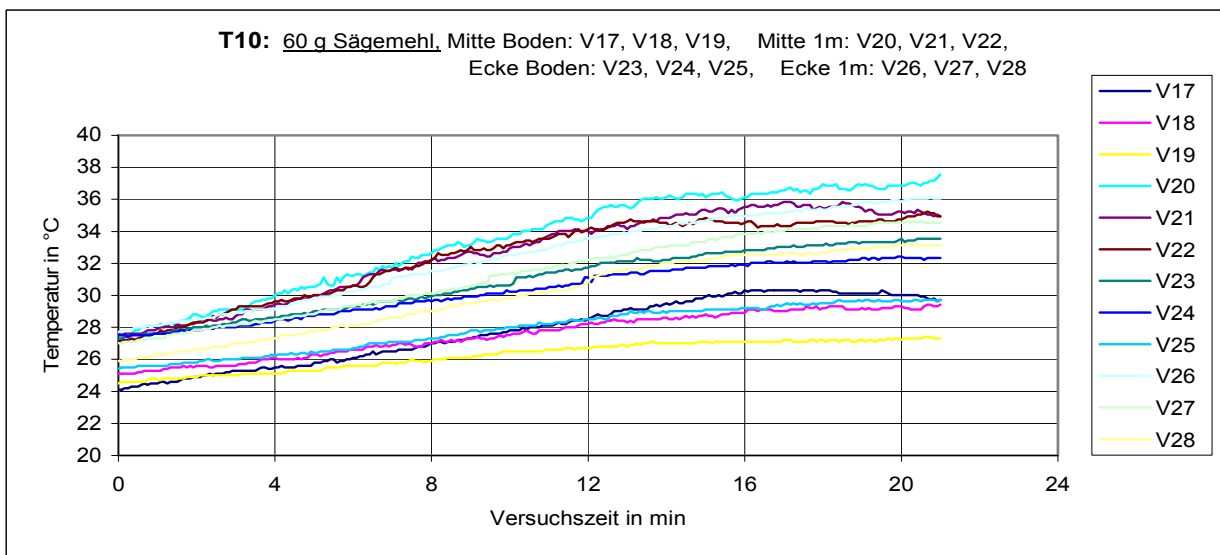
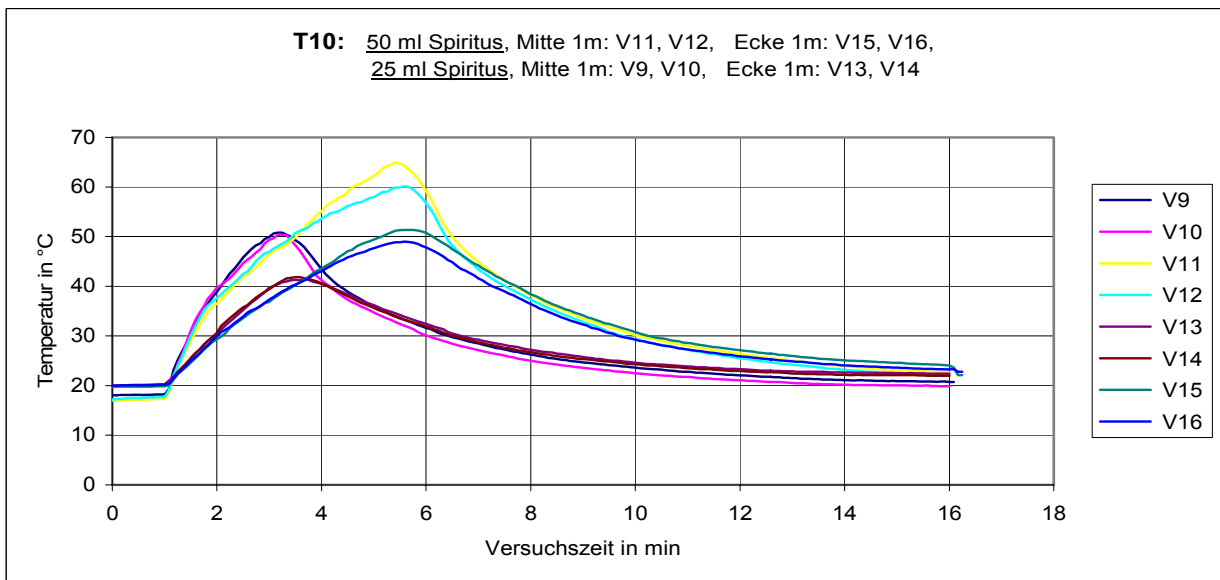
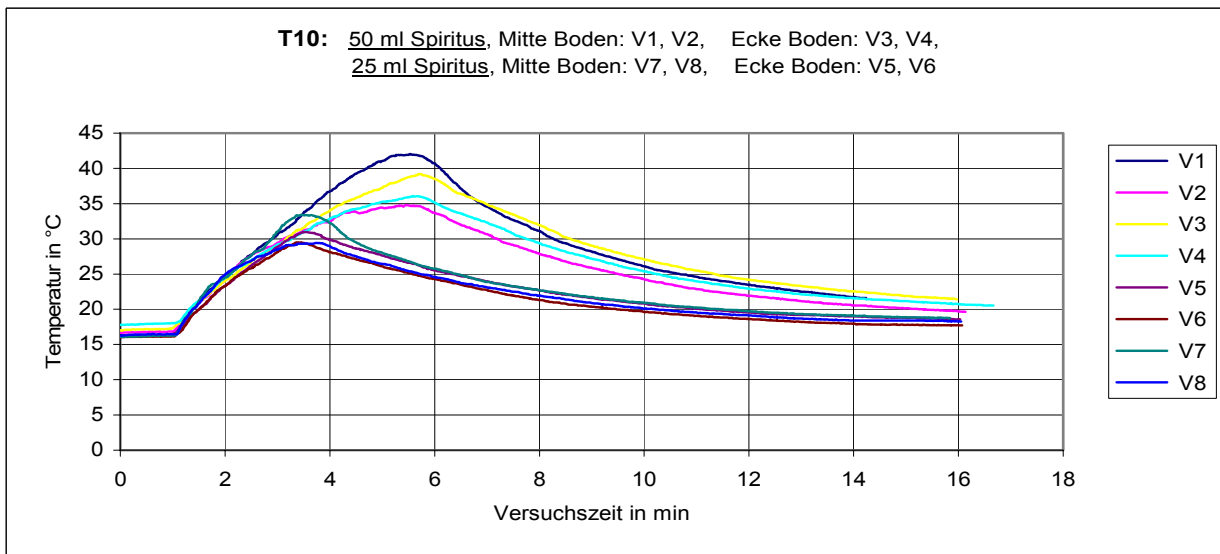


Bild 19. Vergleich der Temperaturen an der Meßstelle T10.

Bild 20 zeigt beispielhaft den Vergleich der Temperaturen an der Meßstelle T5 bei den Versuchen mit Sägemehl (V17 bis V28). Beim Brand in der Mitte in 1m Höhe bei geschlossener Tür (V20) ist die Temperatur leicht erhöht und steigt bei geöffneter Tür durch eine Beeinflussung des im Normalfall senkrecht nach oben gerichteten Plume stärker an (V21, V22). In der Ecke sind praktisch keine Änderungen festzustellen, die sich auf die Temperaturmessung in der Mitte auswirken.

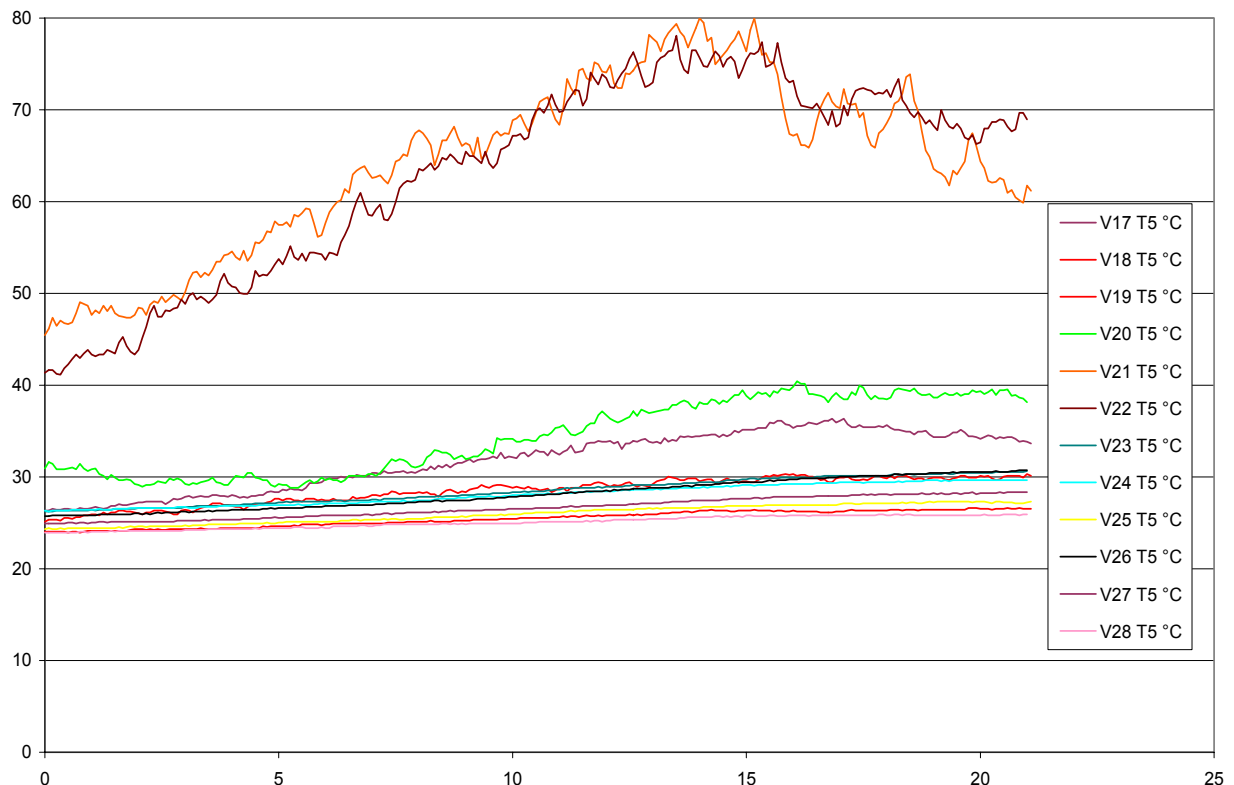


Bild 20. Vergleich der Temperaturen an der Meßstelle T5.

### 5.3 Druckmessung

Um evtl. Einflüsse aus der Umgebung zu minimieren, wurde der Raum abgedichtet und bei den Versuchen A bis E der flüssige Brandstoff von außerhalb entweder elektrisch mit einem Glühdraht oder mit einer kleinen Gasflamme gezündet. Hierbei wurde das aus einer Propangasflasche ausströmende Gas am Funken einer über ein Hochspannungsgerät mit Strom versorgten Zündkerze entzündet, die in kurzen Abständen Zündfunken erzeugte, so dass bei gleichen Ausgangsbedingungen die Reproduzierbarkeit gewährleistet war.

Um die Dichtigkeit des Versuchsraumes zu überprüfen, wurde nach jedem Versuch im Brandraum mit einem Ventilator ein definierter Überdruck erzeugt und der zeitliche Druckausgleich auf Umgebungsniveau bestimmt. Erfolgte ein langsamer Druckausgleich im Versuchsraum, so war der Versuchsraum hinreichend dicht.

In Bild 21 sind die Ergebnisse der Dichtheitsüberprüfung des Versuchsraums für die Versuche A bis E dargestellt. Der gemessene Druckabfall bei Versuch D erfolgte wesentlich schneller als bei den anderen Versuchen. Dies bedeutet, dass bei diesem Versuch die hier erforderliche Dichtheit des Raumes nicht gegeben war und deshalb die Ergebnisse dieses Versuches wegen der stärker abweichenden Druckverhältnisse im Raum nicht direkt vergleichbar sind.

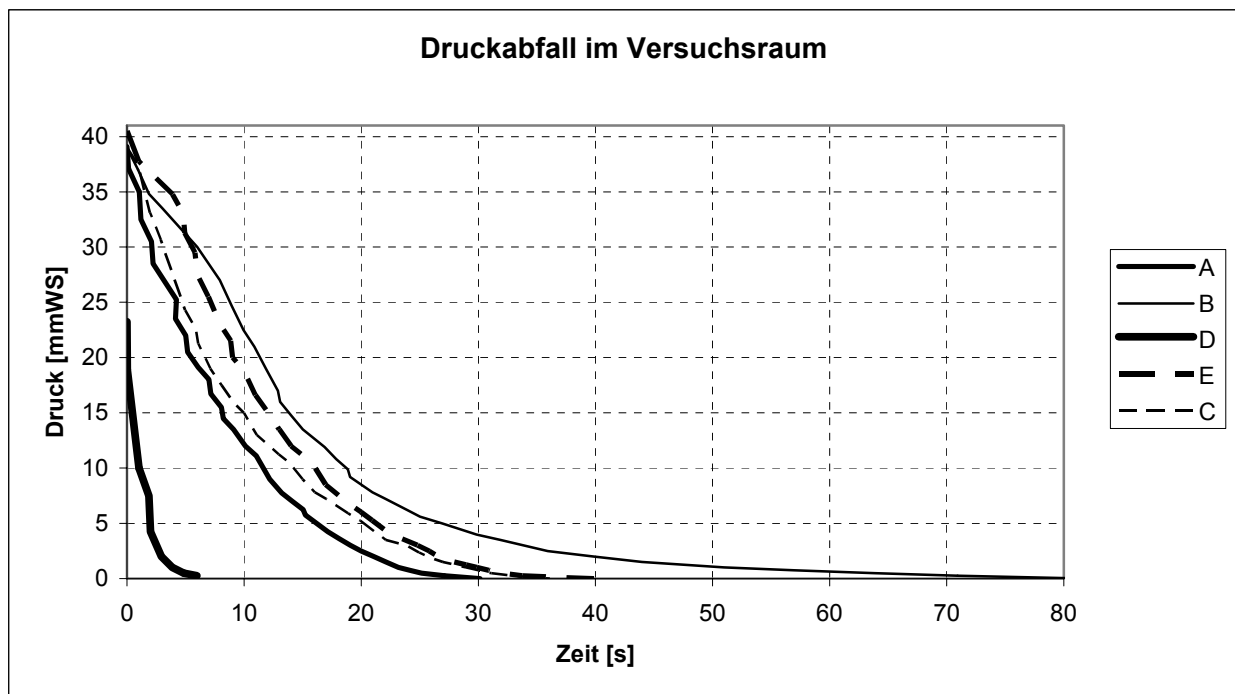


Bild 21. Druckabfall im Versuchsraum in Abhängigkeit von der Zeit.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde im Versuchsraum an der Wandseite schräg gegenüber der Tür im unteren und im oberen Bereich jeweils eine Druckmessstelle ( $p_1$  in Bodennähe bzw.  $p_2$  in Deckennähe) installiert, um den Druckanstieg bzw. -abfall während des Brandes ermitteln und somit besser auf die Strömungsverhältnisse im Versuchsraum schließen zu können. Bild 22 (V1 bis V28) zeigt die aufgezeichneten Druckkurven  $p_1$  bzw.  $p_2$  an der Wand in Abhängigkeit von der Versuchszeit für die in der Tabelle 2 genannten Parameter.



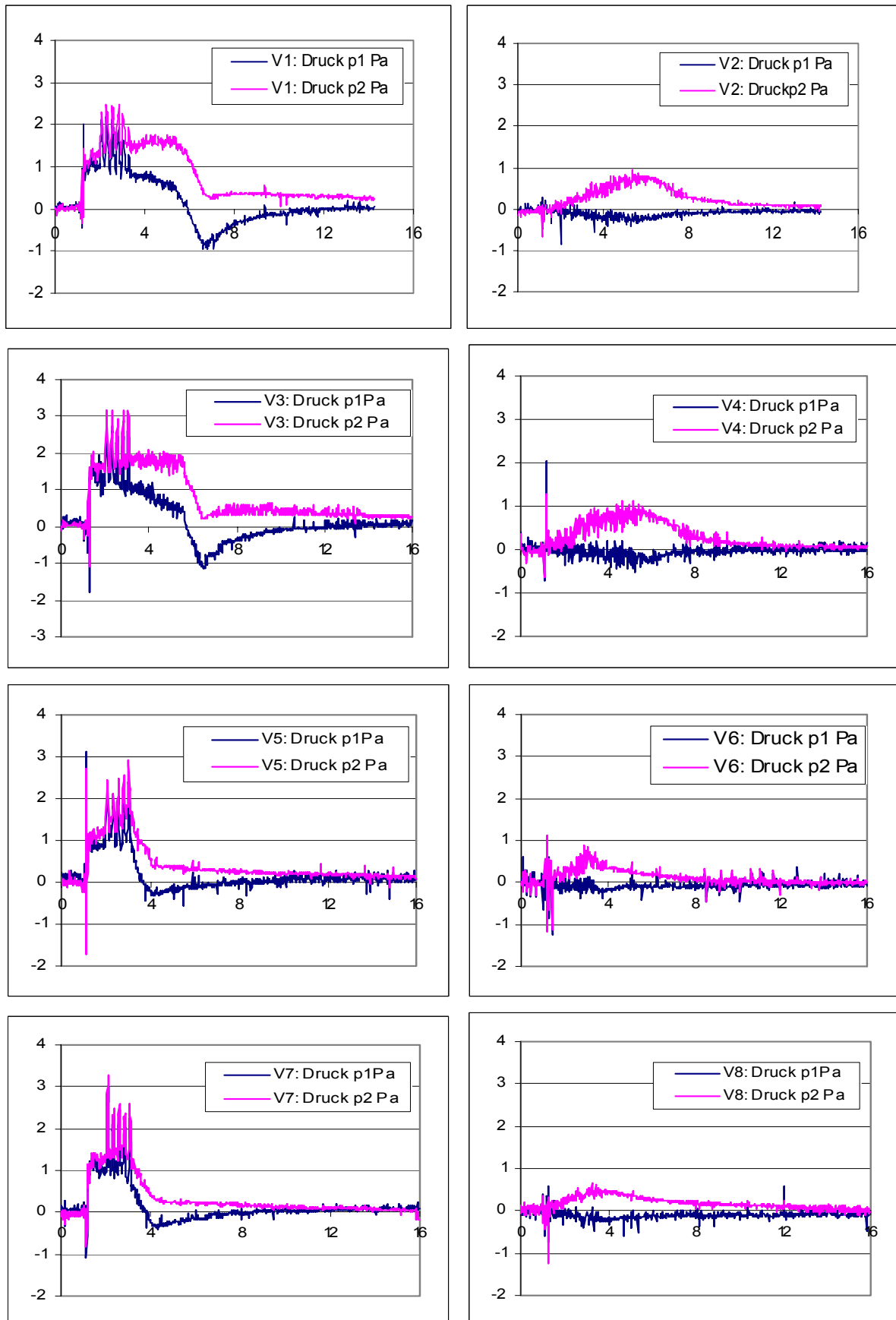
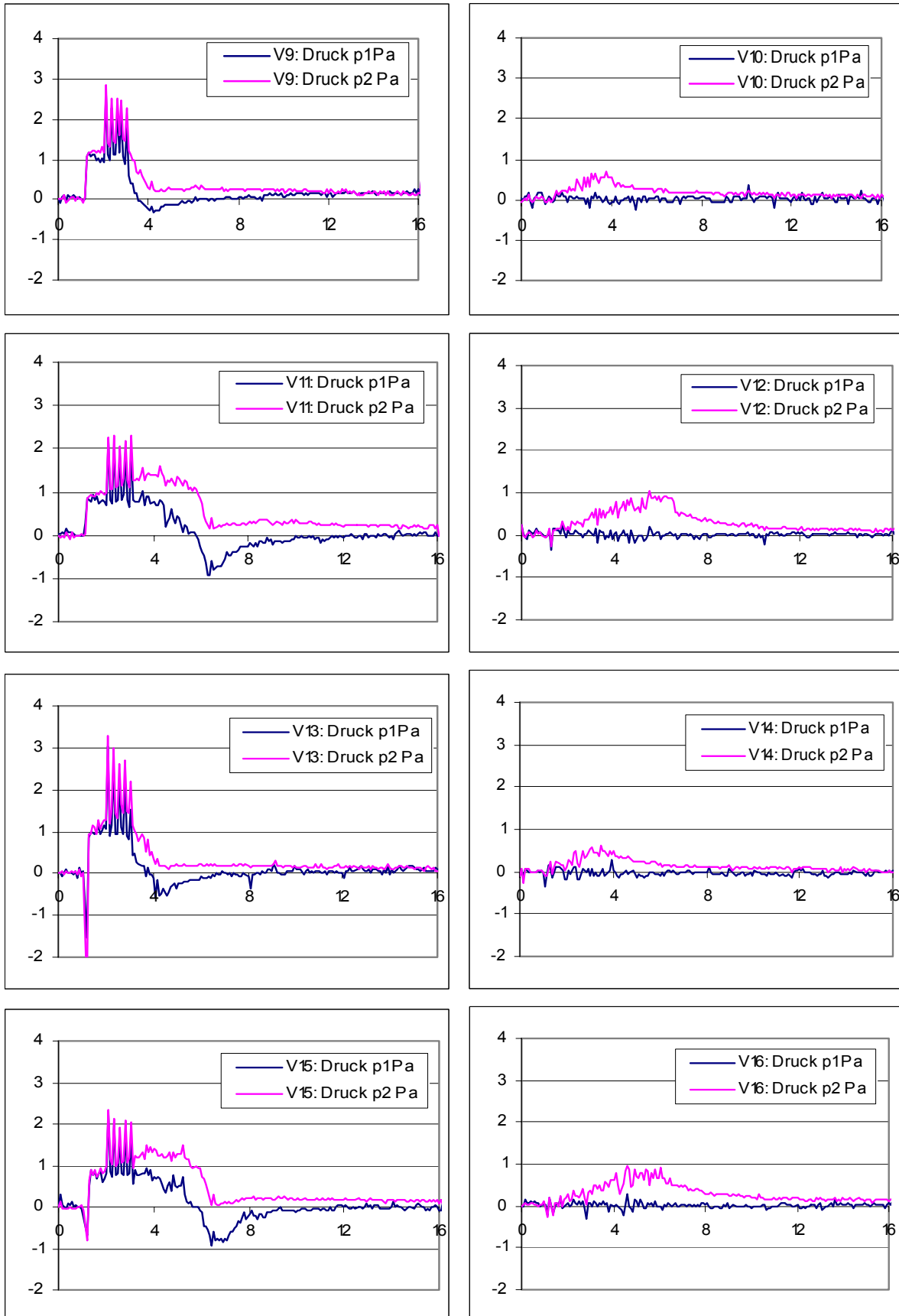
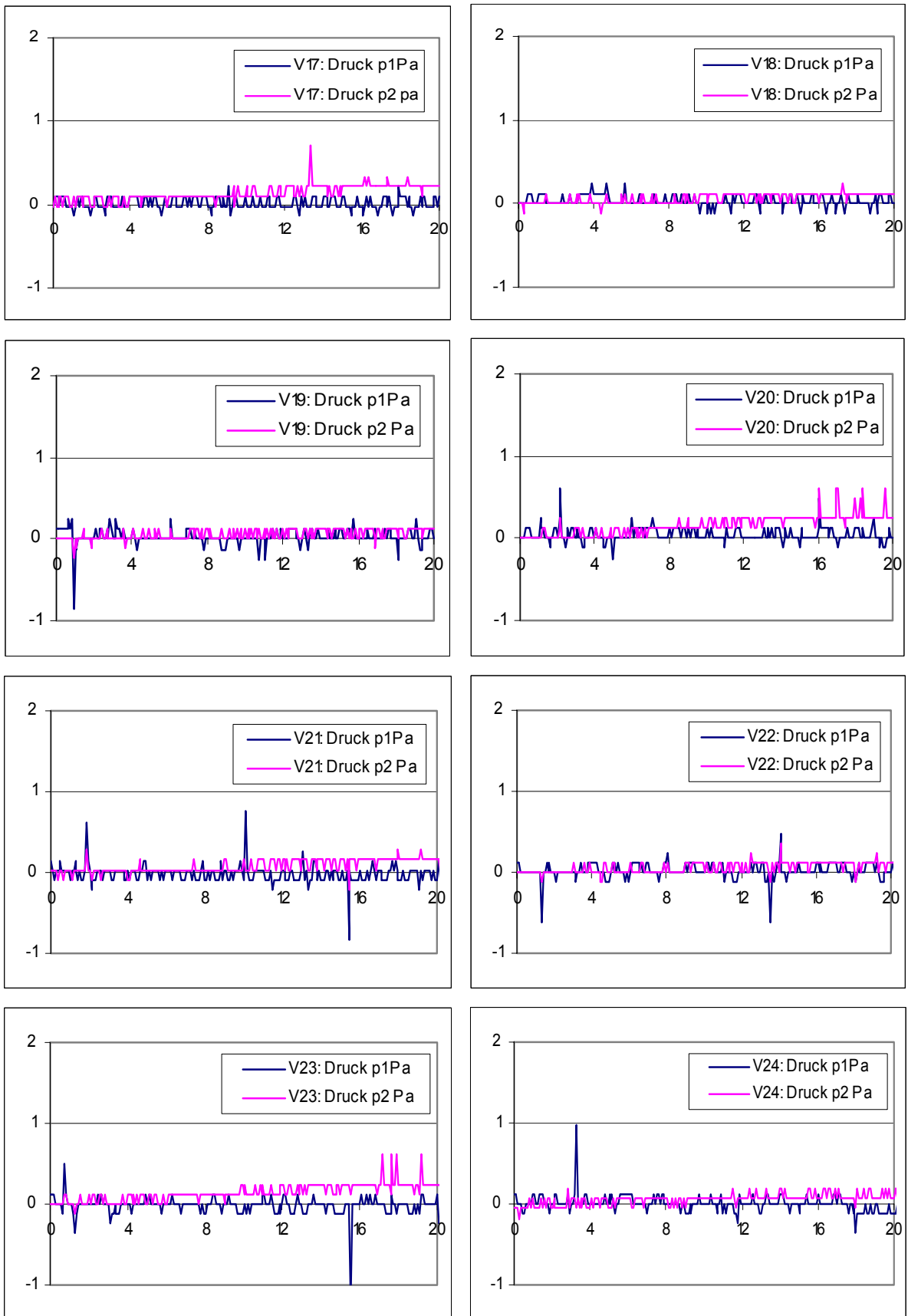


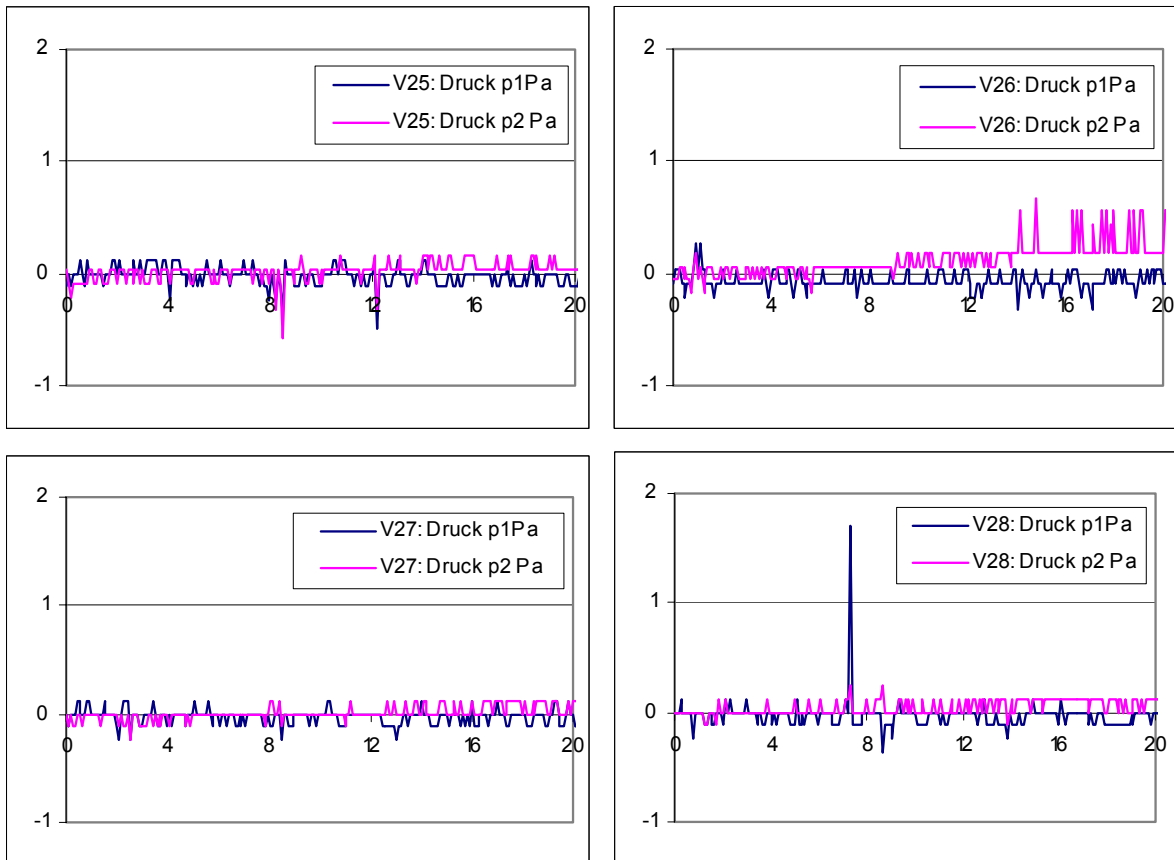
Bild 22. Mittelwert der Drücke ( V1 bis V8) in Abhängigkeit von der Versuchszeit.



