

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Realitätsnahe Prüfeinrichtung für RWA-Anlagen mit Hilfe
von Vormischbrennern
Teile 1 und 2

139

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER LÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung**

Forschungsbericht 139

Realitätsnahe Prüfeinrichtung für RWA-Anlagen

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe

Karlsruhe

September 2004

FA: Nr. 181(3/2001)

186(4/2002)

ISSN 0170-0060

BERICHTS KENNBLETT

Numer des Berichtes: 139	Titel des Berichtes: Realitätsnahe Prüfeinrichtung für RWA-Anlagen	ISSN: 0170-0060	
Autoren: Dipl.-Ing. Hermann Schatz Dipl.-Ing. Dieter Brein		durchführende Institution: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Hertzstr. 16 D-76187 Karlsruhe	
Numer des Auftrages: 181 (3/2001) 186 (4/2002)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlußdatum: Sep 04			
Seitenzahl: 121	Bilder: 36	Tabellen: 6	Literaturverweise: 61
Kurzfassung: <p>Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, eine realitätsnahe Prüfeinrichtung für RWA-Anlagen zu finden. Diesbezüglich wurde einerseits durch umfangreiche Literaturlauswertung auf bereits vorhandene Erkenntnisse hingewiesen und andererseits wurden durch experimentelle Untersuchungen Wege aufgezeigt, wie Simulationen realitätsnaher Brände durchführbar sind, um damit die Gültigkeit von Bemessungen der Rauchabführung für bestimmte Objekte nachweisen zu können.</p> <p>Da in den meisten Fällen ein Brand praktisch keinen Anfangsimpuls besitzt, wurden in der vorliegenden Arbeit mehrere mögliche Prüfeinrichtungen getestet, die möglichst nahe das Brandverhalten eines realen Brandes zu simulieren in der Lage sind. Unter diesen Simulationsbrennern wurde der sogenannte Sprühdüsenbrenner für anschließende Versuche eingesetzt.</p> <p>Um jedoch einen Simulationsbrand meßtechnisch erfassen zu können wurden durch den Brand verursachte Änderungen eines normalen Zustandes wie z.B. Temperatur und Druck der Strömung mit einer an der Forschungsstelle entwickelten Versuchsanlage aufgenommen. Mit unterschiedlichen Sprühdüsen und Brennstoffvolumenströmen wurden Flammen mit Brandleistungen zwischen 300 kW und 1200 kW erzeugt und die Ausbreitung der entstehenden Flammen-/ Rauchgassäule (Plume) gemessen, um den jeweiligen Ausbreitungswinkel angeben zu können. Gleichzeitig wurden an Meßketten Temperaturen in der Versuchshalle zur Bestimmung einer entstehenden Rauchschiicht unterhalb der Decke aufgezeichnet. Weiterhin wurden die Massenströme und die Wärmeströme bei den einzelnen Düsenstellungen bestimmt.</p> <p>Mit einer Prüfeinrichtung dieser Art ist es schließlich möglich, in beliebigen Bauwerken eine Brandsimulation durchzuführen, um den Nachweis von vorausgegangenen Berechnungen für die Belastung bzw. die Rauchfreiheit zu erbringen.</p>			
Schlagwörter: Literatur, Brandsimulation, Simulationsbrand, RWA-Anlage, Brandleistung, Brandausbreitung, Sprühdüsenbrenner, Ausbreitungswinkel, Plume, Rauchschiichtbildung, Massenstrom			

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 EINLEITUNG	1
2. LITERATURAUSWERTUNG	2
3. SIMULATIONSBRENNER	31
3.1 Brandbedingungen	31
3.2 Versuchsanlage und Meßeinrichtung	32
3.3 Verschiedene Brennertypen	33
3.4 Versuchsaufbau Sprühdüsenbrenner	35
3.5 Eichung der Düsen	36
3.6 Bestimmung von Temperatur und Druck in der Flamme bzw. im Plume	37
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG	38
4.1 Temperaturen im Plume	40
4.2 Temperaturen in der Versuchshalle	43
4.3 Flammen- und Plumekonturen	47
4.4 Flammenlänge und virtueller Ursprung	48
4.5 Temperaturbereiche	49
4.6 Geschwindigkeit, Massenstrom, Wärmestrom im Plume	50
5. ZUSAMMENFASSUNG	54
6. LITERATURVERZEICHNIS	56
7. TABELLEN UND BILDER	62

1. EINLEITUNG

Brandschutz gehört zu den Themen der Sicherheitstechnik, die insbesondere immer dann aufgegriffen werden, wenn wieder einmal ein größeres Brandereignis aufgetreten ist. Sind bei diesem Schadenfall zahlreiche Personen zu Tode gekommen, ganz abgesehen vom entstandenen Sachschaden, der in den meisten Fällen einen beträchtlichen Umfang aufweist, wird in der Öffentlichkeit darüber berichtet. Um derartige Schadensereignisse möglichst zu vermeiden bzw. deren Auswirkungen gering zu halten, müssen Vorschriften und Richtlinien aus dem Baurecht und verwandten Rechtsgebieten eingehalten werden.

Da bei großen Gebäudekomplexen und Sonderbauten diese Vorgaben nicht immer eingehalten werden (können), ist es unbedingt erforderlich, bereits bei der Planung (bis zur Fertigstellung) des Bauvorhabens ein Brandschutzkonzept mit den notwendigen brandschutztechnischen Nachweisen zu erarbeiten und vorzulegen, dem auch die zuständige Feuerwehr ihr Einverständnis geben kann. Letztendlich müssen für derartige Bauten mit entsprechenden brandschutztechnischen Gutachten die Bauämter ihre Zustimmung erteilen.

Da bei Bränden in den allermeisten Fällen die Personen nicht durch das Feuer direkt, sondern vielmehr durch die auftretenden Brandgase zu Schaden kommen, sind in besonderem Maße brandschutztechnische Nachweise für die Rauchfreihaltung von definierten Gebäudeteilen und -abschnitten zu führen wie z. B. für Versammlungsstätten oder Atrien, bei denen die Rettungswege zumindest für die Dauer einer Evakuierung rauchfrei (raucharm) gehalten werden müssen und eine gewisse Raucharmut für den Einsatz der Rettungskräfte erforderlich ist.

Um dies zu gewährleisten, werden von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik in einem Forschungsvorhaben Untersuchungen durchgeführt, die einerseits durch eine umfangreiche Literaturlauswertung auf bereits vorhandene Erkenntnisse hinweisen und andererseits durch experimentelle Untersuchungen Wege aufzeigen, welche

die Gültigkeit von auf theoretischen Grundlagen durchgeführten Bemessungen für bestimmte Objekte nachweisen.

Da in den meisten Fällen ein Schadenfeuer etwa fester Brandstoffe praktisch ohne Anfangsimpuls brennt, war es notwendig, in der vorliegenden Arbeit diesbezüglich eine Prüfeinrichtung zu finden, die möglichst nahe das Brandverhalten eines derartigen realen Brandes zu simulieren in der Lage ist. Um einen solchen Simulationsbrand beschreiben zu können, ist es zusätzlich erforderlich, relevante Messwerte, d. h. durch den Brand verursachte Änderungen eines normalen Zustandes wie z. B. bei den Temperaturen, den Drücken oder den Konzentrationen der Strömung, aufzunehmen. Mit einer Prüfeinrichtung dieser Art ist es schließlich möglich, in beliebigen Bauwerken eine Brandsimulation durchzuführen, um den Nachweis von vorausgegangenen Berechnungen für die Belastung bzw. die Rauchfreihaltung zu erbringen.

2. LITERATURAUSWERTUNG

Brein /1/ gibt eine Übersicht über die zur Modellierung der Rauchausbreitung in Gebäuden vorhandenen Gleichungen und weist auf deren Anwendungsbereiche einschließlich ihrer Vor- und Nachteile hin.

Ein Feuer erzeugt naturgemäß Rauch, wobei bei Brandbeginn zunächst der erwärmte Rauch nach oben aufsteigt. Mit zunehmender Intensität des Feuers bzw. des Brandes werden größere Brandgasmengen freigesetzt, die sich mit der über dem Brandherd befindlichen und der durch den Auftrieb eingesaugten Luft zu einer Rauchgas/Luft-Säule, auch Flammensäule oder Brandrauch/Luft-Säule genannt, ausbilden. Diese nach oben gerichtete Säule wird mit dem englischen bzw. französischen Wort „plume“ bezeichnet.

Mit zunehmender Aufstiegshöhe des Rauches, d. h. mit der Entfernung vom jeweiligen Ursprung des Brandes, nimmt sowohl die Temperatur der Brandgase als auch die Strömungsgeschwindigkeit der Brandgase immer mehr ab. Gleiches gilt für die Konzentration der jeweiligen Abgaskomponenten durch die immer größere Verdünnung. Der Plume wird stromab breiter und die Geschwindigkeit der Ausbreitung ver-

ringert sich. Bild 1 zeigt schematisch sowohl einen auftriebsbehafteten Freistrah, der in eine ruhende Umgebung eintritt als auch einen Wandfreistrah. Neben dem Flammenbereich sind Querprofile der Temperatur und der Geschwindigkeit qualitativ dargestellt. Die Masseneinsaugung erfolgt seitlich in den Plume.

Diese Vorgänge sind neben den baulichen Gegebenheiten bei der Bemessung anlagentechnischer Maßnahmen zur Rauchabführung aus einem Gebäude von großer Bedeutung. Um z. B. sicherzustellen, daß Rettungswege von Rauch freigehalten werden können, sind umfangreiche Berechnungen und Untersuchungen notwendig, die in einem Brandschutzkonzept Anwendung finden. Diesbezügliche Berechnungen werden häufig nach einer Modellvorstellung mit übereinander liegenden Zonen, sogenannten Zonen-Modellen, durchgeführt. Aufgrund von Untersuchungen mit der Bestimmung von Meßgrößen oder auch Annahmen über die Brandgröße, die Wärmefreisetzungsrate und die Aufstiegshöhe des Plume, lassen sich durch Kopplung von Energie- und Massenbilanzen die eintretenden Frischluft- und austretenden Rauchgasmassenströme berechnen. Dabei wird vereinfachend angenommen, daß Umgebungsluft nur bis zur Höhe der oberen Zone, dies ist die entstandene Rauchschicht, in die Rauchgassäule eingemischt wird. Sonderfälle mit anderen Raumgeometrien sind für die Modellvorstellung ebenfalls denkbar.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Gleichungen zur Bestimmung der Masseneinsaugung in eine Rauchgassäule, wobei für jeden Einzelfall die Anwendungsbereiche bzw. -grenzen bekannt sein müssen, um die betreffende Situation beschreiben zu können. Dabei ist die direkte Übertragung von Modellversuchen auf die realen Gegebenheiten nicht immer gewährleistet, so daß in vielen Fällen Fehler auftreten können.

Mit Hilfe dimensionsloser Kennzahlen werden auftriebsbehaftete Strömungen gekennzeichnet. Die auf den Brennerdurchmesser bezogene Flammenlänge frei brennender Stoffe hängt in besonderem Maße von der Froude-Zahl $Fr = u^2 / (g \cdot l)$ ab. Die dimensionslose Froude-Zahl ist demnach die maßgebende Größe für die Flammenlänge. Die Froude-Zahl gibt das Verhältnis von Trägheitskraft zur Schwerkraft bzw. zur Auftriebskraft wieder. Aufgrund zahlreicher Untersuchungen wurde festgestellt,

daß Diffusionsflammen im Bereich der Froude-Zahlen von 10^{-5} bis 10^4 weitgehend nur vom Auftrieb bestimmt werden.

Bild 2 zeigt die dimensionslosen Flammenlängen in Abhängigkeit von der Froude-Zahl, die durch experimentelle Untersuchungen nach /2, 3, 4, 5, 6/ bestimmt wurden. Eine kleine Froude-Zahl kennzeichnet Strömungen bzw. Flammen mit einem geringen Anfangsimpuls wie dies z. B. bei einem Entstehungsbrand mit Flüssigkeiten oder Lagergütern der Fall sein kann. Bei einer großen Froude-Zahl besitzen die Strömungen bzw. Flammen dagegen einen hohen Anfangsimpuls. Dies bedeutet, daß beim Einsatz von Düsen die Zufuhr des Brandstoffes ein Kriterium für die Strömungsgeschwindigkeit des austretenden Strahles bzw. der Flammen darstellt. Sind die Anteile von Auftrieb und Trägheit ausgeglichen, so ergibt sich die Froude-Zahl zu $Fr = 1$. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß in der Literatur teilweise die Quadratwurzel ebenfalls als Froude-Zahl $Fr = u / \text{Wurzel}(g * l)$ bezeichnet wird, wodurch gegebenenfalls Unterschiede entstehen können. Bei rein turbulenten Diffusionsflammen übt der Auftrieb gegenüber dem Anfangsimpuls keinen merklichen Einfluß mehr auf die Flammenlänge aus. Die bezogene Flammenlänge nimmt entsprechend der Abhängigkeit von der Froude-Zahl mit zunehmendem Anfangsimpuls zu. Entsprechend wird sie mit größer werdendem Branddurchmesser kleiner.

Darüberhinaus können für den Brandschutz relevante und evtl. bei den Berechnungen zu berücksichtigende Kennzahlen wie die Archimedes-, die Biot-, die Prandtl-, die Reynolds-, die Nusselt- und andere mehr angegeben werden. Die Archimedes-Zahl ist der Reziprokwert der Froude-Zahl, so daß für diese Kennzahl gilt: je kleiner der Anfangsimpuls desto größer ist die Archimedes-Zahl und umgekehrt je größer der Anfangsimpuls desto kleiner ist die Archimedes-Zahl.

Nach Zukoski /7/ wird aus der Froude-Zahl eine dimensionslose Wärmefreisetzungsrate $Q^* = \dot{Q} / \rho * c_p * T * (g * D)^{1/2} * D^2$ abgeleitet, wobei die Geschwindigkeit und die konvektive Wärmemenge Berücksichtigung finden. Die Flammenlänge z_{fl} wird mit Hilfe ihres Durchmessers D in dimensionsloser Form z_{fl} / D dargestellt und eine Abhängigkeit von der Froude-Zahl für die entsprechenden Bereiche angegeben.

Wenn der Auftriebseinfluß den Trägheitseinfluß überwiegt, ist die Froude-Zahl $Q^* \leq 0,1$ und entsprechend die bezogene Flammenlänge $z_{fl} / D \sim (Q^*)^2$. Im Übergangsbereich wird die Froude-Zahl mit $0,1 \leq Q^* \leq 1,0$ angegeben. Im Trägheitsbereich ist die Froude-Zahl $Q^* \geq 1,0$ und entsprechend die Flammenlänge $z_{fl} / D \sim (Q^*)^{2/5}$. Zusätzlich wird bei Zukoski über Messungen mit Gasbrennern unterschiedlicher Durchmesser bis zu einer Leistung von 100 kW berichtet. Durch die Lage des jeweiligen Brenners im Raum wurde der Abstand zur Rauchschtichtunterkante festgelegt. Durch Absaugen eines entsprechenden Volumenstromes über eine Haube wurde dabei die entstehende Rauchschticht konstant gehalten.

Bei Heskestad /8/ wurden Großbrandversuche an palettierten verpackten Kunststoffprodukten, an Holzpaletten und an in Regalen gelagerten verpackten Produkten im Hinblick auf die Flammenlängen durchgeführt und dahingehend bewertet, welchen Einfluß die gegenüber Flächenbränden abweichende Geometrie auf die Beschreibung des virtuellen Ursprungs hat. Er kommt zu dem Schluß, daß der virtuelle Ursprung grundsätzlich mit derselben Formel wie bei Flüssigkeitsbränden dargestellt werden kann. Der virtuelle Brandursprung wird angegeben mit der folgenden Formel $z_0 = 0,083 * \dot{Q}^{2/5} - 1,02 * D$. Bild 3 zeigt beispielhaft Ähnlichkeitsprofile in einer Plume und die Verschiebung der Brandlast in den scheinbaren (virtuellen) Ursprung einer Punktquelle.

Nach Thomas /9/ gilt allg. in einem Bereich von $7 < \dot{Q}^{2/5} / D < (700\text{kW})^{2/5}$ für unbeeinflusste Flammen die mittlere Flammenlänge $L = 0,235 * \dot{Q}^{2/5} - 1,02 * D$. Einflüsse aus der Umgebung wie Wände, Decken, Öffnungen und Wind sind nicht berücksichtigt. Brein /1/ und Schneider /10/ geben weitere Einzelheiten über die Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen der oben genannten Formeln wieder.

Sowohl McCaffrey /11/ als auch Cox und Chitty /12/ verwendeten überwiegend kleinere Brandquellen bis zu einer Leistung von ca. 50 kW bei der Bestimmung der in die Rauchgassäule eingesaugten Masse. Die Flammen reichten dabei nicht in die unterhalb der Decke befindliche Rauchschticht, sie brannten vielmehr in die freie Umgebung. Im Gegensatz dazu wurden bei Thomas et al. /13/ die eingesaugten Luftmassen bei Flammen bestimmt, die in eine unterhalb der Decke befindliche Rauchschticht eindrangen.

Die zahlreichen Untersuchungen und Modell-Rechenverfahren führen zu entsprechend voneinander abweichenden Plume-Formeln. Durch unterschiedliche Vorfaktoren und Exponenten gegenüber anderen Plume-Formeln ergeben sich entsprechend auch unterschiedliche Ergebnisse für die eingesaugten Massenströme, die bis über 160 % voneinander abweichen können. Werden bei den Berechnungen außerdem Gültigkeitsbereiche dieser Formeln überschritten, so können sich die Massenströme sogar um bis zu 240 % unterscheiden. In einer Zusammenstellung von einzelnen Plume-Formeln wird auf deren Anwendungs- und Gültigkeitsbereiche aufmerksam gemacht. Tabelle 1 gibt eine Zusammenstellung von Plume-Formeln wieder, wie sie auch bei Brein /1/ aufgeführt wurde.

Im Zonenmodell CFAST von Peacock et al. /14/ wurden ausschließlich die von McCaffrey /11/ bei Modelluntersuchungen mit Erdgas-Diffusionsflammen aufgestellten Gleichungen verwendet. Hierbei wurden drei Bereiche unterschieden, nämlich der Bereich für die Flamme (engl. „near field“), der intermittierende Bereich und der Ähnlichkeitsbereich (engl. „far field“), in dem die Verbrennung abgeschlossen ist. Für diese Bereiche lassen sich die Massenströme mit den folgenden Formeln ausdrücken:

$$\text{Flammenbereich} \quad \dot{m} = 0,011 * z^{0,566} * \dot{Q}^{0,774}$$

$$\text{Intermittenzbereich} \quad \dot{m} = 0,026 * z^{0,909} * \dot{Q}^{0,636}$$

$$\text{Ähnlichkeitsbereich} \quad \dot{m} = 0,124 * z^{1,895} * \dot{Q}^{0,242}$$

Sie beruhen auf experimentell gefundenen Beziehungen und wurden an den Grenzen zwischen den Bereichen angepaßt. Bei den mit dem Brandstoff Methan durchgeführten Untersuchungen betrug die Wärmefreisetzungsrate 57,5 kW, wobei ein Strahlungsverlust von 15 % zugrunde gelegt wurde. Die max. zulässige Wärmefreisetzungsrate wurde im Programm CFAST auf einen Wert von 60 MW begrenzt.

Beyler /15/ wie auch Morton et al. /16/ erwähnen eine Brandrauchsäule über einer punktförmigen Wärmequelle. Der turbulente Strom über einer derartigen Quelle wurde zerlegt in Terme wie die der Masse, die der Momente und die der Energie. Dar-

über hinaus wurde angenommen, daß die Eintrittsgeschwindigkeit der Luft in den Plume proportional zur Plumegeschwindigkeit ist.

Unter Benutzung dieser Überlegungen gab Zukoski /2/ Gleichungen für die Temperatur $T \sim \dot{Q}^{2/3} * z^{-5/3}$ und die Geschwindigkeit $u \sim \dot{Q}^{1/3} * z^{-1/3}$ auf der Achse an, wobei \dot{Q} die Wärmefreisetzungsrate und z die Höhe über der virtuellen Wärmequelle bedeutet. Entsprechende Proportionalitätsfaktoren für die Gleichungen wurden von mehreren Autoren angegeben, können jedoch hier nicht alle im einzelnen aufgeführt werden.

Für die Masseneinsaugung wurde eine von Zukoski, Cetegen, Kubota /17, 18/ beschriebene Formel benutzt, die oberhalb der leuchtenden Flamme gültig ist. Wird trockene Luft vorausgesetzt, so ergibt sich für den Massenstrom folgende Gleichung $\dot{m} = 0,0724 * \dot{Q}^{1/3} * z^{5/3}$.

Um einen Plume genauer beschreiben zu können ist es notwendig, die Höhe der jeweiligen Flamme zu bestimmen und deren Gültigkeitsbereiche anzugeben. Aufgrund unterschiedlicher Versuchsanordnungen und Eingangsdaten konnten in einem Vergleich sowohl kleinere als auch größere Abweichungen festgestellt werden. Bei den Geschwindigkeits- und Temperaturbeziehungen wurden jedoch bemerkenswerte Übereinstimmungen festgestellt. Demgegenüber beinhalten Korrelationen für den Massenstrom Abhängigkeiten von \dot{Q}^0 bis $\dot{Q}^{3/4}$, für die Höhen in der unteren Flammenregion Abhängigkeiten von $z^{1/2}$ bis $z^{1/3}$ und in der oberen Flammenregion von z^1 bis $z^{5/3}$. Über den Einfluß des Durchmessers einer Brandquelle bezüglich des Massenstromes konnte keine eindeutige Aussage getroffen werden. Außerdem wurden für den Bereich des Massenstromes von einigen Autoren unterschiedliche Gleichungen aufgeführt. Die angegebenen Beziehungen können jedoch nicht als generell geeignete Rechenverfahren für den Massenstrom angesehen werden.

Tanaka und Yamana / 19, 20 / führten Untersuchungen durch, um zu Auslegungskriterien für die Rauchfreihaltung in großen Räumen zum Schutz von Personen zu kommen. Um dies für einen entstehenden Brand theoretisch nachzuvollziehen, werden sogenannte Zonenmodelle angewendet, mit denen eine rechnerische Modellierung in einem gewissen Umfang möglich ist. Bei diesen Modellen kann entstehender

Rauch z. B. durch einen natürlichen und/oder einen mechanischen Rauchabzug oder auch durch Einstellen einer Überdruckströmung ferngehalten werden. Theoretische Grundlagen werden anhand einiger Beispiele für geschlossene Räume und für Räume mit Luftzu- und Luftabfuhr dargelegt. In Bild 4 wurden die Modellvorstellungen mit einem auftriebsbehafteten Freistrahle mit der Bildung und Ausbreitung einer Rauchsicht in einem Raum mit Öffnungen verdeutlicht. Außerdem werden zur Beschreibung dieser Vorgänge von den Autoren zahlreiche Gleichungen angegeben.

In einer Reihe von experimentellen Untersuchungen wurden hierbei Daten gesammelt, um sie mit den Modellansätzen vergleichen zu können. Es handelte sich dabei um Flüssigkeitsbrände mit raucharmem Methanol in Wannen (15 Wannen, Kantenlänge 45 cm), die in einem Raum mit den Abmessungen von 30m * 24m * 26,3m (L*B*H) durchgeführt wurden, was einem 7-stöckigen Gebäude entspricht. Bei einer Grundfläche des Brandes von etwa 3m² (15 Wannen, Kantenlänge 45 cm) betrug die Wärmefreisetzungsrate 1,3 MW (Massenverlustrate * unterer Heizwert). Eine Raucherkerze an der Ecke des Brandes lieferte den zur Sichtbarmachung der Rauchsicht benötigten Rauch. Mittels Thermoelementen und durch Messung der optischen Rauchsicht wurde die Temperatur und die Sichtbarkeit des Rauches festgestellt. Zusätzlich erfolgte eine visuelle Beurteilung des Rauches.

Bei den experimentell durchgeführten Versuchen wurde jeweils unterschieden in

- a) Rauchbildung im geschlossenen Raum, ohne Öffnungen oder anlagentechnische Maßnahmen
- b) Rauchbildung mit Zu- und Abluftöffnungen,
- c) Rauchbildung mit mechanischer Lüftung und
- d) zusätzlicher Überdruck im unteren Bereich des Raumes.

Auch hier wird über dem Brandherd die Temperatur in die bereits erwähnten drei Bereiche aufgeteilt, nämlich den Flammenbereich, den Flackerbereich (Intermittenzbereich) und den Ähnlichkeitsbereich weiter stromabwärts. Durch Auftragung der Temperatur über einer Größe für die Brandquelle $z / \dot{Q}^{2/5}$ ergeben sich bei logarithmischem Auftrag 3 entsprechende Geraden. Bei den angeführten Versuchen ergab die Temperaturmessung auf der Achse selbst in Höhen von ca. 20 m durch den aufsteigenden Strom noch eine gegenüber dem übrigen Raum erhöhte Temperatur von ca. 40°C. Derartige Versuchsergebnisse sowie Studien mit den verwendeten einfachen

Modellen können wichtige Hinweise für das Brandgeschehen in großen Räumen geben.

Eine im NFPA-Handbuch /21/ wiedergegebene und von FMRC (Factory Mutual Research Corporation) aufgestellte Formel gilt für Rauchgase mit einer doppelt so hohen Aufstiegshöhe wie die der Flamme selbst, bevor die Gase in eine unter der Decke vorhandene Rauchschiicht eintreten. Der Massenstrom wird in diesem Fall angegeben mit

$$\dot{m} = 0,071 * k^{2/3} * \dot{Q}^{1/3} * z^{5/3} + 0,0018 * \dot{Q} .$$

Die angeführte Gleichung entspricht der in der Richtlinie NFPA 92B /22/ angegebenen Gleichung. Je nach Lage des Brandes im Raum wird die Gleichung zusätzlich durch einen Korrekturwert k zwischen 0,25 und 1,0 ergänzt. Für die Gültigkeit der Gleichung gilt jedoch grundsätzlich:

- a) Die Flammenhöhe muß deutlich niedriger sein als die Rauchschiichtunterkante.
- b) Die Brandausdehnung in ihrer Länge und Breite muß in etwa gleich sein.
- c) Die Deckenhöhe muß hoch genug sein, d. h. der Brand ist klein im Verhältnis zur Raumgröße.

Im NFPA-Handbuch /21/ werden zwei weitere Formeln angegeben, deren Anwendungsbereiche sich jeweils daraus ergeben, daß der Massenstrom entweder im Flammen- oder im Ähnlichkeitsbereich ermittelt werden soll. Diesbezüglich wurde eine Wärmefreisetzungsrates mit einem im NFPA Code bestimmten Wert verglichen, der auf Messungen von Strömungsprofilen und Temperaturen beruht, worauf hier nicht weiter eingegangen wird.

Schneider, Oswald und Max /23/ erwähnen Maßnahmen mit Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA), die zur Unterstützung bei Einsätzen der Feuerwehr dienen sollen. Als Schutzziele werden hier sowohl die Rettung von Personen als auch die von wertvollen Gütern und Einrichtungen genannt. Zu den weiteren Schutzzielen gehören die Verhinderung der Brandausbreitung und die der Folgeschäden eines Brandes ebenso wie das Ablöschen selbst. Nicht zu vernachlässigen sind Maßnahmen zum Schutz der Umwelt. Außerdem sind die Evakuierungszeit, die Höhe der raucharmen Schicht sowie die Sichtbarkeit bzw. die Sichtweite in einem Raum von Bedeutung.

Auch auf die Interventionszeit der zuständigen Feuerwehr als bedeutendem Faktor wird hingewiesen.

Bemessungsbrände für die genannten Festlegungen werden in der DIN 18232 angegeben. Von besonderer Bedeutung und deshalb maßgebend bei einem Brand sind die betroffenen Flächen und Ausdehnungen sowie die entsprechenden Leistungen eines Brandes. In Tabellen werden entsprechende Werte wiedergegeben. Es ergeben sich daraus Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, die bei Werten von 0,15 m/min als klein, bei Werten von 0,25 m/min als mittel und bei Werten von 0,45 m/min als groß bezeichnet werden. Bei Einbringung einer spez. Brandleistung in kW/m² in die Rauchgasschicht wurden ca. 80% als Konvektion und ca. 20% als Strahlung angenommen. Für die Modellvorstellung wird als „design fire“ in Atrien, Bahnhöfen oder Einkaufspassagen i.a. ein 5 MW-Brand angenommen. Die Annahme eines 50 MW-Brandes wäre zu groß, weil dadurch die berechneten Evakuierungszeiten für den Ernstfall weit geringer ausfallen würden und nicht mehr eingehalten werden könnten. In diesem Zusammenhang wird außerdem mit der Angabe von Gleichungen über den Feuerplume und die Rauchableitung durch horizontale und vertikale Öffnungen in Räumen sowie über die Höhe der Temperaturen als auch über die entstehenden Rauchgase berichtet.

Seifert und Stein /24/ berichten, daß für die Rauchfreihaltung von Rettungswegen über einen gewissen Zeitraum zunehmend der Nachweis mit realen Rauchversuchen gefordert wird. Als vorrangige Ziele für die Rauchbeherrschung werden in diesem Zusammenhang die Rauchfreihaltung von Rettungswegen, die Schaffung einer raucharmen Schicht zur Unterstützung der Feuerwehr, die Begrenzung der Feuer- und Rauchausbreitung sowie der Schutz von Gebäuden und Einrichtungen aufgeführt. Bei der Modellvorstellung eines Brandes wird in dieser Arbeit ebenfalls in drei Bereiche unterschieden, die hier „Feuerplume“, weiter stromabwärts Flammenzone und im weiteren Verlauf „Rauchplume“ genannt werden. In diesen Bereichen ändert sich der Massenstrom in vertikaler Richtung proportional mit dem Abstand wie $z^{5/3}$ und mit der Wärmeleistung wie $\dot{Q}^{1/3}$.

Bei der Modellierung von Entrauchungskonzepten werden Brandbemessungsszenarien festgelegt. Im Unterschied zu der natürlichen Entrauchung, bei der als treibende

Kraft der Druckunterschied (Temperatur-, Dichte-) zwischen der Heißgasschicht und der Umgebung genutzt wird, ist es bei der maschinellen Entrauchung notwendig, mit einem Ventilator einen festgelegten Volumenstrom abzuführen. In beiden Fällen ist jedoch unbedingt eine genügende Frischluftzufuhr erforderlich. Sogenannte Kaltrauchversuche können lediglich Hinweise für Strömungen in den betreffenden Räumen liefern. Aufgrund des fehlenden Auftriebes bei kaltem Rauch ist es jedoch nicht möglich, mit derartigem Nebel die Wirksamkeit einer RWA im Brandfall zu prüfen. Bei realen Bränden dagegen werden Wärme und Rauch gleichzeitig freigesetzt. Aus dieser Erkenntnis heraus erscheint es deshalb besonders wichtig, daß einerseits der Brandrauch realistisch nachgebildet und andererseits die jeweils vorherrschende Schichtuntergrenze des Brandrauches bestimmt wird. Eine evtl. Extrapolation der Versuchsergebnisse auf die Bedingungen des Bemessungsbrandes sollte ebenfalls durchgeführt werden.

Im Falle der natürlichen Entrauchung ändert sich die Rauchschtichtgrenze mit zunehmender Wärmeleistung nur unwesentlich, während bei maschineller Entrauchung die Rauchschticht von der Wärmeleistung in höherem Maße beeinflußt wird. Die Wetterbedingungen und hier insbesondere der Winddruck auf das entsprechende Gebäude sowie die Temperatur- und Dichteunterschiede spielen bei der Beurteilung eines Entrauchungskonzeptes eine wichtige Rolle. Ebenso sollte in einem Gebäude der Rauch ungehindert bis zur Decke aufsteigen können. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird diesbezüglich über ein Prüfverfahren berichtet, bei dem Prüfrauch mit einem Gebläsebrenner mit bis zu einer Leistung von 150 kW erzeugt und einem Kaltluftvolumenstrom mit einer Geschwindigkeit von 1,2 m³/s als sogenannte Wärmequelle zugeführt wurde. Außerdem wurde ein sichtbares Aerosol als Tracer-Rauch dem Strom zugemischt, um eine bessere Beobachtung des Rauches zu ermöglichen. Die Rauchausbreitung und die Rauchschtichtgrenze wurden mittels Meßketten für die Temperatur und gleichzeitiger Messung der CO₂-Konzentration bestimmt. Die Dauer eines Versuches dauerte zwischen 20 min und 60 min. Dabei wurde festgestellt, daß der Plumevolumenstrom größer und die Temperatur der Rauchfahne kleiner waren als bei einem realen Brand. In Bildern wurden die entsprechenden Ergebnisse dargestellt. Versuche mit einer Flüssigkeitslache (gilt in Australien als Norm) bestätigten die Eignung der durchgeführten Gasbrenner-Rauchversuche. Signifikante Unterschiede zwischen Modellvorhersagen und Testergebnissen erfordern jedoch

eine genauere Untersuchung. Praxisnahe Versuche könnten nähere Aufschlüsse darüber geben, ob ein System gemäß der Auslegung auch tatsächlich funktionieren kann.

Nach Gerhardt /25/ ist die Sicherstellung der Rauchfreihaltung in komplexen Räumen im Brandfall auch für einen längeren Zeitraum möglich. Dabei herrscht unter den Fachleuten Einigkeit in der Notwendigkeit des Einsatzes von Entrauchungsmaßnahmen, wobei die Auslegungen über die erforderlichen Maßnahmen offensichtlich erhebliche Unterschiede aufweisen. Die Berechnungen werden häufig mit Hilfe von Zonenmodellen durchgeführt, aber es werden auch Feldmodelle eingesetzt. Zu den Grundlagen der Modelle gehören Angaben über die Lufteinströmung in den Plume und zur Plumeströmung selbst. Bei einer Simulation im Modellmaßstab müssen Ähnlichkeitskriterien und bei experimentellen Modelluntersuchungen realitätsnahe Temperaturen berücksichtigt werden. Eine Erwärmung der Luft und die Beimengung von Nebelfluid werden auch von diesem Autor für die Simulation eines Brandes als nicht ausreichend betrachtet.

Ostertag und Zitzelsberger /26/ berichten über Verfahren zur Rauchfreihaltung von innenliegenden Sicherheitstreppe nräumen als notwendige vertikale Rettungswege in Verbindung mit einer Überdruckbelüftung, die ein hohes Maß an Sicherheit bieten kann. Bei Schleusen im Gebäude tritt jedoch immer ein geringer Rauchanteil in den Treppenraum. Die Bauvorschriften in NRW verlangen deshalb eine Luftleistung $V_L = \text{Höhe}^{1,5} * \text{Breite} * \text{Faktor K}$, wobei zusätzlich eine Temperaturabhängigkeit zu beachten ist. Bei einem Brandfall darf an einer geschlossenen Tür (2m^2) nicht mehr als ein Druck von 50 Pa anliegen, damit diese noch von einer Person geöffnet werden kann. Infolge unterschiedlicher Temperaturen von innen (warm) nach außen (kalt) kann jedoch im Treppenhaus ein Unterdruck entstehen, der bei einer vorhandenen Öffnung zum Brandraum Gase einsaugen würde, was ein enormes Gefährdungspotential darstellen könnte. Deshalb sind Maßnahmen erforderlich, die gewährleisten, daß bei allen möglichen Außentemperaturen jederzeit im Treppenraum ein Überdruck zwischen 25 Pa und 50 Pa herrscht. Diesbezüglich werden Lösungsansätze aufgezeigt. Ein möglicher Ansatz wäre z. B. die Unterteilung von einem in mehrere Treppenabschnitte und ein anderer die Erzeugung eines Druckgewinnes durch eine mas-

sive Luftdurchströmung von unten. Durch eine Nachbildung im Modellmaßstab kann diesbezüglich eine Überprüfung der Ergebnisse stattfinden.