Fortsetzung Bild 22. Mittelwert der Drücke ( V9 bis V16) in Abhängigkeit von der Versuchszeit.



Fortsetzung Bild 22. Mittelwert der Drücke ( V17 bis V24) in Abhängigkeit von der Versuchszeit.



Fortsetzung Bild 22. Mittelwert der Drücke ( V25 bis V28) in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

Bei einem Vergleich der Drücke bei Verwendung von 50 ml Spiritus beim Brand am Boden in der Mitte bzw. in der Ecke ergeben sich nur minimale Unterschiede sowohl beim geschlossenen als auch beim leicht geöffneten (10 cm) Versuchsraum. Der Druckanstieg erfolgt beim geschlossenen Raum nach dem Zünden sehr schnell, während er beim geöffneten Raum naturgemäß nur langsam zunimmt. Nach dem Erlöschen der Flamme sinkt der jeweilige Druck rasch ab und es entsteht im unteren Teil des Raumes ein Unterdruck. Bei leicht geöffneter Tür entsteht bereits nach dem Zünden ein Unterdruck in Bodennähe. Dies ist damit zu erklären, dass im unteren Teil des Raumes Luft angesaugt wird und im oberen Teil abströmt.

Beim Verbrennen von 25 ml Spiritus und denselben Parametern verlaufen die Kurven in ähnlicher Weise, jedoch mit einem etwas geringeren Maximalwert, was auf die kürzere Branddauer zurückzuführen ist.

Durch die Anordnung der Brandlast von 50 ml bzw. 25 ml Spiritus in einer Höhe von 1 m in der Mitte oder in der Ecke des Versuchsraumes ist praktisch kein Unterschied im Kurvenverlauf im Vergleich zur Anordnung auf dem Boden zu festzustellen. Bei geringerer Brennstoffmenge ist die Branddauer wie bereits erwähnt lediglich kürzer. Die geringe Öffnung der Tür im Versuchsraum hat gegenüber dem geschlossenen Raum ebenfalls keine gravierenden Änderungen der Druckverhältnisse zur Folge.

Ein ähnlicher Verlauf der Drücke in Abhängigkeit von der Versuchszeit kann bei folgenden Versuchen V1 bis V16 mit folgenden Parametern festgestellt werden.

<u>50 ml:</u>	Tür zu:	Boden, Mitte, Ecke, 1m Höhe:	V1, V3, V11, V15
	10 cm auf:	Boden, Mitte, Ecke, 1m Höhe	V2, V4, V12, V16
<u>25 ml:</u>	Tür zu:	Boden, Mitte, Ecke, 1m Höhe	V5, V7, V9, V13
	10 cm auf:	Boden, Mitte, Ecke, 1m Höhe	V6, V8, V10, V14

Bei geringerer Spiritusmenge ist aufgrund der kürzeren Branddauer bei geöffneter Tür das Maximum etwas niedriger ausgeprägt.

Bei den Versuchen V17 bis V28 können ebenfalls Gemeinsamkeiten festgestellt werden. Schwankungsbreiten von etwa 0,1 Pa liegen im Bereich der Meßgenauigkeit der verwendeten Druckaufnehmer.

Tür zu: Mitte Boden, Mitte 1m Höhe, Ecke Boden, Ecke 1m Höhe  
(V17,V20,V23,V26)

Bei geschlossener Tür ist eine Druckerhöhung nach oben im Raum erkennbar.

Tür 10cm auf bzw.

Tür 50cm auf: Hier sind nur marginale Unterschiede festzustellen.

#### 5.4 Rauchdichtemessung

Bei den Untersuchungen wurde in der Mitte des Versuchsraumes eine optische Rauchdichtemeßstrecke (Abstand Lichtquelle Sender zu Empfänger betrug 65cm) installiert. Die eigens dafür entwickelte Vorrichtung erlaubt es, während eines Versuches die Rauchdichte in Bodennähe in ca. 45 cm Höhe bis in eine Höhe von ca. 245 cm unterhalb der Decke des Versuchsraumes zu ermitteln. Da für die Messungen nur eine Meßstrecke zur Verfügung stand, war es nicht möglich, an jedem Meßpunkt gleichzeitig während der gesamten Versuchszeit die Rauchdichte in Abhängigkeit von der Höhe zu registrieren, so dass in verschiedenen Meßhöhen jeweils nur eine gewisse Zeit die Zu-/Abnahme des Rauches aufgezeichnet werden konnte. Um auf die Verteilung über der gesamten Höhe des Versuchsraumes schließen zu können, wurden einzelne Werte extrapoliert. Die Meßstrecke befindet sich bei allen Versuchen immer an derselben Stelle in der Raummitte (höhenverstellbar) unmittelbar neben den Thermoelementen.

Bild 23 (V1 bis V28) zeigt die Transmission in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei unterschiedlichen Parametereinstellungen für jeweils 5 Meßhöhen (0,85m; 1,25m; 1,65m ; 2,05m; 2,45m) im Versuchsraum. Wie bereits erwähnt, wurde bei den Versuchen V1 bis V16 in der ersten Minute kein Diskonebel zugeführt, so dass der Ausgangswert der Transmission bei 100 % lag.

Bei den Versuchen V1 bis V8 ist die Transmission in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei Anordnung der Brandquelle auf dem Boden aufgetragen. Bei einem Brand mit 50 ml bzw. 25 ml Spiritus in der Raummitte auf dem Boden bei geschlossener Tür (V1, V7) ist nach dem Einbringen des Diskonebels eine Verringerung der Transmission unterhalb der Decke auf etwa 60% bzw. 50% festzustellen. Bei leicht geöffneter Tür (V2, V8) sinken diese Werte um weitere 10% auf 50% bzw. 40% ab. Nach einer Versuchszeit von 15 min pendelten sich die Messwerte für die Transmission bei geschlossener Tür auf Werte zwischen ca. 70% bzw. 60% ein.

An den anderen Meßstellen nimmt die Transmission in Abhängigkeit von der Höhe etwas langsamer ab, um sich ebenfalls auf den nach 15 min erreichten Wert einzupendeln.

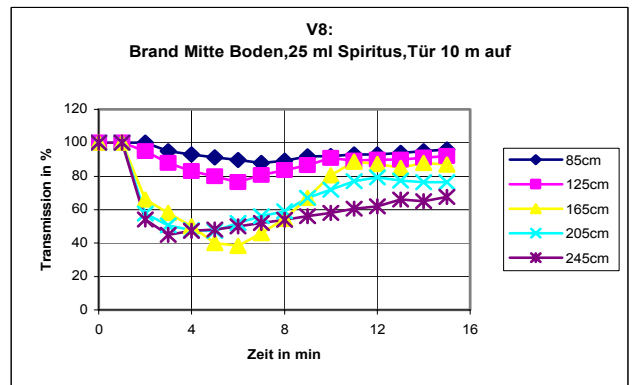
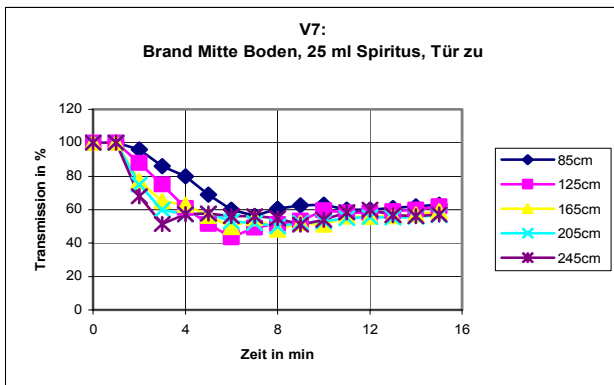
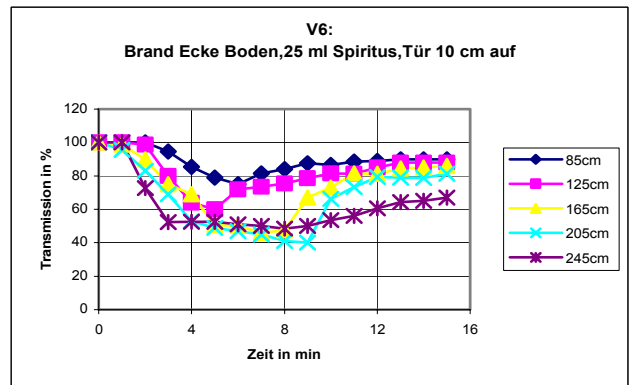
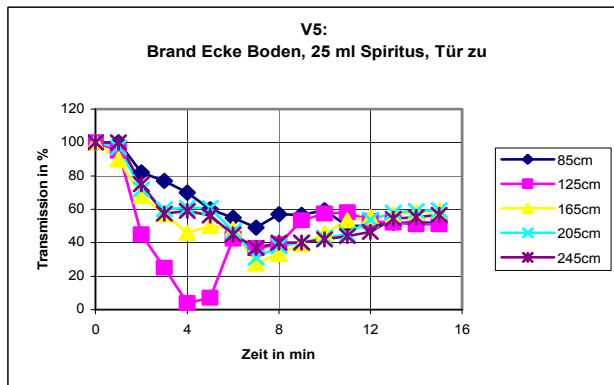
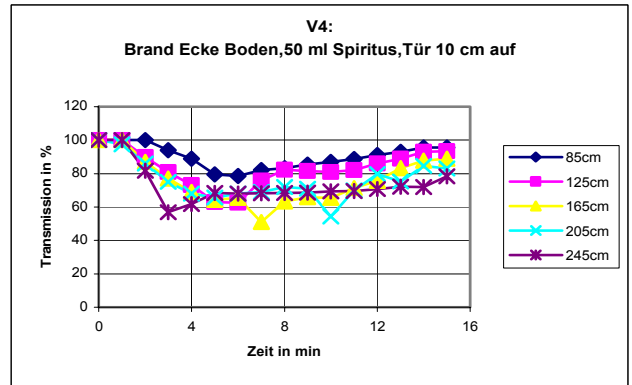
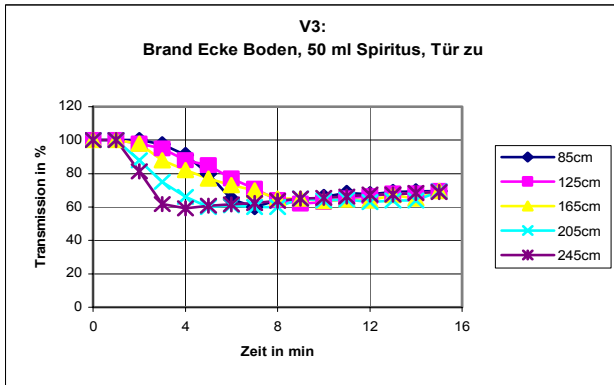
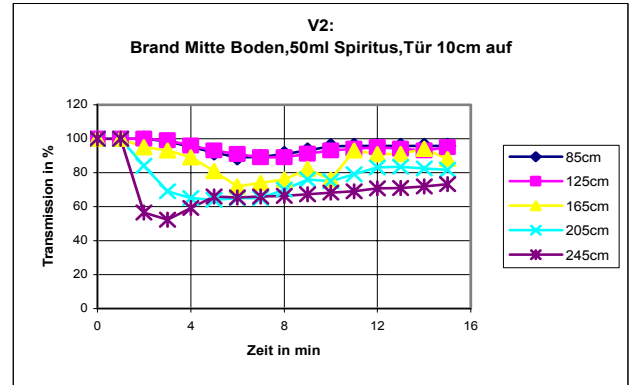
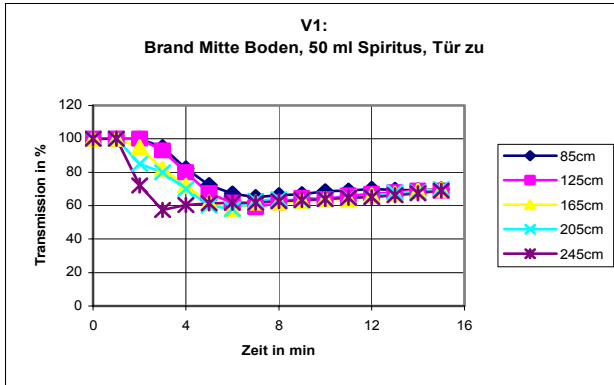


Bild 23. Transmission in Abhängigkeit von der Versuchszeit (V1 bis V8).

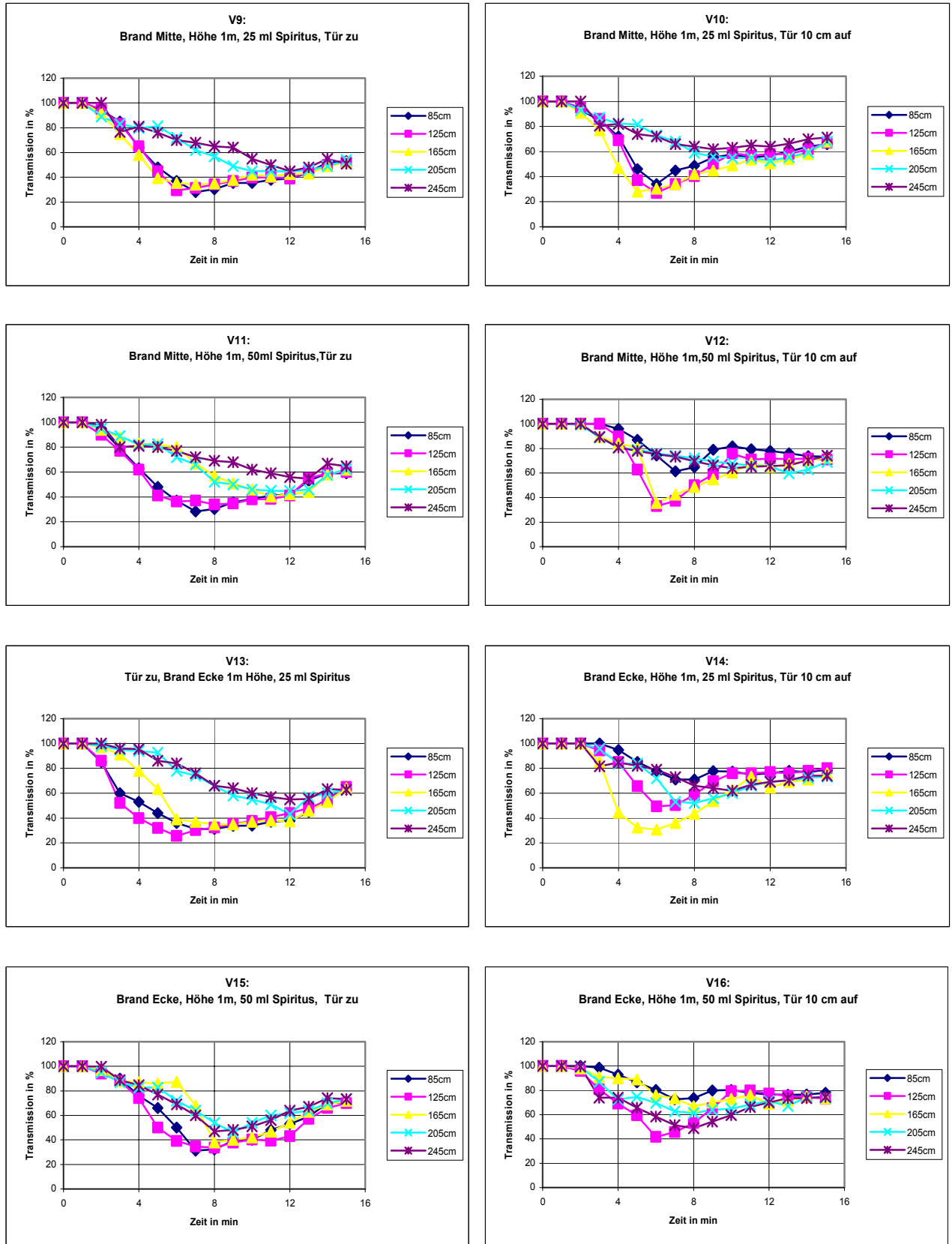


Bild 23. Fortsetzung.: Transmission in Abhängigkeit von der Versuchszeit (V9 bis V16).



Bei leicht geöffneter Tür (V2, V8) ist im oberen Bereich des Raumes das Abfallen der Transmission ebenfalls zu erkennen, während im unteren Bereich bis zu einer Höhe von etwa 150 cm aufgrund der Lufteinströmung eine geringere Abnahme der Transmission stattfindet. Nach einer Versuchszeit von 15 min liegen die höhenabhängigen Werte noch weit auseinander bei Werten zwischen etwa 65% und mehr als 95%.

Befindet sich der Brand in der Ecke auf dem Boden (V3, V4, V5, V6) macht sich dies insofern bemerkbar, dass bei der jeweiligen Transmission Abweichungen im Kurvenverlauf auftreten, die nur mit räumlich zufällig auftretenden Rauchströmungen erklärt werden können. Ansonsten hat auch hier die Transmission (bei leicht geöffneter Tür, unabhängig von der Spiritusmenge) einen ähnlichen Verlauf wie zuvor. Die größten abweichenden Meßwerte der Transmission treten bei der kleineren Spiritusmenge und dem größten Abstand zwischen Brand und Meßstelle auf (s. V5). Sie können nur mit variablen Strömungsverhältnissen im Raum, evtl. auch mit der nicht 100%ig gleichen Verteilung des Diskonebels, erklärt werden.

Bei den Versuchen V9 bis V16 ist die Transmission in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei Anordnung der Brandquelle in einer Höhe von 1 m aufgetragen. Ein gravierender Unterschied zur Brandstelle am Boden ist unabhängig vom Brandort (Mitte, Ecke), der Spiritusmenge (50ml, 25ml) und der geschlossenen sowie leicht geöffneten Tür eine stärkere Abnahme der Transmission im gesamten Raum, um nach einer Versuchszeit von etwa 15 min wieder auf das Niveau der vorherigen Versuche (V1 bis V8) anzusteigen.

Bei leicht geöffneter Tür steigt durch die Luftzufuhr in Bodennähe die Transmission nach dem Absinken wieder etwas schneller an als bei geschlossener Tür. Auch hier lassen sich die größeren Schwankungen hauptsächlich mit dem evtl. nicht ganz gleichmäßig zugeführten Diskonebel erklären, was immer zu leicht unterschiedlichen Strömungsverhältnissen innerhalb des Versuchsraumes führen kann.

Bei den Versuchen V17 bis V28 handelt es sich um eine Versuchsreihe mit Sägemehl als Brandstoff. Wegen der kontinuierlichen Rauchbildung sind während des Schwelvorganges die durch die verschiedenen Parameter bedingten Unterschiede deutlich zu erkennen.

Bleibt die Tür während des Versuchs geschlossen (V17), fällt die Transmission in Abhängigkeit von der Höhe kontinuierlich ab; im oberen Teil des Raumes etwas stärker als im unteren. Nach einer Versuchszeit von ca. 9 min bzw. ca. 14 min steigt die Transmission im oberen bzw. unteren Teil des Raumes wieder leicht an und erreicht nach 20min einen Wert von ca. 80%.

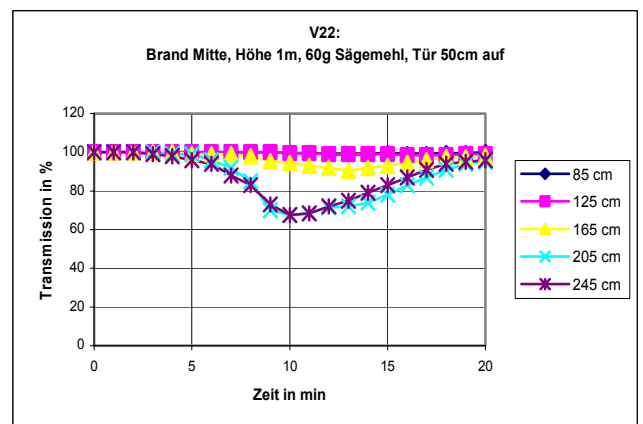
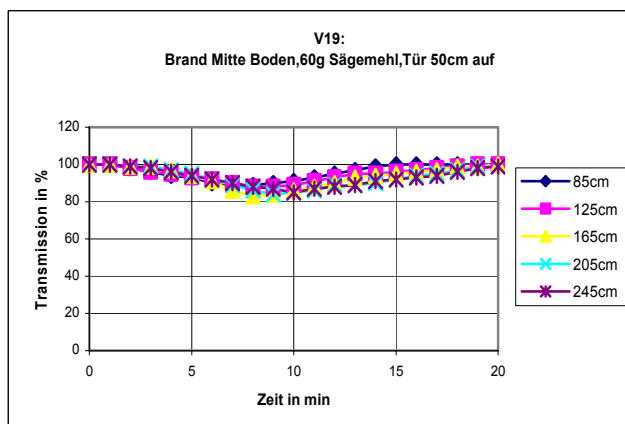
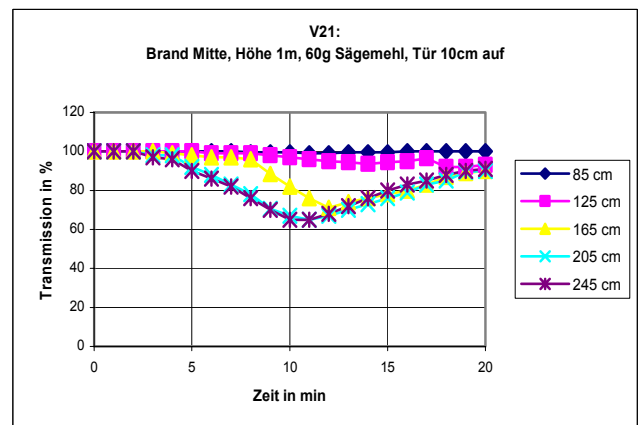
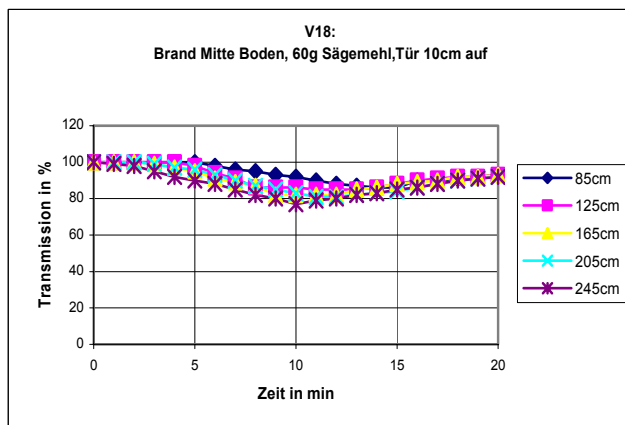
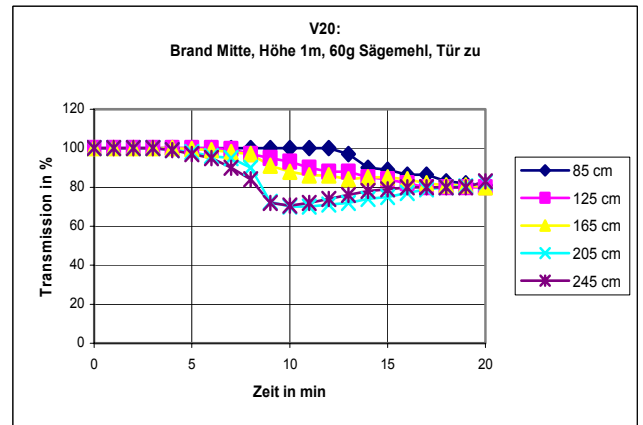
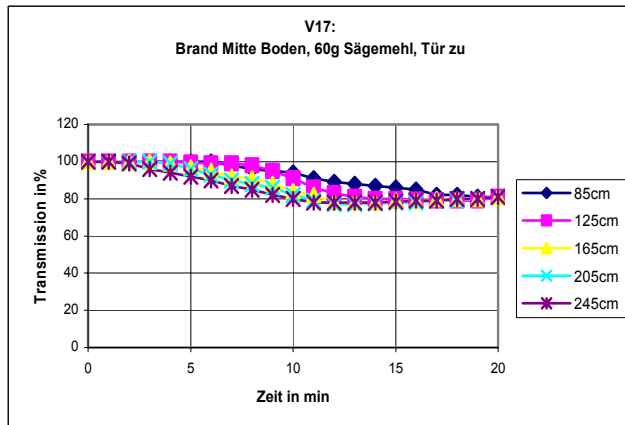


Bild 23.Fortsetzung.: Transmission in Abhängigkeit von der Versuchszeit (V17 bis V22).