He und Fernando /27/ beschreiben ebenfalls die Ermittlung der Rauchsichthöhe von Bränden in Räumen, d.h. die experimentelle Bestimmung der Rauchsichtgrenze. Die Rauchsichte selbst wird durch die Konvektion und die Diffusion bestimmt. Die zu bestimmende Temperaturverteilung ist abhängig vom Wärmetransport durch die Konvektion, die Leitung und die Strahlung. Da bei der Bestimmung meistens keine Übereinstimmung erzielt werden konnte, sind Untersuchungen diesbezüglich dringend notwendig.

Bei Botlan /28/ wurden zwei Versuchsreihen zur Bestimmung der Rauchsichtdicke in einem Raum mit einer Grundfläche von 7 m x 7 m und einer Höhe jeweils zwischen 3 m und 6,3 m durchgeführt. Eine Türöffnung im Raum war 2,05 m x 1,33 m (2,73 m²) groß, eine weitere Öffnung in einem Vorraum betrug 1,33 m². Um Temperaturverteilungen im Versuchsraum messen zu können, wurden Thermoelementketten mit je 10 Elementen installiert. Als Brandstoffe wurden Propan oder Alkohol verwendet. Die Wärmeleistung des jeweiligen Brandes variierte dabei von 100 kW bis zu 400 kW. In Tabellen und Bildern wurden die einzelnen Parameter sowie die Temperatur, die Rauchsichthöhe und weitere Meßdaten angegeben. Da teilweise Strömungen im Raum vorhanden waren, war es besonders schwierig ein Gleichgewicht zwischen Brand und Rauchsicht herzustellen. Sowohl die Rauchsichthöhe als auch die Rauchsichtdicke schwankte bei den Versuchen je nach vorgegebenem Parameter wie z. B. der Brandgröße, der Raumhöhe oder dem Öffnungsquerschnitt für die zugeführte Luft. Einige nicht näher bezeichnete Einflüsse auf die Effektivität der Entrauchung müssen noch analysiert werden.

Chow und Lo /29/ betrachten anhand eines Modells im Maßstab 1:25 einer 3-geschossigen Mall den Füllprozeß mit Rauch in einem Atrium. Unter der Annahme einer konstant gehaltenen Froude-Zahl werden die Luftgeschwindigkeit, die Temperatur und die Rauchsichtdicke miteinander korreliert und auf diese Art empirische Beziehungen hergeleitet. Ein Zonenmodell wurde zur Bestätigung herangezogen. Bei insgesamt 10 Testversuchen wurden drei Ventilationsbedingungen festgelegt. Bei der Durchführung eines 1,6 kW Modellbrandes, dies entspräche real einem 5 MW

Brand, wurde als Brandstoff Methanol verwendet. Diesem „sauberen“ Feuer wurde zur Sichtbarmachung des Rauches Schießpulver zugeführt. Zur Temperaturmessung wurden Chromel-Alumel Thermoelemente verwendet. Die Geschwindigkeitsverteilung wurde mit Hitzdrahtanemometern gemessen und der Massenstrom des Rauches wurde aus der Ventilationsfläche und der Temperatur bestimmt. Die Höhe der Rauchschiicht wurde durch einen Maßstab angezeigt. In Bildern wird die Abhängigkeit der Rauchschiichthöhe von der Ventilation und vom Brand dargestellt. Die Ergebnisse des berechneten und des gemessenen Massenstromes werden als gut übereinstimmend bezeichnet. Bei einem Versuch war in einem Zeitraum von 3,5 min der Reservoir-Raum und nach einer Zeit von 5 min das gesamte Atrium mit Rauch gefüllt. Die Kontrolle der sich bildenden Rauchschiicht war jedoch nicht gut möglich. Für alle durchgeführten Testversuche wurde in Bildern die Lage der Rauchschiicht aufgetragen. Zum Vergleich wurde ein Zonenmodell (CCFM.VENTS) mit einem 5MW-Brand für die Simulation im Atrium gewählt. Die berechnete Rauchschiicht entwickelte sich dabei schneller als die im Experiment. Bei einem 1 MW Brandversuch wurde dagegen eine bessere Übereinstimmung mit der Rechnung festgestellt. Zusätzlich wird in dieser Arbeit über den Einfluß von Brandklappen berichtet.

Chow et al. /30/ führten in einem Atrium mit den äußeren (und inneren) Abmessungen $L \times B \times H : 27,6 \text{ m} (22,4 \text{ m}) \times 18,1 \text{ m} (11,9 \text{ m}) \times 30,6 \text{ m} (27 \text{ m})$ Versuche durch. Dabei wurden die Rauchausbreitung und die natürliche Ventilation, die Rauchabzugssysteme und die Sprinklersysteme im oberen Teil des Atriums sowie die vorhandenen Branddetektionssysteme studiert. Im Dach des Atriums befanden sich 8 Öffnungen mit einer Fläche von $1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ sowie 4 Ventilatoren. Die Beobachtung der Versuche war in 6 Höhen von Korridoren aus mit jeweils 9 Fenstern möglich. An zuvor festgelegten Meßstellen wurden Branddetektoren, Thermoelemente, Druckaufnehmer und Geschwindigkeitssensoren angebracht. Ebenfalls wurden Proben zur chemischen Analyse vorgesehen. Für die Temperaturmessungen in der Rauchschiicht wurden Gestelle und zum Wiegen des Brandstoffs ein Wägesystem installiert. Außerdem wurden 4 Videokameras zur Beobachtung des Rauchanstieges eingebaut. Mit Hilfe dieser Messungen wurde der Massenverlust des Brandstoffes, das zeitliche Absinken der Rauchschiicht und die vertikalen Temperaturverteilungen bestimmt. In einem Bild wurde die Anordnung der 20 Thermoelemente mit jeweils 0,5 mm Durchmesser eingezeichnet. Die Meßstellen befanden sich beginnend 1 m un-

terhalb des Daches im Abstand von jeweils 1 m. In 2 Versuchsreihen von je 20 Versuchen wurden auf dem Boden Flüssigkeitsbrände, sogenannte „pool fire“, mit einem Durchmesser von 0,6 m und von 1 m durchgeführt. In 2 Tabellen wurden als Meßergebnisse neben der Versuchsnummer nachfolgend genannte Größen aufgeführt: die Masse des verwendeten Brandstoffs (Diesel) von 1,9 kg bis 11,5 kg, die zugehörige Brenndauer von 4,5 min bis 17 min, die Umgebungstemperatur von 8 °C bis 32 °C und die Zeitdauer, in der die Rauchschrift jeweils eine der 6 aufgeführten Höhen erreicht hatte. In weiteren Bildern ist die Rauchschrifthöhe, die Temperatur, die Brandstoffmasse und die Wärmefreisetzung bis zu einer Leistung von ca. 550 kW in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragen.

„Pool fire“ mit dem Brandstoff Diesel (42000 kJ/kg) können nach /30/ als sogenannte „t²-Brände“ modelliert werden. Dazu wurde ein von Zukoski, Kubota und Cetegen entwickeltes Modell angegeben, das Gleichungen für die Wärmefreisetzung, den Lufteintritt, die Säulenhöhe und das Auffüllen des Raumes mit Rauch beinhaltet. Die Rauchschriften sind bei den Untersuchungen sehr schwierig zu bestimmen und müssen sorgfältig beobachtet sowie mittels Temperatur- und Rauchdichtemessung bestimmt werden, was in einzelnen Fotos dargestellt wurde. Von den Autoren wurde letztendlich eine Übereinstimmung zwischen den Experimenten und dem einfachen Rechenmodell festgestellt.

Chow und Cui /31 / berichten über moderne Gebäude, die häufig mit Atrien ausgestattet werden. Dabei werden 3 Typen unterschieden. Als Typ 1 wird die kubische Form mit ca. 20 m Länge (60% der Gebäude) bezeichnet. Der Typ 2 ist schmal und sehr lang (25% der Gebäude). Typ 3 dagegen ist mehr als doppelt so hoch wie breit (15% der Gebäude). Das Rechenmodell FIRST wird dazu verwendet, um einen Brand in einem derartigen Gebäude zu simulieren. Mittels eines derartigen Zonen-Modells wird mittels Gleichungen der Wärme- und der Massentransport vom Brandobjekt in die entstehende Rauchschrift simuliert. Für diese Betrachtungen werden nachfolgend sechs Alternativen für die Berechnung mit einem Plume-Modell angegeben. Die zugehörigen Gleichungen und Bereichsgrenzen sind in den jeweiligen Arbeiten aufgeführt.

---- nach Morton-Taylor-Turner /16/ geht der Plume von einer Brandfläche mit virtuellem Ursprung aus

- nach Morton-Taylor-Turner /16/ geht der Plume von einer Punktquelle aus.
- nach McCaffrey /32/ werden bei der Ausbreitung des Plume drei Bereiche angegeben
- nach Cetegen, Zukoski, Kubota /33/ werden Plumegleichungen mit experimentell ermittelten Daten und drei unterschiedlichen Massenflußraten verwendet
- nach Delichatsios /34/ wurden Plumegleichungen aus empirischen Daten ermittelt. Für die Massenflußraten wurden drei unterschiedliche Referenzhöhen verwendet.
- nach Tokunaga, Sakai, Kawagoe, Tanaka, Hasemi /35/ wurden die Plumegleichungen aus empirischen Daten ermittelt. Bei der Ausbreitung wurde ähnlich wie bei McCaffrey von drei Bereichen ausgegangen.

Bei den experimentellen Untersuchungen in unterschiedlichen geometrischen Räumen bis zu einem Volumen von 2000 m³ wurden Wärmefreisetzungsraten zwischen 1 MW und 5 MW bei gleichbleibender und zu Beginn mit t² ansteigender Verbrennung festgelegt. Die Ergebnisse der berechneten Rauchschichtdicken wurden in entsprechenden Bildern dargestellt. Außerdem wurde darauf hingewiesen, daß es zum Vergleich mit Modellvorstellungen notwendig ist, weitere Versuche in derartigen Räumen durchzuführen.

Matsuyama, Misawa, und Wakamatsu /36/ leiteten Gleichungen ab, um Rauchschichthöhen und Temperaturen in einem Brandraum bestimmen zu können. Die Berechnungen mit einem Zonen-Modell wurden den experimentell gewonnenen Daten aus Großversuchen gegenübergestellt. Beispielsweise wurden die Brandgröße, die Fläche und die Deckenhöhe verifiziert. Berechnungen mit analytischen Formeln wurden mit denen von Tanaka verglichen. Die verwendeten Formeln lieferten bei den Berechnungen Ergebnisse, die für die Evakuierung von Personen in Gebäuden als sehr nützlich angesehen wurden.

Außerdem wurde mit einem Modell für einen Brand im Anfangsstadium die Rauchschichtdicke bzw. -höhe sowie die Temperatur hergeleitet und entsprechende Gleichungen dafür angegeben. Zusätzlich wurden der Wärmestrom, der Massenstrom, die Massen- und Energiebilanz der Rauchschicht und die Temperaturen in geschlos-

senen Räumen berechnet. Vergleiche mit experimentellen Daten aus Versuchen in verschiedenen großen Räumen wurden mit Ergebnissen in Tabellen und Bildern veranschaulicht. So wurden z. B. die Rauchsichthöhen untereinander verglichen sowie über der Versuchszeit anschaulich dargestellt. Die Ergebnisse selbst wurden als konservativ bezeichnet und können entsprechend für die Sicherheit bei der Evakuierung von Personen eingesetzt werden.

Bei Kim, Han und Yoon /37/ wurde die Rauchausbreitung als ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Betrachtung der Sicherheit von Personen in Gebäuden beschrieben. Im wesentlichen wurde bei der Ausbreitung des Rauches der Plume in 2 Phasen aufgeteilt. Die erste Phase betrifft den Teil der Strömung bis zum Auftreffen des Strahles auf eine Wand und die zweite Phase den Teil der Strömung nach dem Auftreffen auf diese. Außerdem wurde bei der Ausbreitung eine Zone mit relativ heissem Rauch und eine weitere Zone mit kalter Luft unterschieden. Diese und weitere Annahmen aus einigen Experimenten sowie Versuchsdaten (Grundannahmen) aus anderen Versuchsreihen wurden in Berechnungen bei mehreren Zonenmodellen berücksichtigt. Bei den Messungen selbst wurden Fotodetektoren und Thermolemente verwendet. Weiterhin wurden die Vorteile der Sichtbarmachung der Strömung durch einen Argon-Ionen Laser erläutert. Bei diesen Experimenten wurde kein Rauchgenerator eingesetzt. In einem Flur mit den Abmessungen 2,83m x 11,83m x 2,3 m wurde ein Brenner für Benzin (43900 kJ/kg) mit einem Durchmesser von 15 cm verwendet. Für die Messung des „ceiling jet“ unterhalb der Decke wurden 13 Thermolemente jeweils 5 cm unterhalb der Decke und für die Messung der Rauchverteilung 3 mal 11 Thermolemente vertikal im Flur installiert. Die max. Wärmefreisetzung des Brandes betrug bei diesen Versuchen ca. 9 kW. Bei den Untersuchungen nahm naturgemäß die Geschwindigkeit des Rauches mit zunehmender Entfernung von der Brandquelle ab. Anhand von Bildern wurde zur Verdeutlichung die Anordnung der Meßelemente und die entstandene Rauchsicht dargestellt.

Kim und Han /38/ untersuchten sowohl rechnerisch mit Zonen-Modellen als auch experimentell durch Versuche die Rauchsichtbildung in Gebäuden. Eine experimentelle Methode nutzte einen Laser und Messungen mit Thermolementen, um eine Rauchsicht in einem Raum abzuschätzen. Wie in /37/ bereits berichtet wurde in einem Flur mit einer Fläche von 2,83 m x 11,83 m und einer Höhe von 2,3 m jeweils

mit einem Pool-Brenner mit dem Durchmesser von 20 cm oder 15 cm ein Brand simuliert. Unterhalb der Decke wurden in einem Abstand von 5 cm Thermoelemente installiert. Außerdem wurden herunterhängende Metallstäbe sowie ein 5 W Argon-Laser zu Messungen herangezogen, um das Fortschreiten des Rauches anhand von Videoaufnahmen gut beobachten zu können. Einzelbilder dienten zur Veranschaulichung dieses Vorganges. Die Meßapparatur im Flur mußte bei diesen Versuchen wegen einer nur geringen Wärmefreisetzung von 9,2 kW nicht zusätzlich geschützt werden. Es wurde festgestellt, daß die optisch mit Videogeräten ermittelte Geschwindigkeit der Rauchgase zwischen 10% und 18% höher war als die aus den Messungen mit den Thermoelementen festgestellte Geschwindigkeit. Der Laser selbst wurde während des Versuches als vorteilhaft beschrieben, wenn während der Tests der Strömung kein Rauch zugesetzt wurde und gute Sichtverhältnisse herrschten.

Wen und Huang /39/ stellten in ihrer Arbeit Verbrennungsmodelle, Gleichgewichtsmethoden, Ruß- und Strahlungsmodelle sowie den konvektiven Wärmetransport vor. Dabei werden experimentelle Untersuchungen in zwei Räumen erwähnt, bei denen Temperaturen, Geschwindigkeiten und Wärmeströme gemessen wurden. In Bildern wurden die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

Fu und Hadjisophocleous /40/ entwickelten ein Modell zur Brandentwicklung und Rauchausbreitung in Gebäuden. Für das verwendete Zweizonenmodell wurden zur Berechnung 4 unabhängige Variablen gewählt, nämlich der Druck, die Enthalpie der oberen Schicht und die jeweilige Masse sowohl der oberen als auch der unteren Schicht im Raum. Mit diesen Annahmen wurden Differentialgleichungen aufgestellt. Ein Verbrennungsmodell wurde zur Berechnung der Wärmefreisetzung genutzt. Mittels eines Fließmodells wurde der Eintritt der angesaugten Gase in den Plume beschrieben. Das Einströmen der benötigten Luft erfolgte durch eine Öffnung wie z. B. eine Tür oder ein Fenster. Außerdem wurden Deckenströmungen erfaßt und die mechanische Ventilation zur Rauchfreihaltung herangezogen. Zusätzlich wurden ein Wärmetransportmodell mit der Aufteilung in Wärmeleitung, in konvektive Wärme und in Strahlungswärme sowie numerische Berechnungsmethoden erwähnt. In Auswertungsbeispielen für ein Einraum- und ein Zweiraummodell wurden Ein- und Ausga-

bedaten angegeben und dabei festgestellt, daß Modelle evtl. günstigere Aussagen liefern können als experimentelle Untersuchungen.

Ingason /41/ führte Tests mit mehrwandigen Kartons im Klein- und Großmaßstab durch. Für derartige Versuche konnten mit Korrelationen der Flamme mit unterschiedlichen Eingangsdaten wie beispielsweise der Temperatur, der Geschwindigkeit u. a. einerseits die Sprinklerauslösezeiten bestimmt und andererseits die Brandausbreitung innerhalb verschiedener Lagergeometrien vorhergesagt werden. Die Studie zeigte, daß es möglich ist, die Strömungsbedingungen und die Flammenhöhen zu reproduzieren. Die Erstellung theoretischer Beziehungen wurden mit dem großen allgemeinen Interesse begründet, weil Brandversuche in dieser Art sehr hohe Kosten verursachen.

Nach Ausführungen von John /42/ werden durch die Abführung von Brandrauch aus brennenden Gebäuden höhere Chancen bei der Rettung von Personen eingeräumt. Gleichzeitig wurde bei derartigen Fällen von einer Verminderung der auftretenden Brandschäden ausgegangen. Die Entrauchung von Räumen erfolgt bei Brandereignissen entweder durch Zu- und Abluftöffnungen oder durch mechanische Abzugseinrichtungen. Für die Auslegung ist in jedem Fall der entstehende Brandrauchvolumenstrom sowie die zugeführte Luft in den Brandraum maßgebend. Um derartige Eingangsdaten zu erhalten wurden verschiedene Untersuchungen zur Bestimmung von Volumenströmen und Temperaturen durchgeführt.

Bei mehreren Versuchen wurden sowohl an einem brennenden Tank mit Gasöl III (Heizöl EL) mit einem Durchmesser von 2 m als auch an einem brennenden PKW und an einer brennenden Wohnraumeinrichtung jeweils für rauchfreie Zonen in Höhen von 2 m und 4 m die Höhe des Massenstromes, die Temperatur und der abzuführende Brandrauch-Luft-Volumenstrom ermittelt.

In /43/ wurden insbesondere für Gebäude mit großen Personenansammlungen wirkungsvolle Brandschutzkonzepte für die Rettung im Brandfall als wichtig erachtet. Der bei einem Brand entstehende Brandrauch und die dadurch bedingten Sichtbehinderungen müssen bei der Bemessung in derartigen Konzepten berücksichtigt werden. Da nur unzureichende theoretische Kenntnisse über Rauchfreisetzungsraten

vorliegen, wurden bei Versuchen Einrichtungsgegenstände in Brand gesetzt und die entstehenden Rauchmengen untersucht. Als Ergebnisse wurden die Temperaturverläufe und die jeweilige Höhe der rauchfreien Schicht für Räume mit einem Volumen von 200 m³, 800 m³ und 1600 m³ mit einer Höhe von jeweils 4 m in Bildern dargestellt. Die Brandausbreitung selbst erfolgte mit einer langsamen Geschwindigkeit von 0,12 m/min. Die Energiefreisetzungsrate wurde bei diesen Untersuchungen mit 300 kW/m² bei 4-fachem Luftwechsel angegeben. Für die Sicherheit von Personen bezüglich der Rauchsichthöhe im Raum konnte abgeleitet werden, daß sich der Zeitgewinn zur Rettung bei größer werdenden Räumen wesentlich erhöht. Beim Einsatz von Brandschutzklappen (Schließzeiten 3 min bis 4,5 min) während der Versuche wurde der bei den vorherigen Versuchen durch den Luftwechsel erreichte Zeitgewinn nicht mehr wirksam. Zum besseren Verständnis wurden in mehreren Bildern die Temperaturverläufe im Plume und die Höhe der rauchfreien Schicht nach Erkenntnissen von Thomas et al. /13/ dargestellt. Zusätzlich wurde das Auslösen von Sprinklern unterhalb der Decke erwähnt.

In /44/ wurde darauf hingewiesen, daß die in Brandschutzgutachten enthaltenen Vorgaben häufig durch Brand- bzw. Rauchversuche nachgestellt werden, um die berechneten Ergebnisse mit der Wirksamkeit und/oder Funktionsfähigkeit der installierten Vorkehrungen zu vergleichen. Dies gilt insbesondere bei der Beurteilung solcher Rauchabzugssysteme, die nicht normativ geregelt oder ausgelegt wurden. Bei konkreten Anforderungen aus baurechtlicher Sicht oder genormten Bemessungsansätzen sind jedoch keine Versuche erforderlich. Allgemein dienen derartige Brand- bzw. Rauchversuche zur Überprüfung der Sicherheit von Rettungswegen in Gebäuden mit außergewöhnlichen Randbedingungen. Zu dieser Art von Gebäuden gehören z. B. Atrien, Verkaufsstätten, Industriebauten oder auch Versammlungsstätten. Die mit kaltem Rauch durchgeführten Untersuchungen und die daraus gewonnenen Aussagen sind bezüglich der Abführung von heißem Brandrauch nur begrenzt gültig. Weiterhin wird darauf hingewiesen, daß keine Methoden bekannt sind, mit denen experimentelle Untersuchungen für die Beurteilung der Sichtweite in Rauchsichten angewendet werden können.

In diesem Beitrag werden dennoch die entwickelten Theorien und die Experimente als genügend abgesichert betrachtet. Die nach oben gerichtete Konvektionsströmung

in Form einer Rauchgassäule (Plume) breitet sich unter der Decke aus. Die Strömungsweglänge ist abhängig von der Brandintensität und der Einmischung der Umgebungsluft in den Plume, dessen Temperatur stromabwärts in vertikaler Richtung abnimmt. Geometrische Bedingungen sowie evtl. vorhandene Schichtungen sind dabei jedoch zu berücksichtigen. Einerseits bringt eine zu geringe Brandintensität eine nicht ausreichend hohe Rauchgasproduktion, um einen nach oben gerichteten Plume aufrechtzuerhalten und andererseits verursacht ein zu hoher nach oben gerichteter Impuls undefinierbare Verhältnisse im Brandraum. Beide Möglichkeiten sind jedoch nicht notwendigerweise mit einem realen Brandablauf zu vergleichen. Weiterhin ist zu beachten, daß bei der maschinellen Entrauchung ein definierter Volumenstrom abgesaugt wird, was bei einer höheren Rauchgastemperatur einen geringeren Massenstrom ergibt, so daß deshalb die Möglichkeit einer weiteren Absenkung der sich bildenden Rauchsicht besteht. Auch bei natürlich wirkenden Abzügen führt die abnehmende Dichte des Brandrauches zu einer Begrenzung. Es wird weiterhin darauf hingewiesen, daß Versuche mit kaltem Rauch nicht zu einem gewünschten Ergebnis führten. Eine Vereinfachung bei derartigen Versuchen führt ohne eine differenzierte Betrachtung nur zu qualitativen Aussagen.

Bei Hinkley /45/ wurden die von Thomas et al. /13/ beschriebenen Systeme zur Entrauchung in Brandräumen genannt. Die Rauchproduktion wurde dabei hauptsächlich durch den Lufteintritt in die Flamme und die darüber aufsteigende Rauchsäule - den Plume - verursacht.

Sowohl für kleine als auch für größere Feuer mit thermischen Plumes wurde von Yih et al. /46/ eine Formel für die Masse der eingesaugten Luft angegeben. Die ingenieurmäßige Form des Massenstromes wurde angegeben mit $\dot{m} = 0,188 * P * y^{3/2}$ (m=produzierte Masse; P=Brandumfang; y=effektive Höhe der klaren Schicht). Aus Experimenten in unterschiedlich hohen Räumen oder Hallen wurden weitere Gleichungen mit hiervon geringfügig abweichenden Konstanten und Exponenten für P und y ermittelt. Die Wärmefreisetzung variierten von 8 kW bis zu 3 MW (zwischen 250 kW/m² und 630 kW/m²).

Bei Keough /47/, der in einem Flugzeughangar über 100 Versuche durchführte, betrug die Wärmefreisetzung bis zu 30 MW (bis 1,8 MW/m²). Die Ergebnisse, in Bildern dargestellt, zeigen die gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment.

Von Zukoski /7/ wurden mit Gasbrennern mit den Durchmessern 0,5 m; 0,19 m und 0,1 m Versuche durchgeführt. Die Höhe des Flammenursprungs betrug 1 m über dem Boden. Dabei ergaben sich unterschiedliche Flammenhöhen. Die bei diesen Untersuchungen entstandenen spezifischen Wärmefreisetzungen betrugen zwischen ca. 200 kW/m² und ca. 750 kW/m².

In Abhängigkeit der Entfernung über dem Brenner wurden die bereits erwähnten drei Bereiche festgelegt, die turbulente Flammenzone, der Übergangsbereich zu den Flammenspitzen und die Säule über den Flammenspitzen. Die für diesen Fall aufgestellte Beziehung wurde mit $\dot{m} = 0,52 * D * z^{3/4}$ angegeben (D=Brennerdurchmesser; z=Höhe der rauchfreien Schicht). Auf große Gebäude extrapoliert ergaben sich mit dieser Gleichung jedoch zu geringe Werte für die Massenflußrate. Unterschiedlich durchgeführte Experimente anderer Autoren führten zu weiteren Abweichungen in den Gleichungen.

In diesem Zusammenhang führten Cox und Chitty /12/ Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen mit einem quadratischen (d=0,3m) Brenner durch. Die Abweichungen der durch Korrelationen erhaltenen Ergebnisse nahmen mit Zunahme der Höhe der Rauchsicht über dem Boden immer mehr ab. Die Ergebnisse stimmten jedoch mit denen von Zukoski wegen der Verwendung von Gasbrennern (keine Holzkrippen) gut überein.

Heskestad /48/ analysierte die erhaltenen Ergebnisse, um ingenieurmäßige Beziehungen aufzustellen. Er definierte den Abstand z über den Flammenspitzen, den Branddurchmesser D und die abgegebene konvektive Wärmemenge \dot{Q} . Die so aufgestellte Gleichung wurde auch für größere Brände angegeben, obwohl die Größe y in vorherigen Gleichungen als der Abstand vom Boden definiert wurde.

Bei den Versuchen von Zukoski et al. /18/ sowie Cox und Chitty /12/ wurde in der Gleichung für den Massenstrom die Größe $y = z$ gesetzt. Je nach Brandgröße und

angewandeter Gleichung besteht jedoch die Möglichkeit einer Über- oder Unterschätzung des Massenstromes. Die bei Heskestad /48/ aufgeführten Beziehungen überschätzen z. B. den Massenstrom in höheren Gebäuden. Weiterhin besteht eine Abhängigkeit von der jeweils angenommenen Brandgröße. Aufgrund dieser unterschiedlichen Eingangsgrößen sind bei den Berechnungen insbesondere die bestehenden Anwendungsgrenzen zu beachten.

Von Theobald /49/ wurden spezifische Brandleistungen von 86 kW/m^2 bis 620 kW/m^2 als repräsentativ für Brände in Gebäuden angegeben. Bei Untersuchungen mit Polystyrol-Flaschen in Kartons auf Paletten wurde eine Abbrandrate von ca. $3,5 \text{ kg/s}$ gemessen. Dies implizierte eine Wärmemenge von 22 MW/m^2 mit einem konvektiven Anteil von nur ca. $3,5 \text{ MW/m}^2$. Bei einer brennenden Grundfläche von $2,28 \text{ m} \times 2,28 \text{ m}$, einer Lagerhöhe von $4,5 \text{ m}$ und einer 10 m hohen freien Aufstiegshöhe im Raum ergab sich damit ein Massenstrom von 60 kg/s oder bei anderen Eingangsdaten auch davon abweichende Massenströme. Teilweise wurden die Berechnungen durch die vorgegebenen Verhältnisse bei den Brandgrößen und Höhen bis zur Rauchschicht stark beeinflusst, d. h. einige Versuche waren für die Berechnungen eines Großbrandes und andere für die eines Kleinbrandes besser geeignet. Daraus wurde abgeleitet, daß die ermittelten Massenströme vielfach sowohl unterbewertet als auch überbewertet sein können. Aus diesen Erkenntnissen wurde geschlossen, daß weitere Untersuchungen zur Ermittlung von Grundlagen für die Bemessung der Abführung von Brandrauch notwendig erscheinen. Die bei einem Brandereignis vorhandene Brandstoffmenge wurde bei Thomas (Anhang in /49/) als wichtiger Faktor erachtet.

Hinkley /50/ berichtet von einem von Thomas et al. /13/ im Jahre 1963 aufgestellten 3-Zonen-Modell einer Rauchsäule. In diesem Modell wurden bereits in die für einen Brand mehrfach genannten maßgebenden drei Bereiche unterschieden, nämlich in den Bereich der Flamme über dem Brandherd, in den der heißen Rauchgassäule und in den der heißen Rauchgase unterhalb der Decke. Darüberhinaus spielen die Ventilationsbedingungen in einem Gebäude eine ebenso große Rolle und müssen bei den Berechnungen unbedingt mit berücksichtigt werden. Das Modell wurde auch für größere Brände zur Berechnung der Zunahme der Rauchschichtdicke mit zunehmender Branddauer verwendet. Für diese Modellrechnungen mangelt es jedoch an experimentell gemessenen Eingangsdaten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde weiterhin aufgeführt, daß bei Tanaka und Yamana /19, 20/ mit einer weiteren Formel der Eintritt von Luft in den Plume überprüft wurde. Diesbezügliche Versuche in einem Gebäude mit den Abmessungen 24 m x 30 m x 26 m Höhe zeigten gute Übereinstimmungen mit der Theorie. Zeitliche Änderungen der sich bildenden Rauchsicht wurden dabei jedoch nicht berücksichtigt. Die Massenansaugung des Plumes aus der Umgebung wurde mit der nachfolgenden Formel beschrieben: $\dot{m} = 0,188 * P * (h - d)^{3/2}$. Dabei ist P der Randumfang des Brandes; h ist die Höhe des Raumes und d ist eine von der Masse und der Temperatur der Gase, der Dichte und der Deckenfläche abhängige Größe der Schichtdicke. In beiden genannten Modellen breitete sich der Plume über dem Brandherd frei aus. Bei anderen geometrischen Raumverhältnissen werden die Modelle komplexer. Normalerweise wird bei Zonenmodellen angenommen, daß die heiße Gasschicht gut durchmischt ist und eine einheitliche Temperatur besitzt, was bei realen Bränden jedoch nicht unbedingt der Fall ist. Im Realfall erfolgt eine Schichtung der Gase bereits bei einem Temperaturunterschied von weniger als 5 K. Eine größere Zuströmrates des Massenstromes ist dann gegeben, wenn in der bereits erwähnten Gleichung aus den Versuchen die Größe (h-d) kleinere Werte annimmt als die berechneten Werte. Ein Vergleich der Schichtdicken in einem ventilierten Gebäude mit unterschiedlich durchgeführten Berechnungen zeigt, daß dadurch jedoch nur geringe Differenzen auftreten. Gute Übereinstimmung bei mechanischer Ventilation mit einem Volumenstrom von 6 m³/s ergab sich bei experimentellen Ergebnissen und einer vorher kalkulierten Schichtdicke. In mehreren Bildern wurden diesbezüglich verschiedene Fälle dargestellt.

Bei Reneke und Jones /51/ wurde die Notwendigkeit beschrieben, einen Vergleich zwischen Brandversuchsdaten und Modellberechnungen in Bezug auf Brandgefahren in Gebäuden durchzuführen. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Anwendungsbereiche verschiedener Modelle zu bestimmen. Es zeigte sich, daß für einen angenommenen Brand mit einer Leistung von 4 MW alle verwendeten Modelle als hinreichend genau bzw. zufriedenstellend erachtet wurden, für einen größeren Brand mit einer Leistung von 36 MW dagegen nicht mehr. Die Abweichungen betragen einerseits wenige Prozent und gingen andererseits bis zu einem Faktor von zwei bis drei.

Die dafür notwendigen Untersuchungen wurden in einem Raum mit den Abmessungen 3,4 m x 3,3 m x 3,05 m durchgeführt. Als Brandmaterialien wurde Dieselkraftstoff (45 kJ/g) in Wannen mit einer Kantenlänge von jeweils 84 cm und 62 cm sowie die festen Brandstoffe Holzkrippen (13 kJ/g) in 6 Lagen mit Stäben der Länge 1,9 m und PU-Stäbe (26 kJ/g) der Länge 1,8 m verwendet. Insgesamt wurden jeweils 12 Versuche mit und ohne Ventilation durchgeführt. Für alle Versuche wurden im einzelnen die Wärmefreisetzung, die Temperatur in der oberen Rauchschiicht, die Schichtdicke und die Decktemperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit gemessen und in Bildern dargestellt. Deutlich waren hierbei die von den unterschiedlichen Parametern abhängigen Meßwerte zu erkennen. Die Abweichung der oberen Grenzschiichttemperatur betrug ca. 50°C während die Heissgasschiicht mit derjenigen bei der natürlichen Ventilation gut übereinstimmte. Bei der Decktemperatur lag die Genauigkeit innerhalb von 75°C gegenüber den experimentellen Ergebnissen. Bei größeren Öffnungen und gleicher Brandlast war die jeweilige Wärmefreisetzung höher, so daß die Rauchschiicht anstieg. Dieser Trend wurde durch das Modell CFAST reproduziert. Bei Holzkrippen als Brandlast war der Ventilationseinfluß am deutlichsten. Für die Anwendung in der Praxis wurden kleinere Abweichungen der Berechnungen mit CFAST und den Experimenten als nicht so gravierend angesehen. Für die Versuche mit PU und Holzkrippen wurde eine Übereinstimmung bei den Temperaturen der oberen Rauchschiicht als sehr gut beschrieben. Bei der Berechnung jedoch wurden meist weniger Wärmeverluste angenommen als tatsächlich vorhanden waren. Daraus resultierten zu hohe Decktemperaturen. Bei allen Brandstoffen wurde die obere Schiichttemperatur bei erzwungener Ventilation besser vorherberechnet als bei natürlicher Ventilation. Trotz teilweise guter Ergebnisse zeigte der Vergleich von Modell und Experiment, daß noch viele Eingangsdaten für die Modellrechnung benötigt werden, was auch in anderen Veröffentlichungen bestätigt wird.

Steinert /52/ sieht die Notwendigkeit der Durchführung von sogenannten „Rauchversuchen“ bei der Beurteilung von Berechnungen für die Rauchfreiheit in Sonderbauten. Aus diesem Grund wurden experimentelle Brand- und Rauchversuche in einer großen Messehalle mit den Abmessungen 40 m * 100 m * 10 m durchgeführt. Bei den Untersuchungen mit Poolbränden wurden die Brandstoffe Isopropanol, Methanol und Benzin in jeweils vier unterschiedlich großen Wannen mit einem Inhalt zwischen 0,4 l und 5 l verwendet. Die berechneten Energiefreisetzungen bei diesen Poolbrän-

den mit Oberflächen von 0,04 m² bis 0,48 m² lagen je nach Brandstoff zwischen 23 kW und 393 kW. Durch das Betreiben zweier unterschiedlicher Nebelmaschinen in Bezug auf den Nachweis der Sichttrübung bei Poolbränden konnte kein Einfluß festgestellt werden. Das jeweilige Rauchpotential eines Brandes von Benzin bzw. Methanol gegenüber einem Brand von Isopropanol konnte mit dem Faktor 5 bzw. 1/10 angegeben werden.

Schneider /53/ verweist auf unterschiedliche Einflüsse von Bränden in Bauwerken. Unter diesem Gesichtspunkt wurden die Ausbreitung von Feuer und Rauch, die Brandeinwirkungen, das Verhalten der Baustoffe, die Räumungs- und Rettungsmaßnahmen sowie die Brandmeldung, die Brandbekämpfung und die erforderlichen Brandschutzmaßnahmen genannt. In einem Überblick wurden Zonen- und Feldmodelle miteinander verglichen und darüberhinaus grundlegende Annahmen zur Berechnung mit Modellen angegeben wie etwa die der Geometrie, der Lüftungsbedingungen und der Brandszenarien mit entsprechenden Temperatur- und Rauchverteilungen in Gebäuden. Darüberhinaus wurden Energie- und Massenbilanzen ebenso berücksichtigt wie die Druck- und Strömungsverhältnisse in Räumen im Falle eines Brandes. Die durchgeführten Modellberechnungen bezogen sich meistens auf unterschiedliche Energiefreisetzungsraten, die mit dem Heizwert und der Abbrandgeschwindigkeit berechnet wurden. Für die Modellierung in Brandräumen wurde insbesondere auf die bereits bei Brein /1/ erwähnten Annahmen, Gleichungen und Plume-Formeln hingewiesen.

Duong /54/ vergleicht einige Brandsimulationsmodelle (FIRST, BRI, FAST, CCFM) miteinander und stellt diese den experimentellen Untersuchungen von Keough /47/ in Australien gegenüber. Dabei wurde die Frage nach der Genauigkeit derartiger Modelle und nach dem Vertrauen in ihre Anwendung für die Brandsicherheit aufgeworfen. Die experimentellen Untersuchungen wurden in einer Halle mit den Abmessungen 54,2 m x 94 m x 15 m durchgeführt. Die eigentliche Testfläche in der Halle wurde durch Rauchvorhänge abgetrennt und betrug 20 m x 21 m. Die Gesamtfläche zur Dachentlüftung betrug 67 m². An mehreren Meßstellen wurden die Temperatur und die Geschwindigkeit der heißen Rauchgase gemessen. Als Brandstoff wurde Kerosin in quadratischen Wannen mit den Kantenlängen 1,33 m und 4,05 m verwendet. Für diese Versuchsanordnung wurde nach einer Brandzeit von 60 s die Abbrandrate mit 3,8 l / (min m²) angegeben. Die Wärmefreisetzung betrug je nach Wannengröße

4 MW und 36 MW, die zugehörigen Geschwindigkeiten betragen 2 m/s bis 3,8 m/s. Bei der Berechnung für einen Gasbrenner von 4 MW wurden je nach Simulationsmodell die Massenstromrate, der Wärmetransport oder die Dicke der Rauchschicht zu hoch oder zu niedrig vorausberechnet. Die erhaltenen Ergebnisse mit einem Fehler von bis zu 25 % wurden dabei noch als angemessen bezeichnet. Die berechneten Werte für Pool-Brände liegen dabei höher als die für Gasbrände. Bei einem Brand mit einer Wärmeleistung von 36 MW war jedoch kein Modell gut genug, weil bisher keine Experimente dieser Größenordnung durchgeführt wurden. Jedes Modell benötigt demnach Eingangsdaten, die nicht notwendigerweise unter den gleichen Voraussetzungen gefunden wurden. Alle Plume-Modelle beruhen dabei auf Annahmen von Bränden bis zur Größe von 300 kW, wobei jedes Modell seine eigenen Grenzen besitzt.

Von Matsuyama et al. /55/ wurde die Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} mit sogenannten „t²-Bränden“ beschrieben ($\dot{Q} = a \cdot t^2$). Der Faktor a wurde als Brandrate in kW/s² bezeichnet und t als die Zeit von Beginn der Zündung. Für die Berechnung der Rauchausbreitung wurden Zonenmodelle wie BRI2 und CFAST verwendet, die ebenfalls durch Experimente nachgeprüft wurden. In einem Raum mit den Abmessungen 7,9 m * 3,3 m * 2,7 m mit anschließenden Korridoren wurde als Brandquelle eine dreieckige Wanne auf einer Wägeeinrichtung installiert. Bei einem Vergleich wurden die mit der Sauerstoffsverbrauchsmethode und die mit der Massenverlustrate ermittelten Werte als gut übereinstimmend beschrieben. Für den Faktor a wurden Werte zwischen 0,0045 und 0,0079 kW/s² ermittelt. Die mit den beiden Modellen ermittelten Werte ergaben jedoch im Gegensatz zu den Versuchen eine schnellere Rauchentwicklung und einen höheren Temperaturanstieg. In mehreren Bildern wurden die Rauchschichtdicke und die Temperatur aufgetragen. Trotz einiger Ungenauigkeiten können die angeführten Modelle dennoch für ingenieurmäßige Zwecke eingesetzt werden.

Hansell /56/ berichtet, daß sich heiße und toxische Gase in Atrien ausbreiten können, ohne daß ein bemerkenswertes Feuer vorhanden bzw. zu erkennen sein muß. Bei der Anhäufung von brennbaren Materialien und einer hohen Personendichte in Gebäuden wird der Schutz vor Gefahren dieser Art immer dringlicher. Um die Rettungsmöglichkeiten für Personen in derartigen Gebäuden sicherstellen zu können,

werden deshalb Systeme zur Rauchfreihaltung benötigt. Eine weitere Gefährdung von Personen besteht außerdem dann, wenn ein Atrium von Räumen umgrenzt wird, aus denen heiße Rauchgase und Flammen in das Atrium eindringen können. Für Personen besteht in derartigen Fällen die Hauptgefahr darin, daß sich der Rauch innerhalb von Fluchtwegen ausbreitet, evtl. einhergehend mit einer starken Sichtbehinderung, so daß eine Flucht unmöglich werden kann.

Bei einem Brand in einem Raum steigen die heißen Rauchgase nach oben, während gleichzeitig von unten Luft in die aufsteigende Strömung eintritt. Diese Flammen- bzw. Rauchgassäule bildet den sogenannten Plume, dem Sauerstoff für die weitere Verbrennung zugeführt werden muß. Findet hierbei eine nicht vollständige Vermischung der Gase statt und sind die Verbrennungstemperaturen nur ungenügend hoch, so werden im Brandrauch Rußpartikel gebildet, die sich überall ablagern können. Trifft der vertikal aufsteigende Rauch während eines Brandes auf ein Hindernis wie z. B. die Decke eines Raumes, so breitet er sich radial an dieser Decke bis zu den seitlichen Raumbegrenzungen aus. Gleichzeitig gelangt Umgebungsluft in den Plume und wird nach oben bis zur Unterkante und solange in die sich bildende Rauchsicht befördert bis sich der Raum vollständig mit Rauch gefüllt hat. Die Geometrie des Raumes, die Größe und Lage des Brandes, die im Raum vorhandenen Öffnungen und andere Parameter beeinflussen den Massenstromverlauf dieses Plume. Bei der Brandausbreitung werden dabei vier Entwicklungsstadien unterschieden, nämlich eine langsame, eine mittlere, eine schnelle und eine sehr schnelle Ausbreitung. Diesbezüglich werden der Einfluß einer Rauchschräge oder eines Sturzes sowie der Eintritt von Rauchgasen aus einer Öffnung in ein Atrium oder Möglichkeiten der Ventilation und der Rauchabführung betrachtet. Bei Berechnungen für diese Brandarten wird häufig das sogenannte t^2 -Modell verwendet.

Schneider /57/ weist neben schutzzielorientierten Brandschutzbemessungen auch auf andere Berechnungsmethoden hin wie z. B. auf die genormten Berechnungsverfahren des DIN, die analytischen Berechnungsverfahren mittels Plumeformeln oder die Brandsimulationsrechnungen mittels Wärmebilanzen. Bei der Bewertung spielt die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Brandsimulationsmodelle eine zentrale Rolle, insbesondere bei der Beurteilung der Rauchfreihaltung von Flucht- und Rettungswegen. Durch die Anordnung von Öffnungsflächen in Decken, Dächern und

Wänden oder der Nutzung von maschinellen Entrauchungsanlagen (automatisch/manuell) können Brandgase aus Gebäuden abgeführt werden. Bei natürlicher Ventilation wird die Wirksamkeit maßgeblich durch die Druck- und Temperaturverteilung im Gebäude bestimmt.

Der abgeführte Rauchgasvolumenstrom nimmt mit zunehmender Rauchschildtdicke unterhalb einer Decke zu. Da eine maschinelle Entrauchungseinrichtung immer den gleichen Volumenstrom fördert, wird mit steigender Temperatur der Brandgase der abgeführte Massenstrom immer kleiner. Als Empfehlung wurden im Entwurf der Europeanorm pr EN12 101-5 bezüglich des Schutzzieles Personenrettung folgende raucharme Schichthöhen benannt. Es gelten für öffentliche Gebäude, Einkaufszentren und Messehallen Höhen von 3m, bei Warenhäusern eine Höhe von mindestens 0,5 m über der Spitze der gestapelten Waren, für nichtöffentliche Gebäude, Büros und Gefängnisse Höhen von 2,5 m, für Großgaragen eine Höhe von 2,5 m oder 0,8 mal der Deckenhöhe. Bei berechneten Rauchschildttemperaturen um mehr als 100°C über der Umgebungstemperatur sind die Werte um 0,5 m zu erhöhen. Für die ingenieurmäßige Bewertung können auch andere Kriterien herangezogen werden, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Die Auslegungen hängen jeweils von den Gegebenheiten ab und müssen für den jeweiligen Einzelfall festgelegt werden. Da jedoch ein Brand nur durch die Abführung von Rauch nicht verhindert werden kann, müssen in jedem Fall die notwendigen Löschnaßnahmen eingeleitet werden.

Da für derartige Fälle keine allgemein gültigen Vorschriften vorliegen, wurden verbindliche Festlegungen mit sogenannten Brandszenarien (fire scenarios), Bemessungsbrandszenarien (design fire scenarios) und Bemessungsbränden (design fires) erforderlich, die bei Beurteilungen zum Nachweis der Brandsicherheit anzuwenden sind. Diese englischen Begriffe werden durch kurze Beschreibungen folgendermaßen erläutert:

Fire scenario = Beschreibung des Brandverlaufes, typischerweise der Zündung, der Brandentwicklung, dem Vollbrandstadium, der Abklingphase in Zusammenhang mit der Gebäudenutzung und den technischen Systemen, die den Brandverlauf beeinflussen (ISO/TR 13387-1).

Design fire scenario = Spezifisches Szenarium von Brandereignissen mit dem eine Brandschutzanalyse durchgeführt wird (ISO/TR 13387-1).

Design fire = Quantitative Beschreibung eines design fire scenario mit typischen idealisierten zeitabhängigen Brandkenngrößen wie der Brandleistung, der Brandausbreitung, den Rauchbestandteilen, den toxischen Bestandteilen und der Temperatur (ISO/TR 13387-1). Definierter Brandverlauf, der bei der Brandbemessung zugrunde gelegt wird (Eurocode 1, Teil 2-2). Der bei der Bemessung zugrunde gelegte größte Brand hinsichtlich der Ausdehnung und Wärmeleistung bis zum Einsetzen wirksamer Löschmaßnahmen (TRVB S 125/97).

Bei der Auswahl von Bemessungsbrandszenarien wird vorgeschlagen in Teilschritten vorzugehen. Somit ist es möglich, die Charakteristik des zugrunde liegenden Feuers (design fire) zu beschreiben. Bemessungsbrände werden üblicherweise durch folgende zeitabhängige Parameter charakterisiert: Energiefreisetzung, Brandausbreitung, Produktion toxischer Bestandteile, Rauchproduktion, Temperatur und Erreichen bestimmter Ereignisse wie z. B. den Flashover. In einer Tabelle werden Bemessungsbrände für die Festlegungen in DIN 18232 Teil 2 und 5 angegeben. Zusätzlich sind Angaben über die Brandausbreitungsgeschwindigkeiten aufgeführt. Sie liegen bei 0,15 m/min (besonders klein) über 0,25 m/min (mittel) bis zu 0,45 m/min (besonders groß). Die Brandleistungen werden mit 3 MW bis zu ca. 50 MW angegeben. Davon werden ca. 80 % konvektiv in die Rauchschiicht eingebracht, während ca. 20 % als Strahlung angenommen werden. Im angelsächsischen Raum werden die Brandausbreitung und die Brandleistung häufig anhand von t^2 -Modellen beschrieben. Die auf diese Art und Weise rechnerisch ermittelten Werte lassen sich mit Erfahrungen aus realen Bränden vergleichen. Derartige bei Schadenfeuern gemessene Brandleistungen wurden in einer Tabelle aufgelistet, wobei neben der Brandlast die Raumgröße, die Holzäquivalenz, das verbrannte Material und die gemessene Brandleistung angegeben wurden.

Halfkann /58/ weist auf die Gefahren durch Rauch hin, die bereits beim Abbrand von geringen Mengen brennbarer Materialien entstehen können. Bei einem an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Versuch mit 640 kg Holz und Polstermöbeln wurde in einem Zeitraum von 27 min eine Rauchgasmenge von 11 m³/s freigesetzt. Mit Hilfe einer mechanischen Entrauchung von ca. 32000 m³/h wur-

de dabei eine rauchfreie Schicht erreicht. Ohne Absaugung wäre das Gebäude mit den Abmessungen 30 m * 15 m * 12 m in wenigen Minuten total verrauchert gewesen. Bezüglich dieser Thematik zum Schutz von Personen und Tieren wird auf die Bauordnung (Bauaufsichtsbehörde, Brandschutzdienststelle) hingewiesen. Da Personen in verqualmten Räumen spätestens nach einer Wegstrecke von 10 bis 12 m die Orientierung verlieren, müssen rauchfreie Schichten nachgewiesen werden, die eine Fluchtmöglichkeit zulassen.

Babrauskas /59/ gibt einen umfassenden Überblick über frei brennende Feuer in windfreien Umgebungen oder in Räumen, bei denen die Verbrennung nicht durch äußere Einflüsse gestört wurde. Die Verbrennung wurde dabei durch die Massenverlustrate in kg/s oder durch die Wärmefreisetzungsrate in MW ausgedrückt. In den Ausführungen wurden nachfolgend genannte brennbare Materialien bzw. Brände betrachtet. Dazu gehören Flüssigkeiten oder Kunststoffe (Pool-Brände), zu Krippen aufeinander geschichtete Stäbe, Holzpaletten, Polstermöbel, Matratzen, Kissen (Polster), Garderoben, Fernsehtische, Christbäume, Vorhänge, elektrische Kabeltrassen, Abfallbehälter und Container sowie in Regalen gestapelte Güter. Zahlreiche Tabellen und Bilder beinhalten Angaben zu entsprechenden Materialien, zu verwendeten Mengen, zu physikalischen und auch zu berechneten Größen wie z.B. der Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit.

3. SIMULATIONSBRAND

3.1 Brandbedingungen

In der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) wurden zunächst Voruntersuchungen mit unterschiedlichen Versuchsbränden durchgeführt. Für diese Versuche wurden sowohl aus eigenen als auch aus der Literatur entnommenen Erfahrungen aus Berechnungen und aus realen Brandereignissen Kriterien aufgestellt, die für einen zu verwendenden Simulationsbrand möglichst eingehalten werden sollten.

Entsprechend sollte ein Simulationsbrand

--- möglichst variabel simuliert werden können

--- so wenig wie möglich Schmutzpartikel (Ruß) erzeugen

(keine Verunreinigungen beim Einsatz in einem fertiggestellten Gebäude,
um Einrichtung oder Waren nicht zu beschädigen)

- eine beliebig lange Zeit aufrechterhalten werden können
- Wärmefreisetzen im kW - und MW-Bereich zulassen
- möglichst ohne Anfangsimpuls brennen wie ein realer Brand
- jederzeit ohne großen Aufwand beendet werden können,
wenn es die Situation verlangt
- jederzeit reproduzierbar wiederholt werden können

3.2 Versuchsanlage und Messeinrichtung

Die Versuchsanlage und die Messeinrichtungen befinden sich in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Die Abmessungen der Halle betragen 30 m * 15 m * 12 m (L*B*H). Mit einer in der Versuchshalle installierten Rauchgasreinigungsanlage können Brandgase mit bis zu 35.000 Nm³/h abgesaugt werden. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Einstellungen gewählt:

- keine Absaugung aus der Versuchshalle
- Absaugungen von jeweils 10.000 m³/h und 30.000 m³/h aus der Versuchshalle.

Um den Einfluss der Temperatur der durch den jeweiligen Versuchsbrand entstehenden Brandgase innerhalb der Versuchshalle besser beurteilen zu können, wurden diagonal zur Grundfläche in der Halle vorne links (HV), in der Hallenmitte (HM) und in der Halle hinten rechts (HH) jeweils Thermoelemente an 3 sogenannten Thermoelementketten in den Höhen 3 m, 5 m, 7 m und 9 m angeordnet. Diese Höhen wurden deshalb gewählt, weil eine zu erwartende Temperaturerhöhung durch die Bildung einer Rauchsicht je nach Brandgröße und Absaugung der Brandgase in diesen Höhen in der gesamten Versuchshalle erwartet wurde.

Während des Brandes wurden im Abgasstrom kontinuierlich die Konzentrationen von Kohlenmonoxid CO, Kohlendioxid CO₂, Sauerstoff O₂, die Abgastemperatur und der Druck gemessen, woraus die Strömungsgeschwindigkeit der Brandgase bestimmt

werden kann. So ist es möglich, rückwirkend Aussagen zu treffen bzw. Berechnungen über die Wärmeleistung jedes einzelnen Brandes durchzuführen.

3.3 Verschiedene Brennertypen

Vor Festlegungen zu einem geeigneten Versuchsbrenner wurden verschiedene Systeme in Erwägung gezogen, die jedoch auch z. T. aus Aufwands- und Kostengründen verworfen werden mussten. Zu Anfang stand ein mit Gas betriebener Flächenbrenner zur Disposition. Die Wärmeleistung für einen derartigen Brenner wurde mit ca. 20 kW angegeben. Durch Zusammenschalten einer Vielzahl dieser Brenner wären gewünschte Leistungen einstellbar gewesen. Es stellte sich jedoch sehr bald heraus, dass der Preis für eine betriebsfertig gelieferte Brenneranlage im Gegensatz zu den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht erschwinglich war. Um dennoch eine Wärmeleistung zu erreichen, die bei den Untersuchungen eingesetzt werden sollte, hätten also einzelne Elemente hintereinander und parallel geschaltet werden müssen, so dass die gesamte Apparatur mit der Bevorratung, Zuführung und Verteilung des Brandstoffes sehr aufwendig zu installieren und außerdem aufgrund ihres Umfangs sehr unflexibel zu handhaben gewesen wäre. Es wurde deshalb notwendig, weitere mögliche Brennertypen in Erwägung zu ziehen.

Bei den Untersuchungen wurde als eine weitere Möglichkeit ein mit Flüssiggas betriebener Rohrbrenner getestet. Dieser oder ähnliche Brennerarten besitzen als Einzelbrenner ebenso eine Wärmeleistung von ca. 20 kW, die wiederum durch Zusammenschalten mehrerer Einheiten eine höhere Wärmeleistung entwickeln können. Dadurch nimmt auch bei dieser Art von Brennern der Aufwand zum Betreiben einer Anlage erheblich zu. Außerdem kann bei diesen Brennern durch den ausströmenden gasförmigen Brandstoff ein höherer Anfangsimpuls nicht ausgeschlossen werden, es sei denn, der Strahl trifft auf einen festen Körper auf, um anschließend mit geringem Impuls aufzusteigen. Diese Methode fördert jedoch die Rußbildung erheblich.

Um für die Untersuchungen einen einfachen und dennoch wirkungsvollen Versuchsbrenner zu erhalten, wurde als Medium auf die bereits in zahlreichen Veröffentlichungen beschriebenen Untersuchungen mit brennbaren Flüssigkeiten zurückgegrif-

fen. In allen Fällen wurden dabei Wannen mit flüssigem Brandstoff wie Benzin, Heptan, Methanol oder Ethanol (Ethylalkohol, Spiritus) verwendet, um ein natürliches Brandgeschehen nachzubilden. Diese als „Pool-Feuer“ bezeichneten Brände bringen jedoch den Nachteil mit sich, dass bei höheren Wärmeleistungen eine größere Oberfläche brennt, was bei der Handhabung zum Nachweis der Entrauchung innerhalb eines fertiggestellten Gebäudes zu Schwierigkeiten führen könnte.

Weitergehende Überlegungen führten schließlich dazu, daß die bereits erwähnten flüssigen Brandstoffe ebenso in Tropfenform zum Einsatz kommen könnten. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurden handelsübliche Düsen verwendet, mit denen eine vorgegebene Menge an brennbarer Flüssigkeit wie z. B. Spiritus versprüht wurde, um somit eine bessere Verbrennung durch die fein verteilten Tröpfchen zu erreichen. Bei den Testversuchen zeigte sich, dass die Tröpfchen in dem nach oben gerichteten Strahl des versprühten Mediums jedoch nicht alle vollständig verbrannten, sondern teilweise weiter nach außen flogen und auf dem Untergrund evtl. eine Flüssigkeitsansammlung bildeten, die je nach Wärmeentwicklung des Brandes unkontrolliert schlagartig verbrennen konnte. Aufgrund dieses Sachverhaltes wurden um die Düse zylinderförmige metallene Vorrichtungen angebracht, die einerseits die Tropfen auffangen und andererseits durch die Verbrennung der zum Glühen gebrachten Teile für eine bessere und vollständige Verbrennung sorgten. Als Materialien für derartige Auffangvorrichtungen eigneten sich z. B. Maschendraht mit unterschiedlicher Maschenweite oder Lochbleche mit unterschiedlichen Lochgrößen und Lochabständen, die evtl. in mehrfachen Lagen um und über dem Düsenbrenner als Brandherd angebracht wurden. In Bild 5 ist die Anordnung mit dem Lochblechzylinder mit dem glühenden „Ring“ am Flammenfuß deutlich zu erkennen. Durch zahlreiche Testversuche mit unterschiedlichen Düsen und Variation der Parameter wie z. B. des Volumenstromes, der Tropfengröße und anderer geometrischer Größen konnten für die Simulation eines Brandes geeignete Anordnungen herausgefunden werden. Mit diesen Experimenten konnten bis auf den vorhandenen höheren Anfangsimpuls der aus der Düse austretenden versprühten Flüssigkeit nahezu alle zuvor festgelegten Kriterien mehr oder weniger erfüllt werden.

Um zusätzlich den Anfangsimpuls des versprühten Brandstoffes zu minimieren bzw. ganz auszuschalten wurden die Brenneruntersuchungen fortgeführt und weiter modi-

fiziert. Mit einer bisher in der Literatur noch nicht beschriebenen Methode konnte auch der Anfangsimpuls bis auf die durch den aus der Verbrennung selbst resultierenden Auftrieb vorhandenen Kräfte ausgeschaltet werden. Dazu wurde es notwendig, die jeweils verwendete Düse anstatt wie bisher nicht nach oben, sondern für alle folgenden Untersuchungen nach unten zu richten.

Bei dieser Anordnung wurde lediglich eine geeignete Düse und unterhalb dieser Düse ein nicht brennbarer Bereich mit entsprechendem Durchmesser benötigt. Alle weiteren Hilfsmittel sind nicht mehr notwendig, da die Verbrennung direkt auf einer vorgegebenen Fläche und im darüber befindlichen Luftraum stattfindet. Der jetzt nach unten gerichtete Anfangsimpuls aus der Düse ist nur noch zur Verteilung des Brandstoffes auf der Brandfläche notwendig. Das Abbrennen der durch die jeweilige Düse austretenden Flüssigkeitstropfen entsprach nunmehr einem auftriebsbehafteten natürlichen Brand, bei dem die geforderten Kriterien eingehalten werden konnten.

Mit Hilfe eines derartigen Brenners können mit unterschiedlichen Düsen und variablen Parametern Brände mit unterschiedlich hohen Wärmeleistungen reproduzierbar simuliert werden. Außerdem ist die Dauer eines Brandes nicht mehr wie bei den meisten Untersuchungen von der eingefüllten Menge an Brandstoff in eine Wanne abhängig. Der Brand kann somit beliebig lange fortgesetzt oder auch jederzeit durch Abstellen der Brandstoffzufuhr unterbrochen werden.

Entgegen der ursprünglichen und aus Kostengründen nicht realisierbaren Absicht, mit Vormischbrennern zu arbeiten, wurde also eine Diffusionsflamme erzeugt.

3.4 Versuchsaufbau Sprühdüsenbrenner

Bild 6 zeigt den Versuchsaufbau des sogenannten Sprühdüsenbrenners. Die brennbare Flüssigkeit, hier Brennspritus, befindet sich in den zum Transport und zur Lagerung geeigneten 200 l Fässern. Die Zuführungs- bzw. Entnahmeöffnungen befinden sich während eines Versuches auf der oberen Seite des betreffenden stehenden Fasses. Die brennbare Flüssigkeit wird mittels einer geeigneten Fassungspumpe aus dem Fass angesaugt und zur Austrittsöffnung der Pumpe gefördert. Um zu gewährleisten,

dass kein Schmutz in die Düse gelangt, wird ein Filter dazwischengeschaltet. Die beim Ansaugen entstehenden Drücke werden mit Manometern überwacht. Über ein Regulierventil und einen Absperrhahn gelangt der Brandstoff Spiritus über eine definierte Leitung zur Sprühdüse. Ein durch die Fassungspumpe entstehender höherer Druck gegenüber dem geforderten Betriebsdruck bzw. höherer geförderter Volumenstrom als der aus der Düse austretende geforderte Volumenstrom wird über eine Bypassleitung geleitet und der überschüssige Spiritus zurück ins Fass gefördert. Außerdem kann aus Sicherheitsgründen mit einem Zusatzventil ein evtl. auftretender Überdruck im Fass abgebaut werden. Durch diese Einstellmöglichkeiten kann der Druck an der Düse und damit die vorab kalibrierte Wärmeleistung des Brandes je nach Bedarf konstant gehalten oder auch zeitlich variiert werden.

Nach einem Absperrventil beginnt eine flexible und in der Nähe des Brandes eine feste feuerbeständige Zuleitung bis zum Düsenaustritt. Die für diese Art von Untersuchungen geeigneten Düsen wurden je nach geforderter Wärmefreisetzung entsprechend einem vorher festgelegten Volumenstrom ausgewählt. Der Volumenstrom wiederum wurde durch eine anlagenspezifische Eichkurve bestimmt, so dass es mit dieser Versuchsanordnung möglich ist, reproduzierbare Untersuchungen durchzuführen.

3.5 Eichung der Düsen

Um einem Brand einen bestimmten Wärmestrom zuzuordnen zu können, wurde zunächst die vorhandene Versuchsanordnung beim Einsatz mit den unterschiedlichen handelsüblichen Düsen geeicht. Mit Hilfe eines jeweils fest eingestellten Druckes wurden auf diese Art Düsenkennlinien bestimmt. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, direkt über die Einstellung des Manometers an der Pumpe einen für die jeweilige Versuchsdurchführung erforderlichen Wärmestrom einzuhalten. In Bild 7 wurden Kennlinien für den jeweiligen Wärmestrom in Abhängigkeit der eingestellten Drücke bis zu 6 bar der hier verwendeten fünf verschiedenen Düsen dargestellt.

3.6 Bestimmung von Temperatur und Druck in der Flamme bzw. im Plume

In Bild 8 ist die Messanordnung zur Bestimmung der Temperatur und des Druckes in der Flamme und in der Rauchgassäule (plume) dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen Versuchsaufbau mit einer kreisrunden Brandfläche auf dem Boden aus nicht brennbarem Material wie z.B. Faserzementplatten. Der Belag kann dabei jederzeit erneuert oder durch einen anderen ersetzt werden. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde für die Brandfläche (Bodenplatte) ein maximaler Durchmesser von 2 m festgelegt.

Ein senkrecht stehender Doppel-T-Träger wurde über ein in Eigenbau aus unterschiedlichen Profilen gefertigtes Tragelementsystem mit einer aus zwei Schienen bestehenden Konstruktion fest mit dieser kreisrunden Bodenfläche verbunden. An diesen ca. 7 m langen Doppel-T-Träger wurde eine Haltevorrichtung für einen mit Fachwerk ausgesteiften Kragarm installiert. Dieser Kragarm besitzt in horizontaler Richtung eine Länge von ca. 3 m und endet über dem Mittelpunkt der kreisförmigen Bodenplatte. An ihm können alle gewünschten Messstellen angeordnet werden. Die hier benötigten Messelemente wie Thermoelemente und Drucksonden wurden unten am Kragarm hängend angebracht, so daß die aufwärts gerichtete Strömung bei der Messung weitgehend ungestört bleibt und somit die Messergebnisse nicht verfälscht werden.

Um eine möglichst große horizontale Fläche über dem Brandherd ausmessen zu können, wurden im vorliegenden Fall an diesem Kragarm ausgehend vom Zentrum der Kreisfläche insgesamt 28 Thermoelemente (T1 bis T28) im Abstand von 10 cm und zusätzlich 10 Druckmesssonden (p1 bis p10) im Abstand von 20 cm und ab 1 m Entfernung vom Zentrum im Abstand von 30 cm angeordnet, so dass in horizontaler Richtung in einer vorgegebenen Messhöhe der „Plume“ nahezu vollständig ausgemessen werden kann.

Um zusätzlich auch in anderen Höhen flexibel Messungen durchführen zu können, wurde am Fuße des Doppel-T-Trägers ein elektrischer Antrieb installiert und die bereits oben erwähnte Haltevorrichtung derart ausgeführt, dass sie am Träger einschließlich des Kragarmes mühelos nach unten bis auf Brandniveau und nach oben

z. Z. bis in eine Höhe von ca. 7 m gefahren werden kann. Eine Erweiterung der Installation für größere Höhen ist denkbar. Auf diese Art und Weise kann auch in senkrechter Richtung eine komplette Ebene eines „Plume“ ausgemessen werden.

Da sich ein Brand jedoch immer nach den vorliegenden Gegebenheiten im Raum richtet und deshalb nicht 100%-ig gleichmäßig kreisförmig brennt, könnte eine Messung der Ausbreitung der Flamme und der Brandgase in nur einer senkrechten Ebene zu negativ oder auch zu positiv beeinflussten Meßwerten führen. Um Einflüsse dieser Art vermeiden zu können, wurde der gesamte Aufbau so konzipiert, dass nicht nur in beliebigen Höhen, sondern auch Messwerte in beliebigen radialen Abständen ringförmig in Winkeln von 0° bis 360° innerhalb, über und um die Flamme bzw. im Plume aufgenommen werden können.

Diese Art zu messen wurde dadurch ermöglicht, dass der gesamte Versuchsaufbau mit der Brandfläche und dem Doppel-T-Träger auf Rollen gelagert wurde und somit der Messarm um den Mittelpunkt der Brandfläche und damit auch des Brandes bzw. der Rauchgassäule (Plume) um einen Winkel von 360° gedreht werden konnte. Auf diese Weise wurde gewährleistet, dass mit dieser Versuchsanordnung über einer beliebigen Brandquelle im Zentrum der Bodenplatte, jeder beliebige Messort jeweils radial in horizontaler Richtung bis ca. 3 m und in vertikaler Richtung bis ca. 7 m Höhe erfasst werden kann. Wie bereits erwähnt wurde, können die Abmessungen gegebenenfalls erweitert werden.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Untersuchungen an einer realitätsnahen Prüfeinrichtung für die Auslegung von RWA-Anlagen für die Rauchfreihaltung von Rettungswegen. Die für diese Untersuchungen durchgeführten Brände mit unterschiedlichen Brandleistungen wurden mit Hilfe des bereits beschriebenen Sprühdüsenbrenners simuliert, wobei aus einem Vorratsbehälter ein vor dem jeweiligen Versuch festgelegter Volumenstrom der brennbaren Flüssigkeit Ethanol (Brennspiritus) mittels einer Pumpe und über Manometer geregelt durch eine mehrere Meter lange kalibrierte Rohrleitung bis zur einer handelsüblichen Sprühdüse gefördert wurde. Die einge-

setzten Düsen hatten jeweils unterschiedlich große Austrittsöffnungen. Die Austrittswinkel der Düsen betragen 90° und 120° . Über diese Düsenparameter konnte der Volumenstrom und damit die Brandleistung variiert werden.

Sofort nach Austritt der Flüssigkeit aus der jeweiligen Düse wurde die versprühte Flüssigkeit gezündet und es entstand eine von den eingestellten Parametern abhängige Flamme. Diese Flamme besaß ein von der Düsengröße, der Düsenform, dem eingestellten Druck und der geometrischen Anordnung der Düse über der Bodenfläche entsprechendes Flammenbild. Zum Vergleich wurden zusätzliche Untersuchungen mit Spiritus in wassergekühlten quadratischen Wannen mit den Seitenabmessungen 70 cm und 100 cm durchgeführt. Bei den hier vorgenommenen Untersuchungen wurden die Einstellungen der Wärmeleistungen auf Werte zwischen 246 kW und 1200 kW festgelegt.

Die Volumenströme zum Absaugen der entstandenen Brandgase aus der Versuchshalle betragen zwischen $0 \text{ m}^3/\text{h}$ und $30.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Mit den bereits erwähnten Temperaturmessketten wurden innerhalb der Versuchshalle die Temperaturen $Tv3 \dots Tv9$ (vorne links), $Tm3 \dots Tm9$ (mitte) und $Th3 \dots Th9$ (hinten rechts) in den Höhen 3 m, 5 m, 7 m und 9 m aufgezeichnet. Die Messungen der Temperaturen an den Messstellen $T1$ bis $T28$ und der Drücke an den Messstellen $p1$ bis $p10$ am Messarm erfolgten im Einzelfall in Höhen von 0,4 m bis 6,6 m und bei allen weiteren Versuchen über der Flamme bzw. dem Plume, in Abständen von 1 m, jeweils in einer Höhe von 3 m, 4 m, 5 m und 6 m.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die mit dem Sprühdüsenbrenner durchgeführten Versuche. Neben einer laufenden Versuchsnummer und der Versuchsbezeichnung wurden die festgelegten Messhöhen, die jeweilige Lage und Bezeichnung der verwendeten Düse oder Wanne mit einer entsprechend dem eingestellten Volumenstrom erreichten Brandleistung von 246 kW bis 1200 kW aufgeführt. Die für den jeweiligen Versuch eingestellte Absaugleistung zum Absaugen der Brandgase aus der Versuchshalle, durch die eine entstehende Rauchsicht beeinflusst werden konnte, sind ebenfalls daraus zu entnehmen. Um eine bessere Vorstellung zu erhalten, zeigt Bild 8 neben dem Aufbau der gesamten Versuchsanlage beispielhaft einen Wannenbrand auf der Bodenfläche unterhalb des Meßarmes. Die Bilder 9a, b und 10a, b zei-

gen beispielhaft mit dem Sprühdüsenbrenner erzeugte Flammen von zwei Versuchen mit je 500 kW Brandleistung zu jeweils unterschiedlichen Zeiten, um das auftretende Flammenflackern besser zu verdeutlichen. Auf den weiteren Bildern sind Flammen mit Brandleistungen von 800 kW (Bilder 11a, b) und 1200 kW (Bilder 12a, b und 13a,b) abgebildet, die mit unterschiedlichen Sprühdüsen erzeugt wurden. Auch bei diesen Flammen zeigen die Momentaufnahmen das unterschiedliche Flackern und das Abreißen von Flammenfetzen.