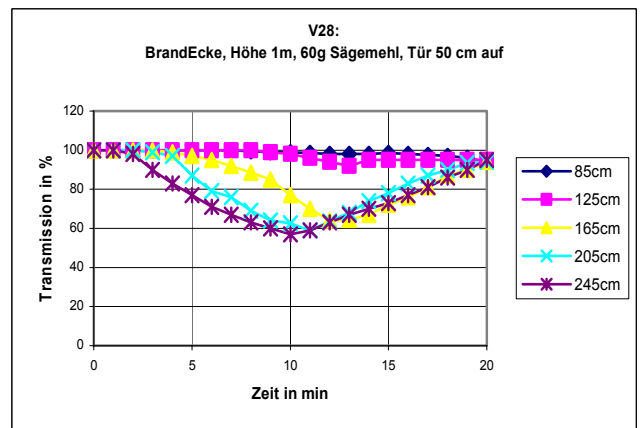
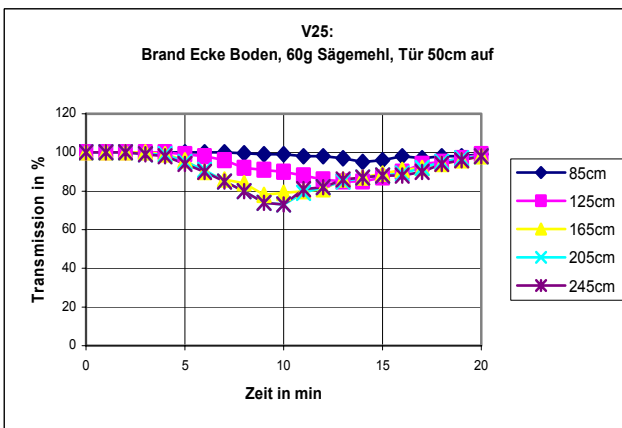
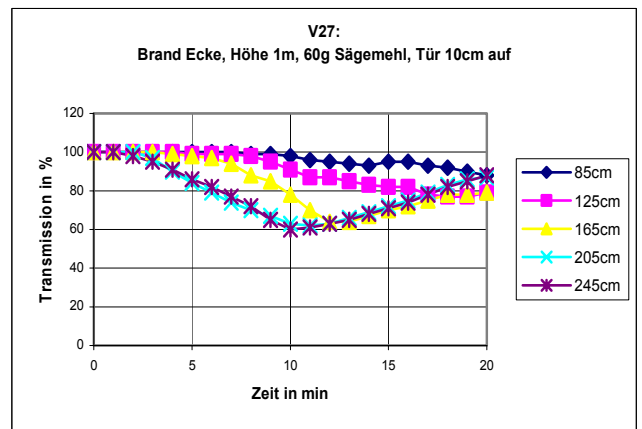
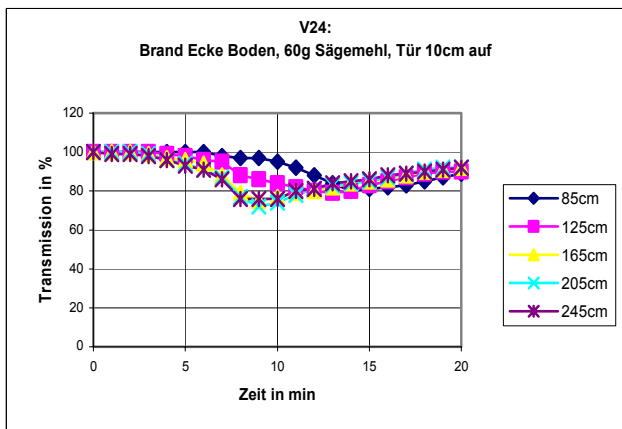
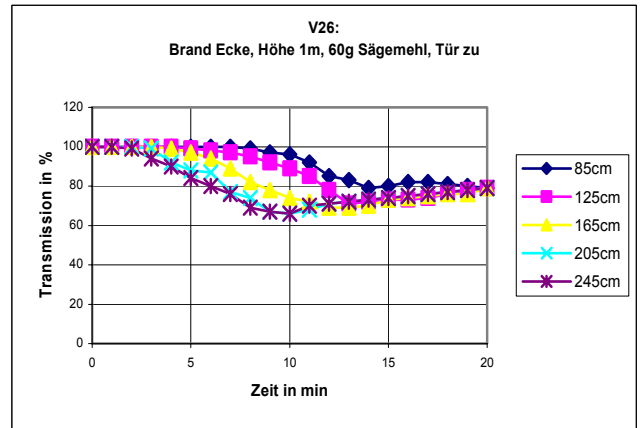
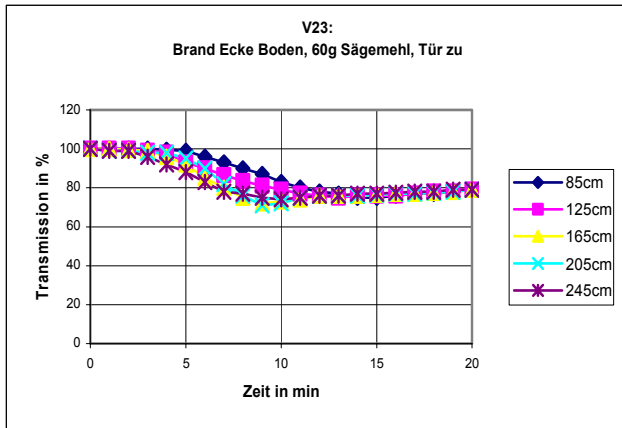


Bild 23.Fortsetzung.: Transmission in Abhängigkeit von der Versuchszeit (V23 bis V28).

Durch das leichte Öffnen der Tür (V18) bleibt die Transmission länger bei höheren Werten und fällt im oberen Teil des Brandraumes geringfügig mehr ab als zuvor, um nach 20 min im gesamten Raum auf ca. 90% anzusteigen.

Ein weiteres Öffnen der Tür auf 50 cm (V19) hat zur Folge, dass im oberen Teil des Raumes die Transmission geringfügig weiter abfällt, im unteren Teil mehr Luft einströmt und nach 20 min wieder nahezu 100% erreicht werden.

Auch bei den Versuchen mit der Brandstelle in 1m Höhe (V20 bis V22) treffen obige Aussagen zu. Als Unterschied kann jedoch festgestellt werden, dass die Transmission im unteren Teil des Raumes jeweils stärker abfällt und im oberen Teil des Raumes jeweils deutlich höher ist.

Befindet sich die Brandstelle in der Ecke (V23 bis V28) auf dem Boden oder in einer Höhe von 1m ist ein ähnlicher Kurvenverlauf wie vorher zu erkennen. Weiterhin kann festgestellt werden, dass bei geschlossener Tür (V17, V20, V23, V26) (Brandstelle: Boden, 1m Höhe, Mitte, Ecke) durch die größere Entfernung Brandstelle zur Meßstrecke der jeweilige Zeitablauf etwas verschoben ist, was bei geöffneter Tür nicht zu erkennen ist.

Außerdem wird durch die Anordnung der Brandstelle in 1m Höhe die Differenz der Transmission im oberen und im unteren Teil des Versuchsraumes wegen des dichteren Rauches oberhalb und der unverbrauchten Luft unterhalb des Brandherdes größer. Je weiter die Tür geöffnet wird, desto schneller wird unabhängig von der Lage der Brandstelle nach dem Erlöschen des Brandes wieder der Wert von 100% der Transmission erreicht, d. h. der Rauch ist abgezogen.

Die visuellen Beobachtungen haben gezeigt, dass nicht bei allen Versuchen eine Rauchsicht zu erkennen war, die eindeutig einer bestimmten Höhe zugeordnet werden konnte. Mittels Messungen wie sie bei den Versuchen durchgeführt wurden, konnte in den unterschiedlichen Höhen jeweils eine Änderung der Messwerte bei der Transmission festgestellt werden. Diese Werte können jedoch wegen der oft geringen Dichte des Rauches nicht immer eindeutig den visuell beobachteten Höhen zugeordnet werden.

## 6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Beim Beobachten der Versuche durch die Sichtfenster des Versuchsraumes konnte nicht bei jedem Versuch eine Ausbildung einer stabilen Rauchschiicht oder eine Abstufung in der Intensität der Trübung durch Rauch visuell festgestellt werden. Bei einem Versuch, als Rauchpulver im geschlossenen Raum gezündet wurde, ohne dass eine permanente Brandquelle aktiv war, konnte beobachtet werden, dass der entstandene Rauch unterhalb der Decke eine stabile Schicht bildete. Bei einigen Versuchen mit Diskonebel konnte jeweils in einer Höhe von 60 cm bis 80 cm eine schwach sichtbare Rauchschiichtung festgestellt werden. Bei den Untersuchungen mit Sägemehl war durch die stärkere Rauchentwicklung die Rauchverteilung im Raum besser zu erkennen. In den meisten Fällen jedoch war der Rauch im gesamten Raum verteilt und keine eindeutige Schichtung mehr auszumachen.

Durch die Beobachtungen hervorgerufen liegt die Vermutung nahe, dass durch die Wannenbrände mit Dekalin, Spiritus oder Sägemehl eine walzenartige Strömung entsteht, die den Rauch im Raum verwirbelt und somit eine mehr oder weniger starke Ver Rauchung des Versuchsraumes erzeugt. Bei den Versuchen mit Diskonebel konnte teilweise in Bodennähe das Einsaugen von Rauch in die Flamme (Plume) beobachtet werden. Nach Verlöschen des Brandes blieb bei einigen Versuchen mit Sägemehl als Brandstoff die vorhandene Rauchschiicht noch für eine gewisse Zeit bestehen.

Die gemessenen Temperaturschichtungen stellten sich in den Versuchen unterschiedlich stark ausgeprägt und in unterschiedlichen Höhen ein. Es wäre zu erwarten gewesen, dass sich die Temperaturverläufe und Schichten während der laufenden Brände nahezu gleich einstellen, da die Randbedingungen in den entsprechenden Zeiträumen als nahezu gleich anzusehen werden konnten. Denkbar ist daher, dass der Einsatz des Rauchpulvers oder des Diskonebels die Strömungsverhältnisse im Versuchsraum beeinflusste und somit zu unterschiedlichen Ergebnissen führte. Beim Einsatz von Sägemehl war die Schwankungsbreite wesentlich geringer.

Bei der visuellen Beobachtung der Versuche konnte kein direkter Zusammenhang zwischen der gemessenen Temperaturschichtung und einer Schichtung von Rauch in unterschiedlichen Konzentrationen festgestellt werden. Die Bildung von Rauchschiichten

könnte in weiterführenden Untersuchungen durch andere Brandquellen mit höherer Partikelproduktion und die gleichzeitige Messung der optischen Rauchdichte in verschiedenen Höhen überprüft werden. Die Auftriebsströmung der Versuchsbrände induzierte eine Art Walzenströmung, die meist die Ausbildung einer stabilen Rauchschrift an der Decke verhinderte. Der Auftrieb des heißen Rauchs reichte nicht aus, um dem Sog der Strömung zu widerstehen, da die Entfernung der Decke und damit des Rauchs zum Brandherd zu gering waren. Es kommt zur Durchmischung des Brandrauches im Versuchsraum und dadurch zur Kontaminierung mit (giftigen) Brandgasen

## **7 Simulationsmodell, Raummodell**

Vergleichsrechnungen mit einem Simulationsprogramm geben Aufschluss über die Genauigkeit eines Rechenmodells innerhalb der in den Versuchen festgelegten Grenzen und über die Frage, ob das Programm zur Simulation von kleinen Bränden innerhalb kleiner Räume geeignet ist. Dabei ist weniger die Übereinstimmung der absoluten Temperaturen von Bedeutung als vielmehr die sich einstellende Temperaturschichtung im Raum. Die Temperaturen an den Meßstellen der experimentellen Versuche können mit den berechneten Temperaturen verglichen werden.

Da wie bereits erwähnt Brandgase bei einem Schadenfeuer die größte Gefahr für Personen darstellen, ist die Lage einer Rauchschrift in einem Raum von großer Bedeutung. Deshalb werden bei Risikoabschätzungen vielfach Brandsimulationsrechnungen für die Rauchfreiheit in Gebäuden hinzugezogen. Insbesondere müssen die Fragen nach einer stabilen Rauchschrift, einem Absinken der Rauchschrift oder einer Verräucherung des gesamten Raumes erfasst und mit berücksichtigt werden.

Zur Simulation wurde ein sogenanntes CFD-Modell (computational fluid dynamics model) für feuergetriebene Strömungen des National Institute of Standards and Technologies (NIST) verwendet. Die Berechnungsweise beruht auf dem Prinzip der Finiten Elemente (FE). Dabei wird ein Versuchsraum in kleine Volumenelemente unterteilt. Die Genauigkeit der Berechnung nimmt mit einem feiner werdenden Rechengitternetz zu, gleichzeitig aber auch der dafür benötigte Rechenaufwand. Um diesen Rechenaufwand in Grenzen zu halten sollte deshalb nach dem Prinzip „so grob wie möglich, so fein wie nötig“ gearbeitet werden. Bei der Simulation des bei Bränden entstehenden Rauches

mit FDS (Fire Dynamics Simulator) kann beispielsweise eine ISO-Oberfläche, d. h. Punkte im Raum mit derselben Rauchkonzentration dargestellt werden.

Das ausgewählte Gitternetz sollte im Bereich des Brandherdes möglichst fein sein, da die Berechnung von dort startet und sich evtl. Ungenauigkeiten exponentiell auf den weiteren Berechnungsverlauf auswirken könnten. Der Brandherd sollte deshalb im Gitternetz durch mindestens vier Zellen dargestellt werden. Um jedoch die gesamte Zellenzahl nicht unnötig zu erhöhen, besteht die Möglichkeit, das Gitternetz in bestimmten Bereichen enger und in anderen Bereichen weiter zu gestalten (Bild 24). Die einzelnen Elemente sollten dabei aus rechentechnischen Gründen möglichst Würfelform haben. Das bei der Modellierung gewählte Raster besitzt im Bereich des Brandherdes eine Abmessung von 5cm x 5cm. Wenn der Brandherd bei den realen Versuchen z. B. eine Fläche von 7cm x 7cm besitzt werden die Kanten (von modellierten Objekten) vom Programm automatisch auf das vorhandene Raster angeglichen. Der modellierte Brandherd wird damit wie ein Brandherd mit 10cm x 10cm Grundfläche berechnet.

Bei der Modellrechnung wurden für den Druckausgleich im Versuchsraum kleine Ventilationsöffnungen belassen; aus Gründen der Symmetrie an den vier Seiten des Modellraumes in Bodennähe. Ein evtl. bei den Untersuchungen auftretender Fehler ist wegen des kleinen Brandherdes und des evtl. bei einem Brand entstehenden Überdruckes sehr gering.

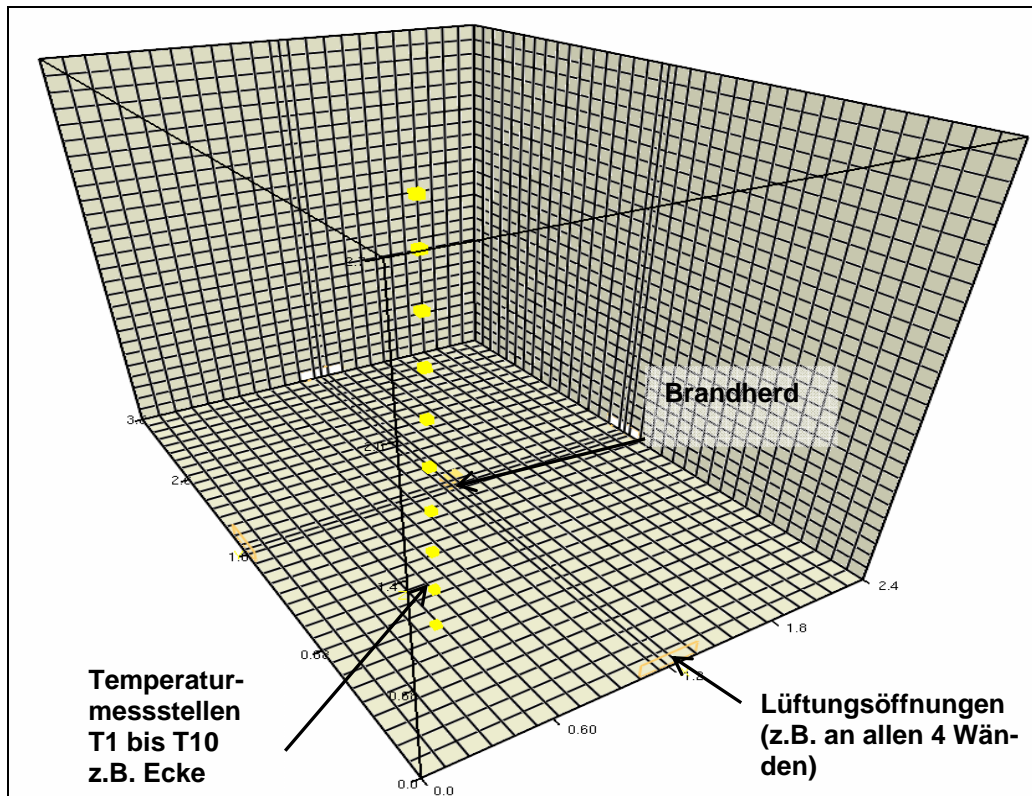


Bild 24. Simulationsmodell des Versuchsraums mit unterschiedlichem Gitternetz.

## 7.1 Simulationsmodell FDS (Fire Dynamics Simulator)

Ein Vergleich der realen Versuche mit dem Simulationsmodell ist nur für gleiche Wärmefreisetzungsraten möglich. Deshalb wurde die Wärmefreisetzungsrate pro Fläche aufgrund der größeren Brandherdfläche niedriger gewählt, um die gleiche Wärmefreisetzungsrate von 3,6 kW der realen Versuche zu erhalten (Bild 25).

Tabelle 3 zeigt beispielhaft die für Vergleichsberechnungen eingegebenen Größen. Bei den Simulationsberechnungen wurden der zeitliche Brandverlauf und die Simulationsdauer variiert. Dabei wurde die simulierte Dauer eines Brandes derjenigen angenähert, die auch bei realen Versuchen beobachtet werden konnte.



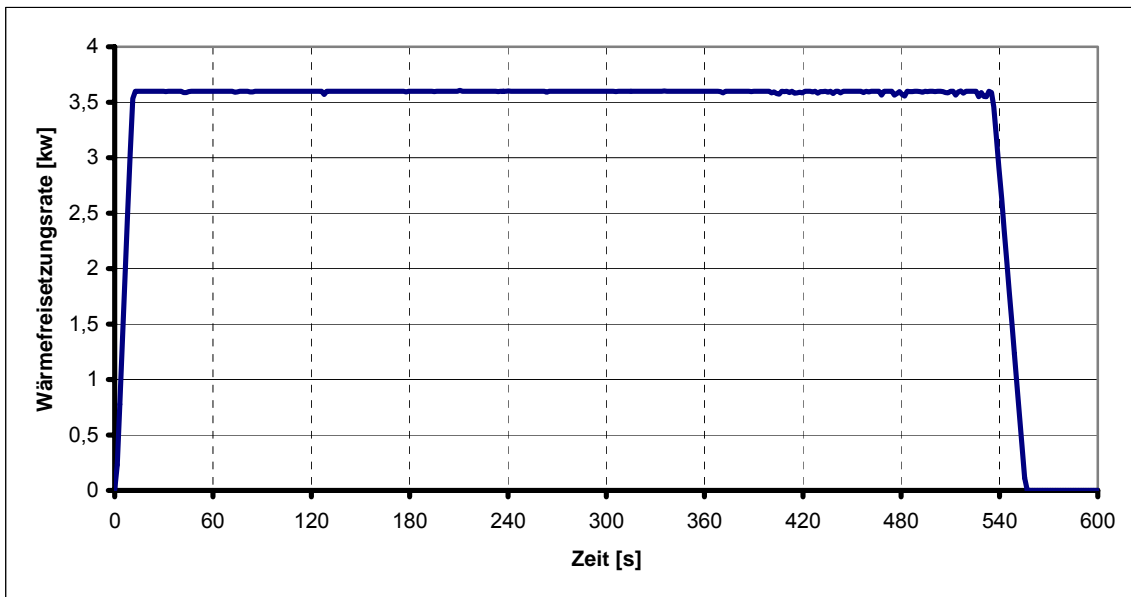


Bild 25. Berechnete Wärmefreisetzungsrate (Versuch B mit  $360 \text{ kW/m}^2$ ).

## 7.2 Rauchsicht und Temperatur

Sowohl die berechneten als auch die gemessenen Temperaturwerte wurden in Abhängigkeit von der Zeit in einem Bild dargestellt. Das Programm geht bei Simulationsstart von einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  im gesamten Raum aus. Eine anfängliche leichte Temperaturschichtung, wie evtl. bei realen Versuchen, wird nicht berücksichtigt.

Mit einem Auswerteprogramm wurde die ISO-Oberfläche der berechneten Rauchkonzentration visualisiert und somit das Absinken bzw. eine Schichtung der Rauchgase im Raum dargestellt. Durch Ermitteln der Höhe der ISO-Oberfläche kann qualitativ die berechnete Unterkante der Rauchsicht in Abhängigkeit der Zeit wiedergegeben werden. Beispielphaft wurde in den Bildern 26a bis 26f der Verlauf der berechneten Rauchsicht für die Simulation des Versuchs B wiedergegeben. In Bild 26e ist die Ausbildung einer stabilen Rauchsicht mit der Unterkante etwa 30 cm über dem Boden zu erkennen. Das Erlöschen der Brandquelle bewirkt ein langsames Absinken der Rauchsicht bis auf Bodenniveau. Weiterhin kann aus den Bildern qualitativ der zeitliche Verlauf der mittleren Position der Rauchsichtunterkante ermittelt werden. Die Ergebnisse wurden in Bild 27 dargestellt.

&HEAD CHID='Rauchsim25',TITLE='Raum 2,4 x 3,5 x 2.70 m ' /	----	Versuchsname
&GRID IBAR=24,JBAR=36,KBAR=27 /	----	Gitternetzeinteilung
&PDIM XBAR=2.40,YBAR=3.50,ZBAR=2.70 /	----	Raumdimension
&TIME TWFIN=780. /	----	Simulationszeit
&MISC REACTION='Dekalin',SURF_DEFAULT='GYPSUM BOARD',	----	Materialangabe
NFRAMES=500,		
DATABASE='c:\NIST\fds\database3\database3_1.data',		
DTCORE=100		
&SURF ID='burner',HRRPUA=360., PARTICLES=.TRUE.,RAMP_Q='Feueraus'	}	HRRPUA: Wärmefrei- setzungsrate des Brandherdes in [kw/m²]
&PART QUANTITY='TEMPERATURE'		
&RAMP ID='Feueraus',T=0.0, F=0.0 /	}	zeitlicher Brandverlauf
&RAMP ID='Feueraus',T=10.0, F=1.0 /		
&RAMP ID='Feueraus',T=535.0, F=1.0 /		
&RAMP ID='Feueraus',T=555.0, F=0.0 /		
&OBST XB=1.15,1.25,1.7,1.8,0.00,0.05,SURF_IDS='burner','INERT','INERT' /	}	Brandstelle
&VENT XB=1.15,1.25,0.0,0.0,0.0,0.05,SURF_ID='OPEN' /	}	Lüftungsöffnungen
&VENT XB=0.0,0.0,1.75,1.85,0.0,0.05,SURF_ID='OPEN' /		
&VENT XB=1.15,1.25,3.5,3.5,0.0,0.05,SURF_ID='OPEN' /		
&VENT XB=2.4,2.4,1.75,1.85,0.0,0.05,SURF_ID='OPEN' /		
&TRNX CC= 1.1 ,PC= 1.15 /	}	Änderung im numerischen Gitternetz
&TRNX CC= 1.3 ,PC= 1.25 /		
&TRNY CC= 1.65 ,PC= 1.7 /		
&TRNY CC= 1.85 ,PC= 1.8 /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,2.65,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='2.65m-T1' /	}	Temperaturmess- stellen
&THCP XYZ=0.4,0.57,2.43,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='2.43m-T2' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,2.16,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='2.16m-T3' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,1.89,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='1.89m-T4' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,1.62,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='1.62m-T5' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,1.35,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='1.35m-T6' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,1.08,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='1.08m-T7' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,0.81,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='0.81m-T8' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,0.54,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='0.54m-T9' /		
&THCP XYZ=0.4,0.57,0.27,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='0.27m-T10' /		
&PL3D DTSAM=2, QUANTITIES='TEMPERATURE','U-VELOCITY','V-VELOCITY','W-VELOCITY','HRRPUV' /		
&ISOF QUANTITY='MIXTURE_FRACTION', VALUE(1)=0.05,VALUE(2)=0.001 /	}	Simulation des Brandrauchs
DATABASE ('c:\NIST\fds\database3\database3_1.data')		
&REAC ID='Dekalin'	}	Stoffdaten für Brandstoff Dekalin Werte für CO_YIELD und SOOT_YIELD an- genommen
FYI='Dekalin, C_10 H_18'		
MW_FUEL=138.		
NU_O2=14.5		
NU_CO2=10.		
NU_H2O=9.		
CO_YIELD=0.011 SOOT_YIELD=0.04 /		

Tabelle 3. FDS Input File (25ml Dekalin → Branddauer 555 s).