Die Bilder 14 und 15 zeigen beispielhaft Versuche mit Brandwannen mit einer Kantenlänge von 50 cm mit den Brandstoffen Ethylalkohol und Heptan. Diese beiden brennbaren Flüssigkeiten unterscheiden sich sehr deutlich in ihrem Heizwert. Aus diesem Grund besitzt die Heptanflamme beim Verbrennen die wesentlich größere Flammenlänge.

4.1 Temperaturen im Plume

Bei Versuch 1 wurde die Düse D2 mit einer vorgegebenen Brandleistung von 300 kW verwendet. In den Höhen 3 m, 4 m, 5 m und 6 m wurden dabei im Plume in Achsennähe jeweils die Maximaltemperaturen von 134°C, 104°C, 78°C und 68°C gemessen, während die Mittelwerte mit 104°C, 76°C, 64°C und 56°C deutlich niedriger lagen (vgl. Tabelle 3). Außerhalb des Plume in einem radialen Abstand von 2,7 m von der Achse an der Meßstelle T28 wurde in allen 4 Höhen die Hallenraumtemperatur von ca. 30°C gemessen. Dies bedeutet, daß eine Absenkung einer Rauchsicht in der Versuchshalle aufgrund einer Temperaturerhöhung in einer Höhe von 6 m in diesem Fall nicht festgestellt werden konnte.

Die Bilder 16a bis 16d zeigen beispielhaft die Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T28 jeweils in einer horizontalen Messebene in Abhängigkeit des Abstandes auf dem Radius. Als Parameter wurden in jeweils der gleichen Meßhöhe (3 m, 4 m, 5 m, 6 m) Winkel auf einem Vollkreis in Schritten von 30° gewählt. Die örtliche Zuordnung und Festlegung der Winkel von 30° bis 360° bzw. 0° innerhalb der Versuchshalle ist beliebig und ergab sich aus versuchstechnischen Erwägungen.

Bei Betrachtung dieser Meßkurven ist deutlich zu erkennen, daß das Temperaturmaximum nicht notwendigerweise direkt auf die Achse des Plume zu liegen kommt, sondern außerhalb der Achsmittle liegen kann. Da während der Versuche auch innerhalb der gesamten Versuchshalle geringfügige Querströmungen auftraten, war die Symmetrie der jeweiligen Flamme mit den aufsteigenden Brandgasen (Plume) innerhalb der Versuchsdauer nicht immer vollständig gewährleistet, so dass bei einem Messdurchgang der Anfangswert bei einem Winkel von 0° nicht notwendigerweise mit dem Endwert bei einem Winkel von 360° übereinstimmen muß. Dies bedeutet, daß auch bei einem Brand in einer großen Halle eine Flamme durch die vorherrschenden Strömungen oder auch durch andere Parameter beeinflusst werden kann. Im Realfall gibt es also die „ruhende“ Umgebung nicht. Dies hat Auswirkungen auf die Lufteinmischung in den Rauchgasstrom mit der Folge einer höheren Einmischungsrate. Hieraus resultiert eine Temperatur- und Geschwindigkeitsabsenkung bei gleichzeitiger Massenzunahme, verglichen mit der „ideal ruhenden“ Umgebung.

Die maximalen Temperaturwerte bei diesem Versuch in einer Höhe von 3 m liegen im Bereich der Winkel von ca. 30° bis ca. 120° bis zu einem radialen Abstand von 0,4 m von der Achse entfernt. In einer Höhe von 4 m erreicht die Temperatur ihre Maximalwerte im Bereich der Winkel von 60° bis 90° , tendieren in einer Höhe von 5 m etwas stärker zu den Winkeln zwischen 90° und 120° und liegen in einer Höhe von 6 m zwischen den Winkeln 90° und 150° , wobei dort die radiale Abweichung etwa 0,6 m von der Achse beträgt.

Weiterhin ist zu erkennen, daß die Höhe der gemessenen Temperaturen im Plume in Abhängigkeit des eingestellten Winkels sehr große Unterschiede aufweisen. So besteht z. B. die Möglichkeit, daß zu einem Zeitpunkt der Messung bei einem Winkel von ca. 120° ein Temperaturmaximum auftritt, während bei einem Winkel von ca. 240° eine sehr viel niedrigere Temperatur vorherrscht und ein Maximum während der Aufzeichnung der Meßwerte noch nicht erreicht wurde. Davon abhängig wurde von der Flamme weg in horizontaler Richtung in jeweils gleicher Höhe die Hallenraumtemperatur bei unterschiedlichen radialen Abständen von der Achse erreicht. Für eine weitergehende Beschreibung der Flamme (s. Abschnitt 4.3) wurde zusätzlich in jeder Meßhöhe eine mittlere Ausgleichstemperaturkurve bestimmt, die ebenfalls im Bild eingetragen wurde.

Eine andere Art der Darstellung zeigen die Bilder 17a bis 17d mit der Temperatur in Abhängigkeit vom jeweils eingestellten Winkel. Parameter ist dabei der horizontale Abstand von der Achse (Radius). Hier sind ebenfalls die bei diesem Versuch aufgetretenen Temperaturschwankungen über der Flamme (Max. bei ca. 120°, Min. bei ca. 240°) während der Messung bei verschiedenen Radien und Winkeln deutlich zu erkennen.

In den folgenden Bildern 18a bis 18d wurden beispielhaft die gemessenen Temperaturen in den jeweiligen horizontalen Ebenen in den Höhen 3 m, 4 m, 5 m und 6 m räumlich dargestellt. Wie bereits erwähnt, ist auch hier deutlich zu erkennen, daß die Flamme nicht immer bei allen Versuchen symmetrisch brannte, sondern evtl. bereits durch geringe Strömungen in der Versuchshalle wie im vorliegenden Falle in Teilbereichen abgelenkt wurde. Diese Störungen können sich ggf. bis weit stromab im Plume fortsetzen. In dieser Art der Darstellung macht sich dies bei etwas größeren Auslenkungen von der Achse in einer Art zweiten Spitze bemerkbar. Besonders anschaulich ist die Aufweitung des Plume-Kegels mit zunehmender Höhe bei abnehmenden Temperaturen zu erkennen. Die tatsächlich gemessenen Maximaltemperaturen werden bei dieser Art der Darstellung jedoch nicht notwendigerweise erfaßt.

Versuch 2 wurde mit der Sprühdüse D3 und einer Brandleistung von 500 kW durchgeführt. Dabei wurden Temperaturen in vertikaler Richtung in einem Höhenbereich von 0,4 m bis zu 6,6 m in Schritten von 0,1 m und in horizontaler Richtung von der Achse (Radius 0 m) in Schritten von 0,1 m bis zu einem Radius von 2,7 m gemessen, so daß bei diesem Versuch sowohl der gesamte Bereich der Flamme, der intermittierende Bereich der flackernden Flamme als auch der Ähnlichkeitsbereich erfaßt wurden. Um die Temperaturen für diesen Bereich darzustellen, wurden beispielhaft für die hier durchgeführten Versuche in Bild 19 sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung die gemittelten Messwerte der Temperatur in Abhängigkeit des Radius an den Messstellen T1 bis T28 aufgetragen. In niedrigen Höhen wurden innerhalb der Flamme in der Nähe der Flammenachse mittlere Temperaturen von ca. 900°C gemessen. Diese fielen stromabwärts in einer Höhe von 1 m bereits auf ca. 780°C, in einer Höhe von 2 m auf ca. 550°C und oberhalb der Flamme in einer Höhe von 3 m auf ca. 300°C ab. Noch deutlicher ist die Abnahme in einer Höhe von 4 m

auf ca. 168°C, in einer Höhe von 5 m auf ca. 136°C und in einer Höhe von 6 m auf ca. 113°C. Einzelne Maximalwerte liegen teilweise etwas höher. Außerhalb des Plumes in horizontaler Richtung an der Meßstelle T28 lagen die Hallenraumtemperaturen in den entsprechenden Höhen von 1 m bis 6 m bei 24°C, 27°C, 34°C, 43°C, 48°C und 54°C.

Anstelle von zahlreichen weiteren Einzeltemperaturkurven der übrigen Versuche wurden zur besseren Übersicht für die beiden vorgenannten Versuche 1 und 2 sowie für die weiteren Versuche 3 bis 13 die zeitlich gemittelten Maximaltemperaturen in den Höhen 3 m, 4 m, 5 m und 6 m in Tabelle 3 eingetragen und in Bild 20 dargestellt. Als Parameter wurden die Düsen und die jeweiligen Brandleistungen aufgeführt. In diesem Bild ist deutlich zu erkennen, daß in jeweils einer Meßhöhe bei Erhöhung der Brandleistung von 246 kW bis auf 1200 kW auch ein deutlicher Anstieg der Maximaltemperatur zu verzeichnen ist. Eine Zunahme der Meßhöhe von 3 m bis auf 6 m bedeutet gleichzeitig eine Abnahme der Maximaltemperatur im Plume über dem jeweiligen Brand, d.h. jeder Flamme kann in einer festgelegten Höhe eine bestimmte Temperatur (-bereich) zugeordnet werden. Evtl. Überschneidungen der Kurven oder sonstige Abweichungen von Meßwerten, wie sie auch im Bild zu erkennen sind, können während des Versuches durch mehrere Faktoren beeinflußt werden. So können die verschiedenen Flammenhöhen aufgrund unterschiedlicher Brandleistungen pro Flächeneinheit bei gleicher absoluter Brandleistung, die unterschiedlich hohen Volumenströme beim Absaugen der Brandgase oder die innerhalb der Versuchshalle festgestellten Temperaturunterschiede in unterschiedlichen Höhen bzw. die dadurch entstehenden Strömungsverhältnisse sowie die bei einer Messung auftretenden gerätebedingten Meßfehler dafür eine Ursache sein. Dennoch kann der höhenabhängige Verlauf der Meßwerte als ein plausibles Ergebnis bezeichnet werden.

4.2 Temperaturen in der Versuchshalle

Die innerhalb der Versuchshalle an den Meßketten während der Versuchsdauer aufgezeichneten Temperaturen stiegen bei Versuch 1 in den Höhen 3m, 5m und 7m von ca. 28 °C (30 °C) zum Zündzeitpunkt auf Werte bis zu ca. 30 °C (32 °C) am Ende des Versuches an. Ausgehend von einer um 2 bis 4 °C höheren Raumtemperatur in

einer Höhe von 9 m konnte sofort nach Brandbeginn ein kontinuierlicher Anstieg registriert werden. Dabei wurden Maximalwerte der Temperatur von 38 bis 40 °C erreicht. Diese erhöhten Temperaturen lassen auf eine Rauchschtichtunterkante in einer Höhe von oberhalb 7 m und unterhalb einer Höhe von 9 m schließen. In den Bildern 21 a, b, c wurden zur Veranschaulichung für die drei Meßketten (vorne, mitte, hinten) die Temperaturen in Abhängigkeit von der Versuchszeit mit der jeweiligen Höhe als Parameter aufgetragen, wobei in einer Höhe von 9 m deutlich die angestiegene Temperatur zu erkennen ist. Bis zu einer Höhe von 7 m waren die Temperaturen in der Versuchshalle demnach konstant. Da mit dem Meßarm nur bis zu einer Meßhöhe von 6 m oberhalb des Hallenbodens gemessen wurde, liegt der ausgemessene Bereich des Plume also in der rauchfreien Zone.

Für Versuch 2 wurden die in der Versuchshalle mit einer Brandleistung von 500 kW aufgezeichneten Temperaturen in Bild 22a dargestellt. Bei Versuchsbeginn lagen die Temperaturen in den Höhen 3 m, 5 m, 7 m und 9 m bei ca. 24°C bis 28°C. Sie erreichten nach einer Versuchszeit von 15 min in der gesamten Halle Mittelwerte von ca. 36°C, ca 49°C, ca. 56°C und ca. 58°C (vgl. auch T28 Höhe 3 m mit 34°C und 5 m mit 48°C). Temperaturschwankungen in der Versuchshalle je nach Entfernung von der Brandquelle oder durch Strömungen verursacht sind durchaus vorhanden. Nach einer Versuchszeit von ca. 23 min wurde die Brandphase des Versuches beendet und die Temperaturabnahme noch bis zur Versuchszeit von ca. 30 min aufgezeichnet. Zu diesem Zeitpunkt erreichte im oberen Teil der Versuchshalle die Temperatur wieder Werte von weniger als 50°C und unterhalb einer Höhe von 3 m Werte von etwa 30°C.

Um einen Vergleich zu einer höheren Brandleistung zu erhalten, wurden in Bild 22 b die Temperaturen der drei Meßketten in der Versuchshalle bei einem Versuch mit einer Brandleistung von 1200 kW über einen längeren Zeitraum von ca. 30 min aufgezeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, daß ausgehend von einer niedrigeren Raumtemperatur bei ca. 15 bis 20 °C in den unterschiedlichen Höhen während der gesamten Versuchszeit die Temperaturen in einer Höhe von 3 m stärker voneinander abweichen als in größeren Höhen. Die Maximaltemperaturen stiegen entsprechend der größeren Brandleistung auf höhere Werte an. Die jeweils höhere Temperatur lag dabei wegen der geringeren Entfernung zur Brandstelle in der Hallenmitte. Weiterhin

kann festgestellt werden, daß sich die Temperaturen in Höhen von 9 m und mehr innerhalb einer Rauchsicht in der gesamten Versuchshalle weitgehend angeglichen hatten.

Für die Versuche 3 bis 13 wurde beispielhaft in den Bildern 23 a bis 23 f, 23 g bis k jeweils der Temperaturverlauf in der Hallenmitte dargestellt, um für die verschiedenen Brandleistungen die wesentlichen Unterschiede bzgl. einer sich in der Versuchshalle ausbildenden Rauchsicht aufzuzeigen. Bei Versuch 3 (Bild 23a) stiegen in den Höhen 3 m und 5 m die Temperaturen geringfügig um ca. 2 °C auf etwa 29 °C an, in 7 m Höhe stieg nach ca. 2 min die Temperatur etwas an und erreichte ca. 33 °C, während in 9 m Höhe bereits kurz nach der Zündung die Temperatur deutlich von 27 °C auf etwa 41 °C anstieg.

Im Gegensatz dazu war bei Versuch 4 (Bild 23b) mit keinerlei Absaugung aus der Versuchshalle nach ca. 2 min Versuchsdauer auch in 3 m Höhe ein geringer und in 5 m Höhe ein deutlicherer Anstieg der Temperatur vorhanden. In 7 m und 9 m Höhe begannen die Temperaturen bereits direkt nach Zündbeginn zu steigen. Damit wird die Erwartung bestätigt, daß eine Schichtenbildung des Brandrauches im Raum bei gleicher Brandleistung sehr viel schneller stattfindet, wenn die Brandgase nicht abgeführt werden.

Bei Versuch 5 (Bild 23c) wurde deutlich, daß bei einer Erhöhung der Brandleistung auf 800 kW bei eingeschalteter Absaugung auch in den Höhen 3 m und 5 m die Temperatur bereits nach der Zündung leicht ansteigt. In den Höhen 7 m und 9 m steigt die Temperatur entsprechend schneller bis auf Werte von etwa 55 °C bzw. 61°C an. Generell ist bei allen Versuchen jedoch im Hinblick auf mögliche weitere Interpretationen von Versuchsdaten zu beachten, daß sie an verschiedenen Versuchstagen mit unterschiedlich hohen Anfangstemperaturen innerhalb der Versuchshalle durchgeführt wurden.

Versuch 6 (Bild 23d) zeigte bei Verwendung einer anderen Düse und gleicher Brandleistung ähnliche Temperaturverläufe, wie sie bei Versuch 5 aufgezeichnet wurden. Versuch 7 (Bild 23e) brachte insofern eine Änderung mit sich als in einer Höhe von 5 m nach einer Versuchszeit von ca. 2,5 min ein stärkerer Anstieg der Temperatur

bzw. ein Absinken der Rauchsicht in der Halle erfolgte. Dies ist auf die geringere Absaugung von 10000 m³/h zurückzuführen. Eine andere Düse bei sonst gleichen Parametern brachte bei Versuch 8 (Bild 23f) keine nennenswerten Änderungen bei der Bildung der Rauchsicht in der Versuchshalle.

Eine Erhöhung der Brandleistung auf 1200 kW bei Versuch 9 (Bild 23g) machte sich in einem wesentlich stärkeren Anstieg der Temperaturen in den Höhen 7 m und 9 m bemerkbar. Im unteren Hallenbereich in einer Höhe von 3 m und 5 m stieg die Temperatur deutlicher an als bei Versuch 6 mit einer Brandleistung von 800 kW. Nach einer Versuchszeit von ca. 2 min begann sich in 5 m Höhe eine weitere Temperaturerhöhung bemerkbar zu machen, was darauf schließen ließ, daß sich die – visuell nicht hinreichend erkennbare - Rauchsicht in der Versuchshalle weiter absenkte.

Bei Versuch 10 (Bild 23h) wurde mit einem Wannenbrand eine Wärmeleistung von ca. 250 kW erzeugt. Hier erfolgte im unteren Hallenbereich bis zu 5 m Höhe keine erwähnenswerte Temperaturerhöhung. In einer Höhe von 7 m war nach einer Versuchszeit von ca. 1,5 min und in einer Höhe von 9 m nach ca. 0,5 min ab Zündbeginn ein Anstieg der Temperatur festzustellen. Bei Versuch 11 (Bild 23i) hatte eine Reduzierung der Absaugleistung auf 10000 m³/h mit den gleichen Einstellungen nur einen minimalen Einfluß auf die Temperaturerhöhung und die Schichtenbildung in der Versuchshalle. Eine Wärmeleistung bei einem Wannenbrand von ca. 500 kW wie bei Versuch 12 (Bild 23j) läßt im Unterschied zu den beiden vorherigen Wannenversuchen die Temperaturen in der Versuchshalle in 7 m und in 9 m Höhe bei etwa der gleichen Branddauer wie zuvor etwas mehr ansteigen, d.h. die Bildung einer Rauchsicht erfolgte schneller. Eine Verringerung der Absaugleistung auf 10000 m³/h bei Versuch 13 (Bild 23k) bewirkte ähnlich wie bei den Versuchen 6 und 7 bzw. 8 einen früheren Temperaturanstieg in den größeren Höhen bei 7 m und 9 m und nach einer Versuchszeit von ca. 3,5 min eine merkliche Temperaturerhöhung in einer Höhe von 5 m. Daraus kann auf eine deutliche Absenkung der Rauchsicht in der Versuchshalle geschlossen werden.

4.3 Flammen- und Plumekontur

Die optische Bestimmung des Bildes einer Flamme bzw. eines Plume wurde mit Hilfe der Temperaturmessungen unterstützt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Temperatur über einem Brandherd wesentlich höher ansteigt als in seiner Umgebung. Mit der bereits beschriebenen Messeinrichtung wurden Temperaturmessungen zur Bestimmung der Flammen- und Plumekontur durchgeführt. Anschließend wurden in der jeweils gleichen Höhe der Messung die Temperaturdifferenzen zur Umgebung berechnet und die Temperatur der Umgebung auf ein Nullniveau festgelegt. Dadurch wurden die unterschiedlichen Raumtemperaturen in der Versuchshalle berücksichtigt. In den Bildern 16a bis 16d wurden die maßgeblichen Temperaturkurven bereits eingezeichnet. Als Grenzwert für die jeweilige Kontur wurde das Erreichen eines Wertes in horizontaler Richtung in der jeweiligen Messhöhe von 5% der jeweiligen Maximaltemperatur auf der Achse festgelegt. Auf diese Weise wurden für die hier durchgeführten Simulationsbrände Flammen- bzw. Plumekonturen ermittelt.

In Tabelle 4 wurden neben der Versuchsnummer die Brandleistung, die radiale Ausbreitung der Flamme bzw. des Plume in der jeweiligen Höhe sowie die zugehörigen Öffnungswinkel eingetragen. Bei allen Versuchen ist deutlich zu erkennen, daß mit ansteigender Höhe auch der Flammen-/Plumeradius der Simulationsbrände größer wurde, d.h. der Plume weitete sich nach oben auf. Die aus den Versuchsdaten berechneten Öffnungswinkel für die aufgelisteten Versuche lagen zwischen $25,6^\circ$ und $47,9^\circ$. Eine eindeutige Abhängigkeit der Winkel von der Brandleistung und von der Absaugung war dabei nicht zu erkennen. In der Literatur wurden zum Vergleich für Diffusionsflammen mittlere Winkel von ca. 30° (s. auch Bild 1) angegeben.

Für den Versuch 2 mit einer Brandleistung von 500 kW wurden in den Meßhöhen von 0,4 m bis 6,0 m in Abständen von 0,5 m die entsprechenden Radien für die Konturen eingetragen. Bei den übrigen Versuchen wurde innerhalb der Flamme, unterhalb einer Höhe von 3 m, aus versuchstechnischen Gründen auf Messungen verzichtet. In diesem Bereich sind die evtl. entstehenden Abweichungen bei den Winkelangaben für die Kontur mit weniger als 5% des Winkels als gering zu bezeichnen und deshalb vernachlässigbar.

Zur Veranschaulichung wurden für die in der Tabelle 4 aufgelisteten Versuche in den Bildern 24a bis 24m die Konturen der halben Öffnungswinkel dargestellt. Zusätzlich wurden die Öffnungswinkel der Einhüllenden für die jeweilige Kontur angegeben, die jedoch selbst bei gleichen Bränden durch äußere Einflüsse evtl. geringfügig voneinander abweichen können. Die für die einzelnen Konturen berechneten zugehörigen Geradengleichungen wurden der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

4.4 Flammenlänge und virtueller Ursprung

Die jeweilige Flammenlänge bei den an der Forschungsstelle untersuchten Bränden mit dem Sprühdüsenbrenner wurde durch Langzeitbeobachtungen unter Zuhilfenahme von Foto- und Videoaufzeichnungen bestimmt. In Tabelle 5 wurden neben der Versuchsnummer die eingestellten Wärmeleistungen der Brände, ihr jeweiliger Durchmesser am Flammenfuß sowie die gemessenen Flammenlängen aufgeführt. Demgegenüber wurden die rechnerisch ermittelten Flammenlängen unter Verwendung der von Thomas /9/ angegebenen Formel $L = -1.02 \cdot D + 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5}$ bestimmt und zum Vergleich in der Tabelle angegeben. Als Ergänzung wurden für die Versuche mit den Brandstoffen Spiritus und Heptan in je einer Wanne mit der Kantenlänge 50 cm die zugehörigen Flammenlängen aufgelistet.

Anhand dieser Tabelle ist zu erkennen, daß bei zwei Bränden die optisch und rechnerisch ermittelten Flammenlängen nahezu gleich (< 5 cm Abweichung) sind, während bei den anderen Bränden die berechneten Flammenlängen die visuell ermittelten mittleren Flammenlängen teilweise um bis zu 25% übersteigen.

In der Tabelle 5 wurde außerdem der mit der Formel von Heskestad /8/ ermittelte virtuelle Ursprung der jeweils verwendeten Wärmequelle eingetragen, der die Lage einer Punktquelle mit gleicher Wärmefreisetzung wie die des Brandes selbst beschreibt. In Bild 3 wurde bereits die Lage des virtuellen Ursprungs verdeutlicht. Während bei den mit Brandstoff gefüllten Wannen der virtuelle Ursprung etwa in der Ebene der Flüssigkeit selbst liegt, kann bei den mit dem Sprühdüsenbrenner ausgemessenen Flammen eine Verschiebung des virtuellen Ursprungs in positiver Richtung mit höher werdender Wärmestromdichte (freigesetzter Wärmestrom pro m²) unter

Berücksichtigung des Flammendurchmessers festgestellt werden. Je größer die flächenbezogene Wärmeleistung ist, desto höher liegt der virtuelle Ursprung des Brandes über der Brandfläche im positiven Bereich. Bei nicht kreisrunden Bränden (quadratische Wannen u. a.) werden bei der Berechnung entsprechend äquivalente Kreisdurchmesser verwendet. Bei der zusätzlich aufgelisteten Wanne mit dem flüssigen Brandstoff Heptan ist gegenüber Spiritus ebenfalls die Verschiebung des virtuellen Ursprungs durch den wesentlich höheren Heizwert in positiver Richtung zu erkennen.

4.5 Temperaturbereiche

Die von McCaffrey /11/ durchgeführten Modelluntersuchungen mit Erdgas-Diffusionsflammen führten für den Temperaturverlauf auf der Achse zu den bereits erwähnten drei Bereichen, aufgeteilt in den Flammenbereich, in den intermittierenden Bereich (flackernde Flamme) und in den Ähnlichkeitsbereich (Auftriebsströmung), wie es in Bild 25 dargestellt wurde. Bild 26 zeigt den zugehörigen Temperaturverlauf auf der Achse für diese drei Bereiche nach Tanaka /19/, aufgetragen über dem Quotienten $z / \dot{Q}^{0,4}$. Die Grenzwerte der einzelnen Bereiche werden bei 0,067 und 0,15 angegeben.

Diesbezüglich wurden mit dem bereits eingesetzten Sprühdüsenbrenner mit einer Brandleistung von 500 kW Messungen durchgeführt und mit den Literaturwerten verglichen. In Bild 27 wurde für Meßhöhen zwischen 0,4 m und 6,2 m der jeweilige Temperaturverlauf auf der Achse für die drei verschiedenen Geltungsbereiche dargestellt. Anhand der Meßwerte ist deutlich zu erkennen, dass die Untersuchungen mit Erdgasflammen und diejenigen mit Flammen des Sprühdüsenbrenners der Forschungsstelle mit dem Brandstoff Spiritus vergleichbar sind. Beim Sprühdüsenbrenner mit einer Wärmefreisetzung von 500 kW lagen unter Berücksichtigung des virtuellen Ursprungs $(z - z_0) / \dot{Q}^{2/5}$ die Geltungsbereiche für die Flamme bei Werten von 0,00 bis 0,075 (0,08) bei einer Aufstiegshöhe z von ca. 1,5 m, für den Intermittenzbereich bei Werten von 0,075 (0,08) bis 0,15 (0,18) bei einer Aufstiegshöhe z von ca. 2,5 m und für den Ähnlichkeitsbereich bei Werten größer als 0,15 (0,18). Von McCaffrey /11/ wurden Grenzwerte der Gültigkeitsbereiche mit $z / \dot{Q}^{2/5} = 0,08$ bzw. mit 0,20 angegeben

Bei den übrigen an der Forschungsstelle durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Sprühdüsenbrennern und Brandwannen mit Wärmefreisetzungen zwischen 246 kW und 1200 kW wurden Messungen in Höhen zwischen 3 m und 6 m durchgeführt. Wie die Bilder 28a bis 28m zeigen, können sämtliche Temperaturverläufe dem Ähnlichkeitsbereich zugeordnet werden. Bei einer Aufstiegshöhe z (Meßhöhe) von 3 m wurde jedoch bei den höheren Brandleistungen ab ca. 800 kW die Grenze (bei 0,15 bis 0,2) zum Intermittenzbereich erreicht.

4.6 Geschwindigkeit, Massenstrom, Wärmestrom im Plume

Die bei einem Brand vorhandene Auftriebsströmung verursacht in der Flamme bzw. im Plume eine entsprechende Geschwindigkeit. Mit Hilfe der bereits erwähnten Drucksonden wurde durch die Messung an vorgegebenen Punkten im Strömungsfeld (s. Abschnitt 3.6) der dort herrschende Druck aufgezeichnet und mit der entsprechenden Dichte über die Bernoulli-Gleichung die jeweils auftretende Geschwindigkeit berechnet. Bei Verwendung eines Prandtl-Rohres bei der Messung kann insbesondere bei geringem Winkelversatz (bis etwa 15°) der Strömung gegenüber der Einbaurichtung des Prandtl-Rohres der in Einbaurichtung strömende Anteil der Rauchgasgeschwindigkeit gemessen werden.

In Bereichen der horizontalen Ansaugung von Umgebungsatmosphäre und der Umlenkung in die Flamme bzw. den Plume sind die Aufzeichnungen der Druckmeßwerte nicht direkt verwertbar und deshalb die Aussagen im Randbereich der Strömung zu ungenau. Andererseits ist jedoch aufgrund der Temperaturmessungen die Strömungsgrenze plausibel bestimmt und deswegen die für den Anteil der in der Rauchgassäule vertikal strömenden Masse maßgebende vertikale Strömungskomponente an dieser Grenze gleich Null zu setzen. Durch Änderungen in der Strömungsrichtung, d. h. evtl. durch Druckschwankungen ermittelte kleinere negative Druckwerte wurden ebenso gleich Null gesetzt.

In den Bildern 29a bis 29d sind beispielhaft für den Versuch 6 mit einer Brandleistung von 800 kW die Druckverteilungen in den Höhen 3 m, 4 m, 5 m und 6 m in dreidi-

mensionaler Darstellung in Abhängigkeit des horizontalen Abstandes (Radius) von der Achse und in den Bildern 30a bis 30d die zugehörigen Geschwindigkeiten in den entsprechenden Höhen in dreidimensionaler Form in Abhängigkeit des horizontalen Abstandes (Radius) von der Achse aufgetragen.

Aus den Messwerten der Temperatur und der Geschwindigkeit ist es möglich, die im Plume strömende Rauchgas/Luftgemisch-Masse zu berechnen. Der flächenspezifische lokale Massenstrom (Massenstromdichte \dot{m}'') durch ein Flächenelement im Querschnitt der Strömung ergibt sich aus:

$$\dot{m}'' = \rho \times u \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

$$\rho = 1,293 \times \frac{273,16}{(T[^\circ\text{C}] + 273,16)}$$

(näherungsweise trockene Luft, ideales Gasgesetz)

T [°C] Messwerte der Temperatur

u [m/s] Geschwindigkeit.

Durch Flächenintegration mit Hilfe eines Computerprogrammes über die diskreten Stützstellen innerhalb der Ränder der Strömung erhält man den Massenstrom in der jeweiligen (horizontalen) Meßebeine der Rauchgassäule.

Die Bilder 31a bis 31d zeigen beispielhaft für den Versuch 6 die jeweilige Massenstromdichte in den Messebenen 3 m, 4 m, 5 m und 6 m in dreidimensionaler Form in Abhängigkeit des radialen Abstandes (Radius) von der Achse bei einer Wärmeleistung von 800 kW. Es ist deutlich zu erkennen, daß mit zunehmender Höhe aufgrund des sich nach oben aufweitenden Kegels des Plume auch die Masse der eingesaugten Umgebungsatmosphäre zunimmt und damit der im Plume transportierte Massenstrom immer größer wird.

Bild 32 zeigt beispielhaft den jeweiligen Massenstrom in Abhängigkeit von der Höhe bei einer Wärmeleistung von 800 kW. In dem dargestellten Versuch wurde der durch ein Computerprogramm ermittelte Massenstrom wie zu erwarten durch die Aufweitung des Plume mit zunehmender Höhe größer.

Es ist jedoch ebenso möglich, daß während eines Versuches sowohl durch äußere Einflüsse als auch bei der Berechnung durch die Verwendung eines vorhandenen Computerprogrammes die Ergebnisse evtl. nicht den gewünschten Verlauf zeigen. Vielmehr können bereits beim Ablauf eines Versuches Abweichungen bei den gemessenen Temperaturen und Strömungen auftreten oder auch bei den Rechenmethoden durch die automatische Abfolge der Rechenschritte evtl. nicht plausibel erklärbare Zwischenergebnisse weiterverwendet werden, was die Berechnungen beeinflussen kann, so daß nicht mehr notwendigerweise mit einer Zunahme der Masse in größeren Höhen ausgegangen werden kann. In Tabelle 6 wurden die Ergebnisse zusammengestellt.

Der Massenstrom wurde mittels eines Computerprogrammes berechnet, wobei bei gleicher Berechnungsmethode mit unterschiedlichen Stützstellen gearbeitet wurde, um diese Abweichungen deutlich zu machen. Am Plume selbst wurden für die weitere Berechnung keine geometrischen Änderungen bzgl. der gemessenen Abweichungen in der jeweiligen Strömung vorgenommen.

Durch sehr aufwendige Korrekturverfahren können einerseits geometrische Abweichungen bei den Plumes mit berücksichtigt und andererseits programmtechnische Bedingungen geschaffen werden, um die Ergebnisse eines Versuches immer plausibel beschreiben und die folgende Berechnung den Idealvorstellungen näherbringen zu können. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, daß sich ein realer Brand nicht unbedingt an die vorher festgelegten Bedingungen hält, so daß immer eine gewisse Unsicherheit mit einkalkuliert werden sollte.

Neben der Brandleistung \dot{Q} (Wärmefreisetzung) hat die Aufstiegshöhe z der jeweiligen Flamme einen maßgeblichen Einfluß auf den Massenstrom. Die Lufteinmischung kann in den Plume unter Berücksichtigung der Aufstiegshöhe und des Wärmestromes jeweils durch eine Potenzfunktion dargestellt werden. Die bereits durch die Temperaturmessungen festgestellten Grenzen, bei denen der Übergang zwischen den genannten drei Bereichen stattfindet, wurde mathematisch berücksichtigt, was nach /11/ zu den folgenden drei bereits erwähnten Gleichungen für den Massenstrom führt:

Flammenbereich	$\dot{m} = 0,011 * z^{0,566} * \dot{Q}^{0,774}$
Intermittenzbereich	$\dot{m} = 0,026 * z^{0,909} * \dot{Q}^{0,636}$
Ähnlichkeitsbereich	$\dot{m} = 0,124 * z^{1,895} * \dot{Q}^{0,242}$

Die Formeln wurden an den Übergängen zwischen den Bereichen mathematisch angepaßt. Erfahrungswerte mit Vergleichsversuchen zeigen, daß die damit berechneten Massenströme im Allgemeinen auf der sicheren Seite liegen.

Bild 33 zeigt den Massenstrom in Abhängigkeit von der Aufstiegshöhe für verschiedene Brandleistungen. Die gestrichelten Kurven geben die Massenströme bei Brandleistungen von 100 kW, 500 kW, 3000 kW und 10000 kW nach McCaffrey /11/ wieder. Im Vergleich dazu sind für die hohe Brandleistung von 10000 kW die Kurven nach Thomas, Hinkley et al. /13/ im Gültigkeitsbereich der Flamme und die nach Zukoski / 7/ im Ähnlichkeitsbereich aufgetragen.

Für den Massenstrom \dot{m} eines Plume gilt nach Heskestad /60/ für Höhen z , die größer sind als die Flammenlänge, folgende Formel mit dem virtuellen Ursprung z_0

$$\dot{m} = 0,071 * \dot{Q}^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 0,00192 * \dot{Q}.$$

In der bereits erwähnten Tabelle 1 wurden die verschiedenen Formeln wiedergegeben. Der Massenstrom im Plume ist abhängig von der Wärmefreisetzungsrate, der Höhe und der Geometrie der Brandquelle. Zur Einordnung der hier durchgeführten Messungen und Auswertungen wurde in Bild 34 die Masseneinsaugung entsprechend den Formeln nach McCaffrey /11/ und Zukoski /7/ (s. auch Brein /1/) mit ausgewerteten Massenströmen verglichen. Dafür wurde ein Versuch mit einer durch den zuvor beschriebenen Sprühdüsenbrenner erzeugten Brandleistung von 300 kW herangezogen. Außerdem wurde zum Vergleich die aus der Versuchshalle abgesaugte Masse mit 10 kg/s eingetragen. Die Unterkante der Rauchsicht in der Versuchshalle erreichte bei diesem Versuch nicht die obere Messebene in 6 m Höhe. Jedoch konnte aufgrund der Auswertung von Temperaturmessungen in der Versuchshalle außerhalb der Rauchsäule (Plume) eine Rauchsicht in einer Höhe von ca. 7 m festgestellt werden. Es ist zu erkennen, daß in diesem Fall eine vergleichsweise gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit der Formel von Zukoski vorliegt.

In den Bildern 35a bis 35d wurde für eine Brandleistung von 800 kW die Wärmestromdichte in den vier Messebenen 3 m, 4 m, 5 m und 6 m in dreidimensionaler Form dargestellt. Auch hier nimmt wie zu erwarten der Radius des abgebildeten Kegels mit zunehmender Höhe zu.

Der Wärmestrom verläuft auf einem Niveau zwischen ca. 625 kW und 800 kW. In Tabelle 6 wurden für den Wärmestrom wie zuvor beim Massenstrom die entsprechenden Werte aus den Versuchen eingetragen. Auch hier ist deutlich zu erkennen, daß die gemessenen Wärmeströme von Meßebebene zu Meßebebene unterschiedlich hoch sind, was auf die bereits beim Massenstrom erwähnten Erklärungen zurückzuführen ist.

Wie aus der Tabelle 6 weiter zu ersehen ist, kann jedoch für die unterschiedlich hohen Wärmeleistungen des Sprühdüsenbrenners deutlich eine Tendenz festgestellt werden. Bei höheren/kleineren eingestellten Leistungen ergeben sich entsprechend auch höhere/kleinere Werte. Unter Berücksichtigung des Konvektions- und des Strahlungsanteils der Flamme können die Ergebnisse als hinreichend gut bezeichnet werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, eine realitätsnahe Prüfeinrichtung für RWA-Anlagen zu finden. Diesbezüglich wurde einerseits durch eine umfangreiche Literaturlauswertung auf bereits vorhandene Erkenntnisse hingewiesen und andererseits wurden durch experimentelle Untersuchungen Wege aufgezeigt, wie Simulationen realitätsnaher Brände durchführbar sind, um damit die Gültigkeit von Bemessungen der Rauchabführung für bestimmte Objekte nachweisen zu können.

Da in den meisten Fällen ein Brand praktisch keinen Anfangsimpuls besitzt, wurden in der vorliegenden Arbeit mehrere mögliche Prüfeinrichtungen getestet, die möglichst nahe das Brandverhalten eines realen Brandes zu simulieren in der Lage sind.

Unter diesen Simulationsbrennern wurde der sogenannte Sprühdüsenbrenner für anschließende Versuche eingesetzt.

Um jedoch einen Simulationsbrand meßtechnisch erfassen zu können wurden durch den Brand verursachte Änderungen eines normalen Zustandes wie z. B. Temperatur und Druck der Strömung mit einer an der Forschungsstelle entwickelten Versuchsanlage aufgenommen. Mit unterschiedlichen Sprühdüsen und Brennstoffvolumenströmen wurden Flammen mit Brandleistungen zwischen 300 kW und 1200 kW erzeugt und die Ausbreitung des entstehenden Plume (Flammen-/ Rauchgassäule) gemessen, um den jeweiligen Ausbreitungswinkel angeben zu können. Gleichzeitig wurden an Meßketten Temperaturen in der Versuchshalle zur Bestimmung einer entstehenden Rauchsicht unterhalb der Decke aufgezeichnet. Weiterhin wurden die Massenströme und die Wärmeströme bei den einzelnen Düseneinstellungen bestimmt.

Mit einer Prüfeinrichtung dieser Art ist es schließlich möglich, in beliebigen Bauwerken eine Brandsimulation durchzuführen, um den Nachweis von vorausgegangenen Berechnungen für die Belastung bzw. die Rauchfreihaltung zu erbringen.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- / 1/ Brein, D.: Anwendungsbereiche und –grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln)
Literaturübersicht
Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), März 2000, 59 S.
- / 2/ Putnam.A.A.
Speich, C.F.: A model study of the interaction of multible turbulent diffusion flames
Ninth (International) Symposium on Combustion, Academic Press, London (1963), S.867-875
- / 3/ Hess, K.: Flammenlänge und Flammenstabilität
Karlsruhe, Technische Hochschule, Dr. Ing.-Dissertation, 1965
- / 4/ Blinov, V.B.
Chudjakov, G.N. Über einige Gesetzmäßigkeiten der Diffusionsverbrennung von Flüssigkeiten
Doklady Akademii Nauk SSSR, Band 113, Nr.5 (1957), S. 1094-1098 (Orig. russisch)
- / 5/ Werthenbach,H.G: Brände von Erdölprodukten in Tanks – Versuche und Rechenmodell
Karlsruhe, Universität, Dr.-Ing.-Dissertation, 1970
Veröffentlicht als Forschungsbericht Nr.21 der Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) 1971
- / 6/ Schatz, H.: Brennverhalten bei geringer Brennstoffzufuhr, Simulation mit kleinen Tanks
Karlsruhe, Universität,
Nicht veröffentlichte Messungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 1977
- / 7/ Zukoski, E.E.: Mass flux in fire plumes
IAFSS. Fire Safety Science. Proceedings of the 4th International Symposium, Ottawa, 1994
- / 8/ Heskestad, G.: Flame heights of fuel arrays with combustion in depth
IAFSS, Fire Safety Science Proceedings of the 5th International Symposium, Melbourne, 1987
- / 9/ Thomas, P.H.:
Borves, P.C.: Some aspects of the self-heating and ignition of solid cellulosic materials
British Journal of Applied Physics, 12 (1961), S.222-229
- /10/ Schneider, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz
WIT, 1.Auflage 2002, Düsseldorf, Werner Verlag, ISBN 3-8041-4189-7

- /11/ McCaffrey, B.: Momentum implications for buoyant diffusion flames
Combustion and Flame 52 (1983) S.149-167
- /12/ Cox, G; Chitty, R.: A study of the deterministic properties of unbounded fire plumes
Combustion and Flame 39 (1980) S. 191-209
- /13/ Thomas, P.H. Investigations into the flow of hot gases in roof venting
Hinkley, P.L. Fire Research Technical Paper No. 7
Theobald, C.R. London: HMSO, 1963
Simms, D.L.
- /14/ Peacock, R.D. et al: CFAST, the consolidated model of fire growth and smoke transport
NIST Technical Note 1299
- /15/ Beyler, C.L. Development and burning of a layer of products of incomplete combustion generated by a buoyant diffusion flame
Dissertation. Boston Harvard University 1983
- /16/ Morton, B. R. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous source
Turner, G.I.; Taylor, J.S.: Proc. Roy. Soc. A234, 1-23 (1956)
- /17/ Zukoski, E.E. Entrainment in fire plumes
Kubota, T. Fire Safety Journal, 2 (1981) S.107-121
Cetegen, B.:
- /18/ Cetegen, B.M. Entrainment in the near and far fields of fire plumes [s. /1/]
Zukoski, E.E. Combustion Science and Technology 39:305 (1984)
Kubota, T. und Report NBS-GCR-81-346, Center for Fire Research, National Bureau of Standards, Aug. 1981
- /19/ Tanaka, T. Smoke control in large scale space.
Yamana, T.: Teil 1: Analytic theories for simple control problems
Fire Science and Technology 5 (1985) Nr.1, S.31-40
- /20/ Yamana, T. Smoke control in large scale space
Tanaka, T.: Teil 2: Smoke control experiments in a large scale space
Fire Science and Technology 5 (1985) Nr.1, S.41-53
- /21/ Smoke movement in building
NFPA Fire Protection Handbook, 18. Auflage, Abschnitt 7, Kapitel 6, Boston 1997
Kapitel 7, Boston 1997
- /22/ Guide for smoke management systems in malls, atria and large areas
NFPA Code 92 B, Boston, 1995

- /23/ Schneider, U. Grundlagen für die Dimensionierung der Rauchfreihaltung
Oswald, M.; Max, U.: Teil 1
VFDB 3(2001) S.105-110
- /24/ Seifert, U.; Stein, J.: Rauchversuche in Gebäuden
VFDB 3 (2001) S.123-128
- /25/ Gerhardt, H.J. Entrauchungsnachweise.
Kritische Diskussion von Methoden des
Brandschutzingenieurwesens
VFDB 3(2001) S.99-104
- /26/ Ostertag, D. Innenliegende Sicherheitstreppe in Hochhäusern
Zitzelsberger, J.: und ihre Rauchfreihaltung
VFDB 3(2001) S.120-122
- /27/ He, Y. Determination of interface height from measured
Fernando, A. parameter profile in enclosure fire experiment
Luo, M.: Fire Safety Journal 31 (1998) 1, S.19-38
- /28/ Botlan, Y.L. Stratification des fumees
Face au Risque (1995) 318, S.11-13,16
- /29/ Chow, W.K. Scale modelling studies on atrium smoke movement and
Lo, A.C.W.: the smoke filling process
Journal of Fire Protection Engineering 7 (1995) 2, S.55-64
- /30/ Chow, W.K. Experimental studies on natural smoke filling in atria
Cui, E.; Li, Y.Z. Journal of Fire Sciences 18 (2000) 2, S.84 – 103
Huo, R.; Zhou, J.J.:
- /31/ Chow, W.K. Plume equations for studying smoke-filling process in atria
Cui, E.: with a zone model
Fire and Materials 21 (1997) S.235-244
- /32/ McCaffrey, B.J.: Purely buoyant diffusion flames: some experimental
results
NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards
Gaithersburg, MD, USA, (1979)
- /33/ Cetegen, B.M. Entrainment and flame geometry of fire plumes.
Zukoski, E.E. PhD thesis, California Institute of Technology,
Kubota, T.: Pasadena USA (1982)
- /34/ Delichatsios, M.A.: Air entrainment into buoyant jet flames and open pool fires
FMRC, Norwood, MA, USA (1985)

- /35/ Tokunaga, T. Mass flow rate formula for the upward current above
Sakai, T.; diffusion flames
Kawagoe, K, Fire Technology 2 (1982) Nr.2 S.10-16
Tanaka, T, und
Hasemi, Y.: Fire Science and Technology 2 (1982) 2, S117-125
- /36/ Matsuyama, K. Closed form equations for room smoke filling during an
Misawa, Y. initial fire
Wakamatsu, T.: Fire Science and Technology 19 (1999), S.27-38
- /37/ Kim, M.B.; Laser-assisted visualisation and measurement of corridor
Han, Y.S. smoke spread
Yoon, M.O.: Fire Safety Journal 31 (1998) 3, S.229-251
- /38/ Kim, M.B. Tracking of the smoke front under a ceiling by a laser
Han, Y.S.: sheet and thermocouples
Fire Safety Journal 34 (2000) 3, S.287-295
- /39/ Wen, J. CFD modelling of confined jet fires under ventilation-
Huang, L.Y controlled conditions
Fire Safety Journal 34 (2000) 1, S.1-24
- /40/ Fu, Z. A two-zone fire growth and smoke movement model for
Hadjisophocleous, G:multicompartment buildings
Fire Safety Journal 34 (2000) 3, S.257-285
- /41/ Ingason, H.: Plume flow in high rack storages
Fire Safety Journal 36 (2001) 4, S.437-457
- /42/ John, R.: Rauch- und Wärmeabzug bei Bränden in großen Räumen
Brandschutzseminar Nov. 1986
- /43/ Rauchentwicklung im Brandfall: VDMA-Seminar
Brandverhütung + Feuersicherheit 2 (2001) S.31-34
- /44/ Grundsätze für Rauchversuche in Gebäuden
VB, Vorbeugender Brandschutz 4 (2000) S.17-20
- /45/ Hinkley, P.L.: Rates of Production of hot gases in roof venting
experiments
Fire Safety Journal 10 (1986) S.57-65
- /46/ Rouse, H.; Yih, C.S.: Gravitational convection from a boundary source
Humphreys, H.W. Tellus, 4 (1952) 3, S201-210
- /47/ Keough, J.J.: Venting fires through roofs: experimental fires in an aircraft
hangar
Report UP 344, Commonwealth Experimental Building
Station (Australia), Oct. 1972

- /48/ Heskestad, G.: Engineering relations for the fire plumes
Technology Report 82-8, Society of Fire Protection Engineers, 1982
- /49/ Theobald, C.R.
(Thomas, P.H.): Growth and development of fire in industrial buildings,
Current Paper CP 40/78
Building Research Establishment, March 1978 (Appendix)
- /50/ Hinkley, P.L. Comparison of an established method of calculation of
smoke filling of large scale spaces with recent
experiments
Fire Science & Technology 8 (1988) Nr.1, S.1-8
- /51/ Reneke, P.A.
Jones, W.W.: A comparison of CFAST predictions to USCG real-scale
fire tests
Journal of Fire Engineering 11 (2001) Nr.1, S.43-68
- /52/ Steinert, C.: Nutzung von Heißgasgeneratoren bei der Beurteilung
von Verrauchung und
Entrauchungsmaßnahmen in bestehenden Gebäuden
Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für das
Bauwesen Leipzig e. V., 1999, 78 S. und Anhang
- /53/ Schneider, U.: Physikalisch-chemische Grundlagen der
Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz
Seminar: Baulicher Brandschutz, Brandschutz 2000 –
Ingenieurmethoden im Brandschutz,
Lehrgang Nr.: 25223/94.135
- /54/ Duong, D.Q.: The accuracy of computer fire models: some comparisons
with experimental data from Australia
Fire Safety Journal 16 (1990) S. 415-431
- /55/ Matsuyama, K.
Zuno, M.
Wakamatsu, T.: A systematic experiments of room and corridor smoke Mi-
filling for use in calibration of zone and CFD fire models for
engineering fire safety design of buildings
Fire Science and Technology 21 (2001) Nr.1, S.43-55
- /56/ Hansell, G.O.: Smoke control in the 21st century
Fire Engineers Journal 56 (1996) 182, S.25-32
- /57/ Schneider, U.: Festlegung von Schutzziele u. Brandszenarien für den
Brandschutzentwurf
Seminar: Baulicher Brandschutz, Brandschutz 2000 –
Ingenieurmethoden im
Brandschutz, Lehrgang Nr.: 25223/94.135
- /58/ Halfkann, K.H.: Gefahren durch Rauchausbreitung
Planung und Technik, BbauBI (1998) 7, S.58-63

- /59/ Babrauskas, V.: Free burning fires
Fire Safety Journal 11 (1986), S.33-51
- /60/ Heskestad, G. : Luminous height of turbulent flames
Fire Safety Journal 5 (1983) S.103/108
- /61/ BSI DD 240:
Part 1: 1997 Fire safety engineering in buildings. Guide to
the application of fire safety engineering principles
und
Part 2:1997. Fire safety engineering in buildings. Com
mentary on the equations given in Part 1

7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Zusammenstellung von Plume-Formeln nach BSI DD 240: Part 1, 1997 nach /52/ (siehe auch in / 1 /)

	Geometrie	Sonstige Bedingungen, Gültigkeitsbereich h	Formel	Grenzwerte von β nach BSI DD 240:part2:1997	Kommentar
1	Axialsymmetrie, Lachenbrand, kleine Brandfläche, kein Wandeinfluß	$D \leq z/10$ $z \gg z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,071 * \dot{Q}_P^{1/3} * (z - z_0)^{5/3}$	0,7 ... 1,5	Einfluß der Umgebungsturbulenz + 20% bis +50%
2	Kleine Brandfläche, auch von Axialsymmetrie abweichend, kein Wandeinfluß	Länge < 3 * Breite (bezogen auf die Grundfläche)	$\dot{m}_e = 0,071 * \dot{Q}_P^{1/3} * z^{5/3}$	keine Angabe	Vereinfachung; ohne virtuellen Ursprung
3	An ebener Wand anliegende Strömung	$D \leq z/10$ $z \gg z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,044 * \dot{Q}_P^{1/3} * z^{5/3}$	0,6 ... 1,6	Einfluß der Umgebungsturbulenz + 20% bis +50%
4	An Wandecke anliegende Strömung	$D \leq z/10$ $z \gg z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,028 * \dot{Q}_P^{1/3} * z^{5/3}$	0,5 ... 2,0	Einfluß der Umgebungsturbulenz + 20% bis +50%
5	Axialsymmetrische Rauchgassäule, große Brandfläche, rund oder quadratisch	$D > z/10$ (d.h. bis zu begrenzten Aufstiegshöhen) $z < 2,5 * U$ $200 < \dot{q}'' < 750$ [kW/m ²]	$\dot{m}_e = 0,188 * z^{3/2} * U$ (Gl. 31 DD 240:part 1:1997) $\dot{m}_e = 0,337 * z^{3/2} * U$ (kleine Räume, prEN 12101-5)	0,75 ... 1,15	

Fortsetzung Tabelle 1

6	Linienquelle	Länge $D > 3^*$ Breite der Schmalseite $z_{fl} < z < 5^* D$	$\dot{m}_e = 0,21 * \dot{Q}_P^{1/3} * D^{2/3} * z$	0,86 ... 1,36	Anwendung auf $z \geq 2^* D$ begrenzen, für $z \geq 5^* D$ Gl. nach Zeile 2
7	Linienquelle	Länge $D > 3^*$ Breite der Schmalseite $z > 5^* D$	$\dot{m}_e = 0,071 * \dot{Q}_P^{1/3} * z^{5/3}$	keine Angabe	
8	Plume über Brandraumöffnung (1); Massenstrom aus Brandraum	$b_F/L \geq 1$	$\dot{m}_F = 0,09 * (\dot{Q}_P b_F^2)^{1/3} * h$	0,7 ... 1,1	Entstehungsbrand (pre-flashover); $b_F/h_F \geq 1$
9	Plume über Brandraumöffnung (2), in den Plume oberhalb der Öffnung eingesaugter Massenstrom	$b_F \gg h$, bei anderen Geometrien der Öffnung etc. siehe NFPA 92 B	$\dot{m}_e = 0,23 * \dot{Q}_P^{1/3} * b_F^{2/3} * (z_F + h)$	0,7 ... 1,5	frei aufströmendes Rauchgas, bei Anlehnen an aufgehende Wand \dot{m}_e um 1/3 reduzieren
10	wie vor, jedoch mit Balkon und Rauchschürzen außerhalb des Brandraums	$l_{RS} \gg h_B$	$\dot{m}_e = 0,36 * \dot{Q}_P^{1/3} * l_{RS}^{2/3} * (z_B + 0,25 * h_B)$	0,7 ... 1,4	siehe Kommentar ⁽¹⁾
11	wie vor, jedoch ohne Rauchschürzen		$\dot{m}_e = 0,36 * \dot{Q}_P^{1/3} * (b_F + b_B)^{2/3} * (z_B + 0,25 * h_B)$	0,7 ... 1,4	siehe Kommentar ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Kommentar zu den Zeilen 10 und 11:

Bei großen Aufstiegshöhen wird angenommen, daß die Strömung axialsymmetrisch geworden ist. Unter der Bedingung, daß $z > 5h$ bzw. $z > 3 h_B$ kann die Gleichung nach Zeile 1 verwendet werden., wobei $z_0=0$ dann verwendet wird, wenn dies zu einem konservativeren Ergebnis (d.h. einem größeren Wert von \dot{m}_e) führt. Wenn jedoch das in Frage kommende Kriterium zur Risikobewertung die Rauchgastemperatur oder die Rauchkonzentration ist, dann erhält man durch Anwendung des jeweils niedrigeren Wertes von \dot{m}_e die konservativere, d.h. auf der sichereren Seite liegende Lösung. Letztere Anmerkungen sind jedoch unabhängig von der Variationsbreite, die sich aus der Anwendung der durch die in der Tabelle angegebenen Vertauensintervallparameter ergeben!

Tabelle 2. Mit dem Sprühdüsenbrenner durchgeführte Versuche

Nr.	Versuch	Meßhöhe Boden m	Düsenart Düse/Winkel Nr / Grad	Brand- Leistung kW	Abstand Boden - Düse m	Absaugung Halle m³/h
1	H300D2V05	3,0	D2 / 120	300	0,3	30000
	H400D2V06	4,0	"	"	"	"
	H500D2V07	5,0	"	"	"	"
	H600D2V08	6,0	"	"	"	"
2	alle Höhen	0,4 - 6	D3 / 120	500	0,4	30000
3	H300D4V01	3,0	D4 / 120	500	0,4	30000
	H350D4V02	3,5	"	"	"	"
	H400D4V01	4,0	"	"	"	"
	H450D4V02	4,5	"	"	"	"
	H500D4V03	5,0	"	"	"	"
	H550D4V04	5,5	"	"	"	"
	H600D4V05	6,0	"	"	"	"
4	H300D4V01	3,0	D4 / 120	500	0,4	keine
	H400D4V02	4,0	"	"	"	"
	H500D4V03	5,0	"	"	"	"
	H600D4V04	6,0	"	"	"	"
5	H300D4V01	3,0	D4 / 120	800	0,4	30000
	H400D4V02	4,0	"	"	"	"
	H500D4V03	5,0	"	"	"	"
	H600D4V04	6,0	"	"	"	"
6	H300D5V01	3,0	D5 / 120	800	0,4	30000
	H400D5V02	4,0	"	"	"	"
	H500D5V03	5,0	"	"	"	"
	H600D5V04	6,0	"	"	"	"
7	H300D5V01	3,0	D5 / 120	800	0,4	10000
	H400D5V02	4,0	"	"	"	"
	H500D5V03	5,0	"	"	"	"
	H600D5V04	6,0	"	"	"	"
8	H300D5aV01	3,0	D5a / 90	800	0,7	10000
	H400D5aV02	4,0	"	"	"	"
	H500D5aV03	5,0	"	"	"	"
	H600D5aV04	6,0	"	"	"	"
9	H300D5V05	3,0	D5 / 120	1200	0,4	30000
	H400D5V06	4,0	"	"	"	"
	H500D5V07	5,0	"	"	"	"
	H600D5V08	6,0	"	"	"	"

Fortsetzung Tabelle 2.

Nr.	Versuch	Meßhöhe Boden m	Wanne Länge cm	Brand- Leistung kW	Absaugung Halle m³/h
10	H300WAV02	3,0	Wa 70*70	6l Sp	30000
	H400WAV03	4,0	"	"	"
	H500WAV04	5,0	"	"	"
	H600WAV05	6,0	"	"	"
11	H300WAV06	3,0	Wa 70*70	6l Sp	10000
	H400WAV07	4,0	"	"	"
	H500WAV08	5,0	"	"	"
	H600WAV09	6,0	"	"	"
12	H300WAV01	3,0	Wa 100*100	16l Sp	30000
	H400WAV02	4,0	"	"	"
	H500WAV03	5,0	"	"	"
	H600WAV04	6,0	"	"	"
13	H300WAV05	3,0	Wa 100*100	16l Sp	10000
	H400WAV06	4,0	"	"	"
	H500WAV01	5,0	"	"	"
	H600WAV02	6,0	"	"	"

Tabelle 3.

Plume -Temperaturen in unterschiedlichen Meßhöhen

Versuch Nr.	Düse/kW Wanne/kW	Höhe 3 m	Höhe 4 m	Höhe 5 m	Höhe 6 m
		zeitl.(Punkt) mittl. Max.- Temperatur	zeitl. mittl. Max.- Temperatur	zeitl. mittl. Max.- Temperatur	zeitl. mittl. Max.- Temperatur
1	D2/300	134	104	78	68
2	D3/500	300	168	136	113
3	D4/500	340	155	116	98
4	D4/500	310	185	132	112
5	D4/800	333	210	150	114
6	D5/800	363	219	148	116
7	D5/800	344	218	156	118
8	D5a/800	358	183	122	102
9	D5/1200	429	265	190	140
10	WA/246	117	79	70	57
11	WA/246	85	47	42	42
12	WA/500	185	115	104	84
13	WA/500	230	152	104	84

Tabelle 4. Zu Düsen/Wannen mit entsprechenden Brandleistungen zugehörige Radien in Abhängigkeit der Höhe und Öffnungswinkel.

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Düse / Wanne	D2	D3	D4	D4	D4	D5	D5	D5a	D5	WA70	WA70	WA100	WA100
Brandleistung kW	300	500	500	500	800	800	800	800	1200	246	246	500	500
" kW/m ²	1263	2546	1768	995	1811	1258	1258	2079	1528	501	501	500	500
Absaugung m ³ /h	30000	30000	30000	0	30000	30000	10000	10000	30000	30000	10000	30000	10000
Höhe m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m	Radius m
0,4		0,38											
0,5		0,45											
1,0		0,60											
1,5		0,67											
2,0		0,70											
2,5		0,86											
3,0	1,15	0,95	0,95	1,05	1,15	1,10	1,05	1,00	1,45	1,60	1,00	1,35	1,05
3,5		1,17	1,10										
4,0	1,45	1,24	1,15	1,30	1,40	1,25	1,30	1,30	1,78	2,10	1,30	1,75	1,20
4,5		1,26	1,40										
5,0	1,90	1,37	1,75	1,75	2,00	1,60	1,55	1,70	1,85	2,40	1,40	1,80	1,55
5,5		1,74	1,90										
6,0	2,15	1,75	2,10	1,90	2,40	1,85	1,90	2,00	2,45	2,60	1,70	2,15	1,70
Öffnungs- winkel in °	38,5	27,2	45,1	34,5	47,9	29,7	31,5	37,7	37,1	38,0	25,6	28,9	26,7

Tabelle 5. Flammenfußdurchmesser, Flammenlängen und virtueller Ursprung.

Versuch Nr.	Düse	Qpunkt kW	festgelegt	optisch gemessen	optisch gemessen	Bereich gemessen min - max	Thomas/9/ berechnet	Heskest./8/ berechnet
			Durch- messer D m	Länge L m	Länge L m	Länge L m	virtueller Ursprung m	
1	D2	300	0,55	1,65	1,30 - 2,50	1,74	0,25	
2	D3	500	0,50	2,15	1,50 - 3,00	2,31	0,49	
3 , 4	D4	500	0,60	2,25	2,00 - 3,00	2,21	0,38	
5	D4	800	0,75	2,50	2,00 - 3,50	2,64	0,44	
6 , 7	D5	800	0,90	2,20	1,80 - 3,20	2,49	0,29	
8	D5a	800	0,70	2,30	1,70 - 3,00	2,69	0,49	
9	D5	1200	1,00	2,55	2,20 - 3,50	2,99	0,39	
/	WA50Sp	125	0,56	0,90	0,70 - 1,00	1,05	0,001	
/	WA50Hep	384	0,56	1,65	1,45 - 2,00	1,97	0,326	
10 , 11	WA70Sp	246	0,79	1,10	0,90 - 1,30	1,32	-0,055	
12 , 13	WA100Sp	501	1,13	1,00	0,80 - 1,20	0,97	-0,156	

Tabelle 6. Massenstrom und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Höhe

Nr.	Versuch	Höhe	Massenstrom in kg/s		Wärmestrom in kW	
			a	b	a	b
3	H300D4V01	3,0	19,34	19,24	571	565
	H350D4V02	3,5	19,16	19,41	466	465
	H400D4V01	4,0	18,78	19,49	319	358
	H450D4V02	4,5	8,81	9,24	332	372
	H500D4V03	5,0	15,59	15,69	474	503
	H550D4V04	5,5	18,38	19,25	560	610
	H600D4V05	6,0	11,11	12,22	437	492
4	H300D4V01	3,0	13,26	14,27	457	529
	H400D4V02	4,0	11,77	12,40	505	540
	H500D4V03	5,0	12,06	13,08	606	682
	H600D4V04	6,0	10,76	12,04	572	648
1	H300D2V05	3,0	8,31	8,95	187	216
	H400D2V06	4,0	9,76	10,67	224	255
	H500D2V07	5,0	9,94	11,90	215	241
	H600D2V08	6,0	9,70	10,58	210	228
5	H300D4V01	3,0	17,32	18,35	704	842
	H400D4V02	4,0	16,53	17,66	681	745
	H500D4V03	5,0	16,34	17,91	686	771
	H600D4V04	6,0	19,14	20,25	756	831
9	H300D5V05	3,0	17,51	18,28	1124	1302
	H400D5V06	4,0	16,38	17,32	964	1019
	H500D5V07	5,0	13,85	15,44	762	893
	H600D5V08	6,0	19,42	20,02	1030	1075
6	H300D5V01	3,0	13,66	14,31	715	784
	H400D5V02	4,0	15,92	16,90	570	625
	H500D5V03	5,0	17,61	18,01	615	642
	H600D5V04	6,0	16,21	17,46	670	734
10	H300WAV02	3,0	6,91	6,87	121	106
	H400WAV03	4,0	13,14	13,30	125	125
	H500WAV04	5,0	14,98	15,27	143	149
	H600WAV05	6,0	16,23	16,93	158	161
11	H300WAV06	3,0	11,04	11,03	174	162
	H400WAV07	4,0	10,64	11,06	176	168
	H500WAV08	5,0	6,00	5,87	139	125
	H600WAV09	6,0	9,64	10,22	171	180

12	H300WAV01	3,0	11,04	10,19	383	378
	H400WAV02	4,0	14,76	14,80	445	449
	H500WAV03	5,0	17,50	16,99	463	461
	H600WAV04	6,0	21,72	21,97	526	529
13	H300WAV05	3,0	10,74	10,67	371	353
	H400WAV06	4,0	11,57	11,87	363	401
	H500WAV01	5,0	12,60	13,34	394	395
	H600WAV02	6,0	9,70	10,62	298	323
7	H300D5V03	3,0	14,40	14,95	680	626
	H400D5V04	4,0	20,77	21,37	693	700
	H500D5V05	5,0	15,82	16,27	699	705
	H600D5V06	6,0	19,86	21,16	740	788
8	H300D5aV01	3,0	12,49	12,88	558	551
	H400D5aV02	4,0	17,31	17,67	572	547
	H500D5aV03	5,0	21,01	21,60	597	630
	H600D5aV04	6,0	21,57	22,43	677	698

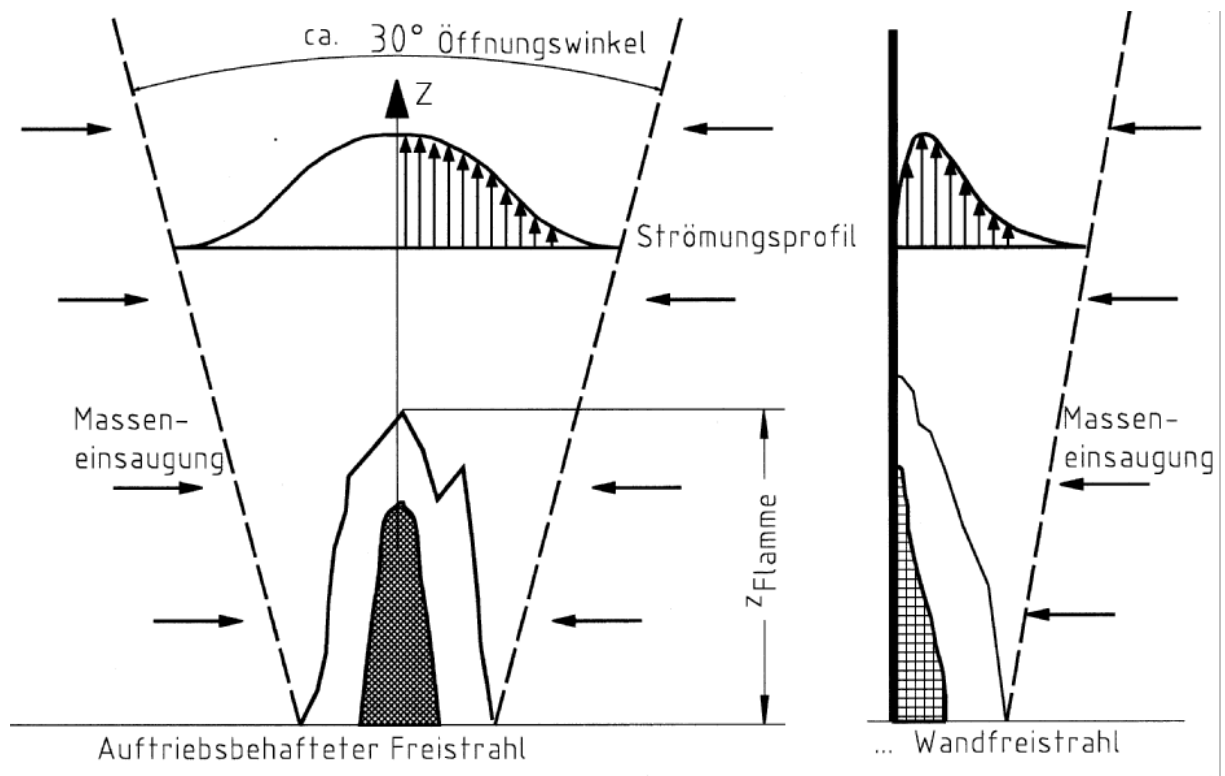


Bild 1. Auftriebsbehafteter Freistrah in ruhende Umgebung und Wandfreistrah

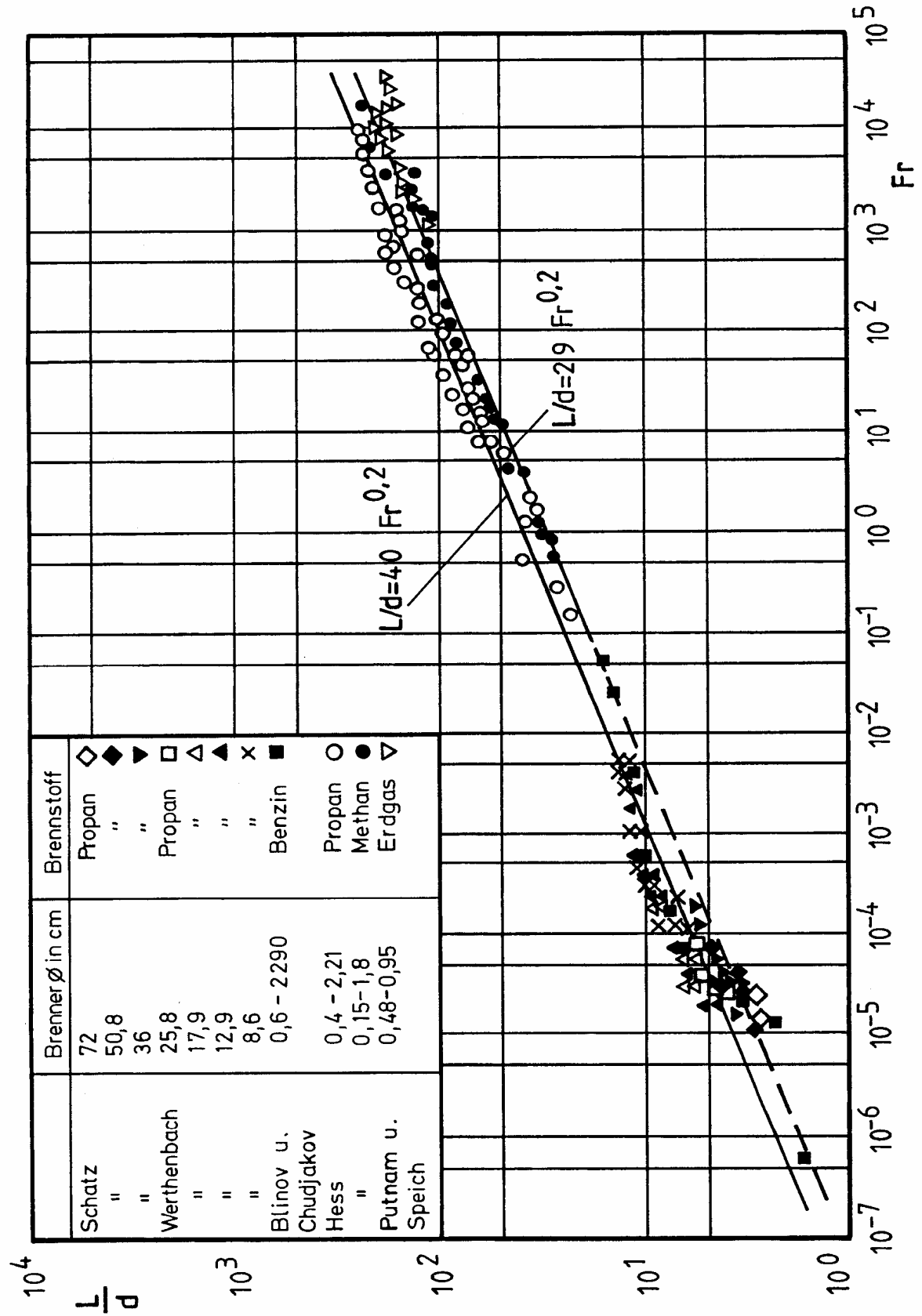


Bild 2. Auf den Brennerdurchmesser bezogene Flammenlänge als Funktion der Froude-Zahl nach /2/, /3/, /4/, /5/, /6/.