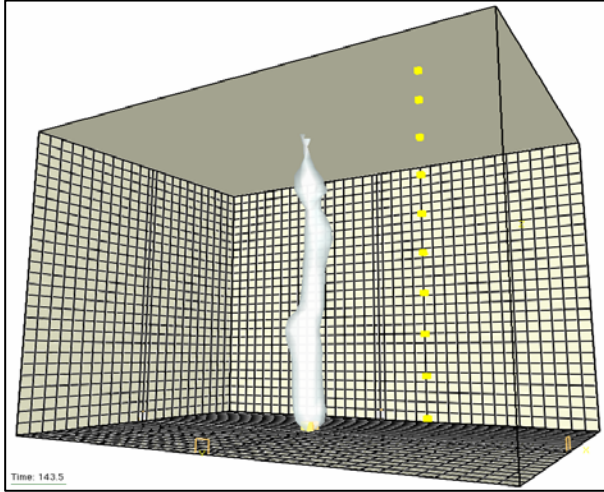


Bild 26b: Rauch nach 204s  
(Aufsteigen des Rauchs)

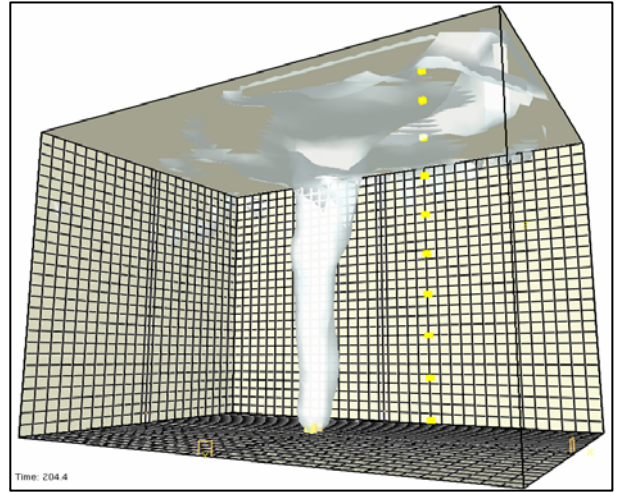


Bild 26a: Rauch nach 143s  
(Rauch stößt an Decke)

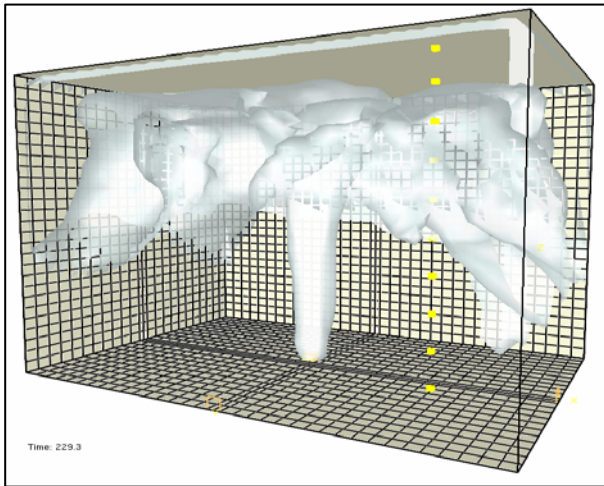


Bild 26c: Rauch nach 230s  
(Absinken des Rauchs an den Wänden)

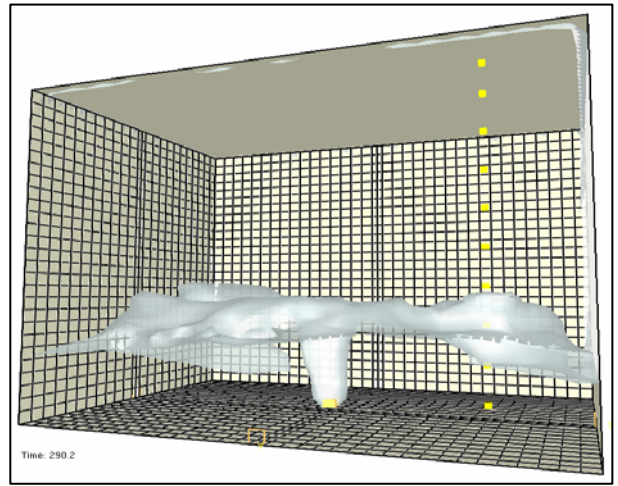


Bild 26d: Rauch nach 290s  
(Ausbildung einer Rauchschrift)

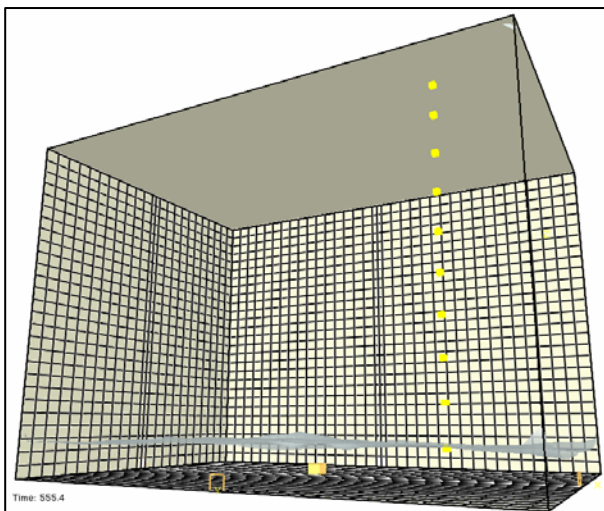


Bild 26e: Rauch nach 555s

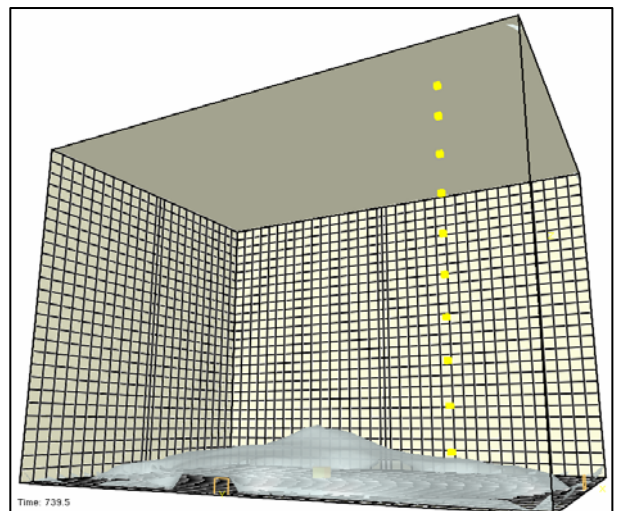


Bild 26f: Rauch nach 739s

(Brenner aus; Rauchschrift „stabil“)

(komplette Verrauchung)

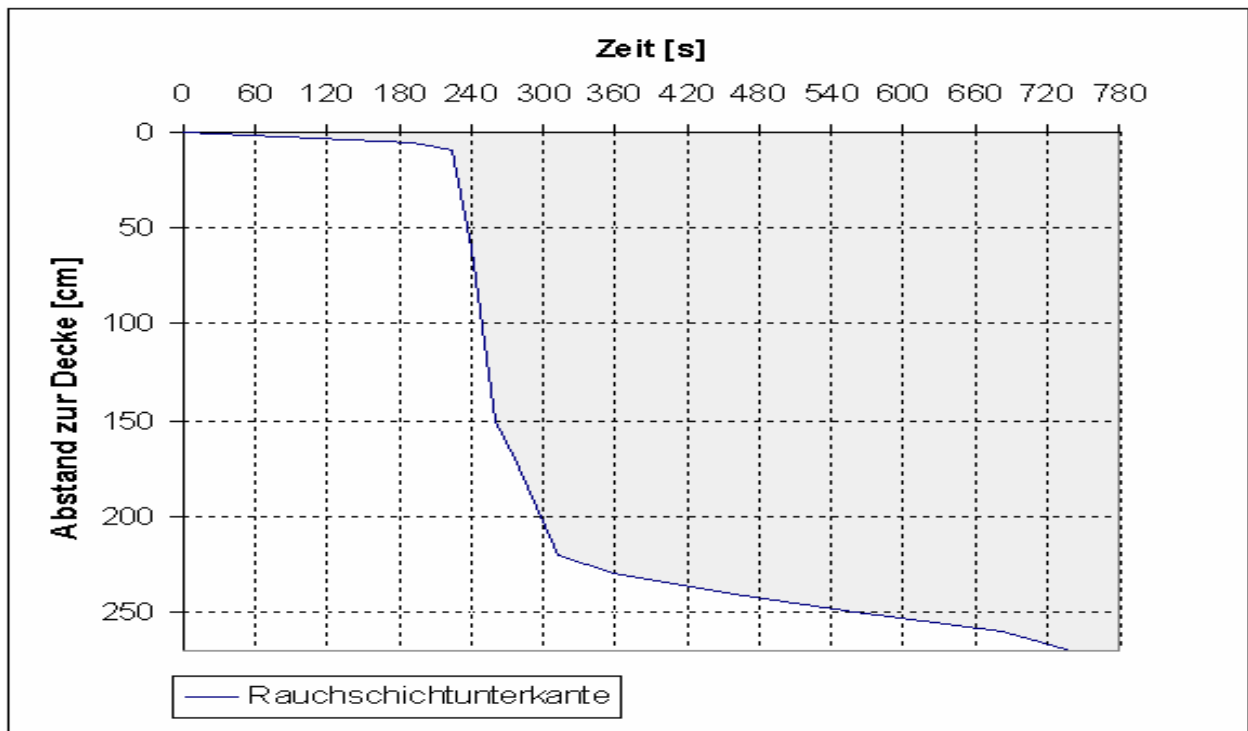


Bild 27. Qualitative Lage der Rauchschrift in der Simulation (Versuch B).

Bei den Untersuchungen konnte beobachtet werden, dass sich die Partikel der Brandgase im gesamten Raum verteilen. Die Ausbildung einer Rauchschrift oder von Zonen mit geringeren Rauchkonzentrationen konnten meist nicht beobachtet werden. Es kann jedoch weder ausgeschlossen werden, dass sich stabile Schichten mit unterschiedlichen Rauchkonzentrationen bilden, noch kann eine qualitative oder quantitative Aussage über eventuell entstandene Konzentrationsunterschiede hergeleitet werden. Aussagen über mögliche brandrauchreiche und brandraucharme Schichten beruhen auf der Interpretation von Temperaturmessungen (s. Abschnitt 5.2).

Bei den durchgeführten Rechnersimulationen mit FDS bildet sich über den vom Brandherd aufsteigenden Plume zunächst von der Decke ausgehend nach unten eine stabile Rauchschrift aus, während in Bodennähe über eine längere Zeitdauer eine raucharme Schicht vorhanden ist.

Die Temperaturkurven haben bei den Versuchen A bis E im Versuchsraum (Bilder 28 bis 32) und der entsprechenden jeweiligen Rechnersimulation (Bilder 33 bis 35) einen ähnlichen Verlauf. Die absoluten Beträge der Einzelwerte sind jedoch unterschiedlich. Die Temperaturen (T1 oben, T10 unten) im Versuchsraum steigen an und bleiben nach ca. 480 s (Versuch) bzw. 300 s (Simulation) bis zum Ende des Brandes auf einem nahezu konstanten Niveau. Dies läßt darauf schließen, daß in dieser Zeit der Wärmeverlust über Wände und Decke des Versuchsraumes ähnlich hoch war wie der der zugeführten Wärmemenge des Versuchsbrandes.

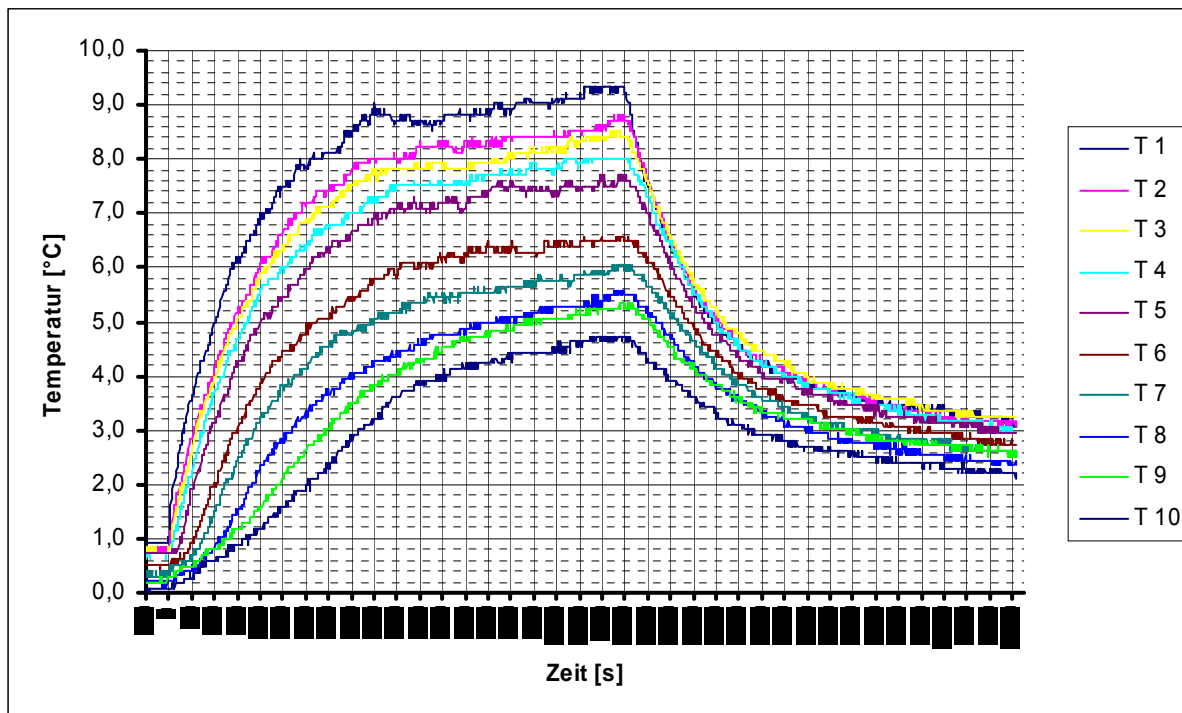


Bild 28. Temperaturverlauf während des Versuchs A ( 0 Kelvin  $\equiv$  14,6°C ).

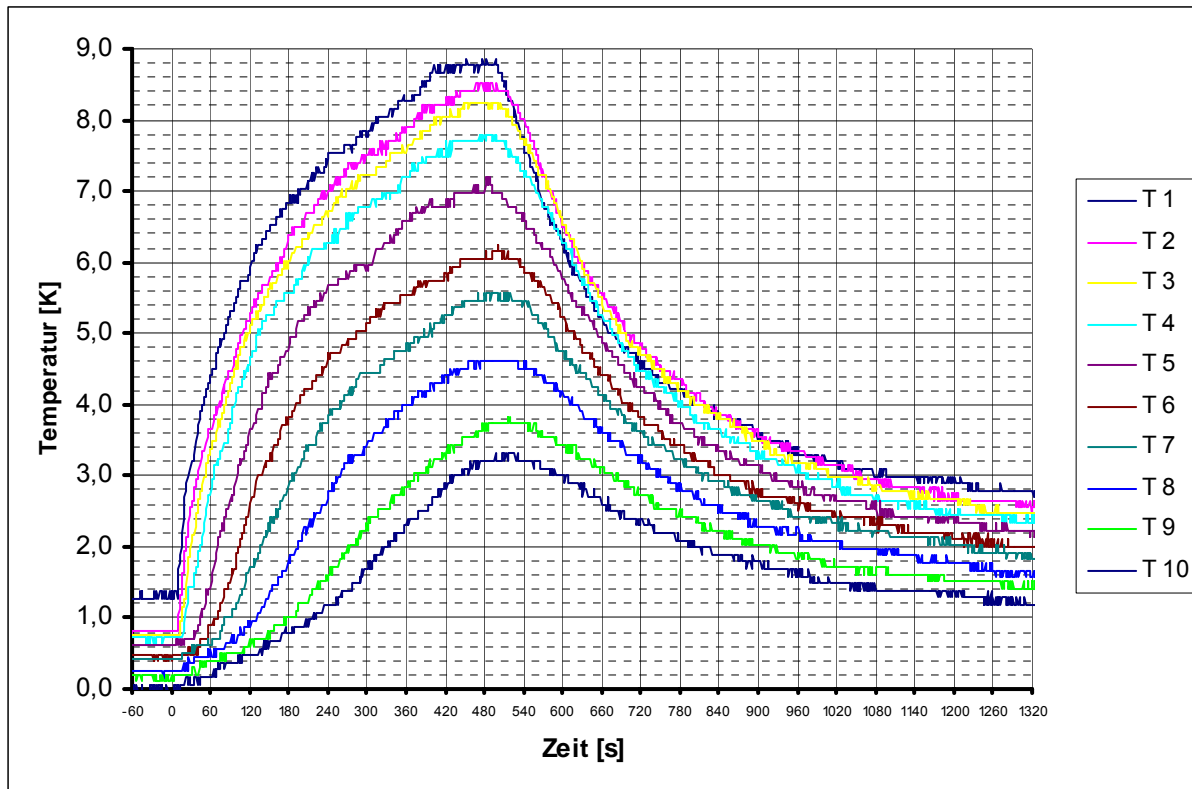


Bild 29. Temperaturverlauf während des Versuchs B ( 0 Kelvin  $\equiv$  15,1°C ).

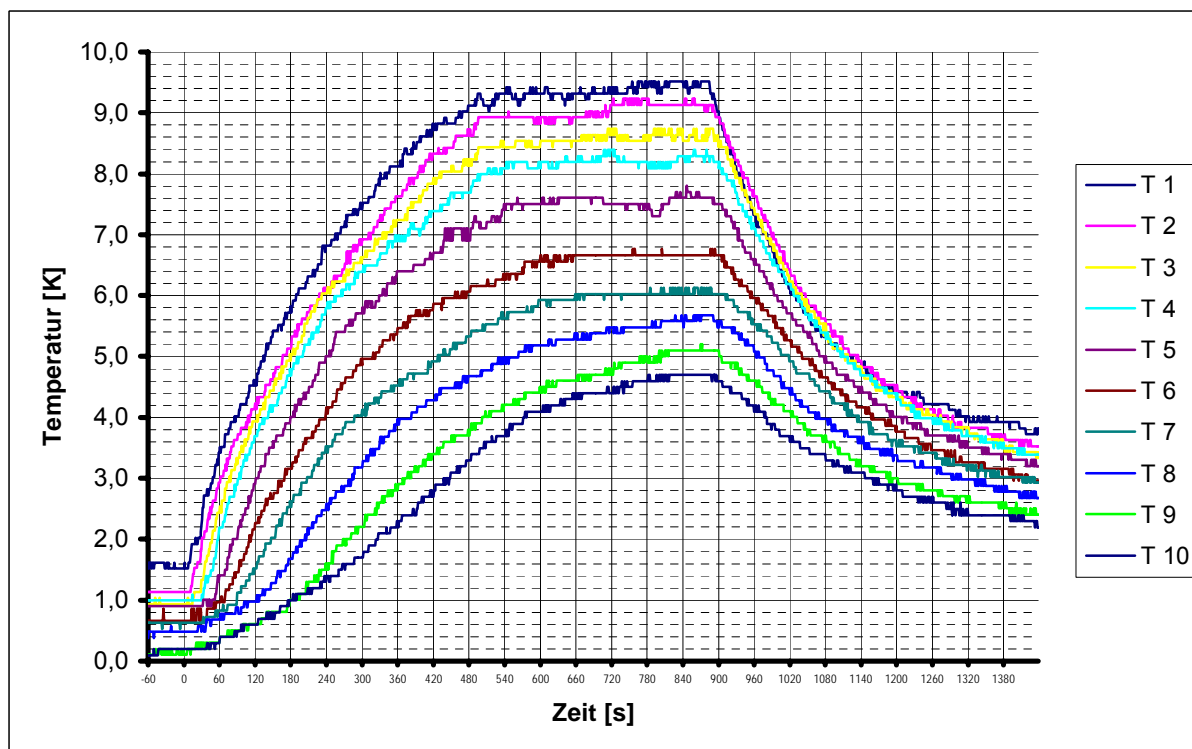


Bild 30. Temperaturverlauf während des Versuchs C ( 0 Kelvin  $\equiv$  13,8°C ).



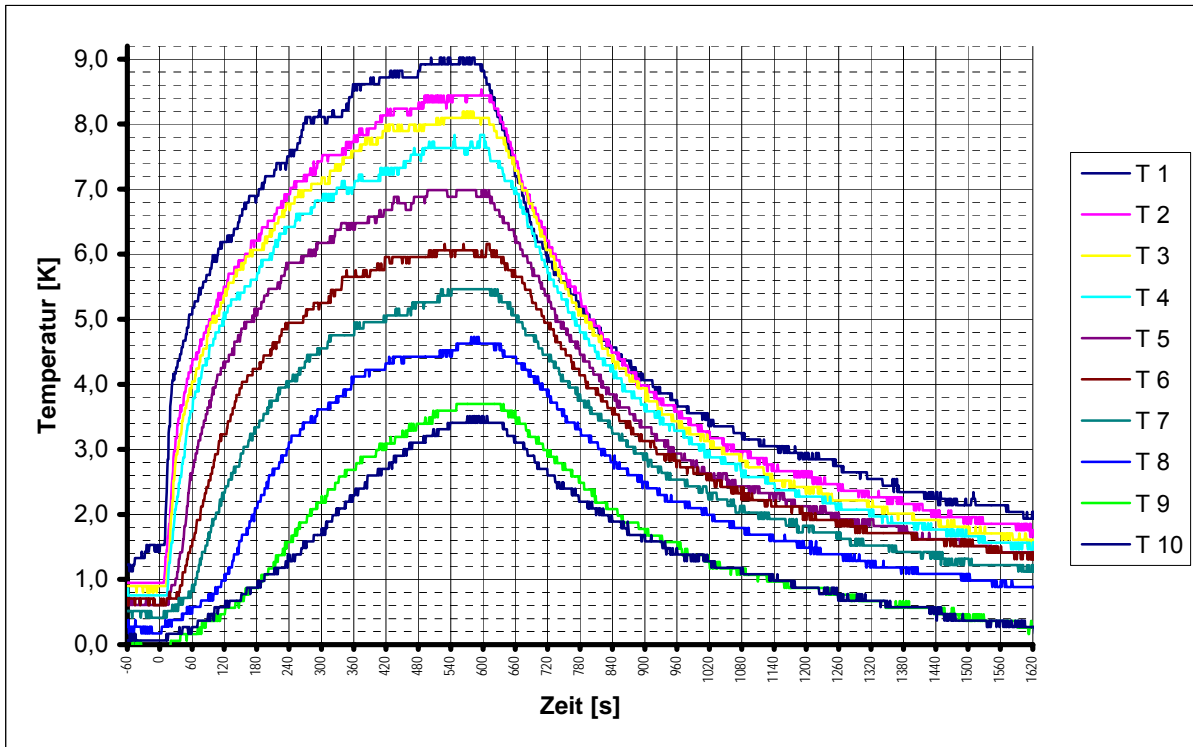


Bild 31. Temperaturverlauf während des Versuchs D ( 0 Kelvin  $\equiv$  13,8°C ).

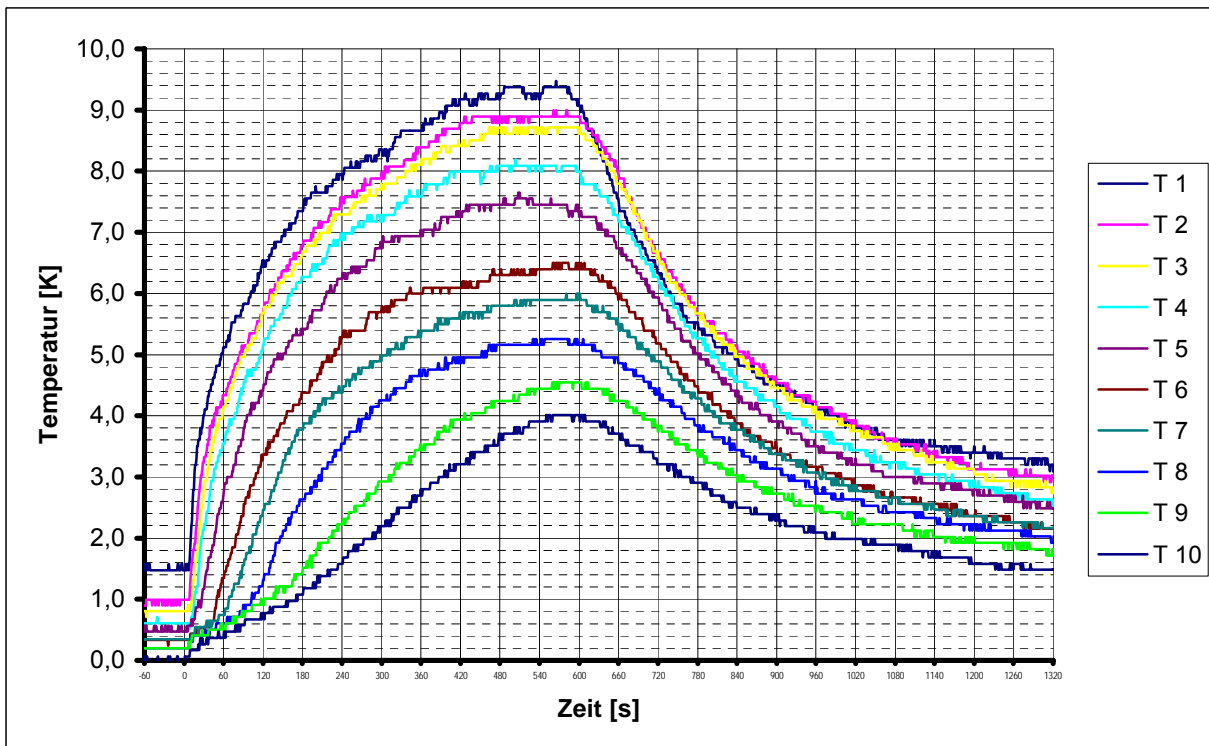


Bild 32. Temperaturverlauf während des Versuchs E ( 0 Kelvin  $\equiv$  12,3°C ).

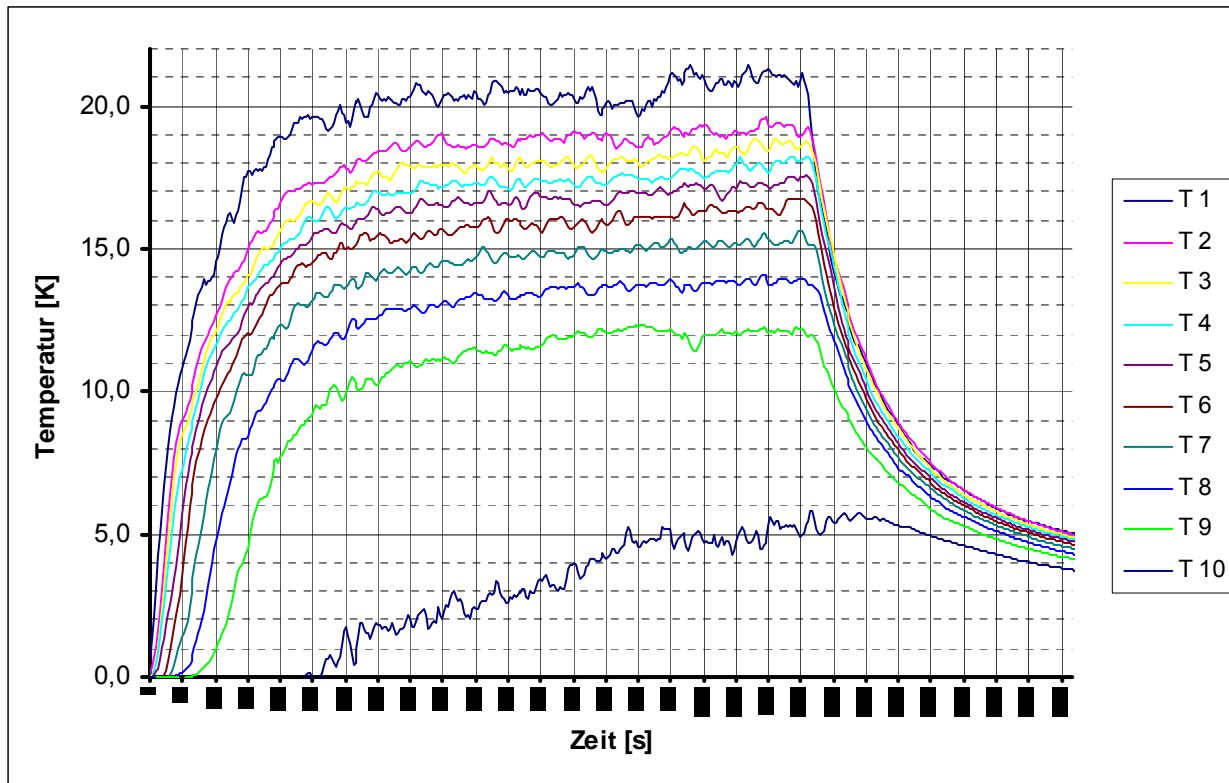


Bild 33. Berechneter Temperaturverlauf Versuch A ( 0 Kelvin  $\equiv$  20°C ).

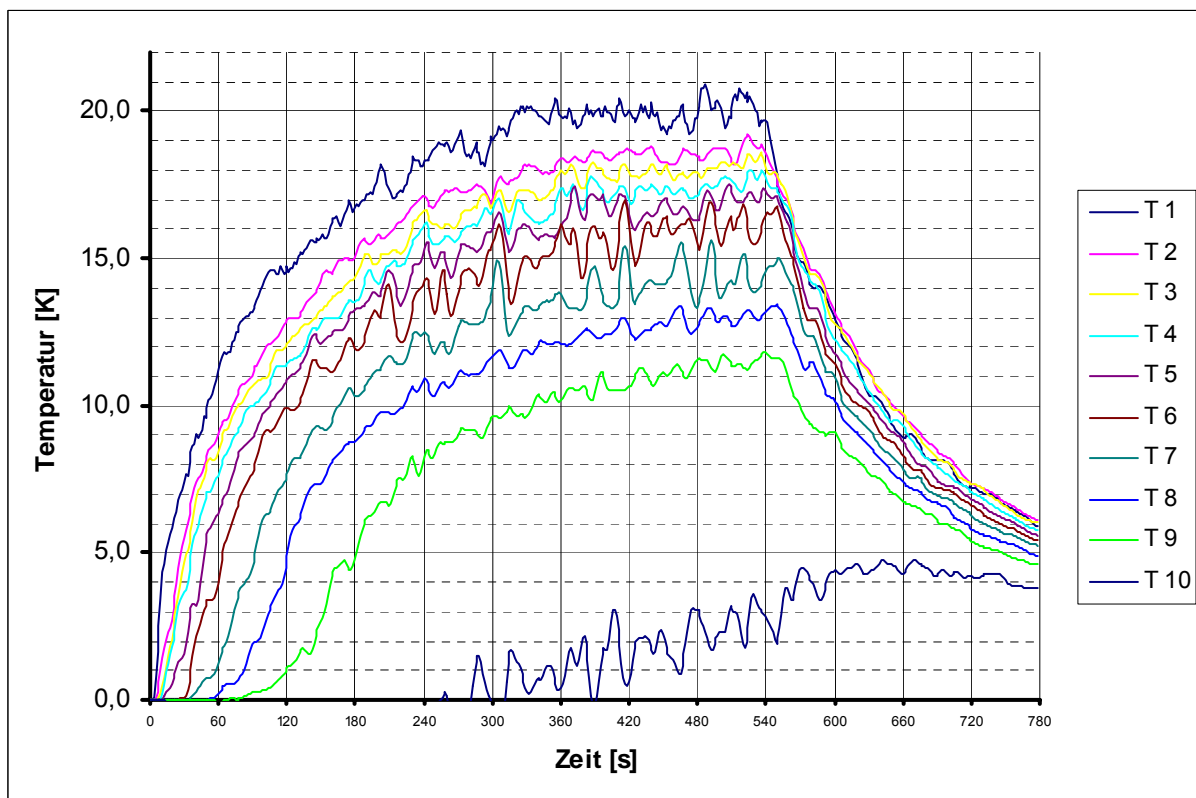


Bild 34. Berechneter Temperaturverlauf Versuch B ( 0 Kelvin  $\equiv$  20°C ).