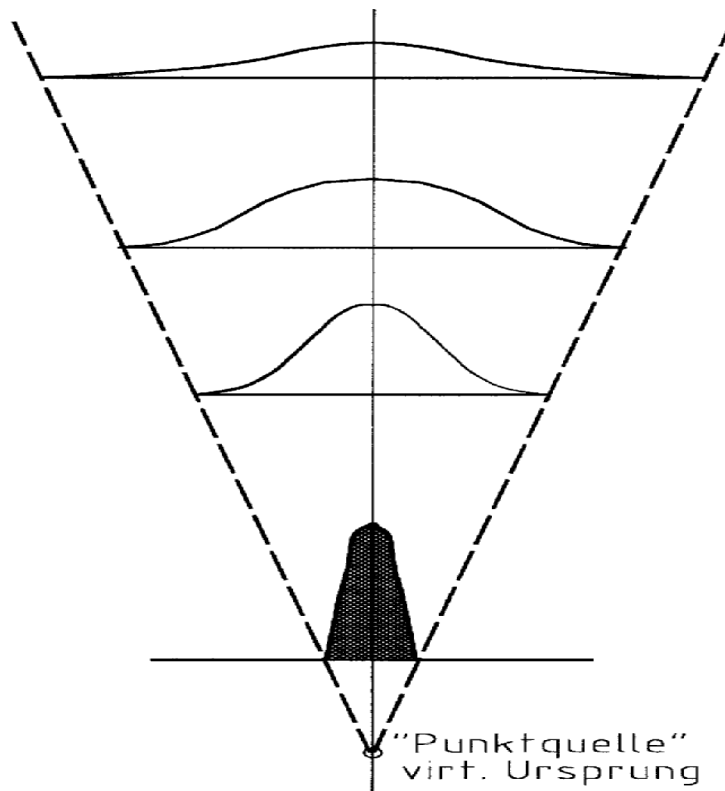
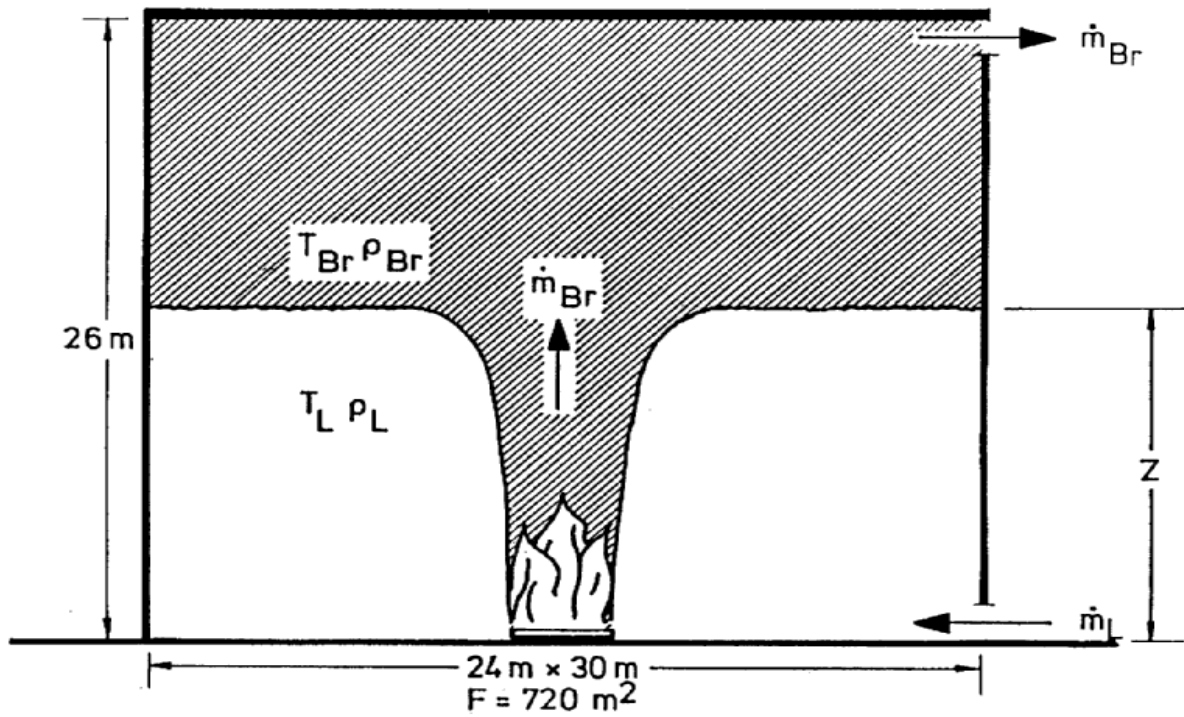


Bild 3. Ähnlichkeitsprofile in der Rauchgassäule (Plume)
Verschiebung der Brandlast in den virtuellen Ursprung



$$\dot{m}_{Br} = 0,21 \left(\frac{\rho_L^2 \cdot g}{c_{pBr} \cdot T_L} \right)^{1/3} \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot Z^{5/3}$$

Bild 4. Auftriebsbehafteter Freistrahler stößt an Raumdecke an. Ausbildung einer Rauchschiebt nach Yamana und Tanaka.



Bild 5. Anordnung eines nach oben gerichteten Test-Sprühbrenners mit Auffangvorrichtung aus Lochblech und Maschendraht.



Bild 6. Versuchsaufbau Sprühdüsenbrenner mit Entnahmeverrichtung.

Wärmestrom-Kennlinien

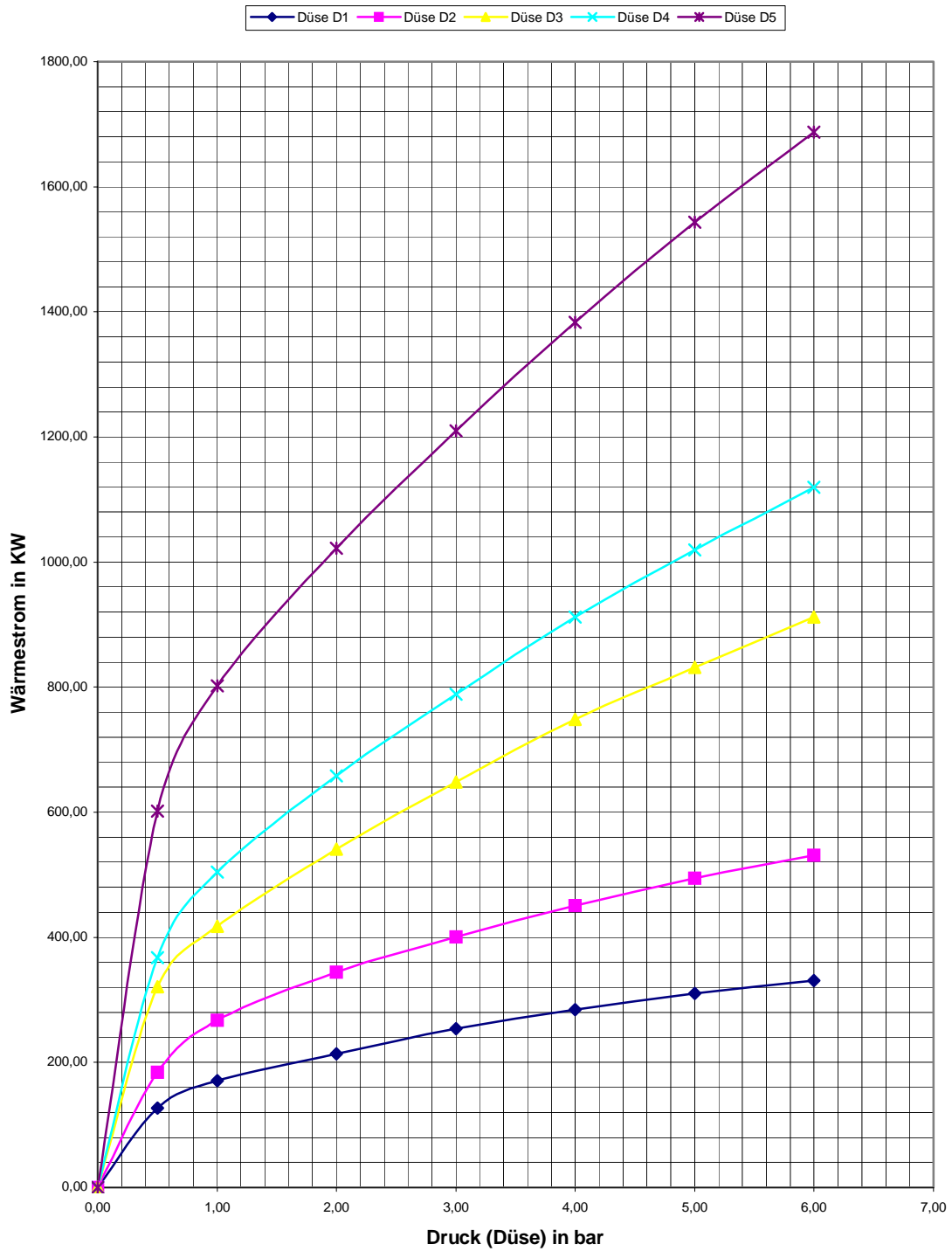


Bild 7. Wärmestrom-Kennlinien in Abhängigkeit des Druckes bei 5 verschiedenen Sprühdüsen.



Bild 8. Koordinatengerät zur Bestimmung von Temperatur- und Strömungsfeldern auftriebsbehafteter Flammen mit Testbrand auf der Bodenplatte.



Bild 9a. Sprühdüsenbrenner (D3), 500 kW Flamme (Zeitpunkt a). Bild 9b. Sprühdüsenbrenner (D3), 500 kW Flamme (Zeitpunkt b).

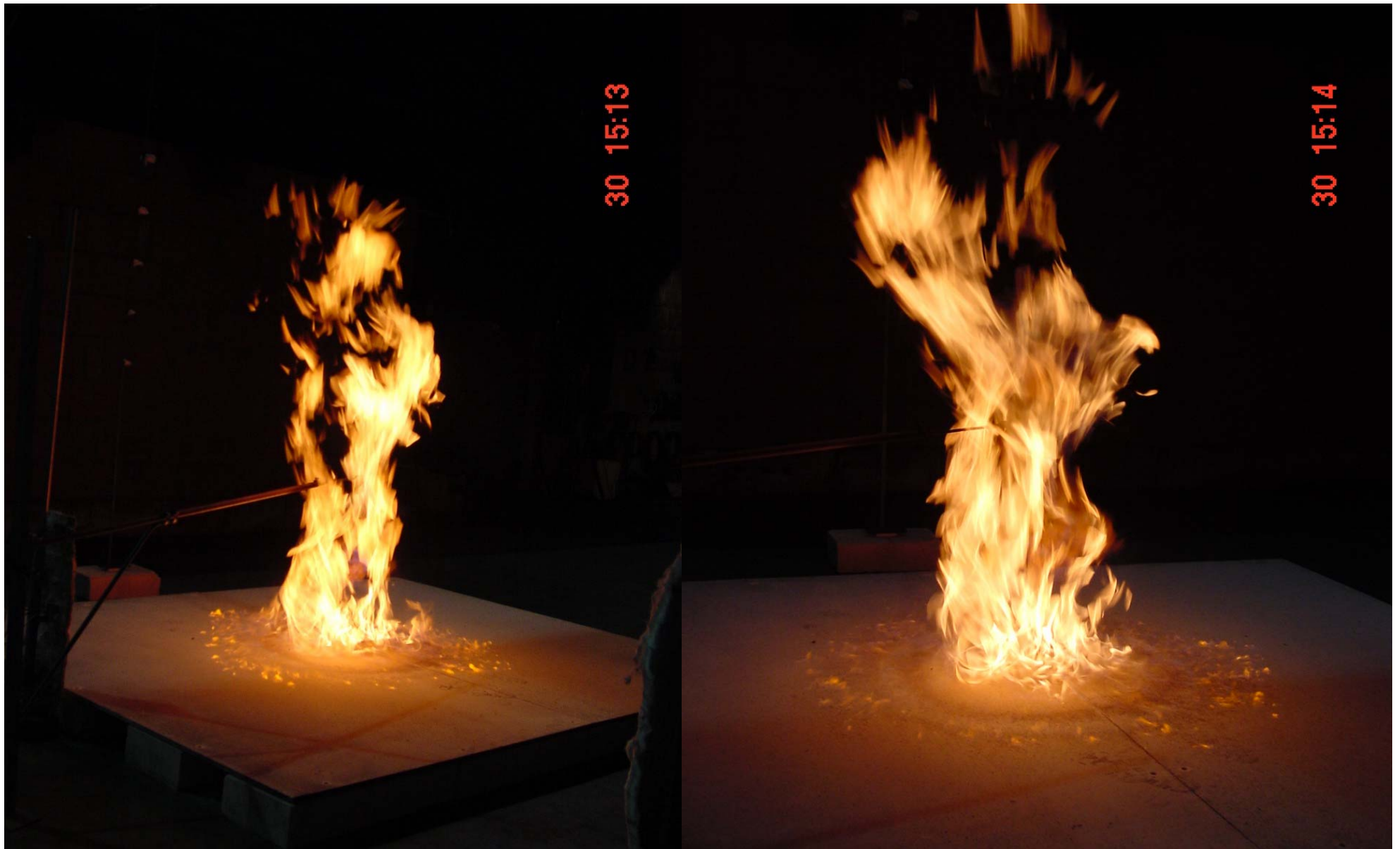


Bild 10a. Sprühdüsenbrenner (D4), 500 kW Flamme (Zeitpunkt a). Bild 10b. Sprühdüsenbrenner (D4), 500 kW Flamme (Zeitpunkt b).



Bild 11a. Sprühdüsenbrenner (D4), 800 kW Flamme (Zeitpunkt a). Bild 11b. Sprühdüsenbrenner (D4), 800 kW Flamme (Zeitpunkt b).



Bild 12a. Sprühdüsenbrenner (D5),1200 kW Flamme (Zeitpunkt a). Bild 12b. Sprühdüsenbrenner (D5),1200 kW Flamme (Zeitpunkt b)



Bild 13a. Sprühdüsenbrenner (D5), 1200 kW Flamme (Zeitpunkt a).

Bild 13b. Sprühdüsenbrenner (D5), 1200 kW Flamme (Zeitpunkt b).



Bild 14. Spiritusflamme in einer 50x50 cm Wanne.



Bild 15. Heptanflamme in einer 50x50 cm Wanne.

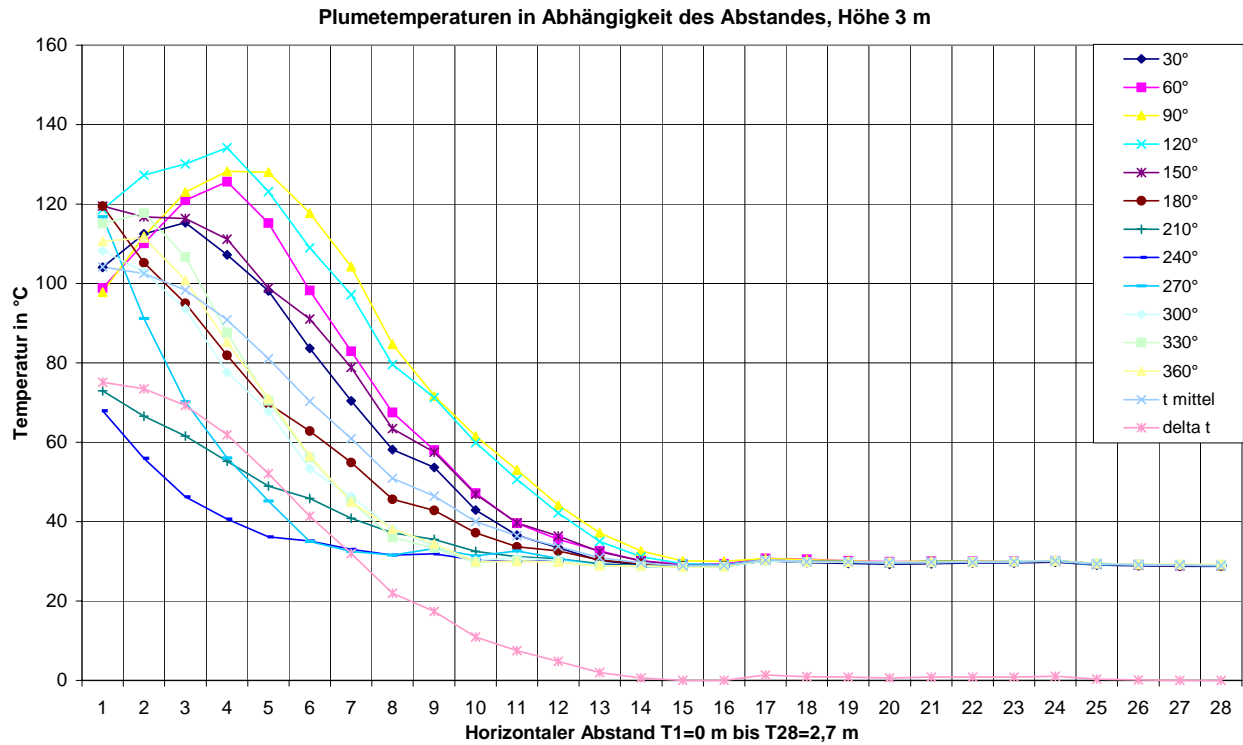


Bild 16a. Temperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit vom radialen Abstand

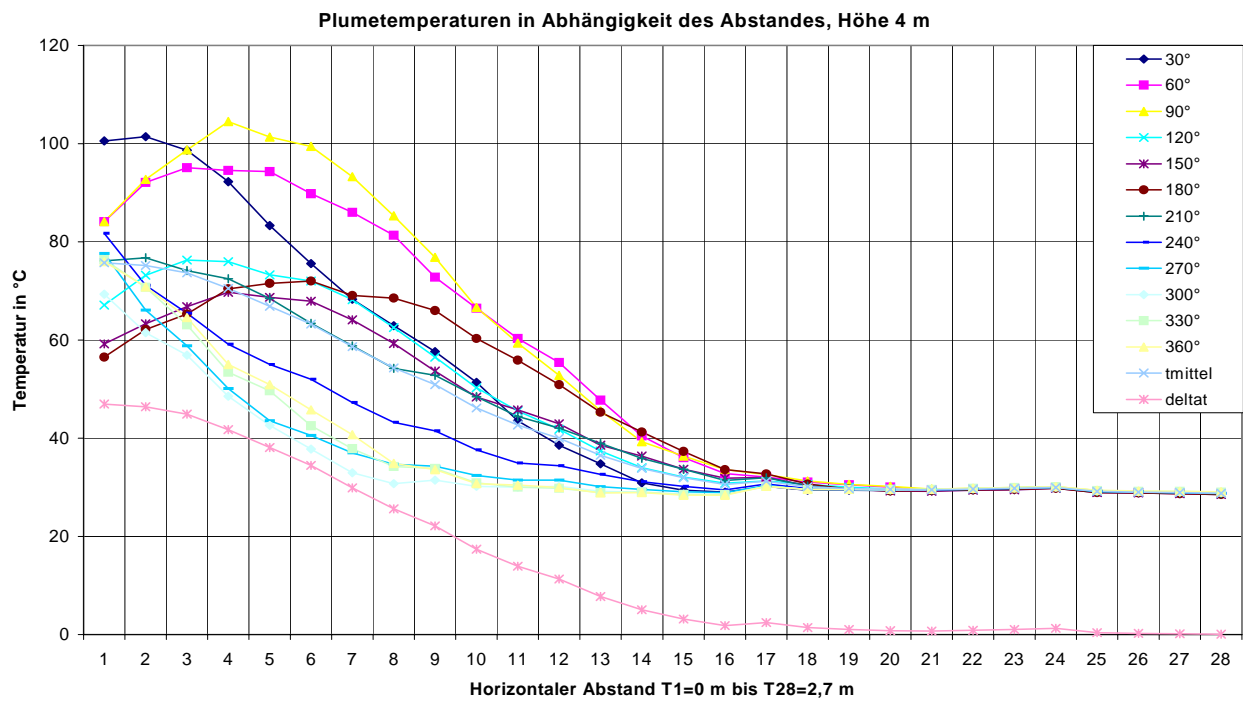


Bild 16b. Temperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit vom radialen Abstand.

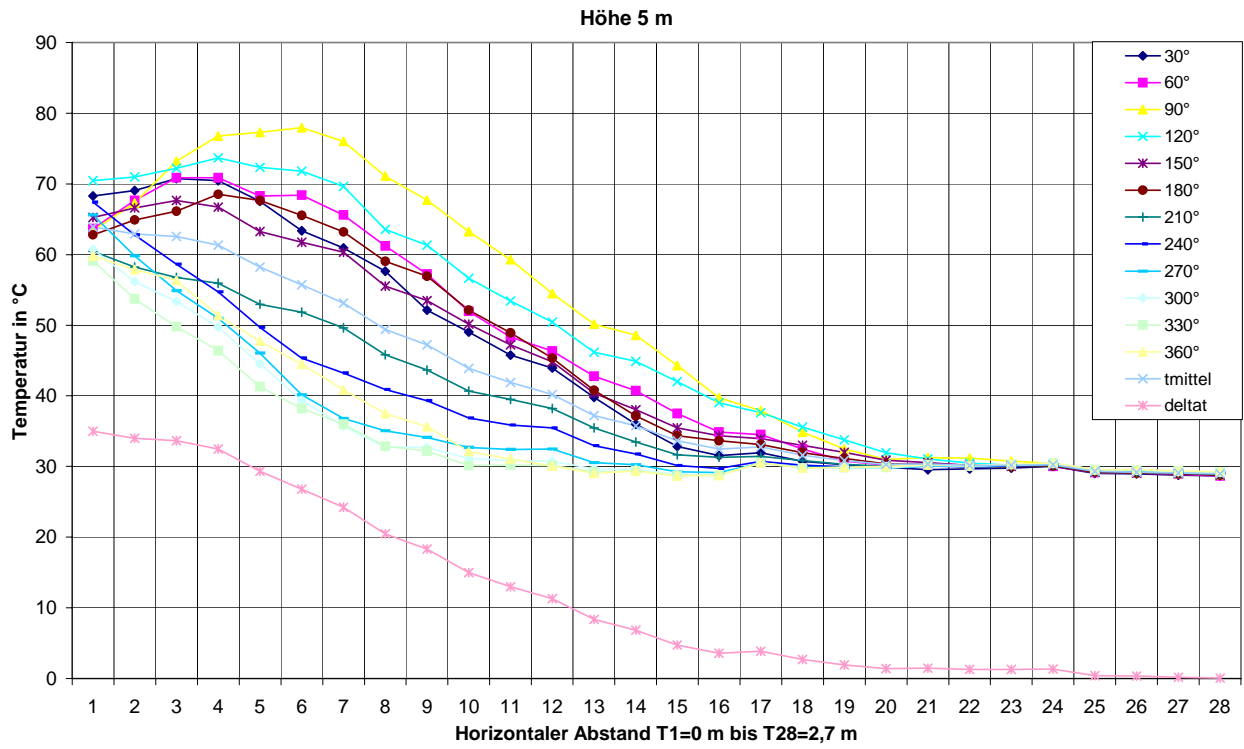


Bild 16c. Plumetemperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit des Abstandes

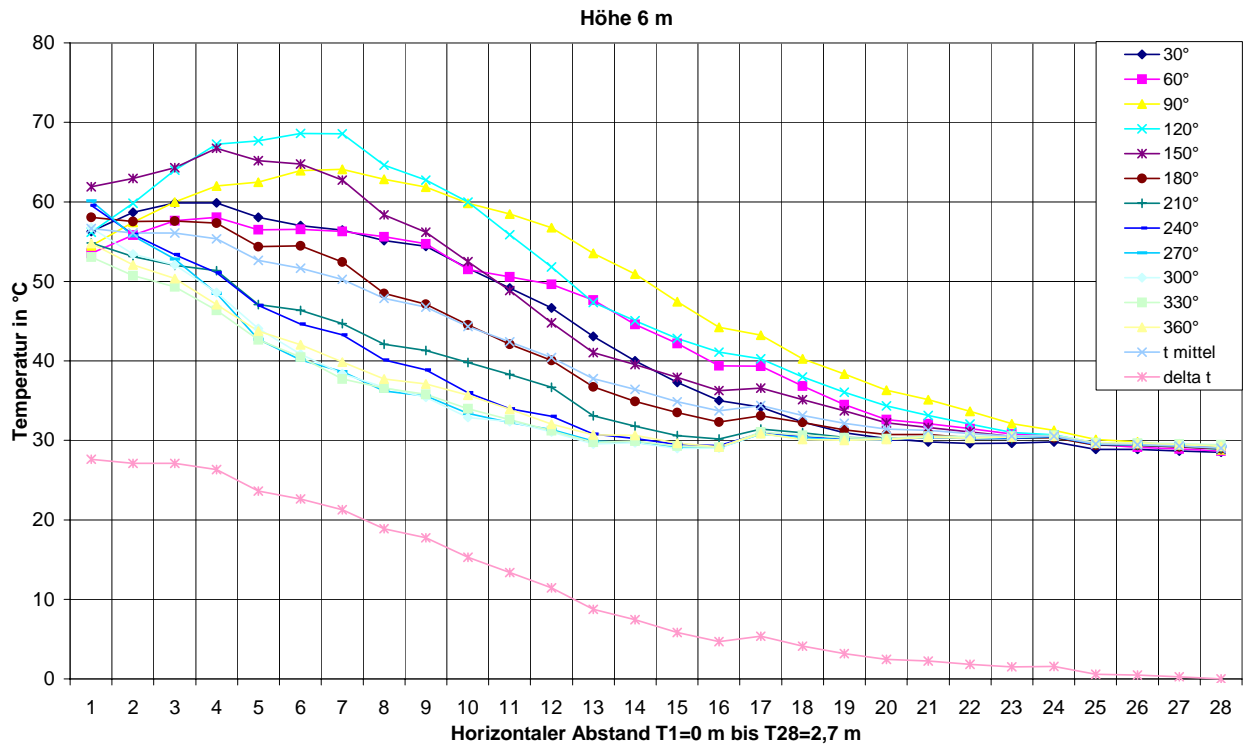


Bild 16d. Plumetemperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit des Abstandes

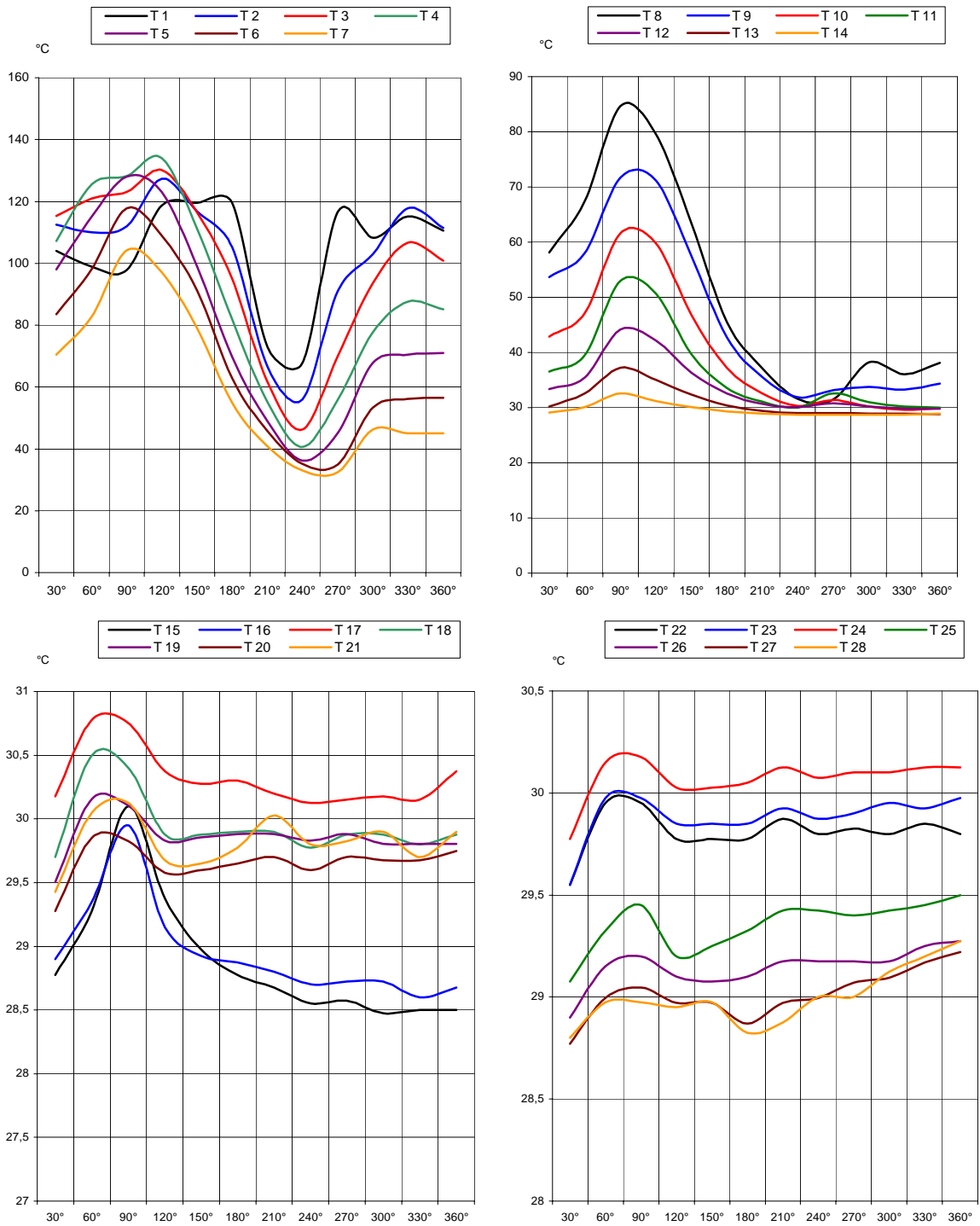


Bild 17a. Temperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit des Drehwinkels in 3 m Höhe.

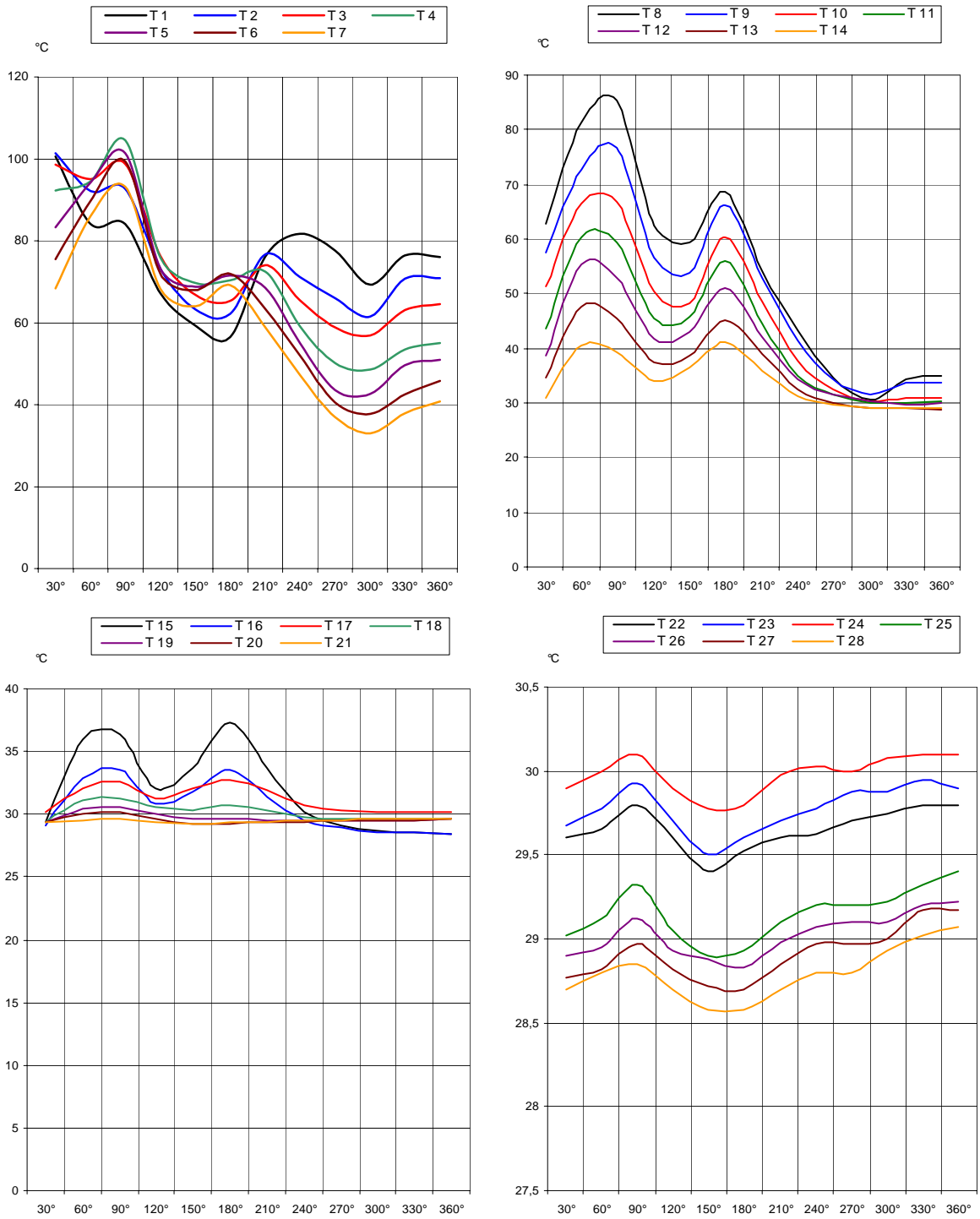


Bild 17b. Temperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit des Drehwinkels in 4 m Höhe.

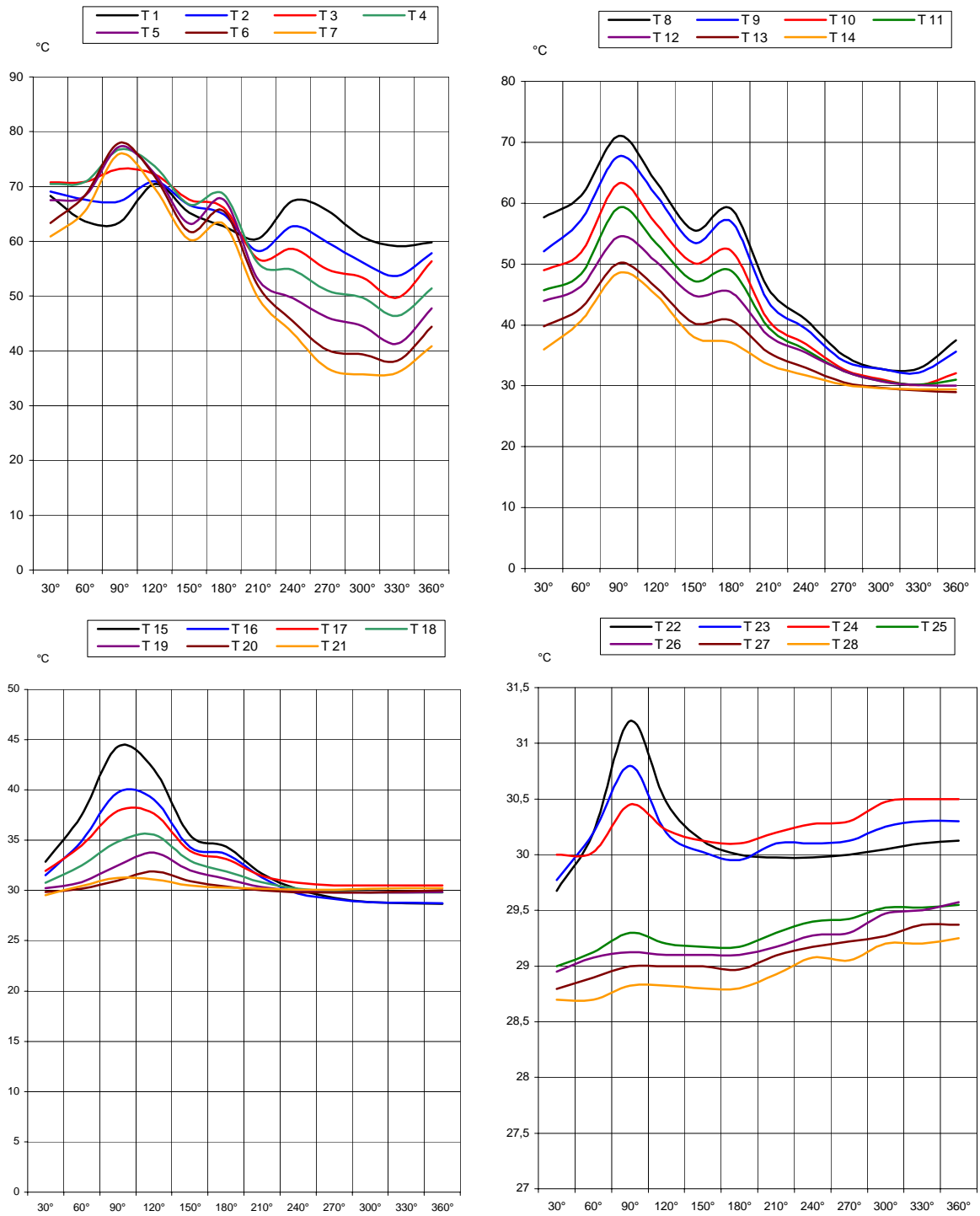


Bild 17c. Temperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit des Drehwinkels in 5 m Höhe.

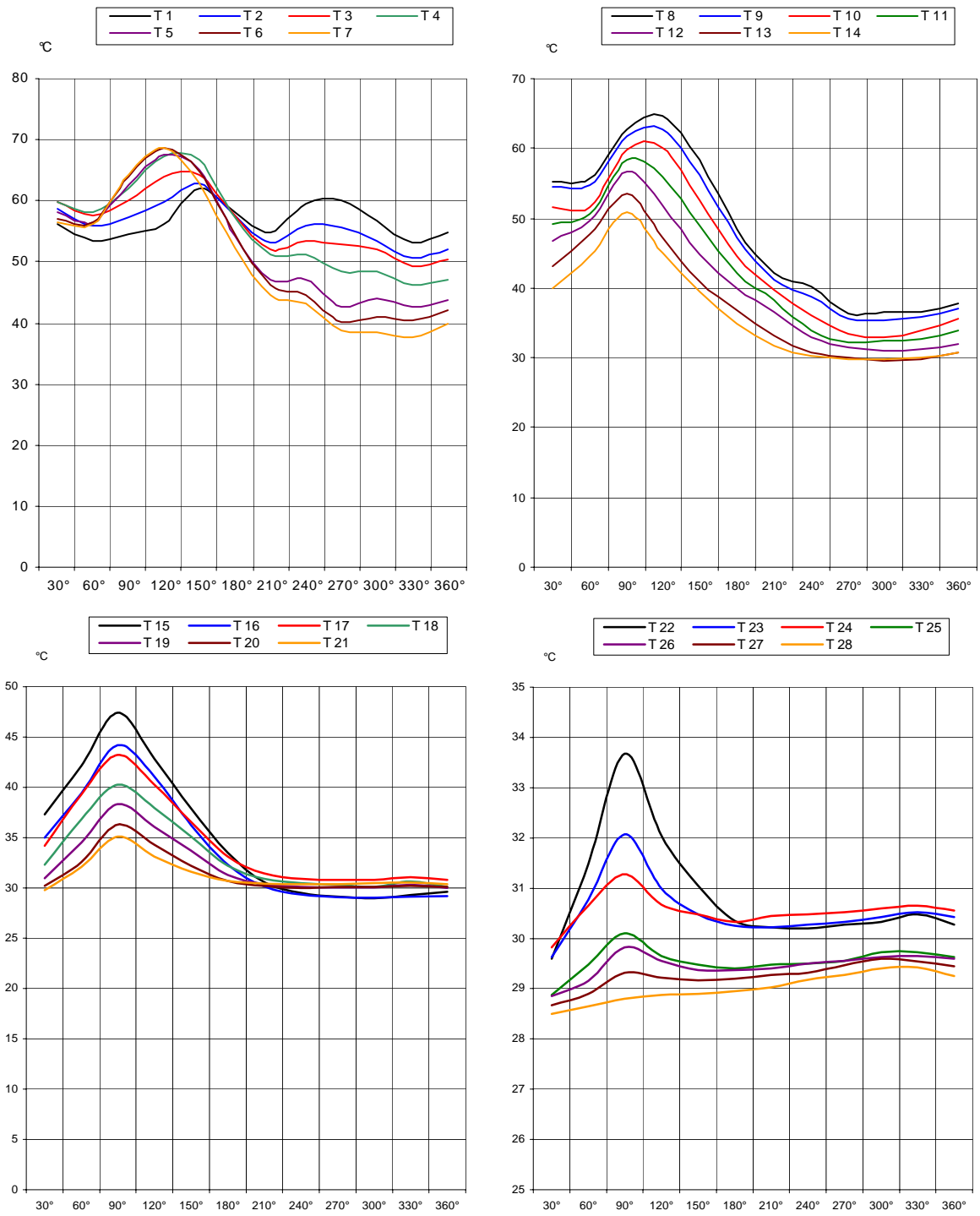


Bild 17d. Temperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit des Drehwinkels in 6 m Höhe.

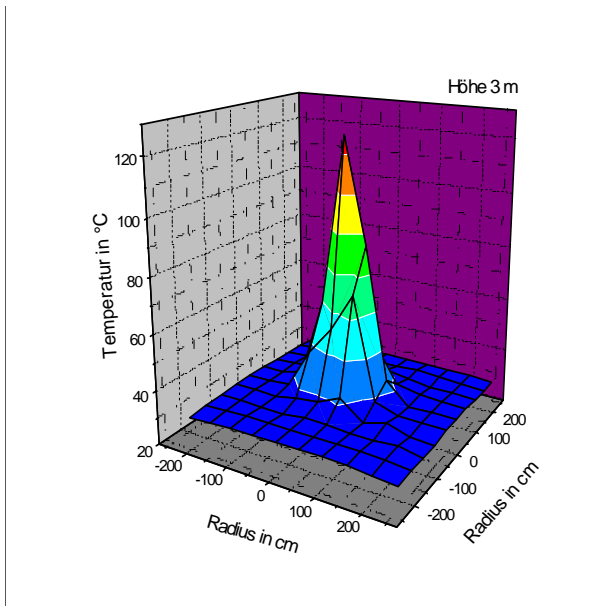


Bild 18a.

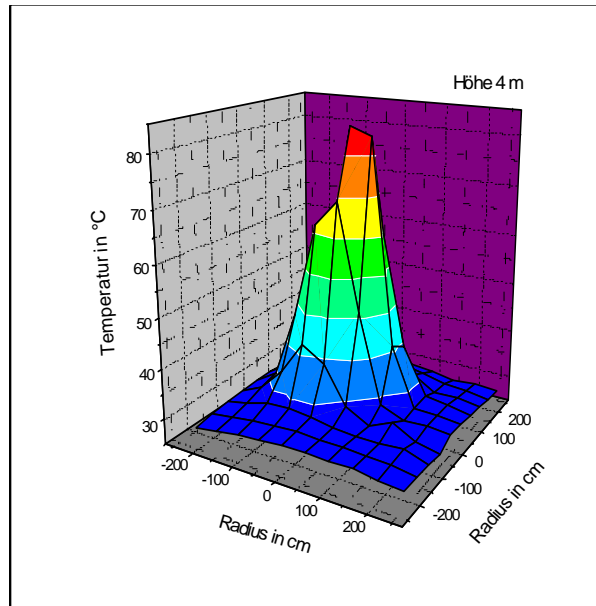


Bild 18b.

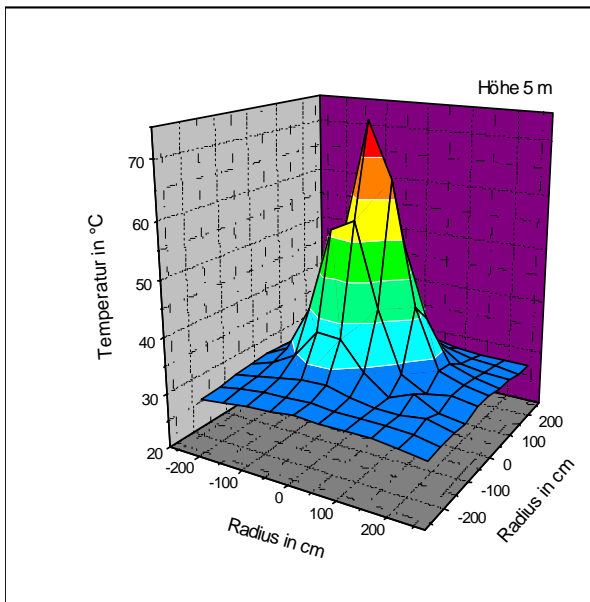


Bild 18c.

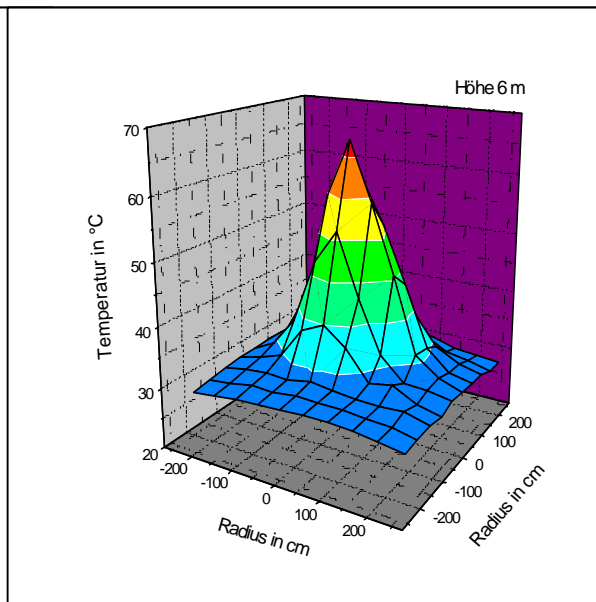


Bild 18d.

Bild 18a, b, c, d. Temperatur einer 300 kW Flamme in der jeweiligen horizontalen Ebene (Höhe 3 m, 4 m, 5 m und 6 m) in Abhängigkeit vom Radius.

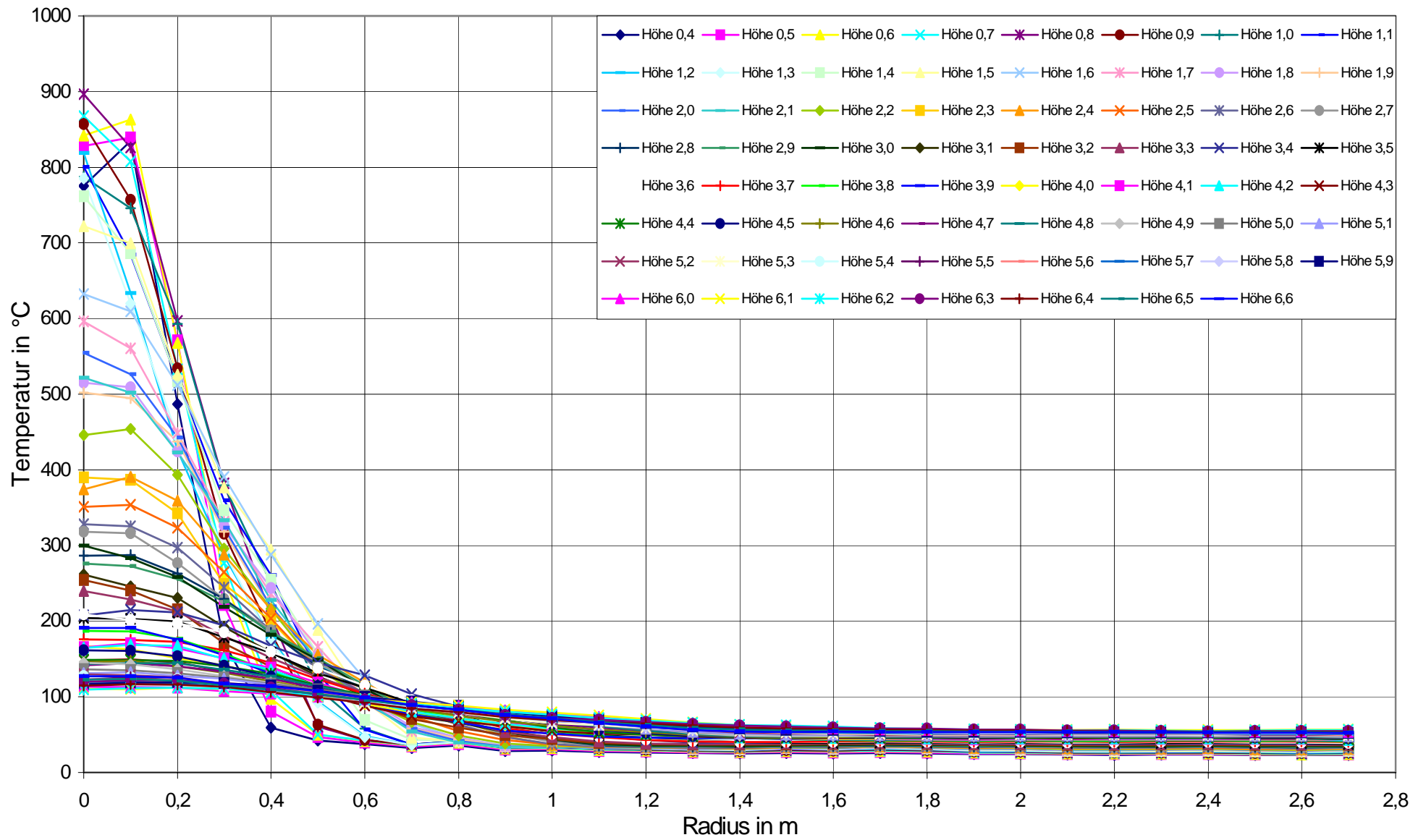


Bild 19. Temperaturen T1 bis T28 in Abhängigkeit vom Radius mit der Höhe als Parameter.

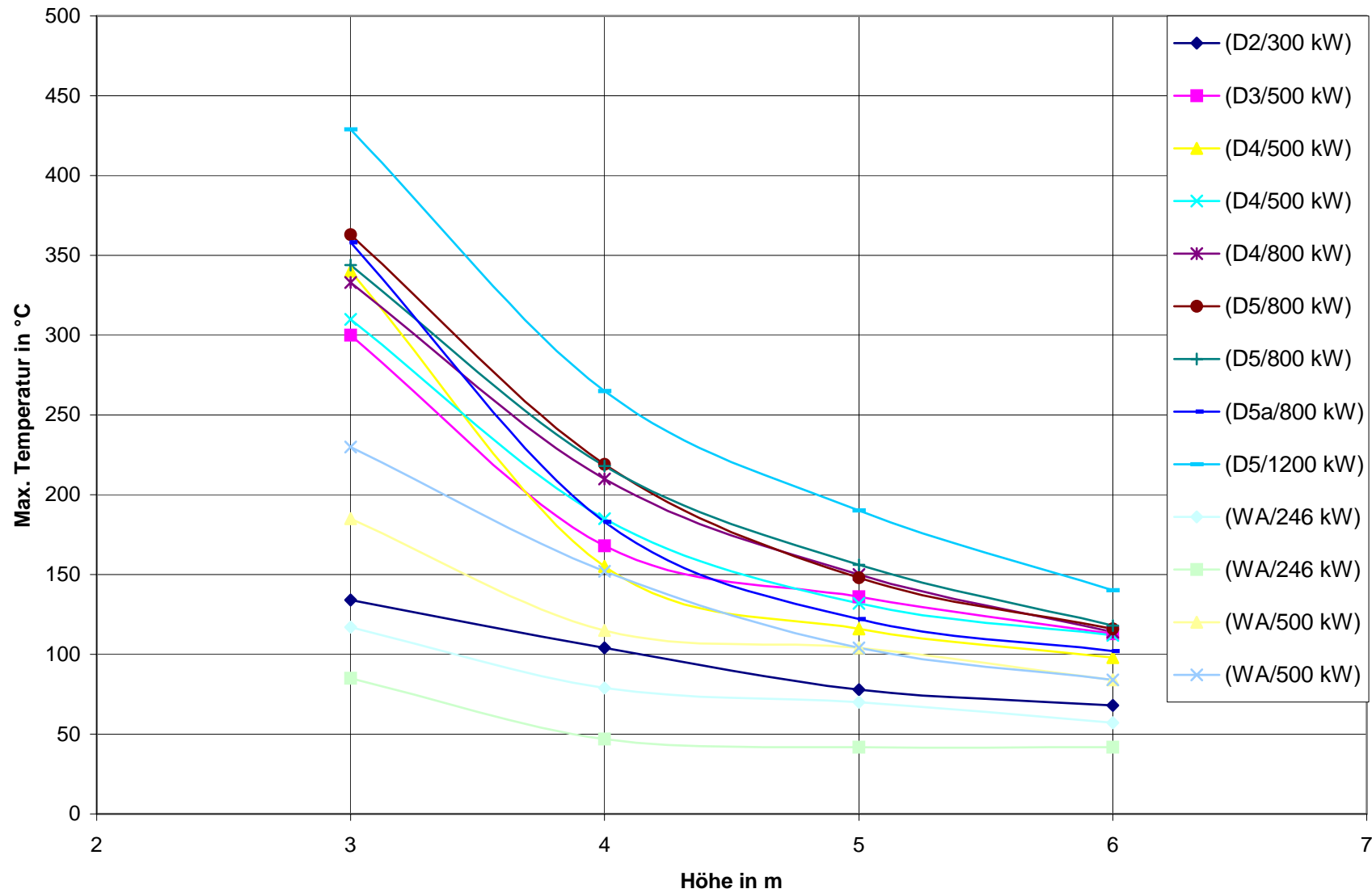


Bild 20. Zeitl. gemittelte Maximaltemperaturen auf der Achse in Abhängigkeit von der Höhe.

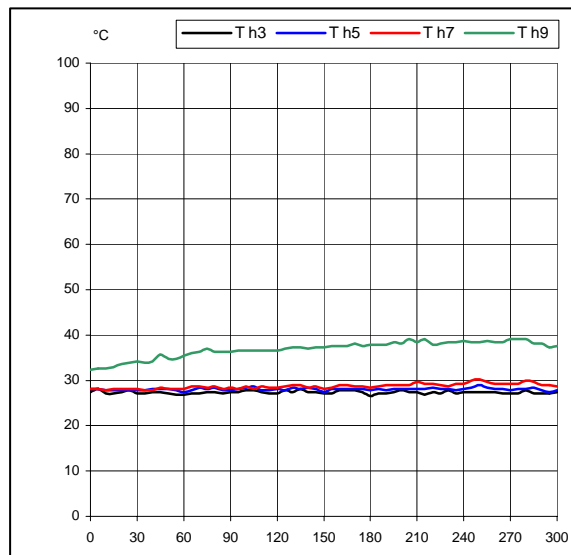
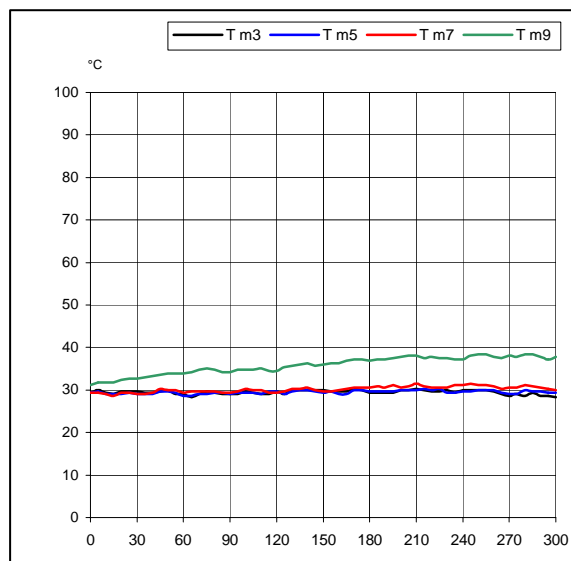
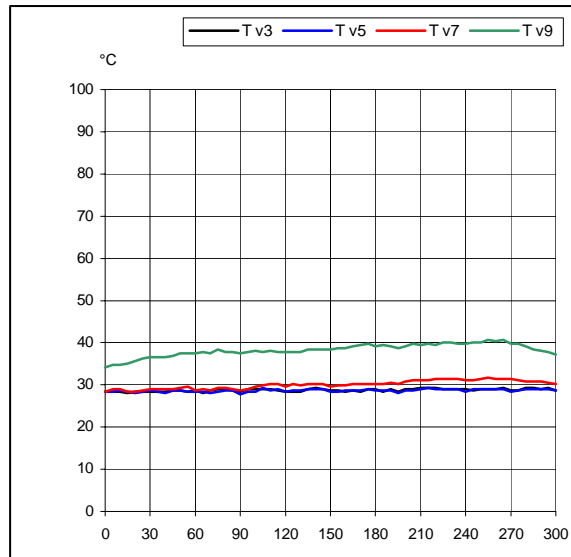


Bild 21 a, b, c. Temperaturen in Abhängigkeit von der Versuchszeit
 Tv3, Tv5, Tv7, Tv9 (Temp. vorne, Höhe 3,5,7,9 m)
 Tm3, Tm5, Tm7, Tm9 (Temp. mitte, Höhe 3,5,7,9 m)
 Th3, Th5, Th7, Th9 (Temp. hinten, Höhe 3,5,7,9 m).

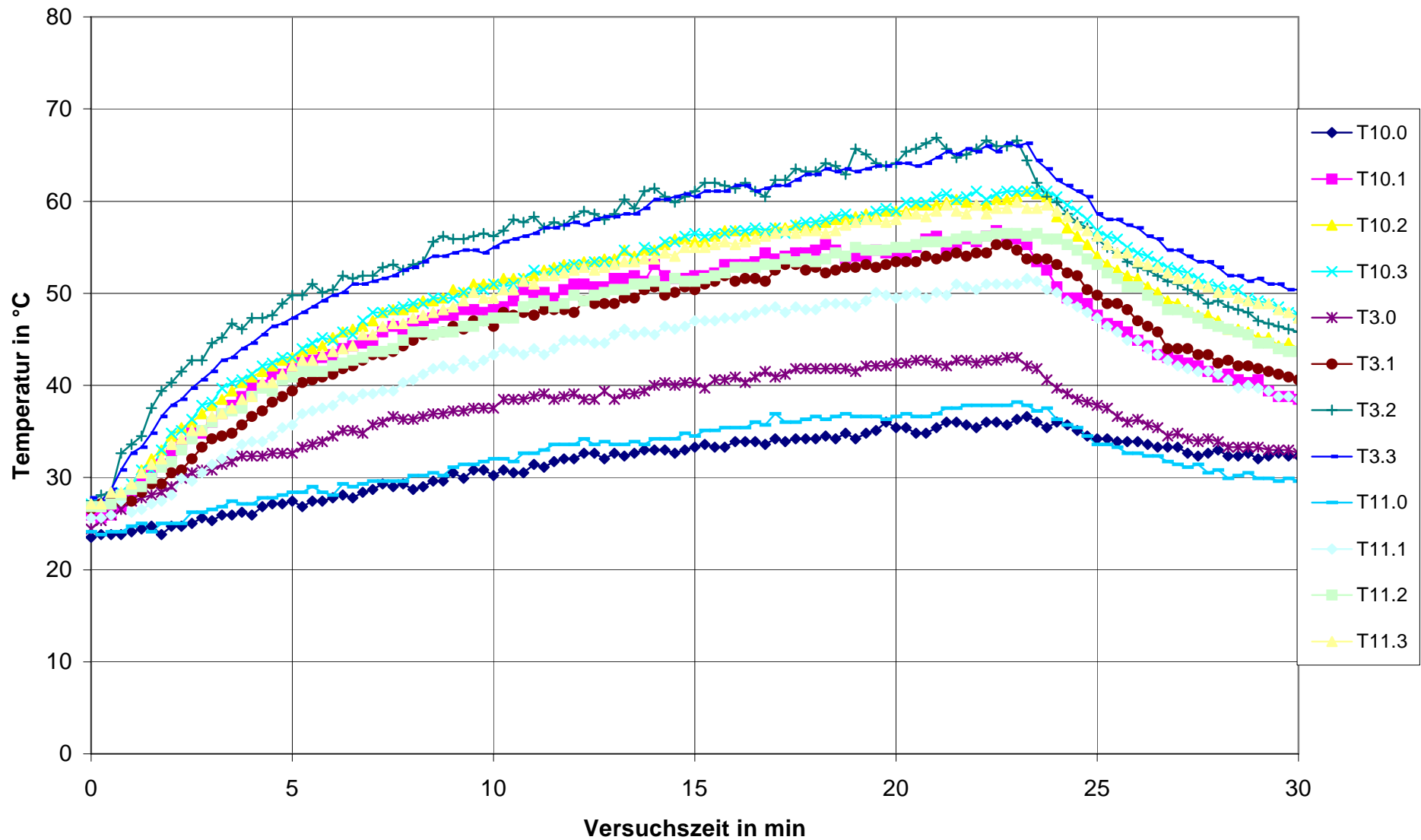


Bild 22a. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei einer Brandleistung von 500 kW.
 Höhe 3 m: T10.0, T3.0, T11.0
 Höhe 5 m: T10.1, T3.1, T11.1
 Höhe 7 m: T10.2, T3.2, T11.2
 Höhe 9 m: T10.3, T3.3, T11.3
 T10 (Halle vorne links, HV) T3 (Halle Mitte, HM) T11 (Halle hinten rechts, HH)

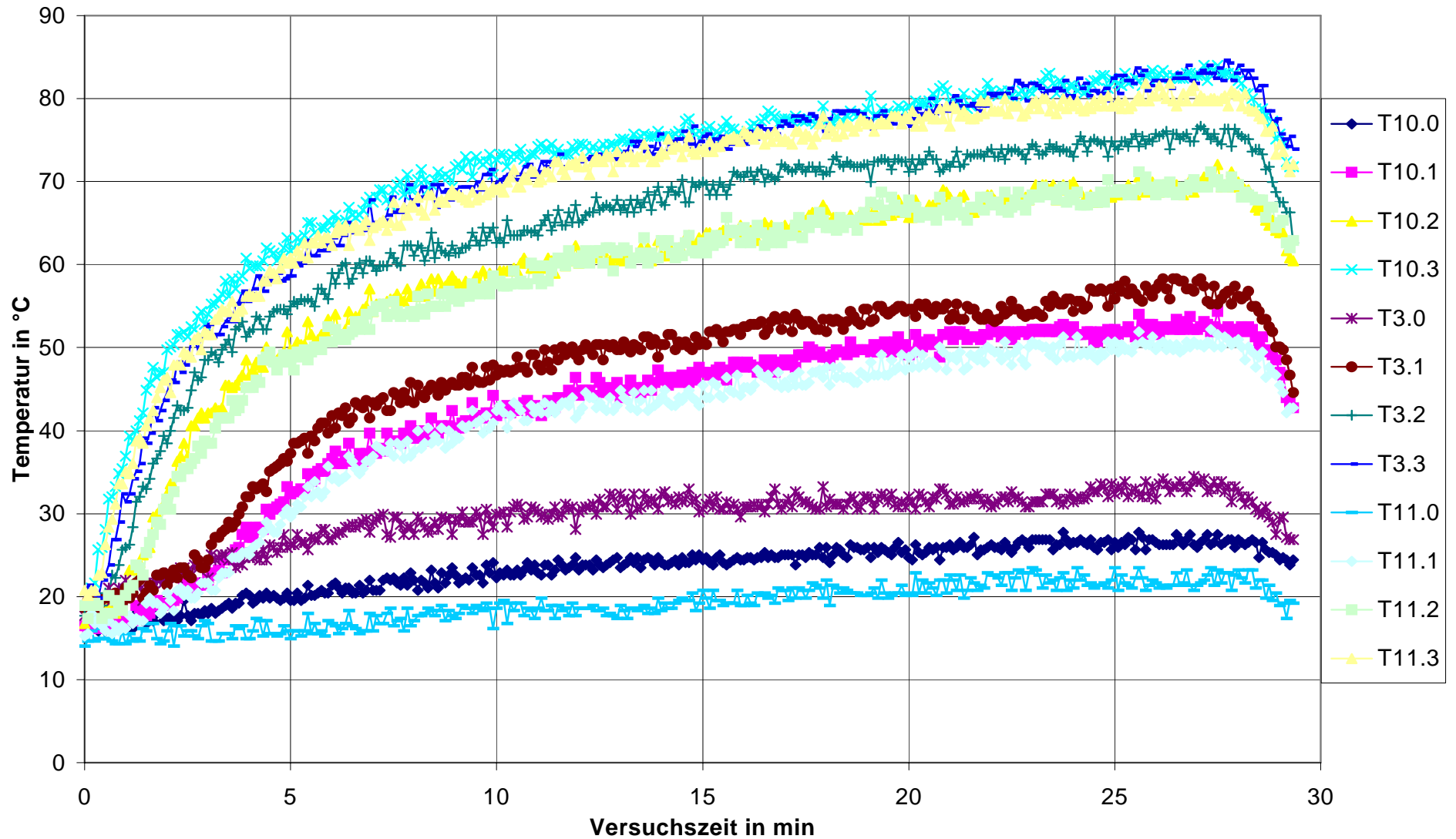


Bild 22b. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei einer Brandleistung von 1200 kW.

Höhe 3 m: T10.0, T3.0, T11.0

Höhe 5 m: T10.1, T3.1, T11.1

Höhe 7 m: T10.2, T3.2, T11.2

Höhe 9 m: T10.3, T3.3, T11.3

T10 (Halle vorne links, HV)

T3 (Halle Mitte, HM)

T11 (Halle hinten rechts, HH)

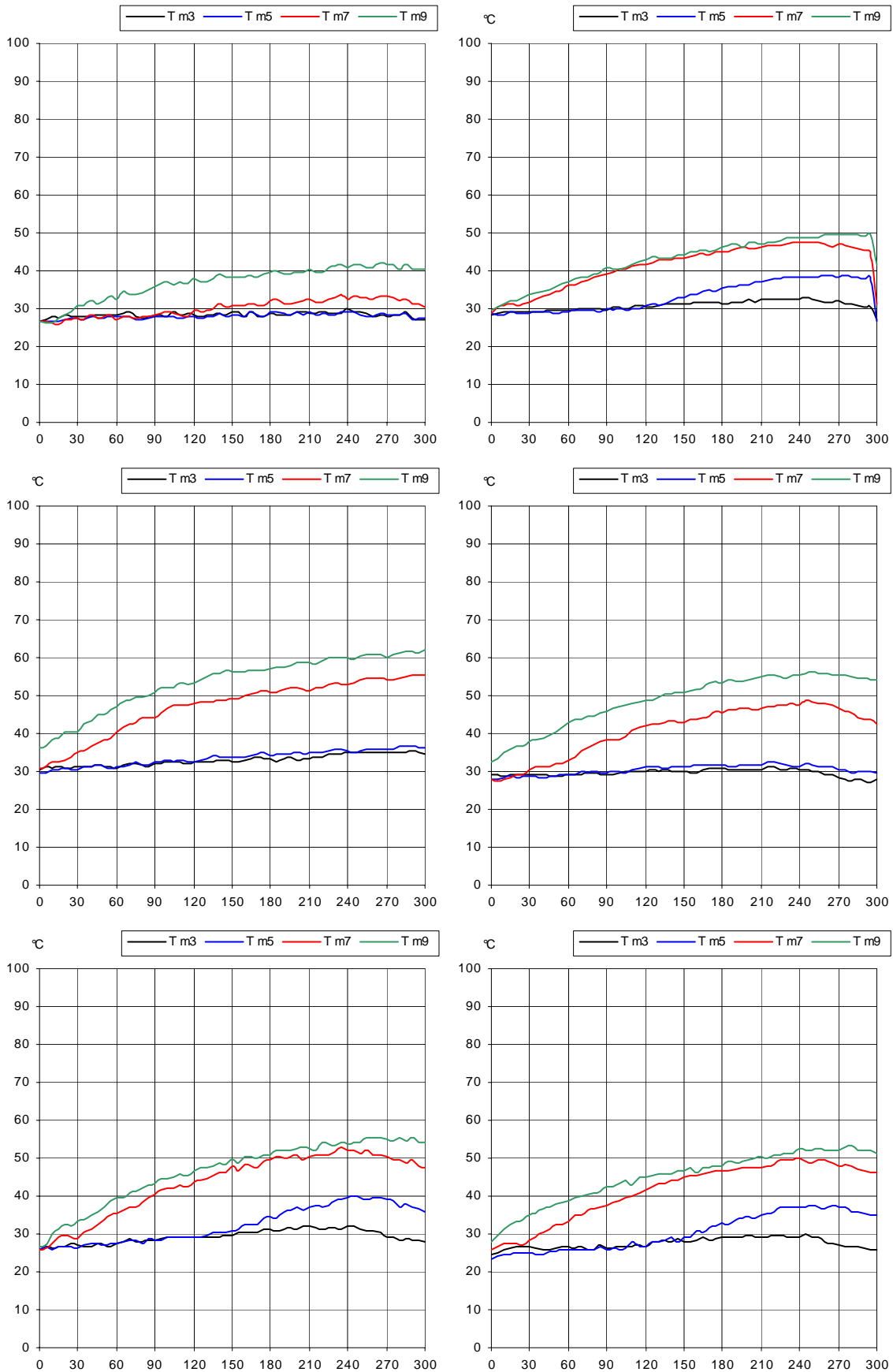


Bild 23a,b,c,d,e,f. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Versuche 3,4,5,6,7,8) in vier Höhen (3m, 5m, 7m, 9m) in der Hallenmitte (HM).