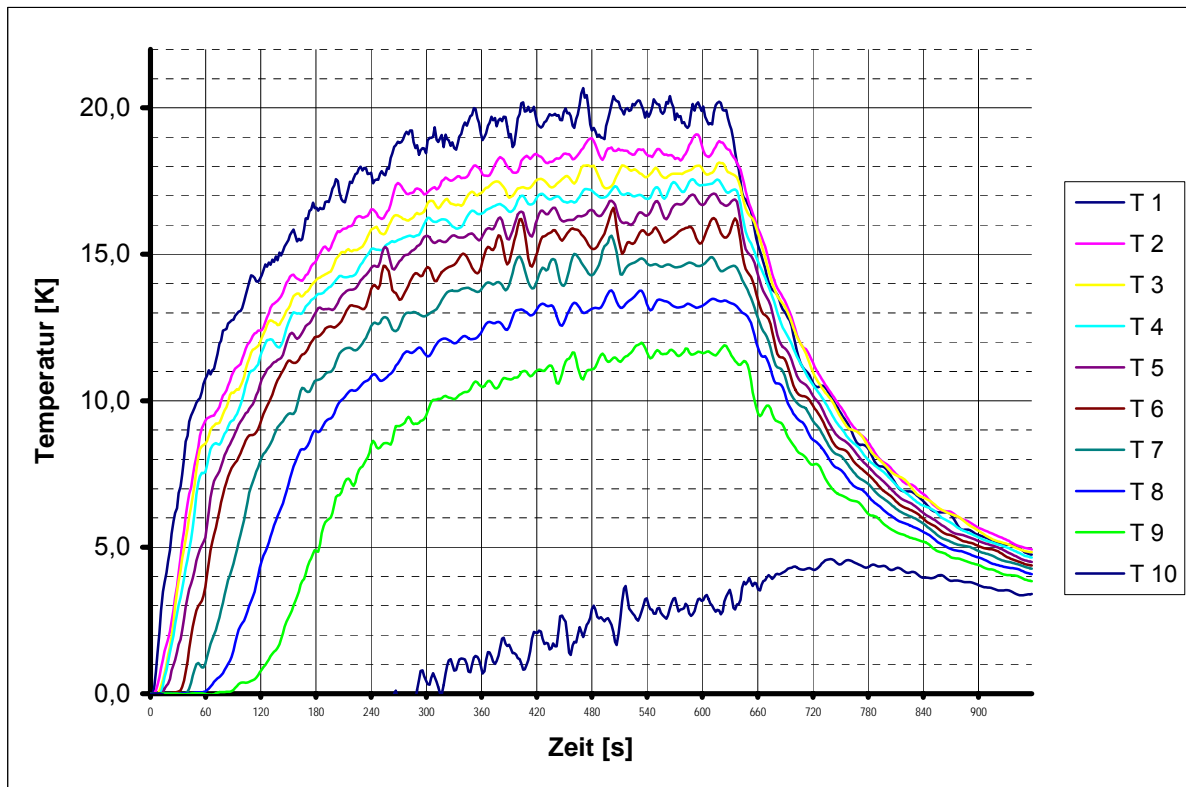


Bild 35: Berechneter Temperaturverlauf Versuch D ( 0 Kelvin  $\equiv$  20°C ).

Weniger vergleichbar ist der Verlauf der jeweiligen Temperaturdifferenzen (T1 oben, T10 unten im Raum) an den einzelnen Messstellen sowohl bei den Versuchen (Bilder 36 bis 40) als auch bei der Rechnersimulation (Bilder 41 bis 43). Bei der Rechnersimulation verschiebt sich die Position des Bereichs mit dem größten Temperaturgefälle im Versuchsraum von oben nach unten (T1-T2, T6-T7, T7-T8, T8-T9). Bei einem Vergleich der Temperaturdifferenzen aus den Versuchen mit denen aus der Rechnersimulation ist es sehr schwierig ähnliche Kurvenverläufe festzustellen.

Wie bereits in Bild 17 dargestellt, war bei diesem Versuch die Dichtheit des Versuchsraumes weitaus schlechter als bei den anderen Versuchen. Dies lässt vermuten, dass ein Zusammenhang zwischen der Dichtheit des Versuchsraumes und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Versuch und Rechnersimulation besteht. Daraus kann als Folgerung festgestellt werden, dass in einem völlig dichten Versuchsraum experimentell keine Rauchsichten dargestellt werden können. Es müssen hingegen Leckageöffnungen vorhanden sein, oder wie bei einem Teil der Untersuchungen, die Tür teilweise geöffnet sein, um eine Rauchsichtbildung beobachten bzw. darstellen zu können.

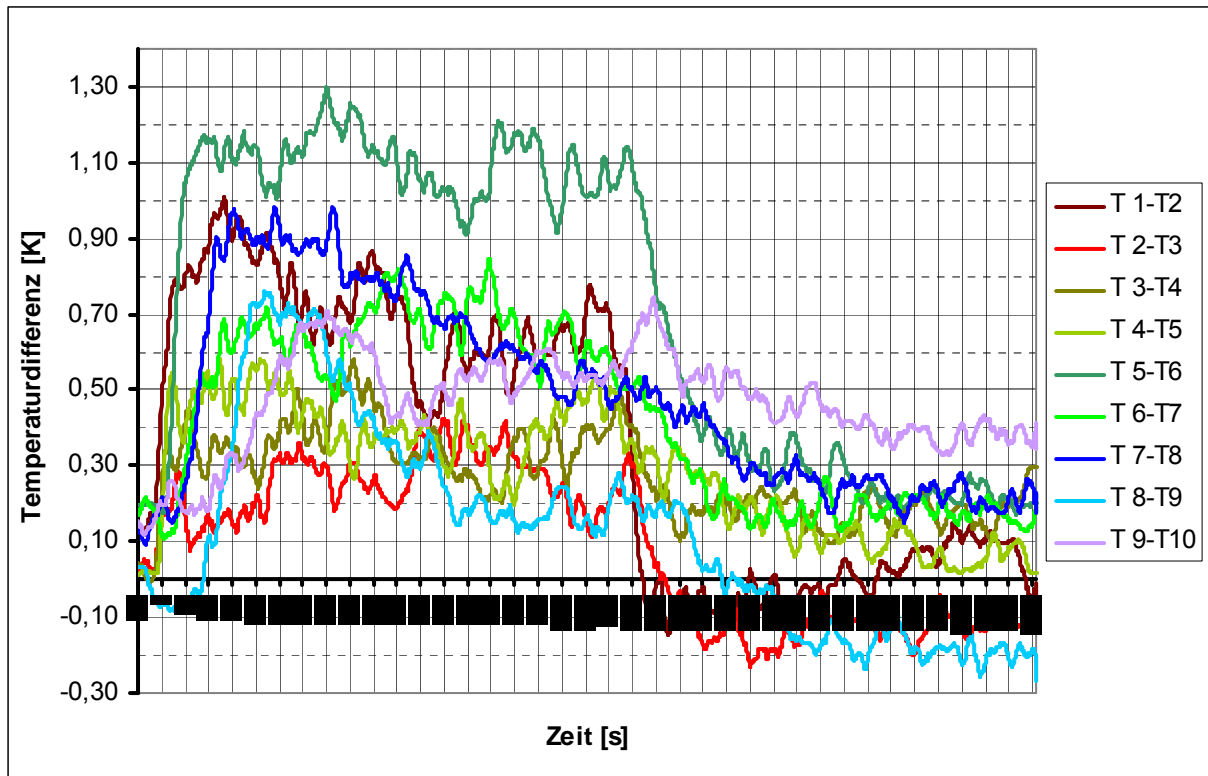


Bild 36. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Versuch A).

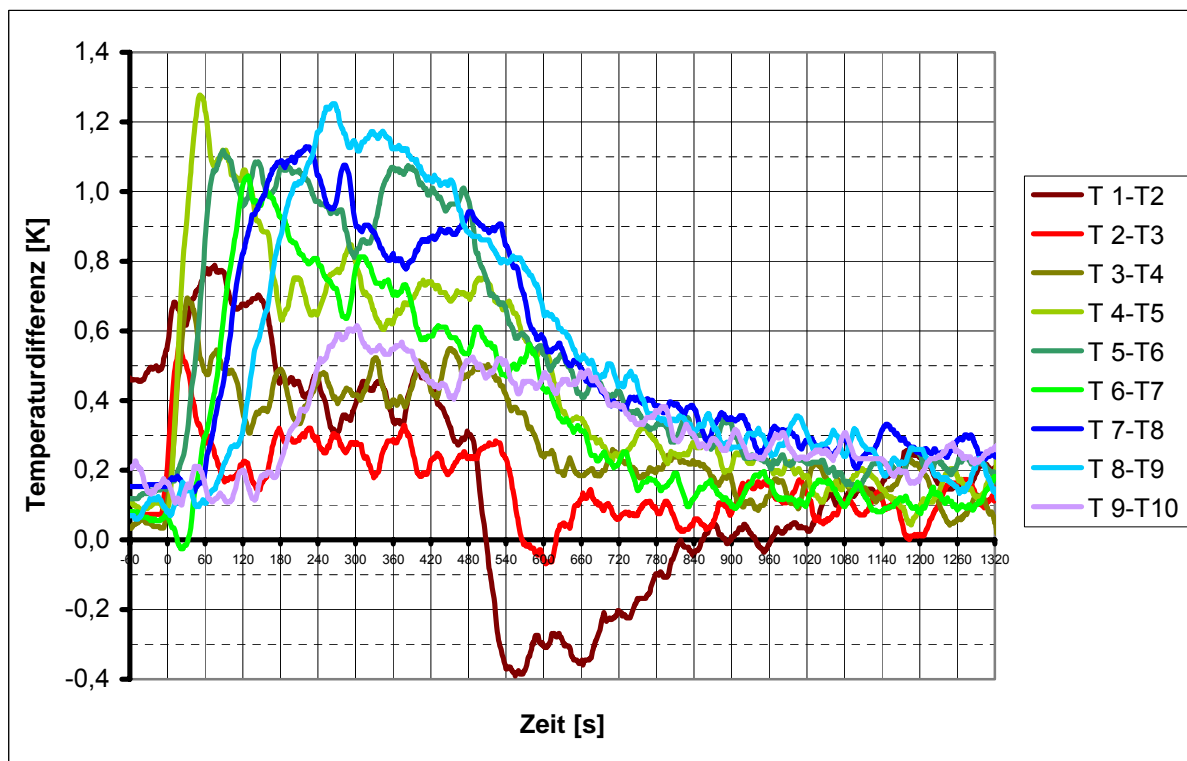


Bild 37. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Versuch B).

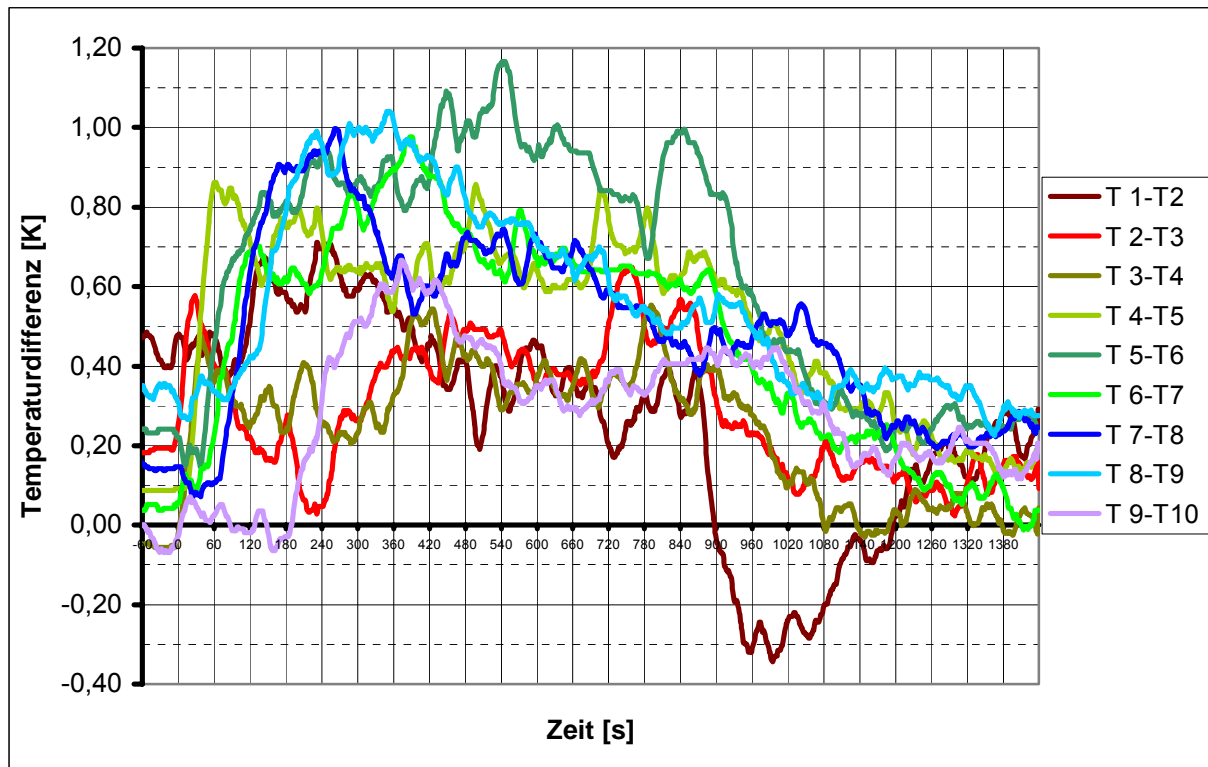


Bild 38. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Versuch C).

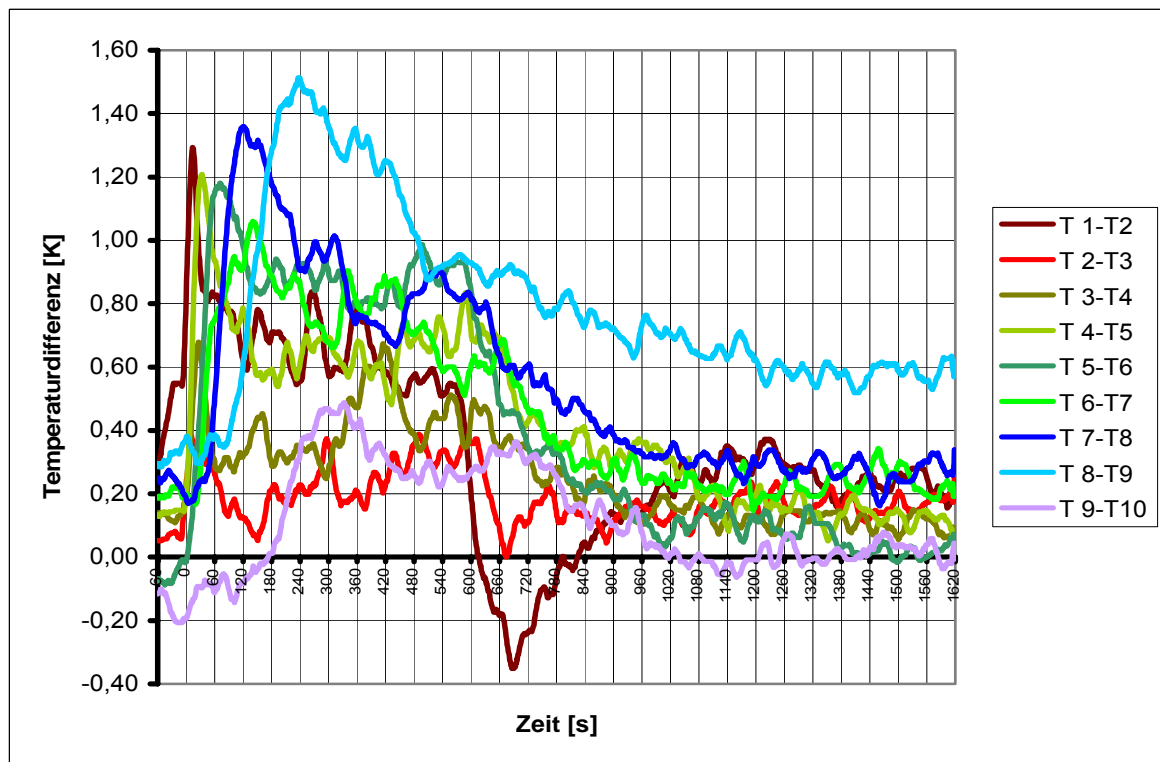


Bild 39. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Versuch D).

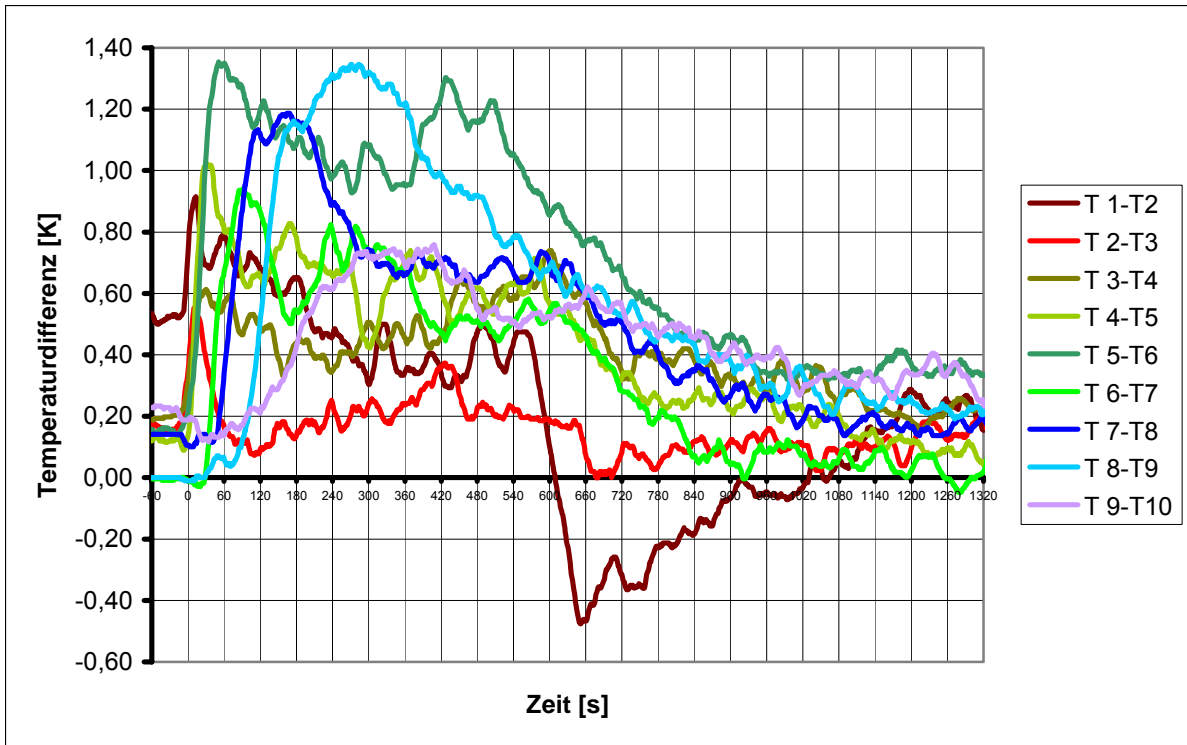


Bild 40. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Versuch E).

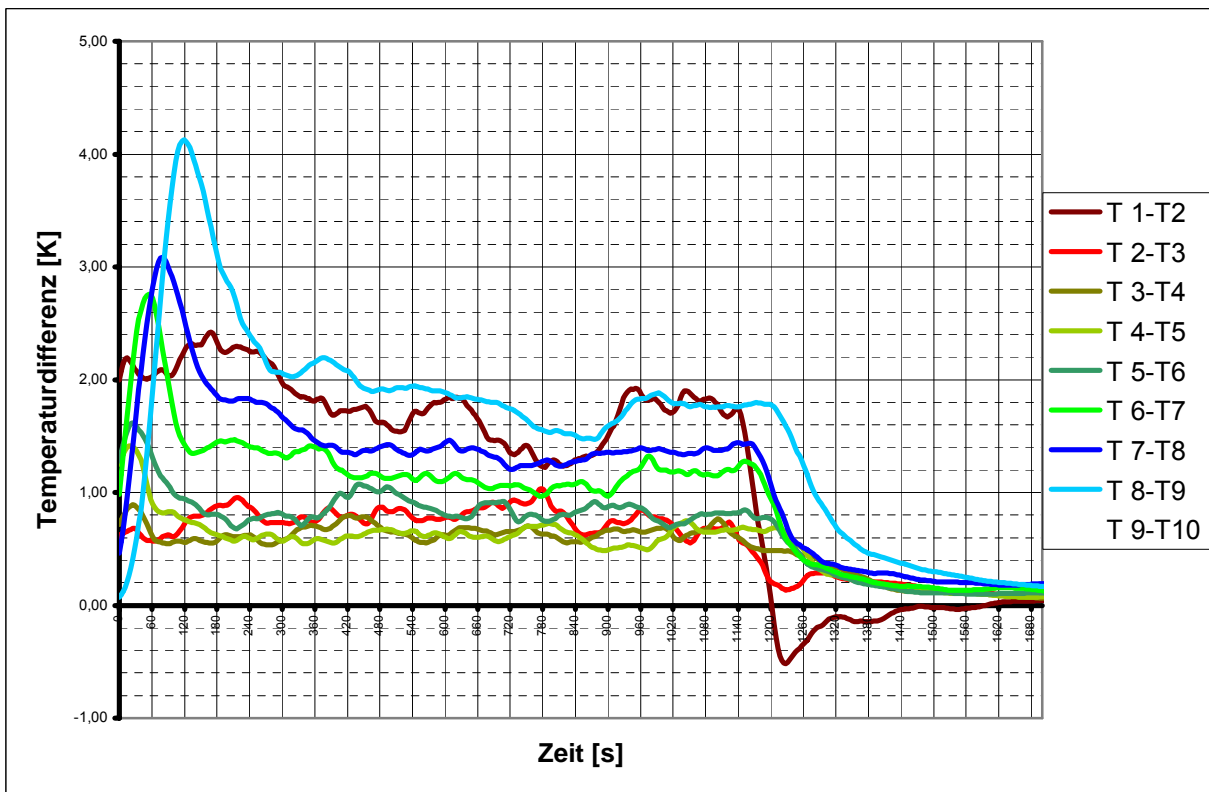


Bild 41. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Simulation Versuch A).

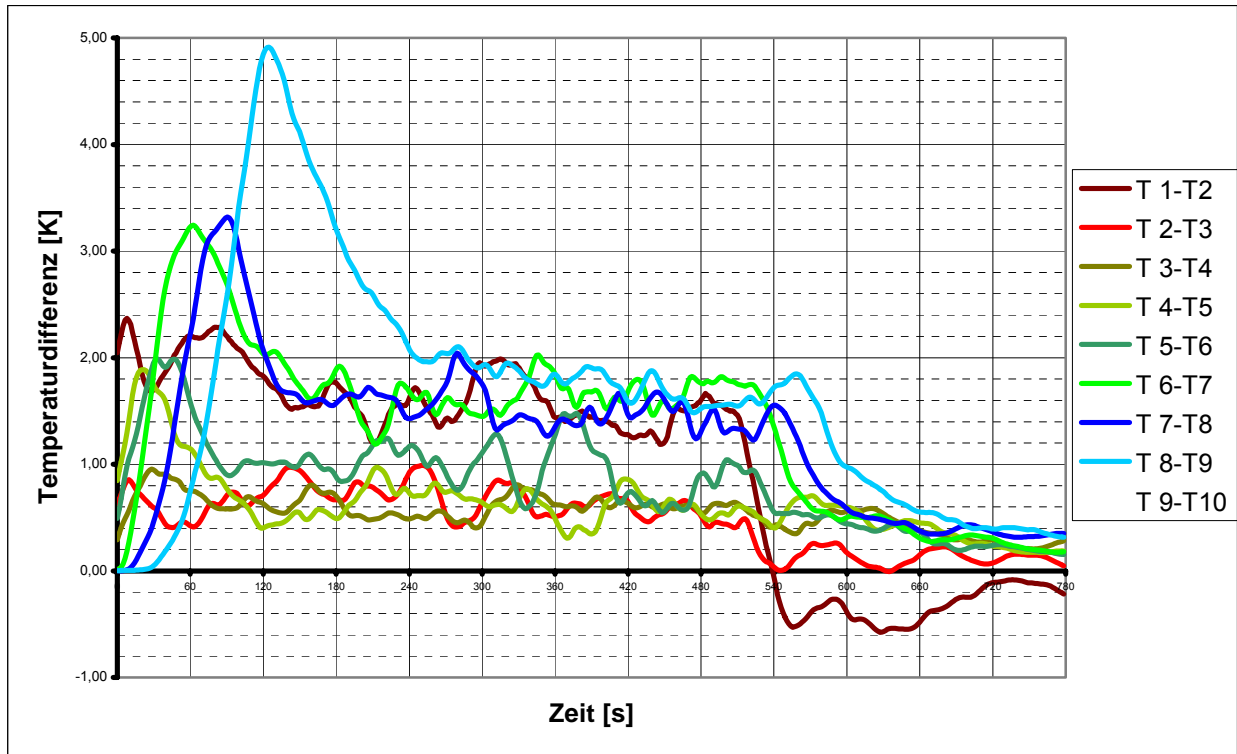


Bild 42. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Simulation Versuch B).

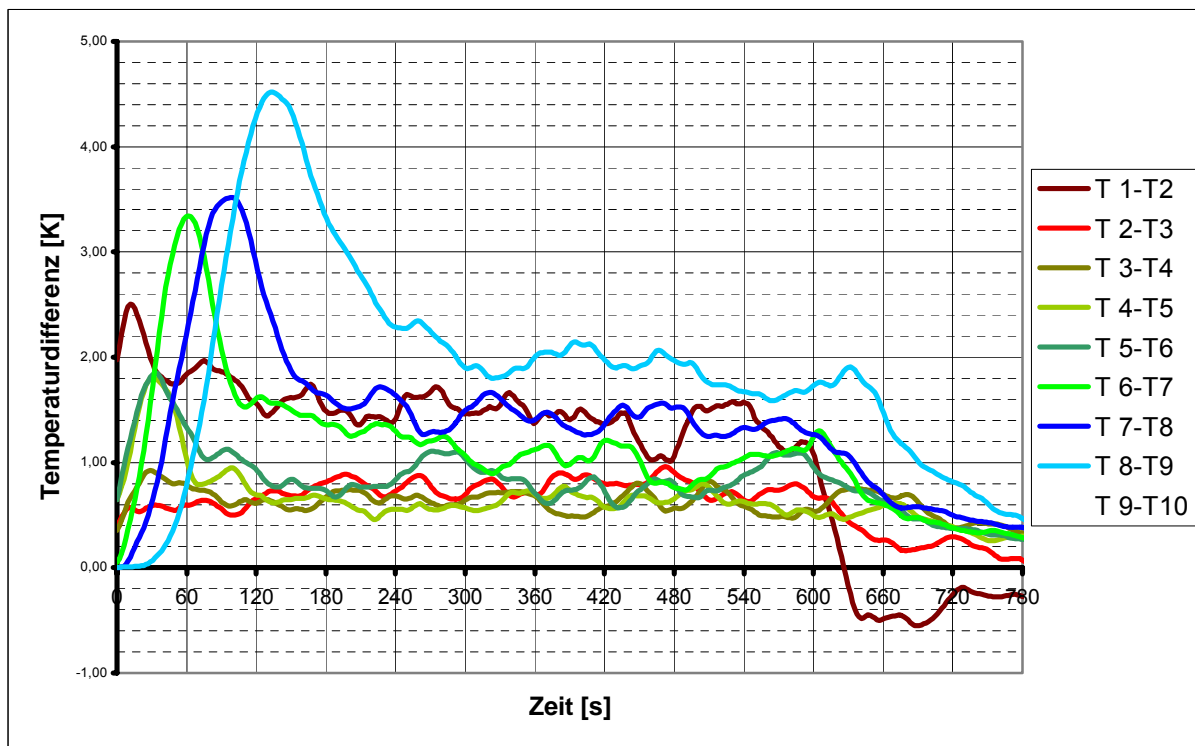


Bild 43. Temperaturdifferenzen untereinander liegender Messstellen (Simulation Versuch D).

## 8 Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Parametern

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden die Abmessungen desselben Versuchsraums, in dem die experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden, für zahlreiche Computersimulationen verwendet. Um einen Vergleich der mittels Simulationsrechnungen festgestellten Rauchschichtbildung mit den entsprechenden Rauchschichten bei den experimentellen Untersuchungen vornehmen zu können, wurden systematisch mehrere Parameteränderungen vorgenommen.

Bei gleicher Größe des Versuchsraumes wurde beispielsweise die jeweilige Zuluftöffnung simuliert, d. h. der Raum mit geschlossener Tür, mit wenig geöffneter Tür (10 cm) und mit halb geöffneter Tür (50 cm). Der Brandherd wurde sowohl in der Raummitte als auch in der zur Öffnung entfernteren Ecke angeordnet. Die Zündung des Brandes erfolgte in Bodennähe sowie in Höhen von 1 m und 2 m. Die Brandleistung wurde zwischen  $360 \text{ kW/m}^2$  und  $2 \text{ MW/m}^2$  variiert, um damit Einflüsse eines sich schnell ausbreitenden Feuers mit größerer Wärmeentwicklung zu berücksichtigen.

Von der Art des Brandstoffes selbst hängt die mehr oder weniger starke Rauchentwicklung ab. Für die Simulationsrechnung wurden die Flüssigkeiten Spiritus und Dekalin verwendet. Außerdem wurde die Auswirkung der Versuchszeit auf die sich einstellenden Verhältnisse beobachtet. In den Bildern sind Höhenmarkierungen bzw. Temperaturmeßstellen der Simulation gelb gekennzeichnet. Die Rechenzeit einer Simulation ist abhängig von der Anzahl der eingegebenen Parameter sowie der Anzahl der ausgegebenen Ergebniswerte. Sie kann sich bei diesen Modellberechnungen von wenigen Minuten bis zu vielen Stunden erstrecken. Die folgenden Bilder geben jeweils einen Überblick über die im Versuchsraum vorherrschenden Verhältnisse zu einem bestimmten Zeitpunkt der Simulation. Als Brandstoff wurde hier das stark rußbildende Dekalin gewählt.

Die Bilder 44a und b bzw. 45a und b geben beispielhaft die momentanen Rauchentwicklungen bzw. Rauchschichtbildungen einer Simulation bei einer Brandleistung von  $360 \text{ kW/m}^2$  wieder. Wie bereits erwähnt, befindet sich der Brandherd in jeweils 3 verschiedenen Höhen. Die dargestellte Simulationszeit beträgt jeweils 4min bzw. 15min.

Nach dem Zündvorgang ist zu beobachten, dass beim Brand in Bodennähe die heißen Brandgase zunächst nach oben steigen. Durch den Abkühlvorgang im oberen Teil des Raumes (Decke, Wände) beginnen die Brandgase bereits nach kurzer Zeit wieder nach unten zu fallen, wie in Bild 44a deutlich zu erkennen ist. Nach ca. 15 min (Bild 44b) ist der Brandraum bereits vollständig verraucht, während bei einem Brand in 1 m Höhe im unteren Teil des Raumes deutlich eine Zone mit geringerer Rauchbeaufschlagung zu erkennen ist, die bei einem Brand in 2 m Höhe weiter ansteigt.

Bei leicht geöffneter Tür von 10 cm (Bild 45) ist bei gleicher Simulationszeit von 15 min bei den 3 Brandhöhen im unteren Teil des Raumes eine raucharme/ -freie Zone vorhanden. Die Dicke der Rauchsicht nimmt mit der Höhe des Brandes im Raum ab, die Rauchsicht in dieser Schicht dagegen zu.

Wird die Tür 50 cm (Bild 46) weit geöffnet, so ist bei gleicher Simulationszeit eine Veränderung dahingehend zu erkennen, dass die raucharme/ -freie Zone im Raum weiter ansteigt. Dies bedeutet, dass mit größer werdender Öffnung immer mehr frische Luft im unteren Teil des Raumes zugeführt bzw. vom Brandherd angesaugt und im oberen Teil des Raumes durch die Tür abgeführt werden kann, so dass eine Art zirkulierende Strömung entsteht. Auf diese Weise wird eine mehr oder weniger dichte Rauchsicht gebildet, die jedoch nicht weiter absinkt. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die einströmende Luft beim Brand in Bodennähe und in 1 m Höhe der nach oben gerichtete Plume über dem Brandherd abgelenkt wird.

In den Bildern 47a und b sind für diese Simulation die Temperaturverhältnisse im Raum sowohl nach 1 min als auch nach 15 min grafisch dargestellt. Entsprechend der Rauchverteilung ist auch hier die Bildung von Schichten bei den Temperaturen zu erkennen, die mit zunehmender Zeit dicker werden. Bei den Temperaturangaben neben den jeweiligen Farbverlaufsbalken ist festzustellen, dass diese im Flammennahbereich wesentlich unterhalb erwarteter realer Temperaturen liegen, eine Folge des für eine Feinauflösung immer noch zu groben Rechengitters. Gezeigt wird jeweils ein vertikaler Querschnitt der mittleren Temperaturen in der Raummitte. Momentan gemessene Einzeltemperaturwerte bei T1 bis T10 können sich teilweise von den gemittelten Temperaturwerten erheblich unterscheiden. Bei der Simulation des Brandes in Bodennähe wurden z. B. in der Flamme Temperaturen von 270°C und an der Decke von 50°C erreicht.

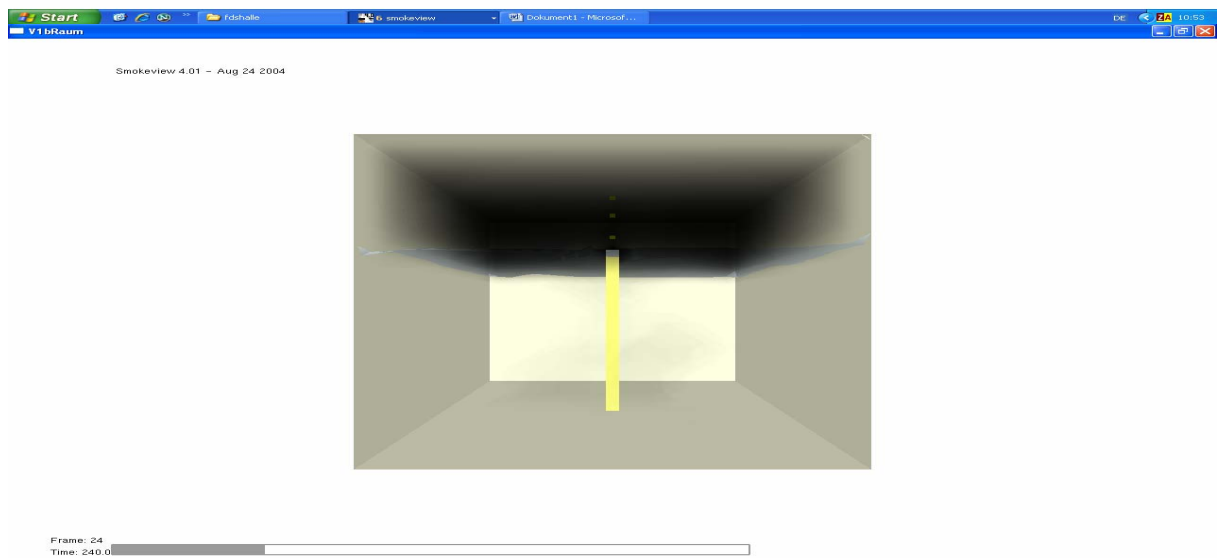
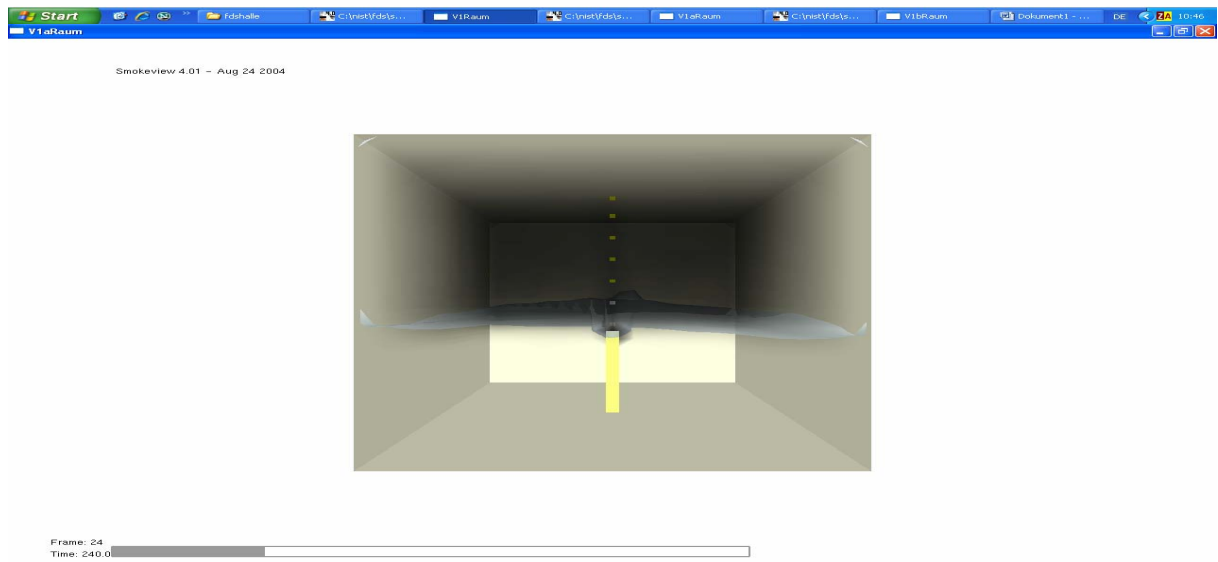
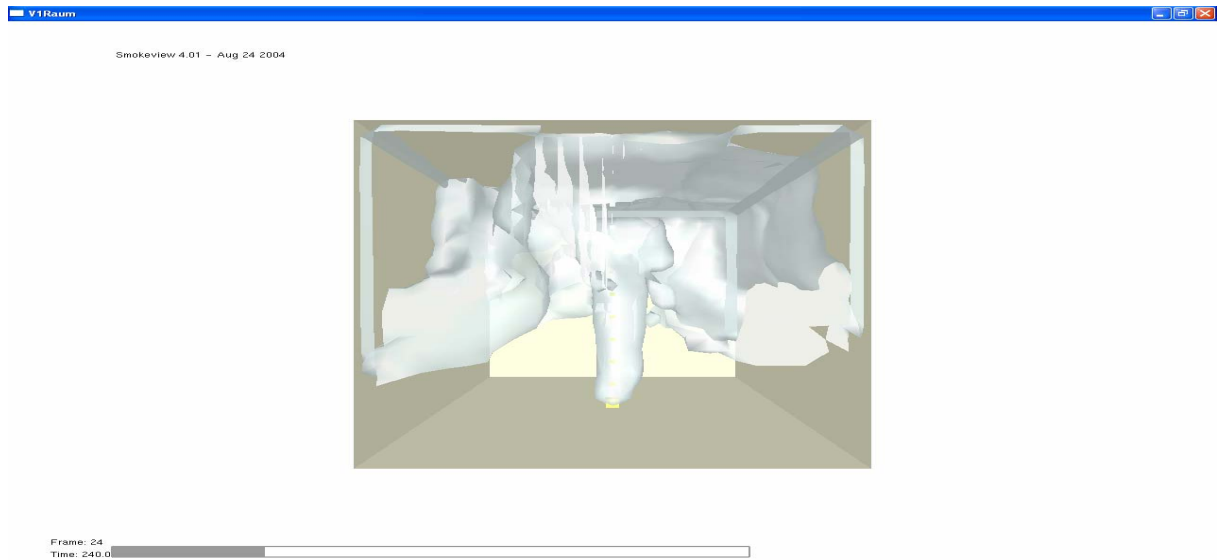


Bild 44a. Rauchschichtunterkante im geschlossenen Raum; Brandleistung  $360\text{kW/m}^2$ ; Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m; Zeit 240s.



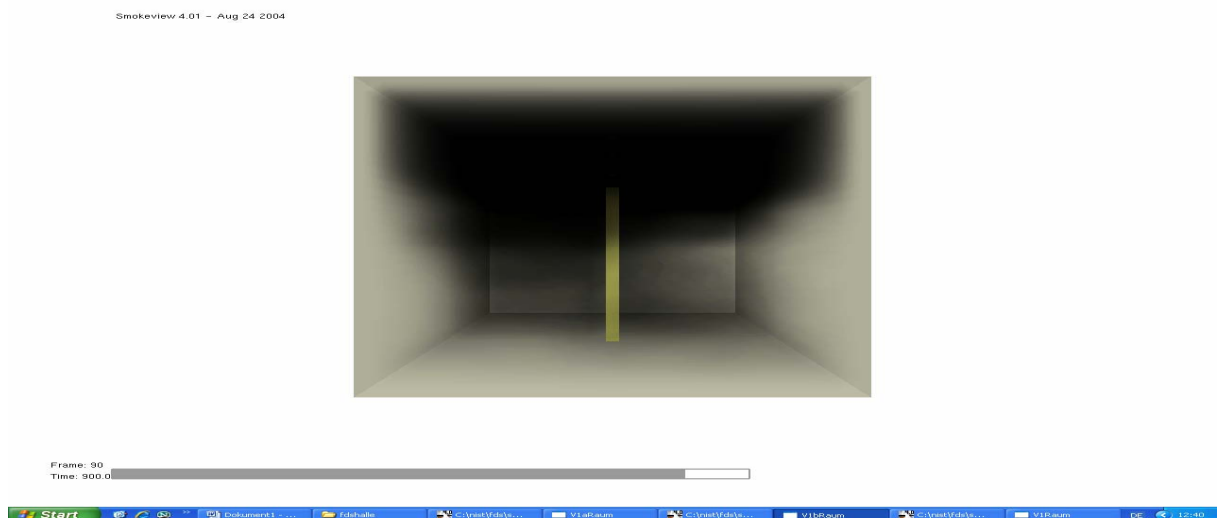
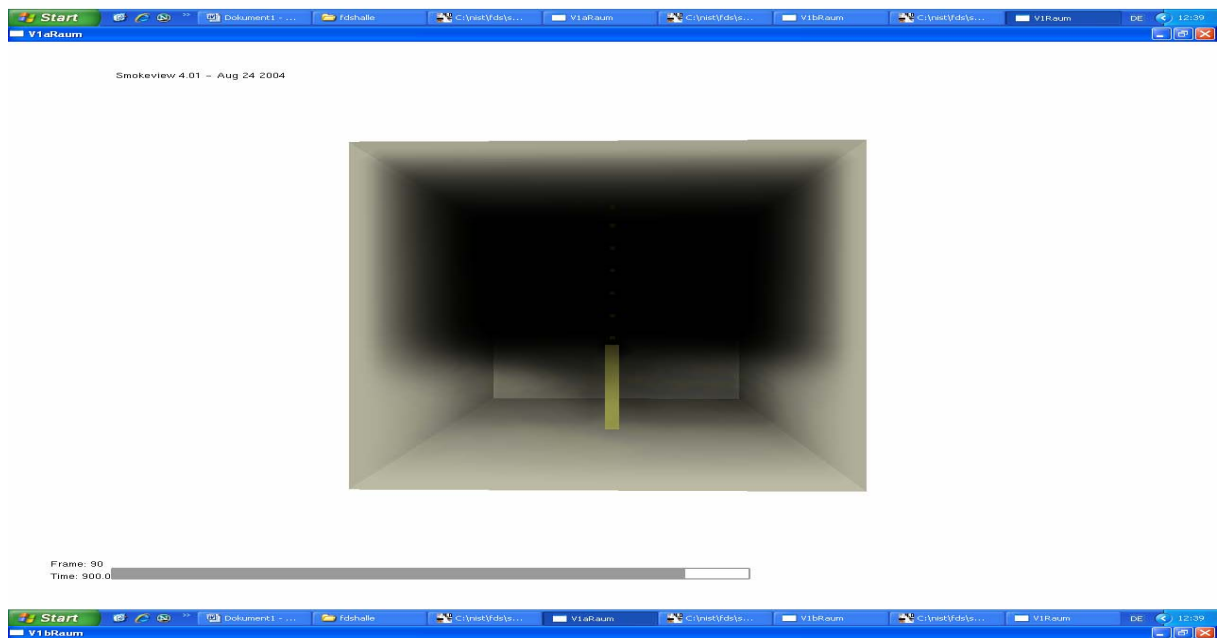
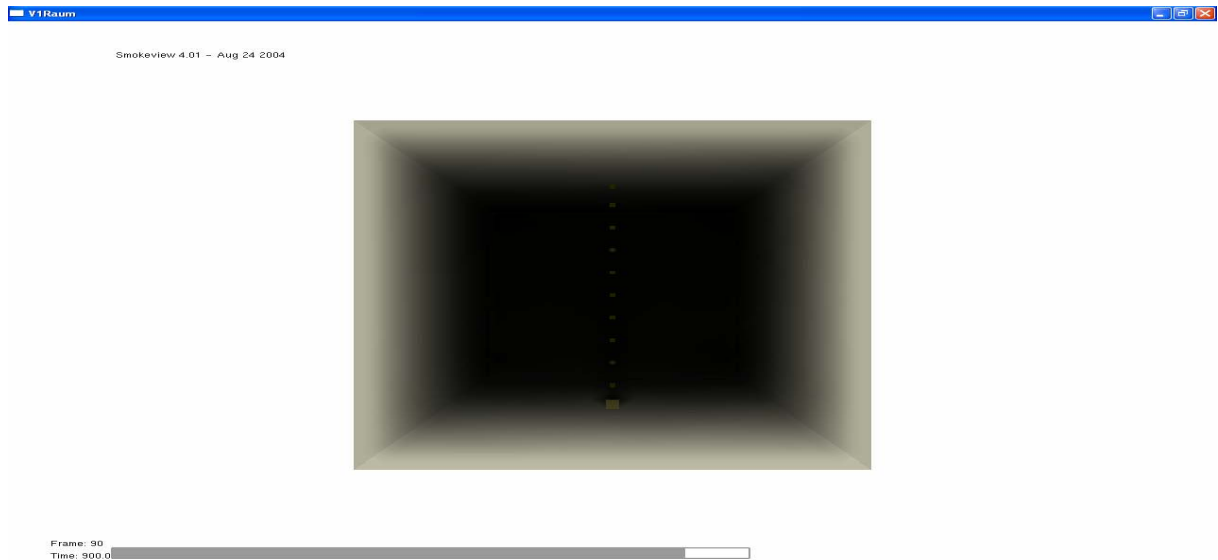


Bild 44b. Rauch im geschlossenen Raum; Brandleistung  $360 \text{ kW/m}^2$ ; Höhe der Brandstelle: Boden, 1 m, 2 m; Zeit 900 s.

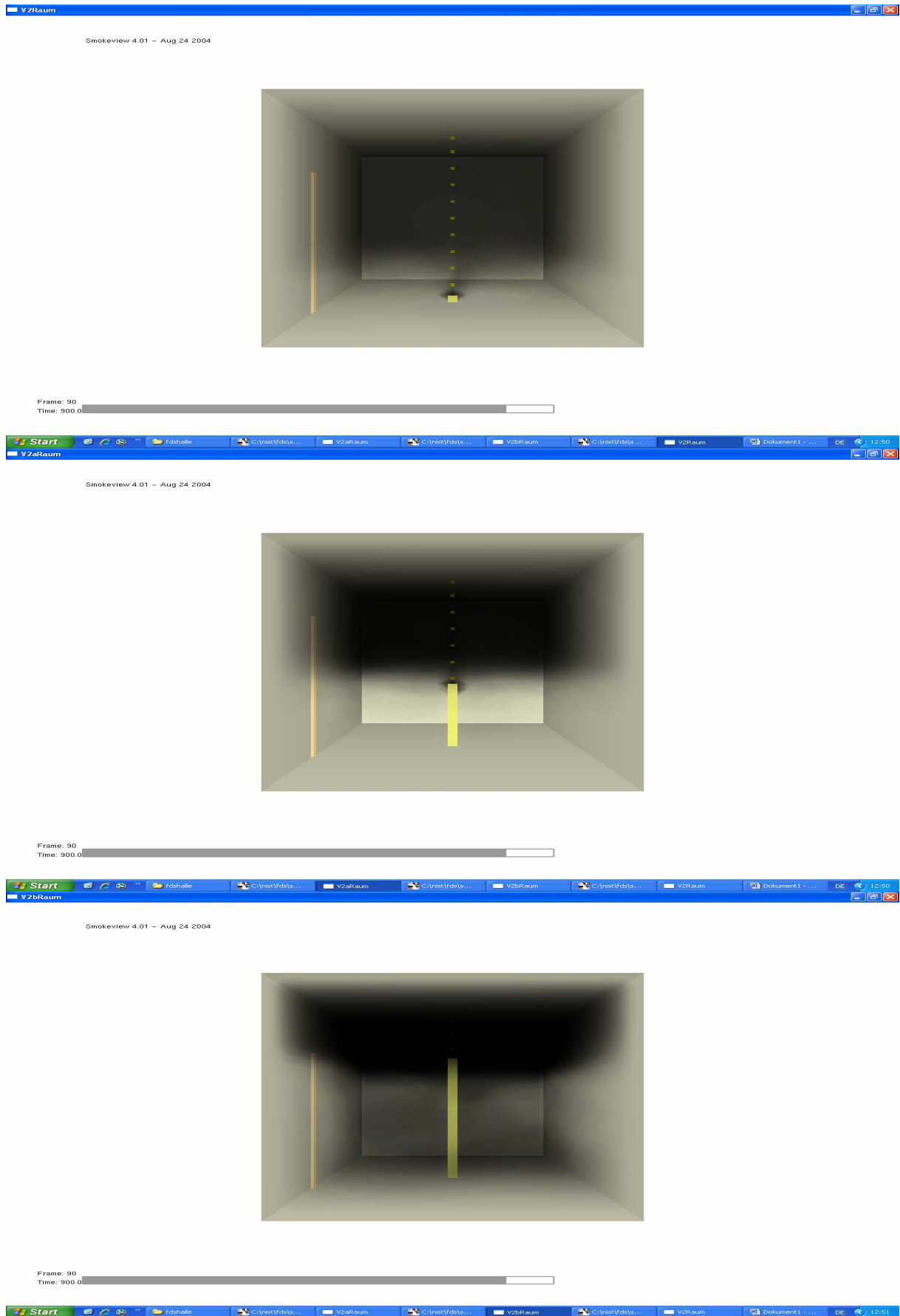


Bild 45. Rauch im 10 cm geöffneten Raum; Brandleistung  $360 \text{ kW/m}^2$ ;  
Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m; Zeit 900 s.

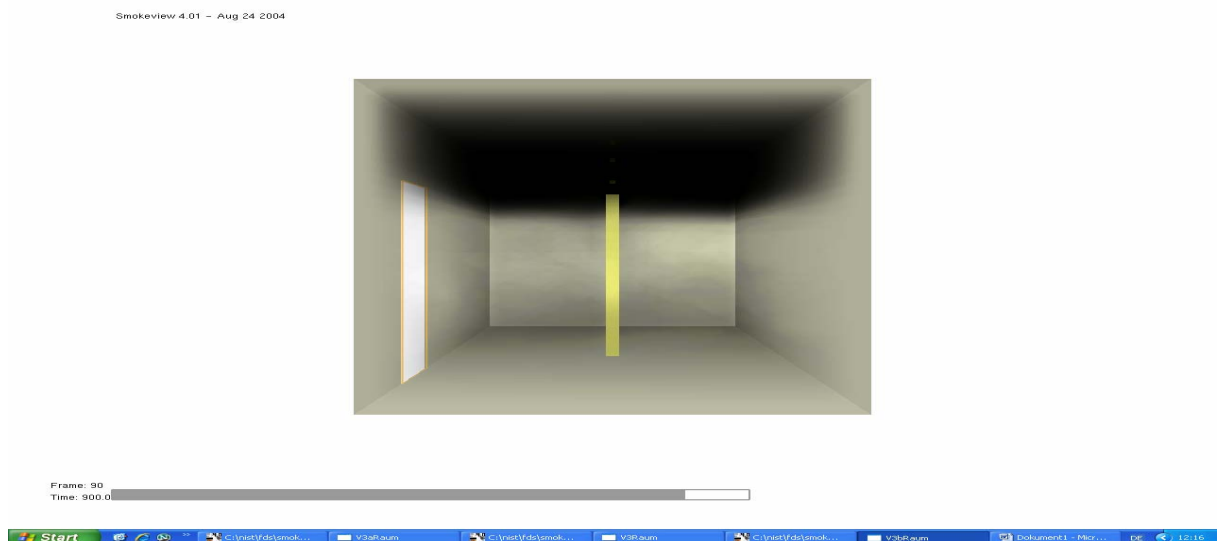
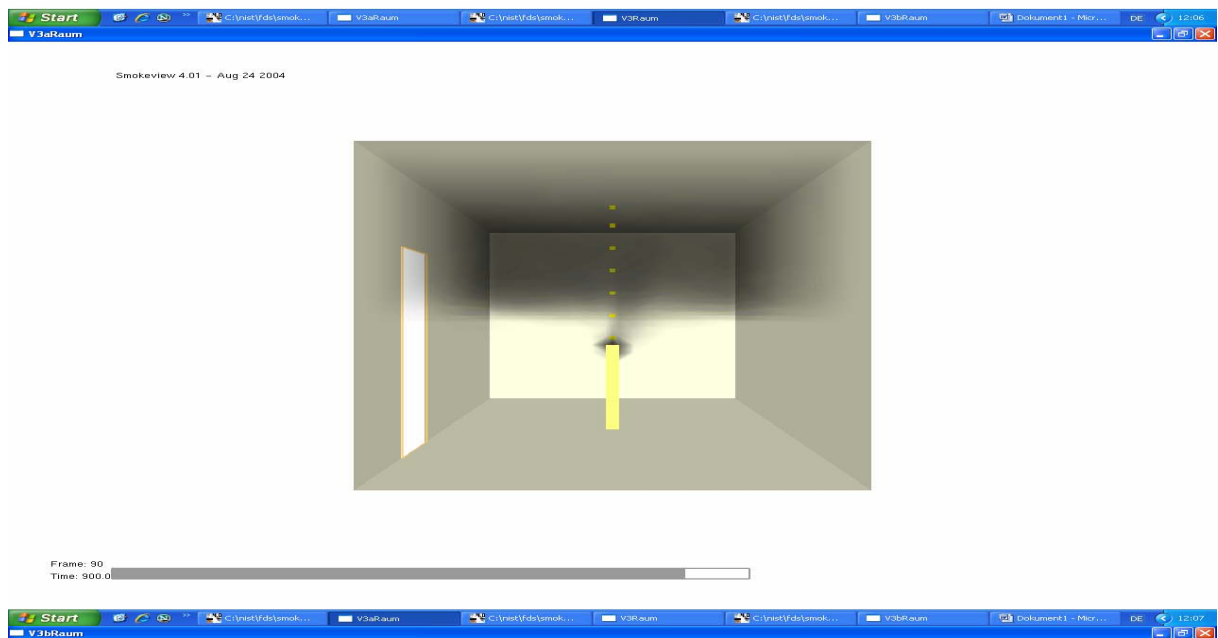
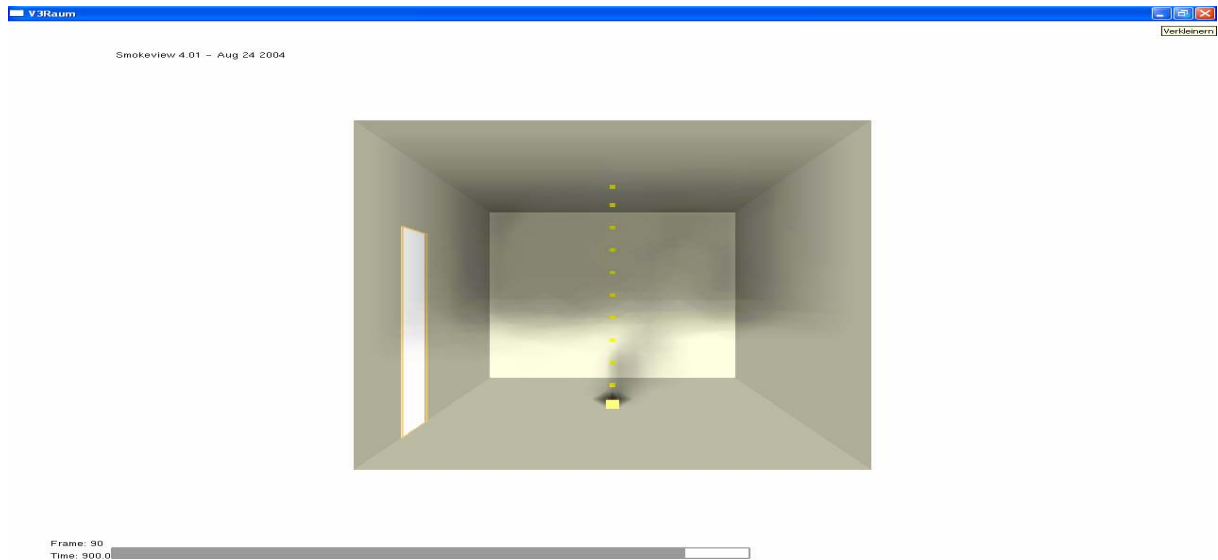


Bild 46. Rauch im 50 cm geöffneten Raum; Brandleistung  $360 \text{ kW/m}^2$ ;  
Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m; Zeit 900 s.

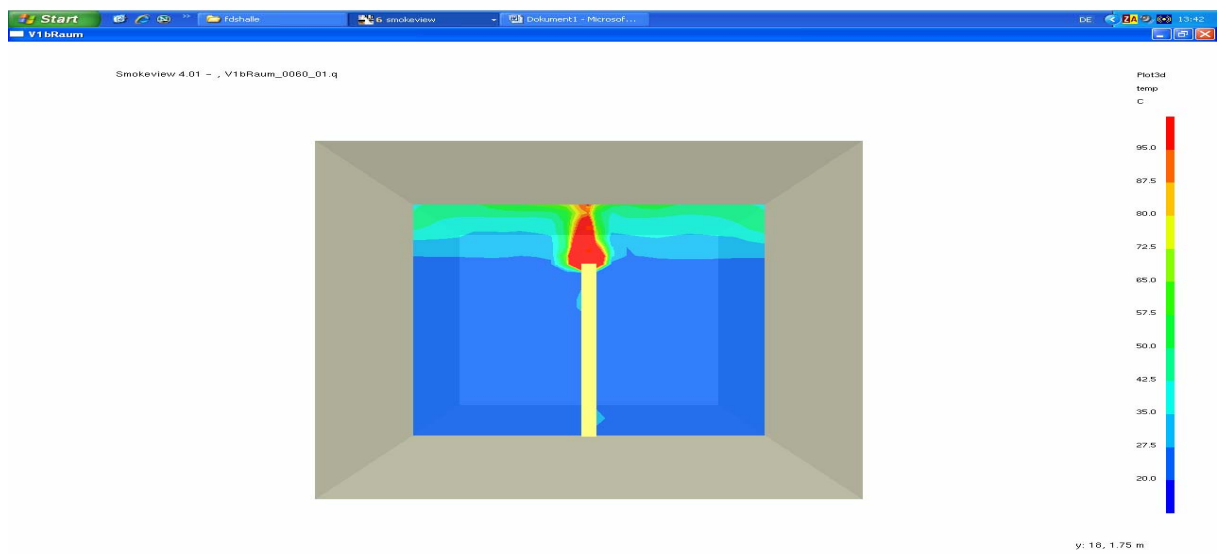
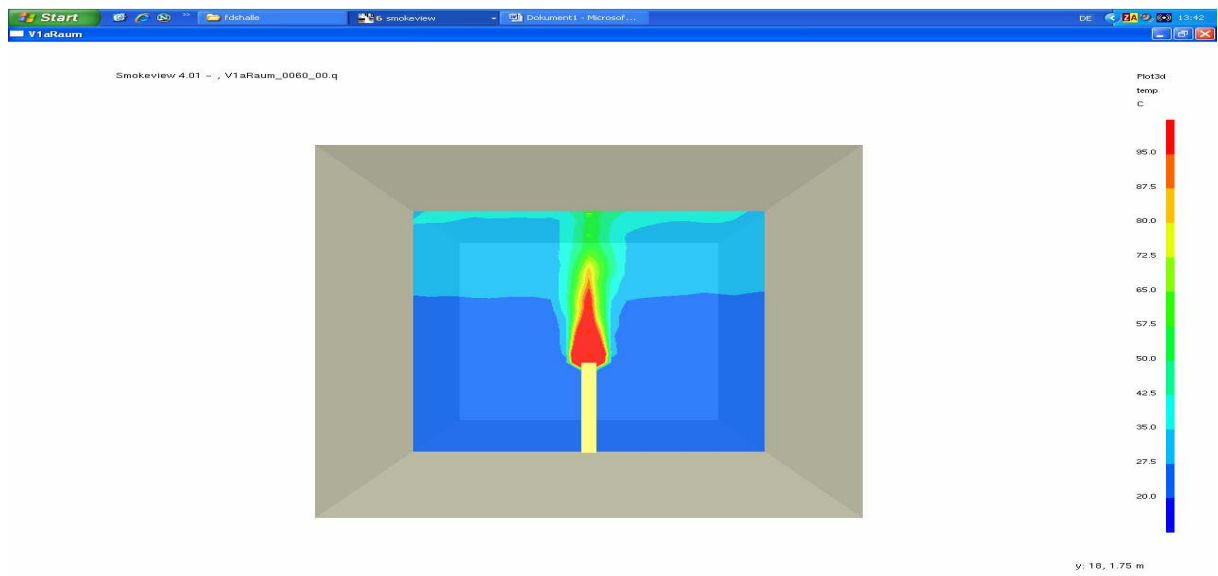
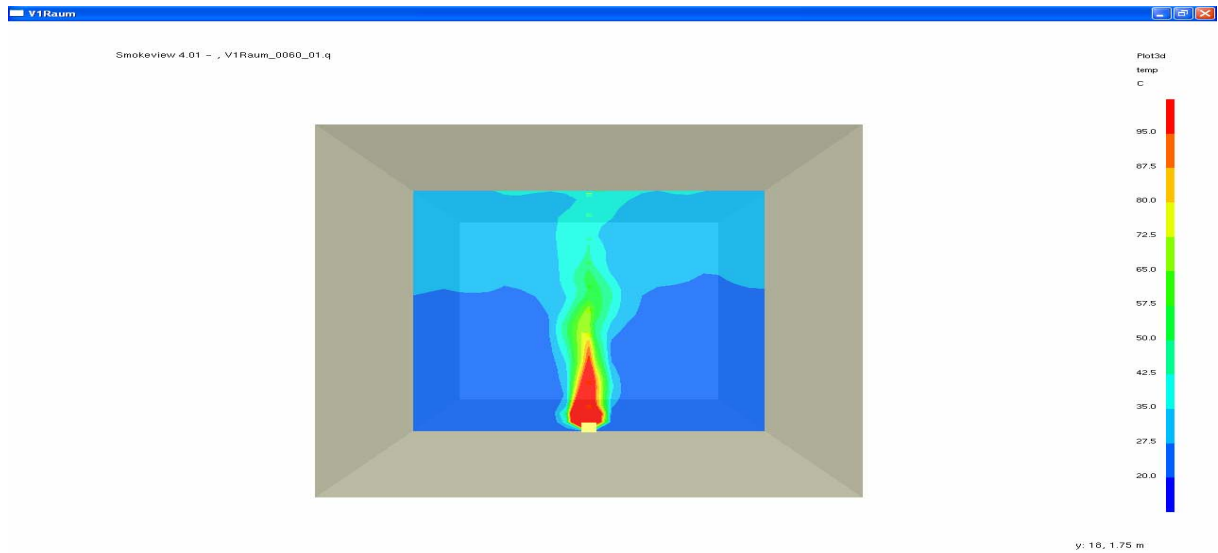


Bild 47a. Temperatur in Raummitte (vertikaler Schnitt); Raum geschlossen; Brandleistung  $360\text{kW/m}^2$ ; Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m; Zeit 60s.

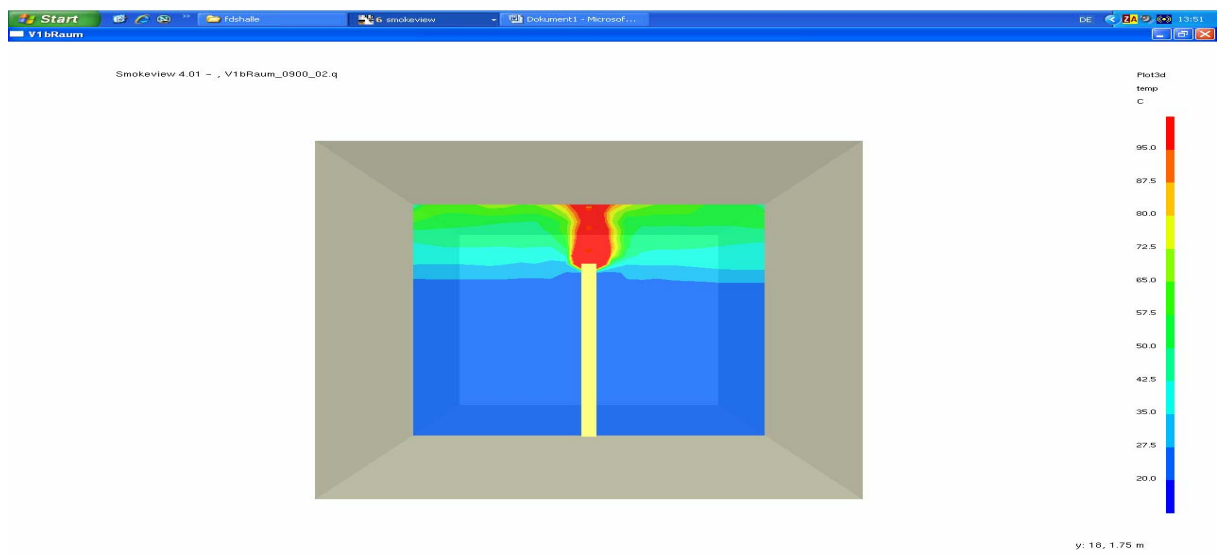
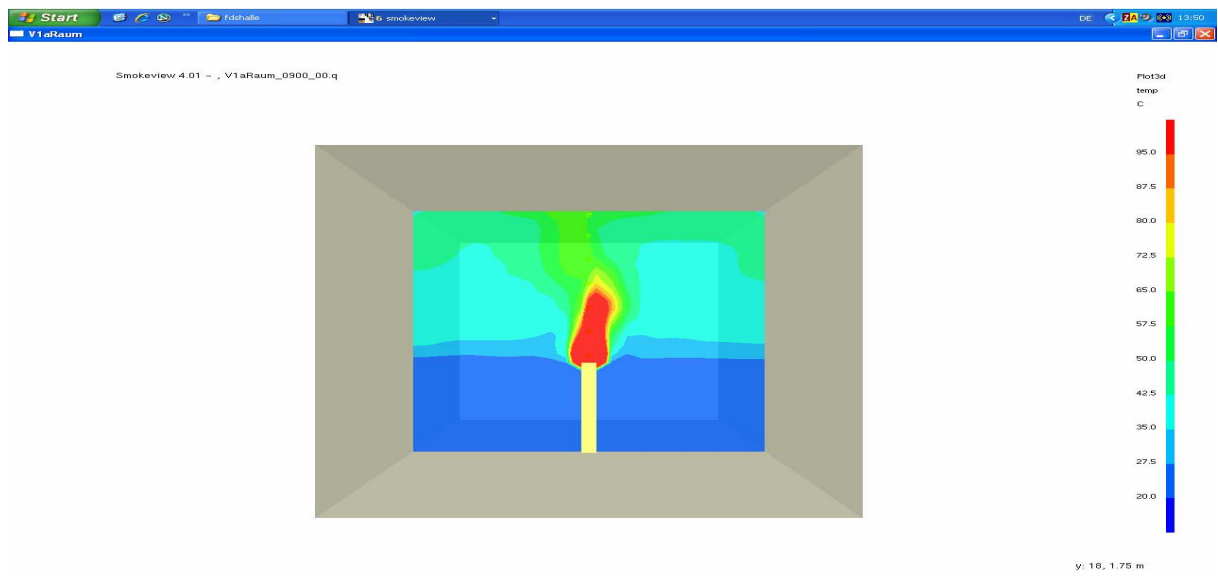
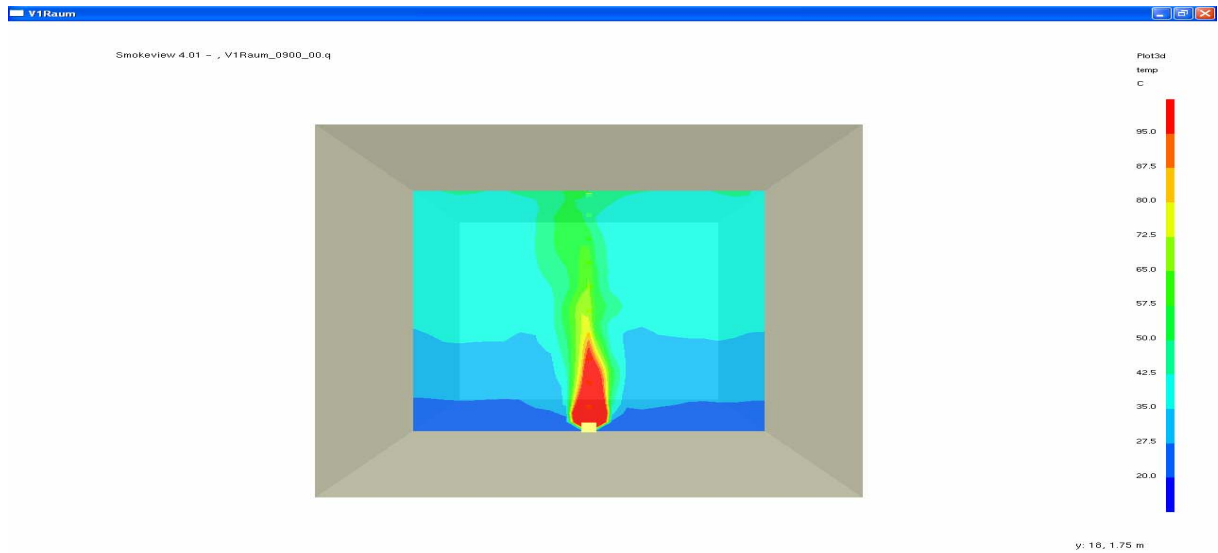


Bild 47b. Temperatur in Raummitte (vertikaler Schnitt); Raum geschlossen; Brandleistung  $360\text{kW/m}^2$ ; Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m: Zeit 900s

In den Bildern 48 a und b sind beispielhaft bei gleichen Simulationsbedingungen in 3 unterschiedlichen Höhen die Verhältnisse im Raum bei einer Brandleistung von 2000 kW/m<sup>2</sup> dargestellt. Zunächst ist die jeweilige mittlere Position der Rauchschtunterkante sowie die darüber liegenden Rauchscht nach einer kurzen Simulationszeit von 1 min (Bild 48a) aufgetragen. Je nach Höhe der Brandstelle im geschlossenen Raum sind die verschieden hohen und unterschiedlich dichten Rauchschten deutlich zu erkennen.

Mit fortschreitender Simulationszeit im geschlossenen Raum (Bild 48b) ist beim Brand in Bodennähe bereits der gesamte Raum nach 2 min nahezu und nach ca. 3 min (Bild oben) vollständig mit Rauch gefüllt. Beim Brand in 1 m Höhe ist die Rauchscht nach 2 min auf mehr als die halbe Raumhöhe abgesunken und hat nach ca. 8 min (Bildmitte) den Raum vollständig erfasst, während beim Brand in 2 m Höhe nach 2 min noch weniger als die Hälfte und erst nach etwas mehr als 15 min (Bild unten) der gesamte Raum mit Rauch vollständig gefüllt ist.

Wird bei dieser Brandleistung die Tür leicht geöffnet, so wird die Verrauchung im unteren Teil des Raumes geringer. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein weiteres Öffnen der Tür auf 50 cm wie in Bild 49a, im Gegensatz zur geschlossenen Tür und unabhängig von der Höhe der Brandstelle im Raum, eine starke Rauchverminderung im unteren Teil des Raumes zur Folge hat, d. h. die Rauchschtunterkante im Raum wird angehoben. Im Bild sind die Verhältnisse im Raum nach einer Simulationszeit von 15 min dargestellt. Auch hier ist die Ablenkung des Plume durch einströmende Luft gut zu erkennen.

Bild 49b zeigt beispielhaft nach 15 min die entsprechenden Temperaturverhältnisse für die 50 cm weit geöffnete Tür bei den 3 unterschiedlich hoch angeordneten Brandstellen. Hier ist ebenfalls die durch die einströmende Luft verursachte Ablenkung der aufsteigenden Gase zu erkennen.

In Bild 50 sind beispielhaft für den Fall der 50 cm weit geöffneten Tür für die 3 unterschiedlich hohen Brandstellen in Raummitte nach einer Zeit von 1 min die Unterkante der Rauchscht und die mittlere Wärmestrahlung an die jeweiligen Oberflächen dar-

gestellt. Je nach Lage der Brandstelle wird die entsprechende Fläche mehr erwärmt als z. B. die Wand gegenüber der Tür beim Brand in 1 m Höhe. Auch hier weichen Einzeltemperaturwerte der grafischen Darstellungen von den gemittelten Temperaturwerten ab. Nach einer Simulationszeit von 15 min wird bei einem Brand in Raummitte in 2 m Höhe z. B. eine Temperatur von ca. 135 °C an der Meßstelle T10 unterhalb der Decke erreicht.

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen ist es dennoch möglich, abhängig von den eingegebenen Parametern und den ausgegebenen berechneten Werten, einzelne Zustände in einem Gesamtsystem darzustellen. Wegen der zahlreichen Möglichkeiten, derartige Simulationsrechnungen durchzuführen, ist es in dieser Arbeit nur möglich, anhand einzelner Beispiele die Problematik von derartigen Berechnungsmethoden aufzuzeigen.

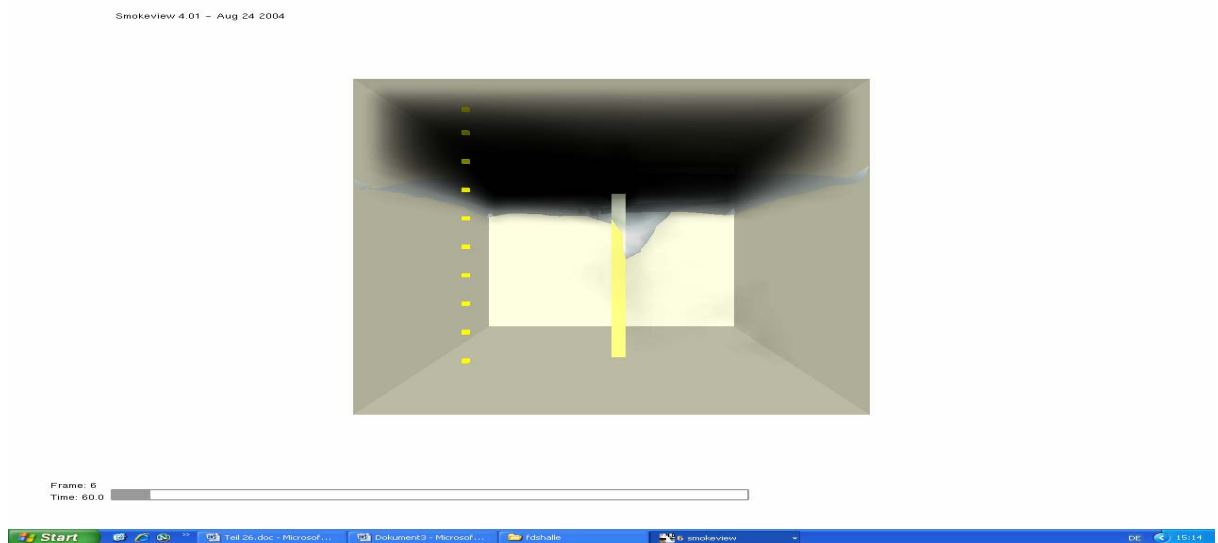
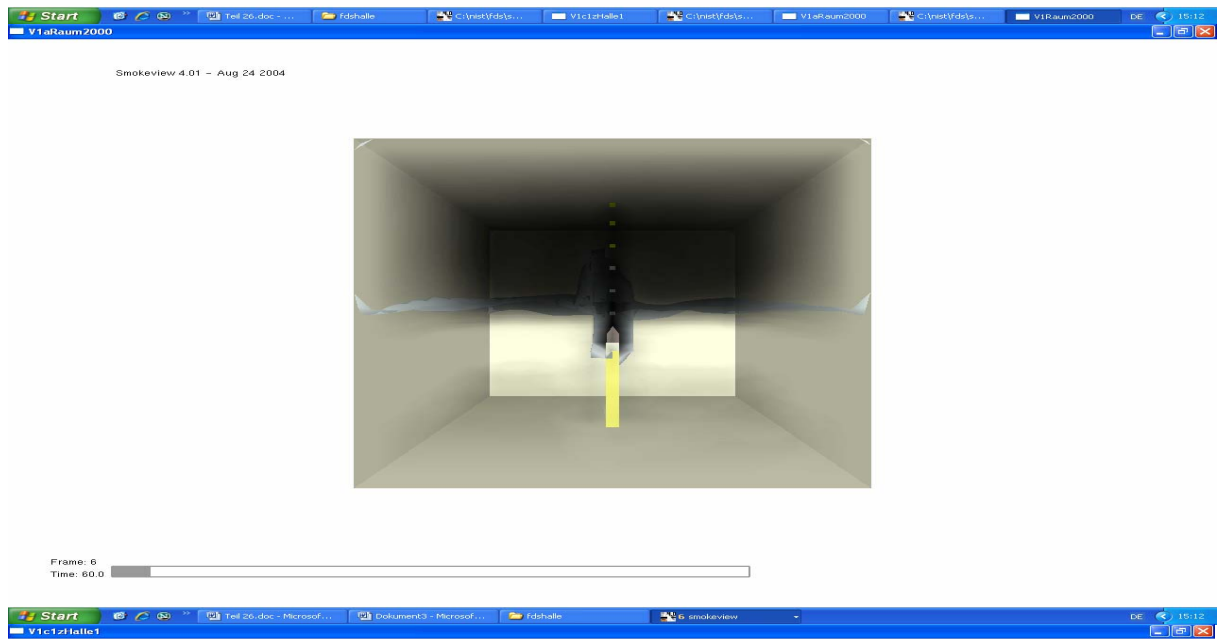
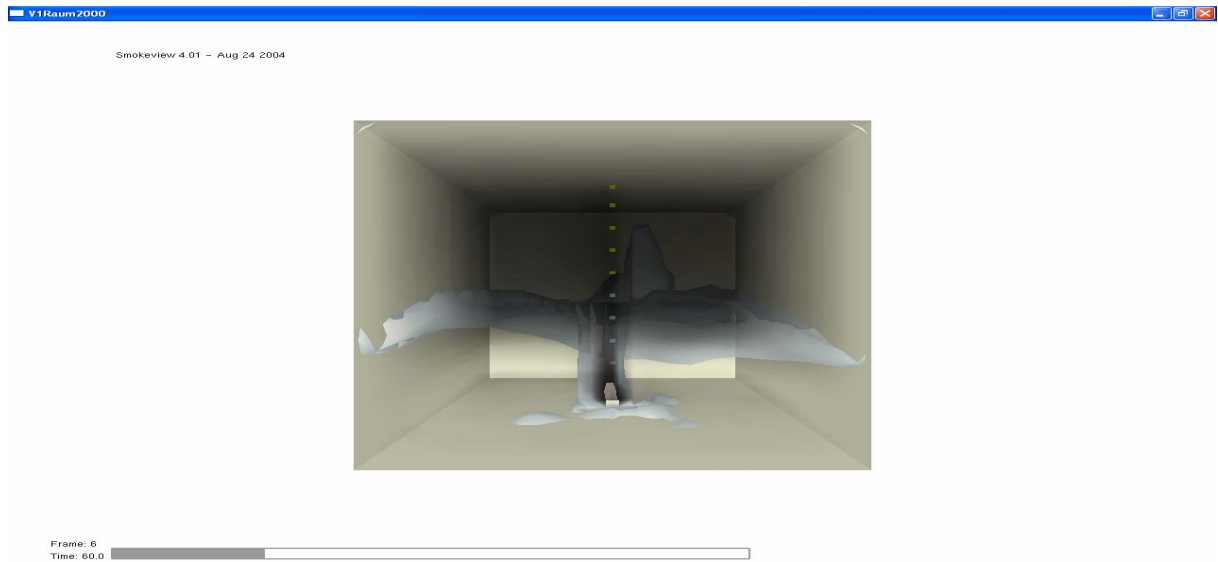


Bild 48a. Rauchschtichtunterkante im geschlossenen Raum; Brandleistung  $2000\text{kW/m}^2$ ; Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m; Zeit 60s.



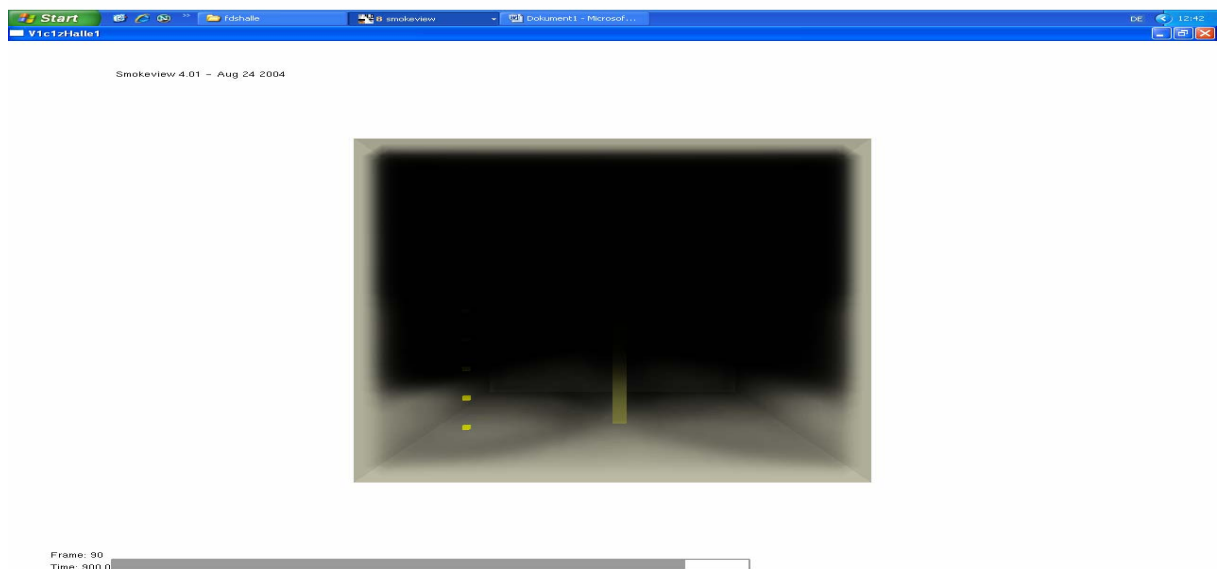
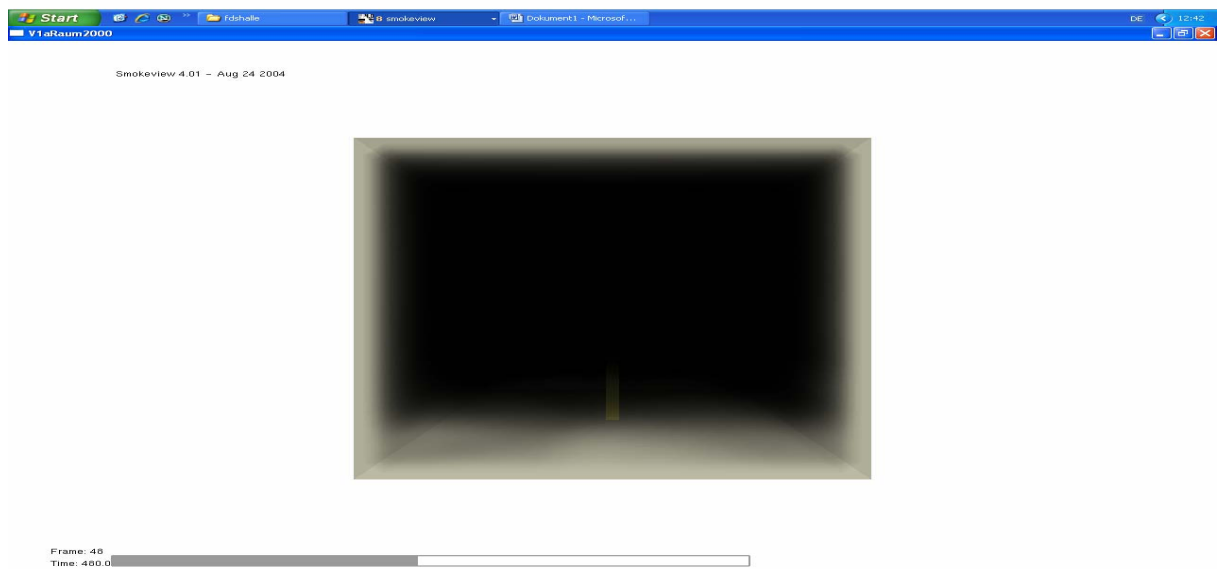
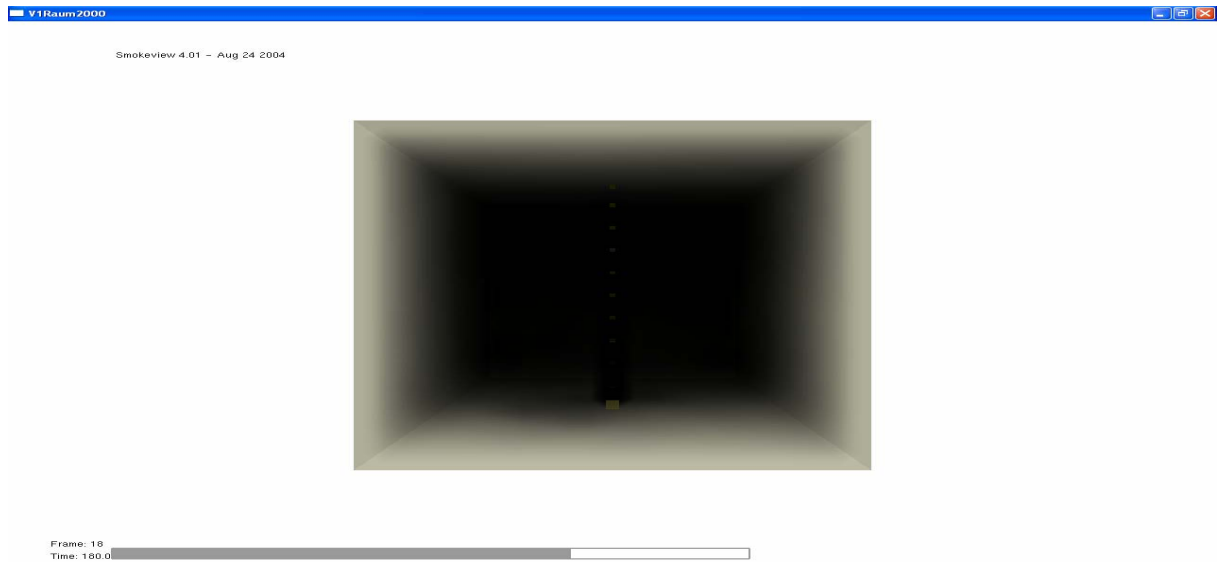


Bild 48b. Rauch im geschlossenen Raum; Brandleistung 2000 kW/m<sup>2</sup>; Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m; Zeit 3min, 8min; 15min.

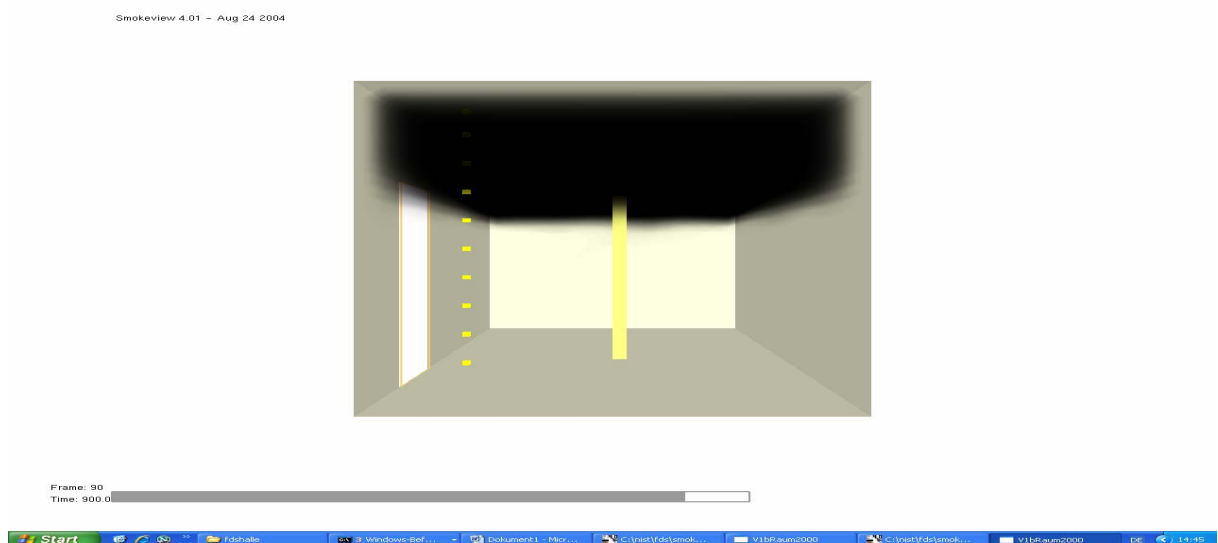
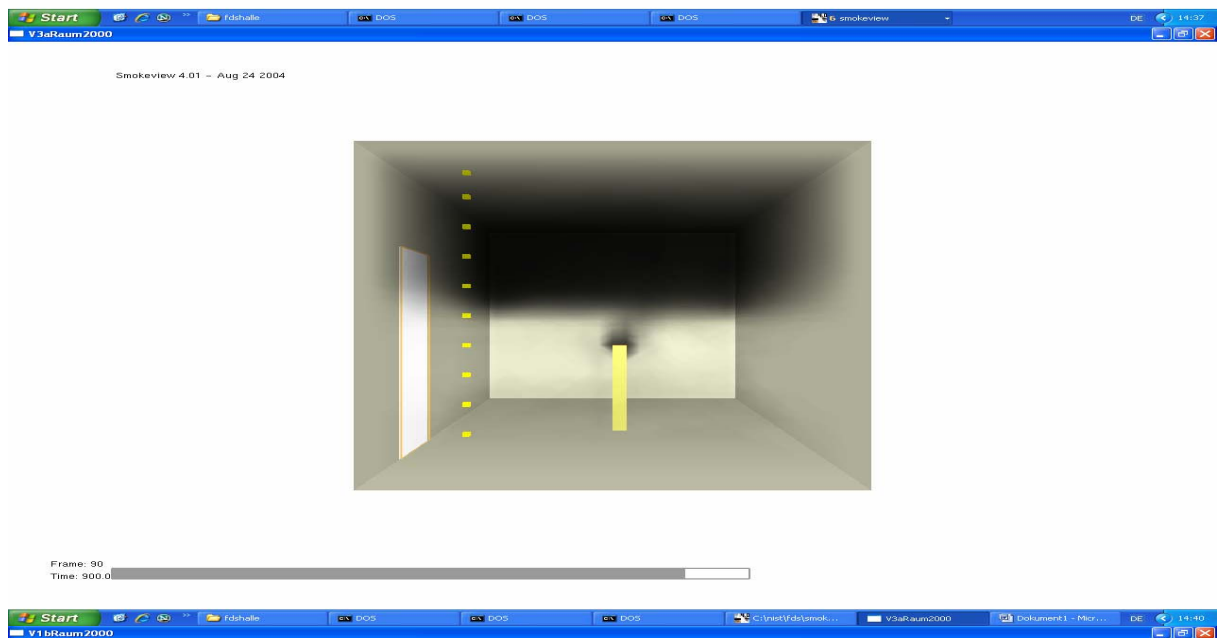
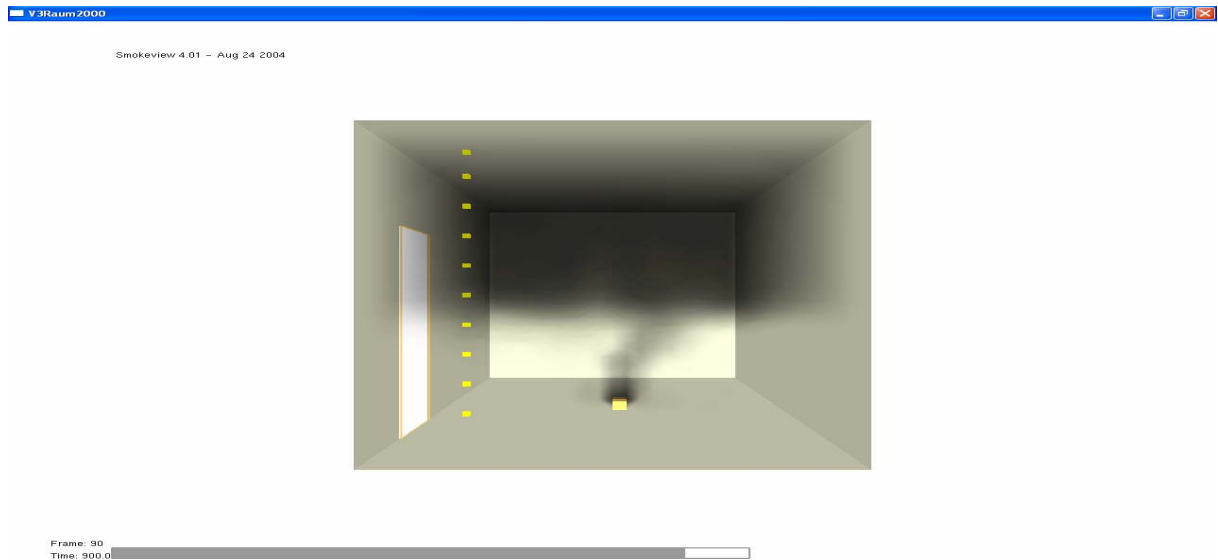


Bild 49a. Rauchsicht, Tür 50cm auf; Brandleistung 2000kW/m<sup>2</sup>;  
Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m: Zeit 900s.

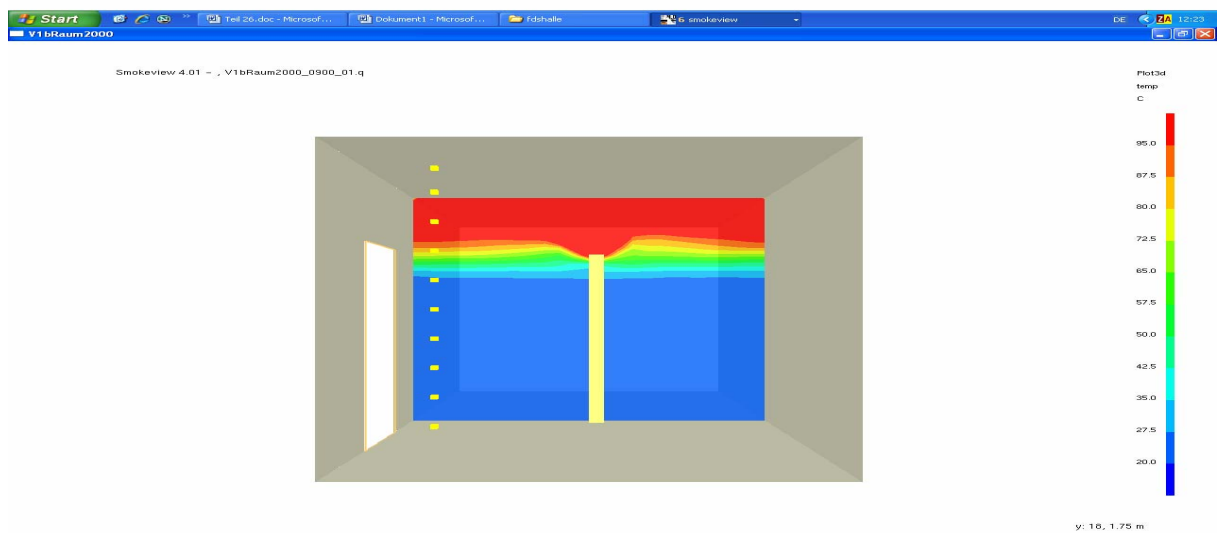
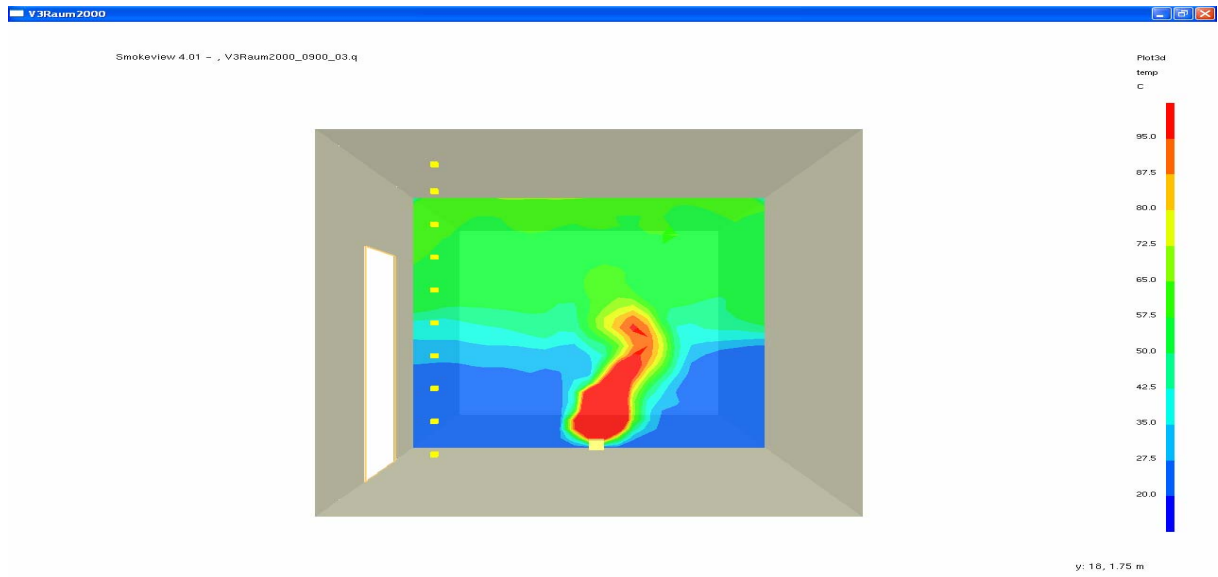


Bild 49b. Temperatur in Raummitte (vertikaler Schnitt); Tür 50cm auf;  
Brandleistung 2000kW/m<sup>2</sup>; Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2; Zeit 900s

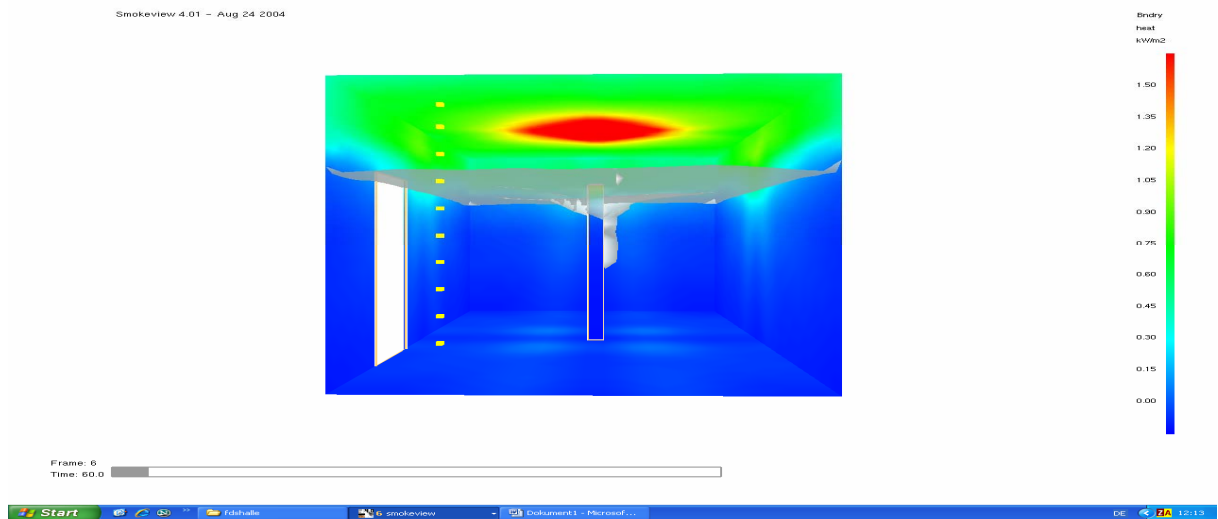
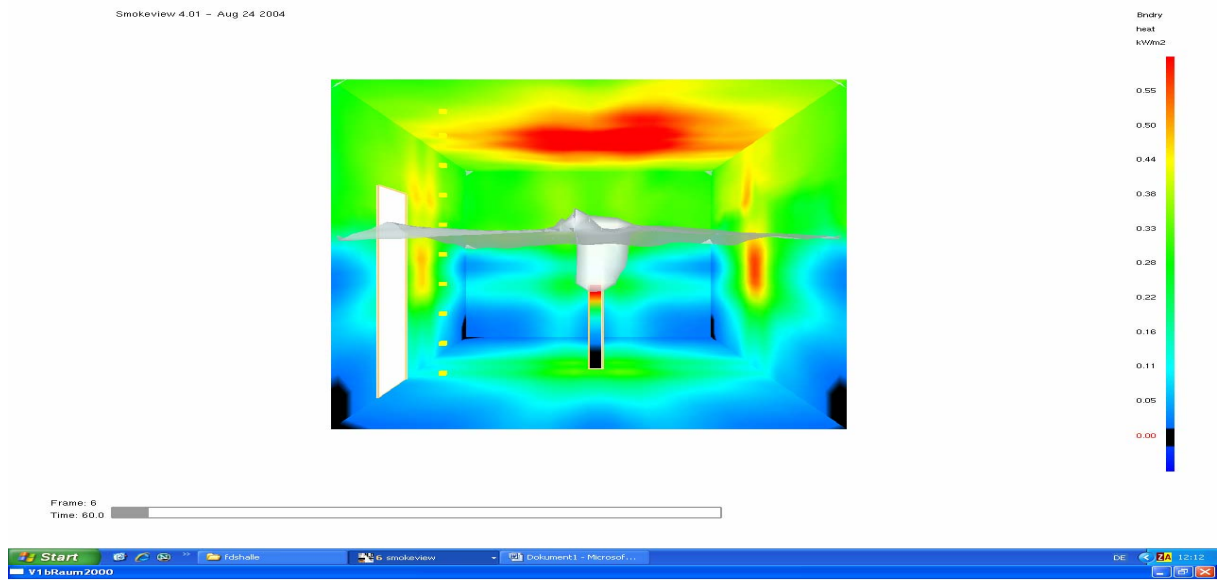
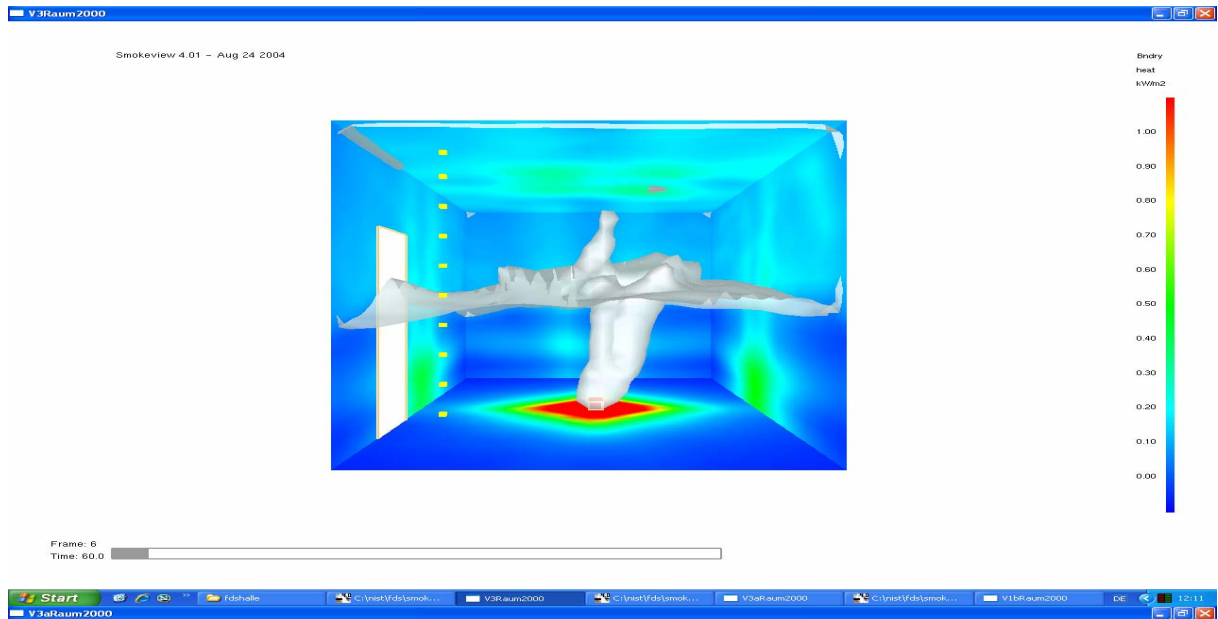


Bild 50. Rauchschichtunterkante u. Wärmestrom auf die Wandflächen; Zeit 60s; Brandleistung 2000kW/m<sup>2</sup>; Tür 50cm auf; Höhe der Brandstelle: Boden, 1m, 2m.

## 9 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, Kenntnisse darüber zu erlangen, unter welchen Umständen bei Bränden stabile Rauchsichten gebildet werden können bzw. wann sich ausgehend von stabilen Verhältnissen instabile einstellen. Verschiedene Einflüsse wie die Zusammensetzung der Rauchsicht, die Luftfeuchtigkeit und/oder die Rekondensation von Wasserdampf, wurden in theoretischen Überlegungen dargelegt und in ihren Bedeutungen abgeschätzt mit dem Ergebnis, daß diese Einflüsse von untergeordneter Bedeutung für die Stabilität von Rauchsichten sind und allenfalls in extremen Grenzbereichen ausschlaggebend sein können. Einflüsse der Rauchsichttemperatur sowie strömungstechnische Effekte sind im Vergleich dazu sicherlich als wesentlich höher zu bewerten. Durch Untersuchungen in einem Versuchsraum wurden die theoretischen Ausführungen ergänzt und die Ergebnisse aus den Versuchen den Simulationsmodellrechnungen gegenübergestellt.

Dabei kann festgestellt werden, dass Simulationsrechnungen in den untersuchten Grenzen Abweichungen von den Ergebnissen bei realen Bränden beinhalten. Da es sehr schwierig ist, Untersuchungen eines realen Brandes so durchzuführen, dass sich einerseits überhaupt eine Rauchsicht ausbildet und diese außerdem bestehen bleibt und sich nicht sofort wieder auflöst und andererseits eine Simulation annähernd die gleichen Ergebnisse bringen soll wie diejenigen eines realen Brandes, ist es wegen der Vielzahl von Möglichkeiten notwendig sowohl noch weiterführende reale Untersuchungen als auch Simulationsrechnungen mit zusätzlichen bzw. geänderten Parametern durchzuführen, um umfassendere und besser übereinstimmende Ergebnisse zu erzielen. Hier konnten nur einzelne Schritte in dieser Richtung simuliert werden.

Bei der Entwicklung von Brandschutzkonzepten und Risikobeurteilungen kommt der Lage und Stabilität einer Rauchsicht in einem Raum eine besondere Bedeutung zu, weil davon die Beurteilung für eine gefahrlose Benutzung von Rettungswegen abhängt.

Bleibt der Rauch in Deckennähe oder verteilt er sich im gesamten Raum? Um diese Frage zu beantworten, sollten grundsätzlich zu den Simulationsberechnungen immer praxisnahe Tests durchgeführt werden, da sehr viele unterschiedliche Faktoren eine Rolle spielen. Zusätzlich sind in einem Brandfall die Sichtverhältnisse im Raum und die Toxizität des Brandrauches bzgl. der zur Verfügung stehenden Fluchtzeit und Fluchtweglänge mit zu berücksichtigen und in die Beurteilung einzubeziehen.