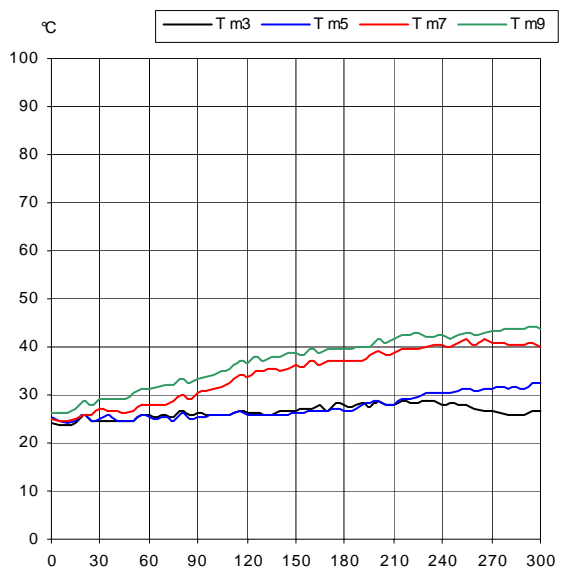
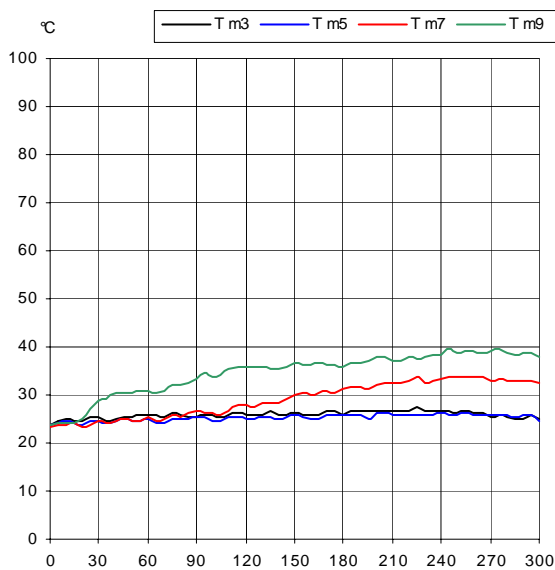
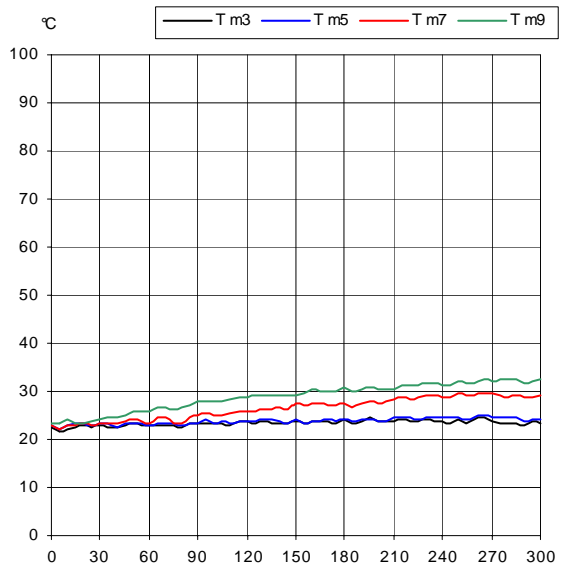
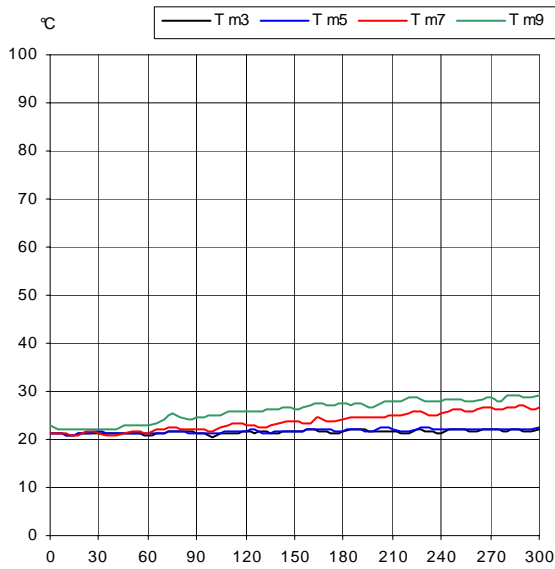
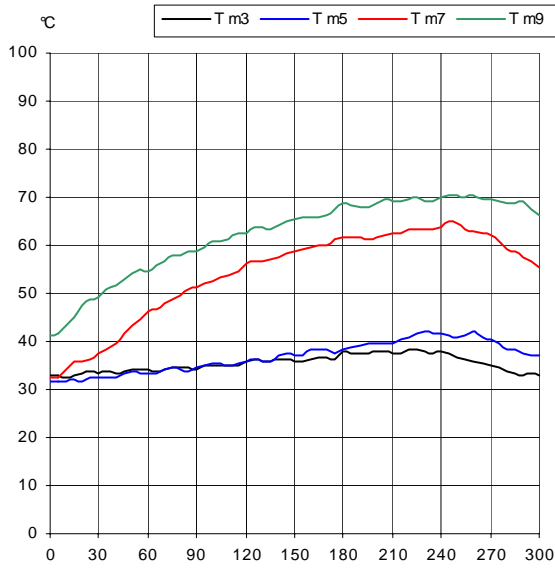


Bild 23g, h, i, j, k. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Versuche 9,10,11,12,13) in vier Höhen (3m, 5m, 7m, 9m) in der Hallenmitte (HM).

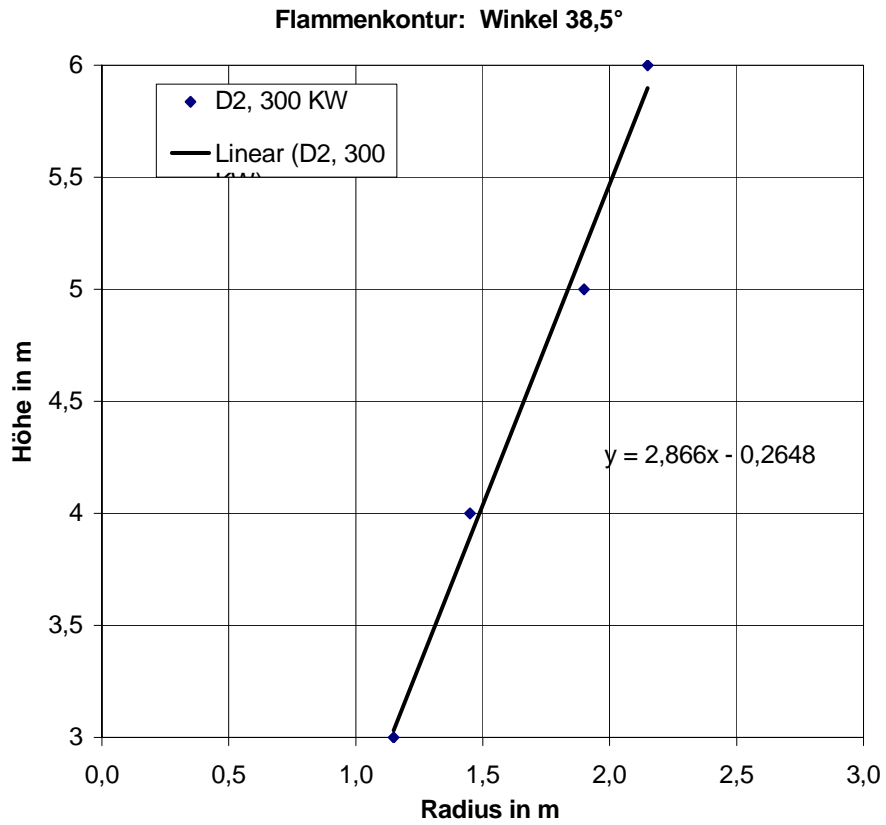


Bild 24a. Versuch 1: Kontur des Öffnungswinkels.

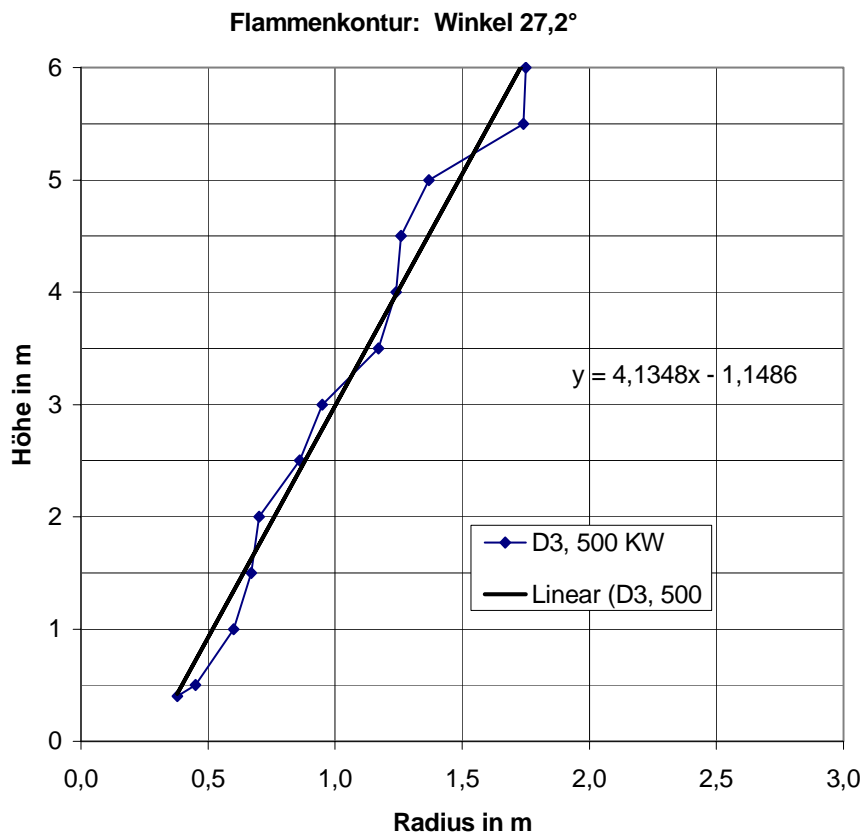


Bild 24b. Versuch 2: Kontur des Öffnungswinkels.

Flammenkontur: Winkel 45,1°

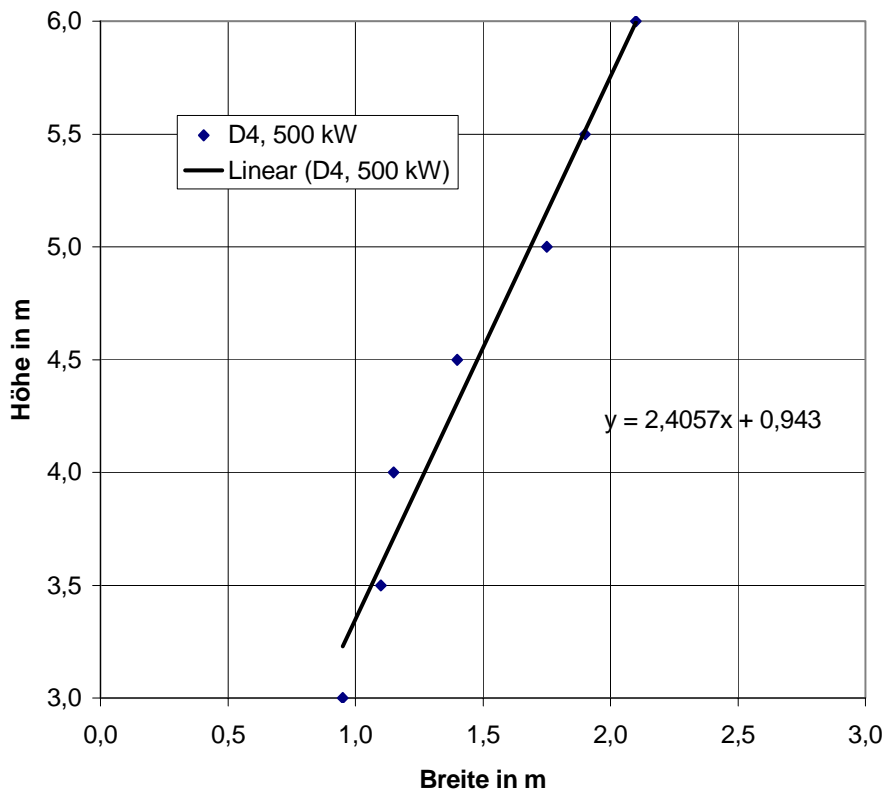


Bild 24c. Versuch 3: Kontur des Öffnungswinkels.

Flammenkontur: Winkel 34,5°

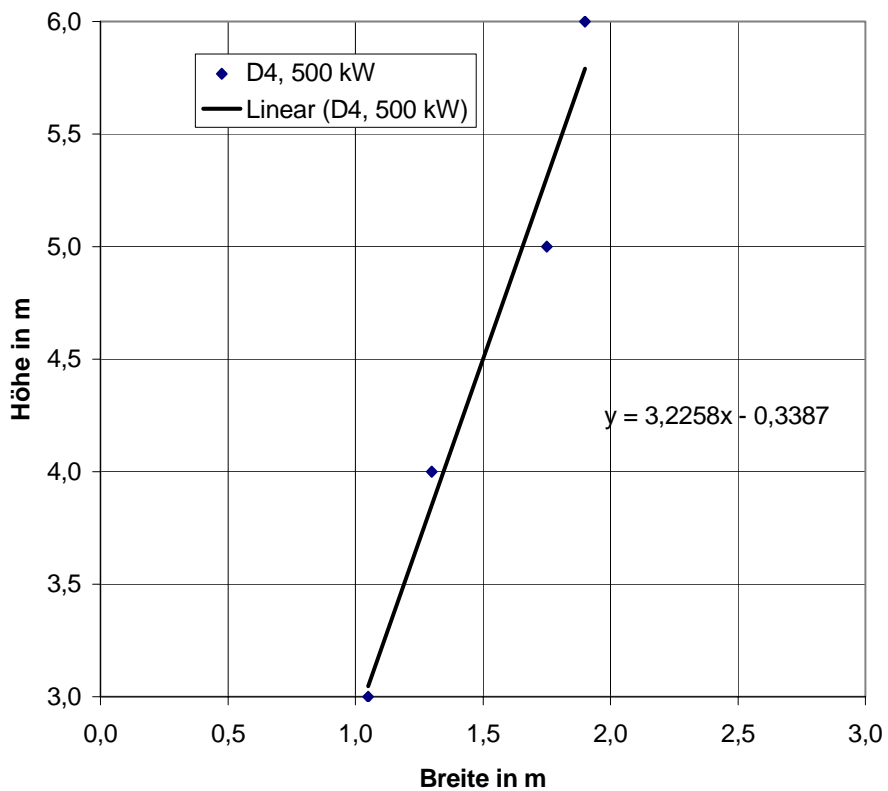


Bild 24d. Versuch 4: Kontur des Öffnungswinkels.

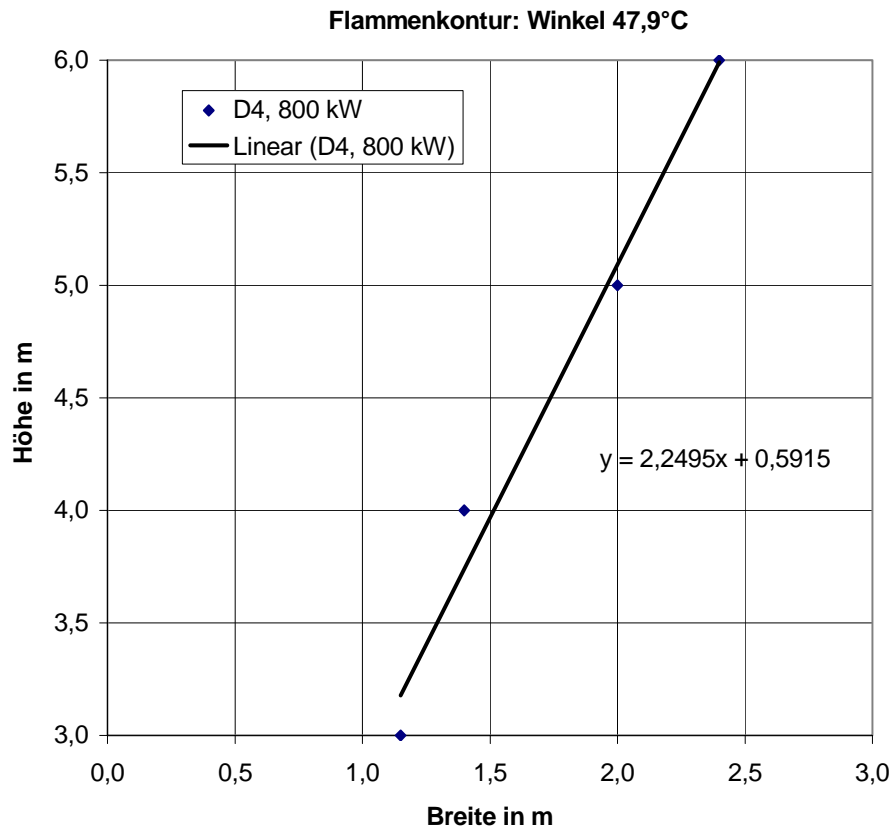


Bild 24e. Versuch 5: Kontur des Öffnungswinkels.

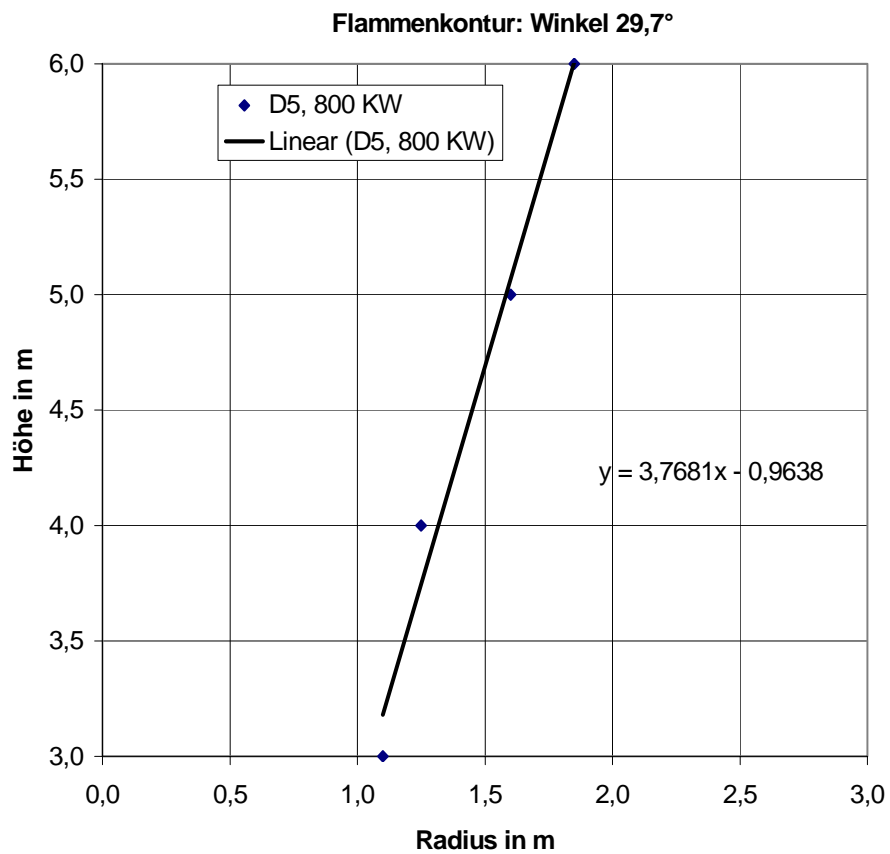


Bild 24f. Versuch 6: Kontur des Öffnungswinkels.

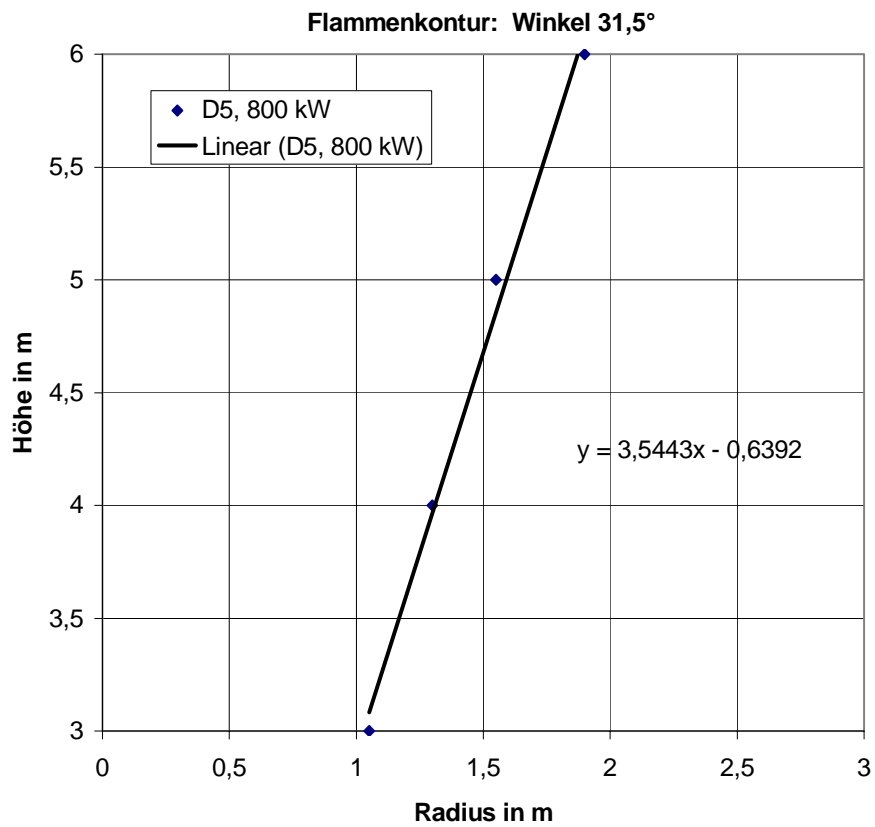


Bild 24g. Versuch 7: Kontur des Öffnungswinkels.

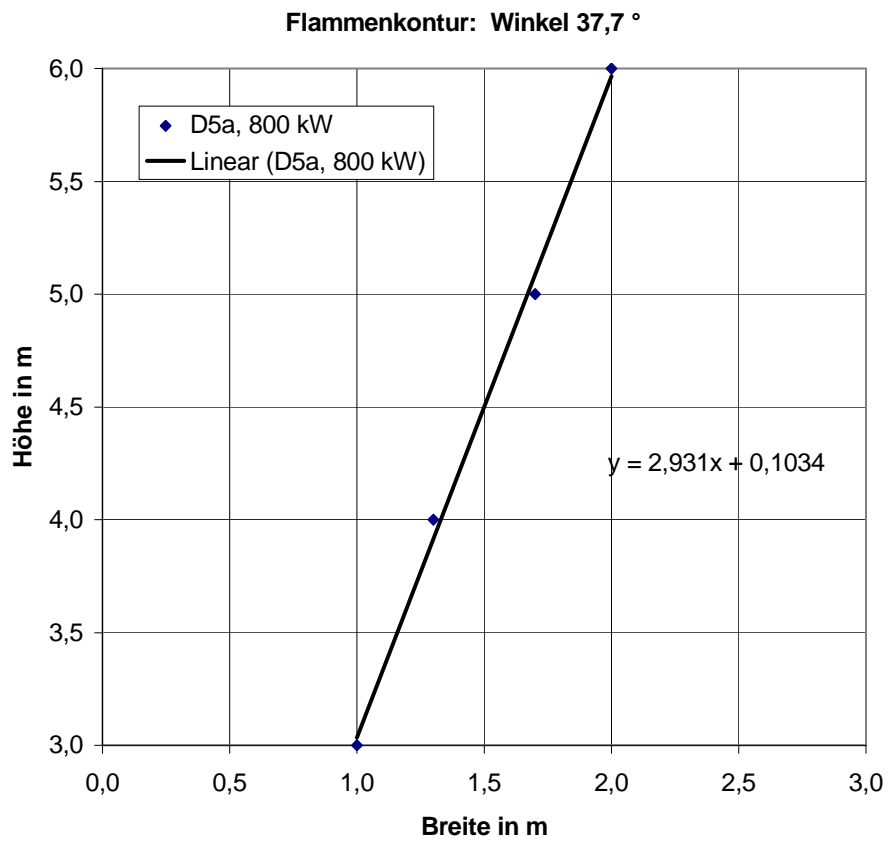


Bild 24h. Versuch 8: Kontur des Öffnungswinkels.

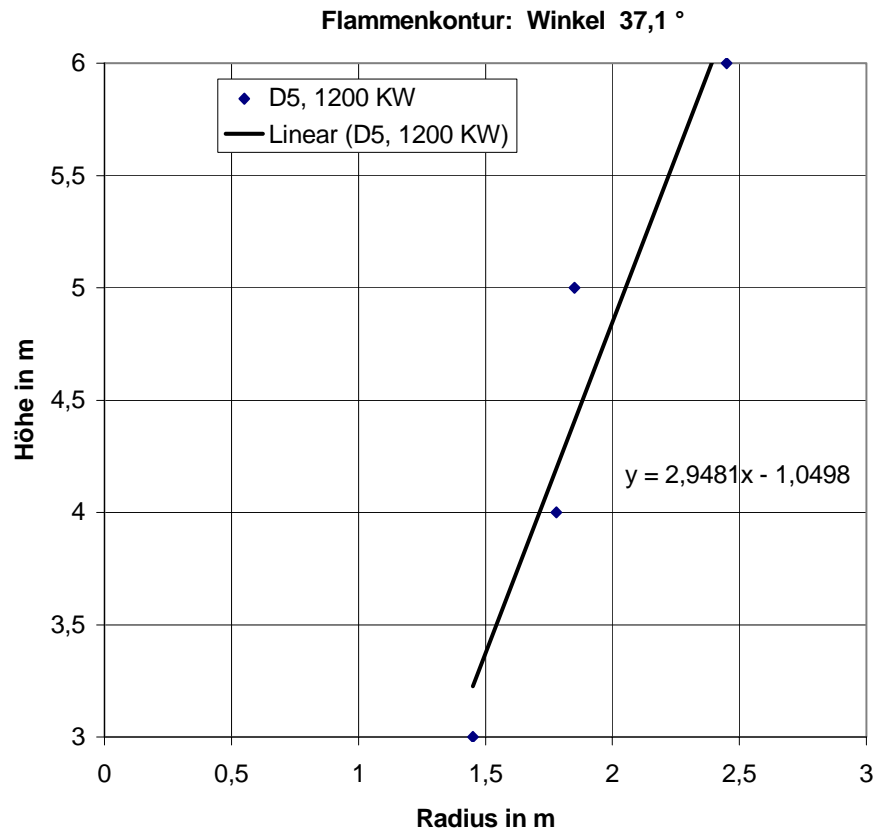


Bild 24i. Versuch 9: Kontur des Öffnungswinkels.

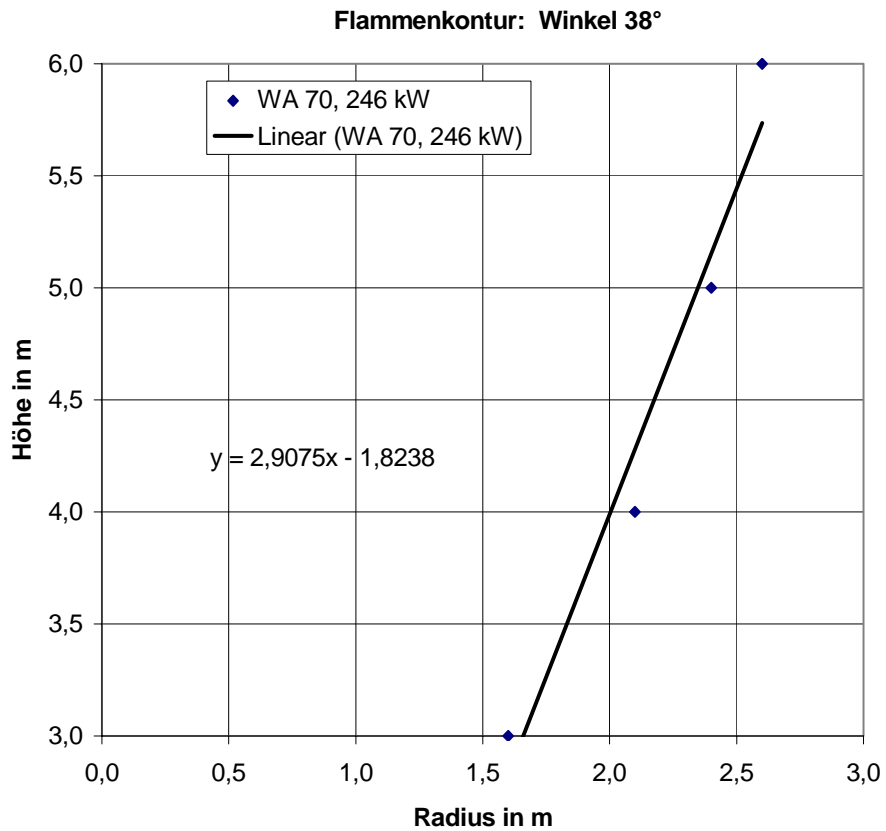


Bild 24j. Versuch 10: Kontur des Öffnungswinkels.

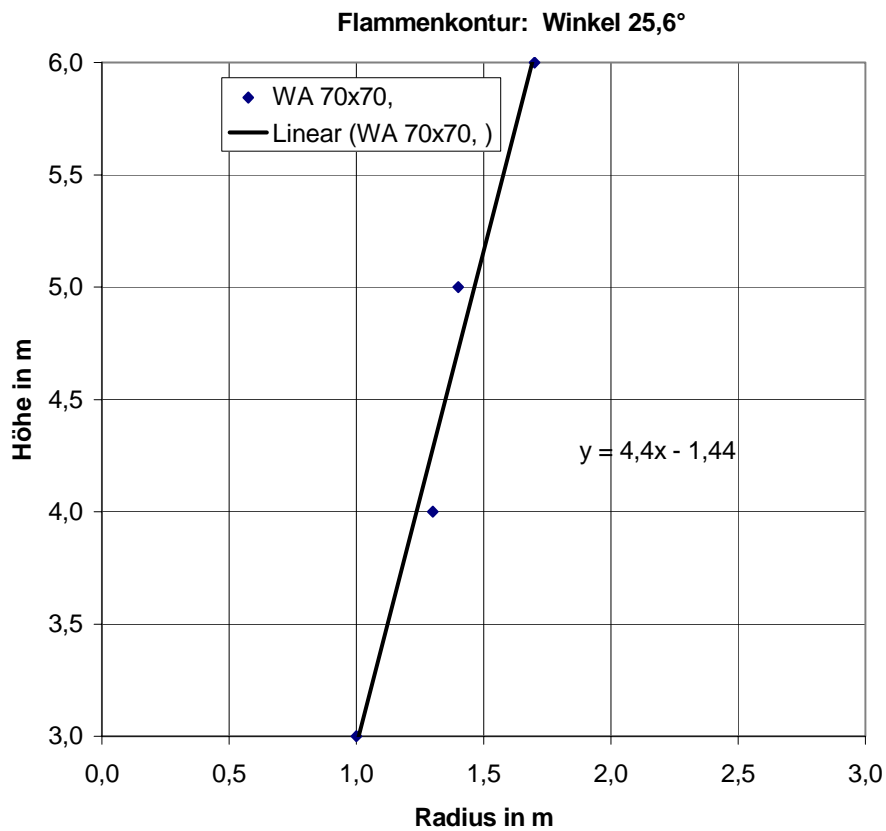


Bild 24k. Versuch 11: Kontur des Öffnungswinkels.

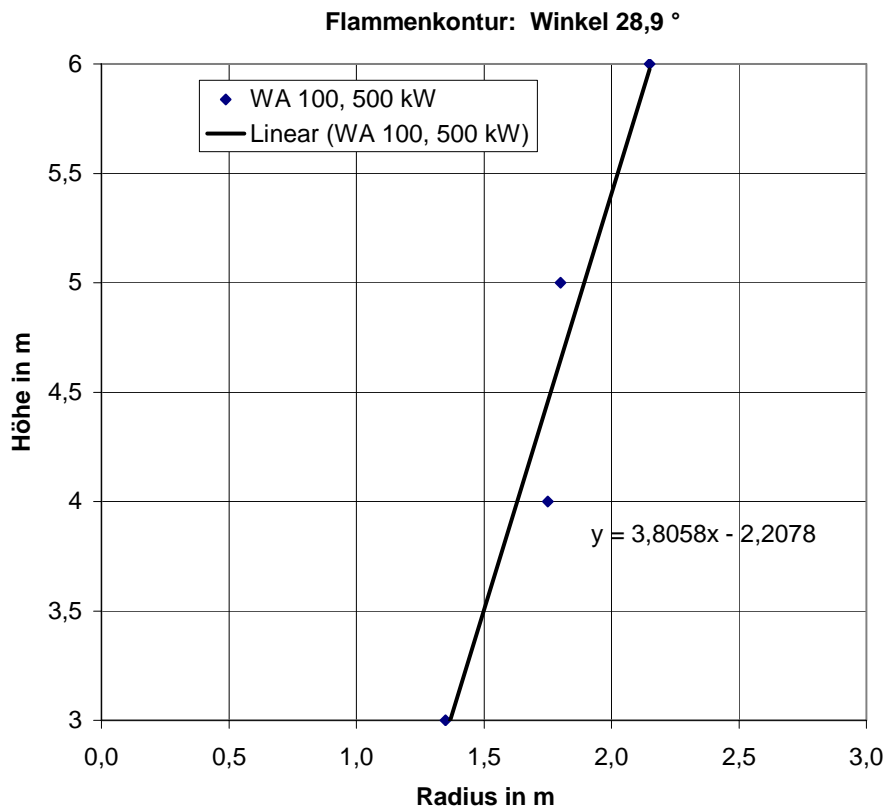


Bild 24l. Versuch 12: Kontur des Öffnungswinkels.

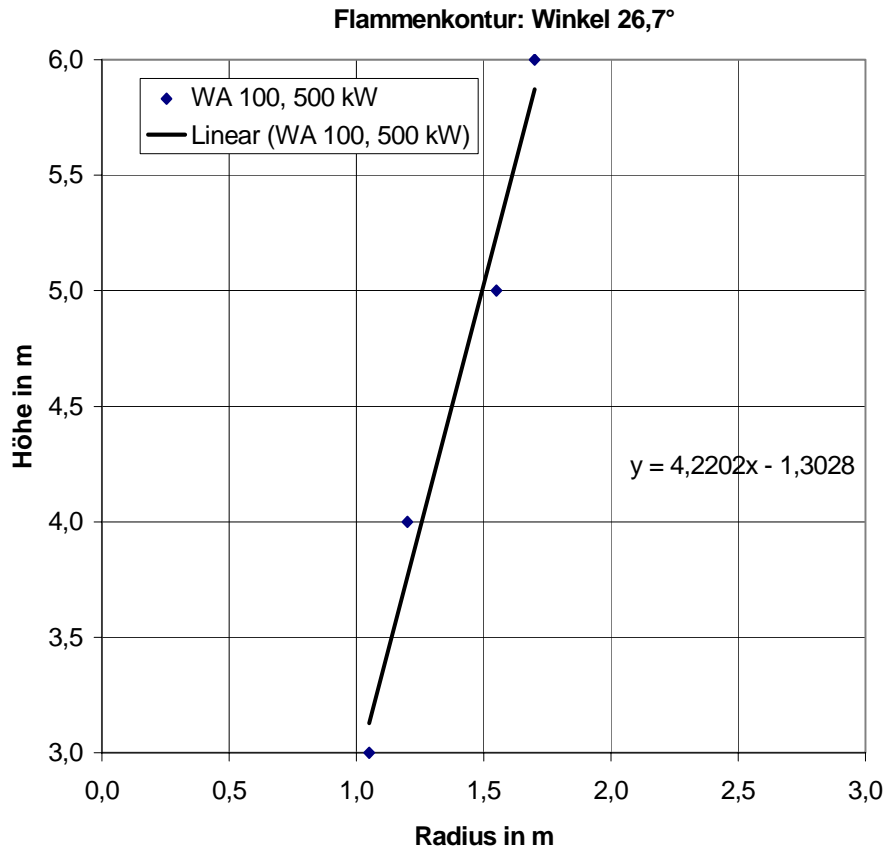


Bild 24m. Versuch 13: Kontur des Öffnungswinkels.

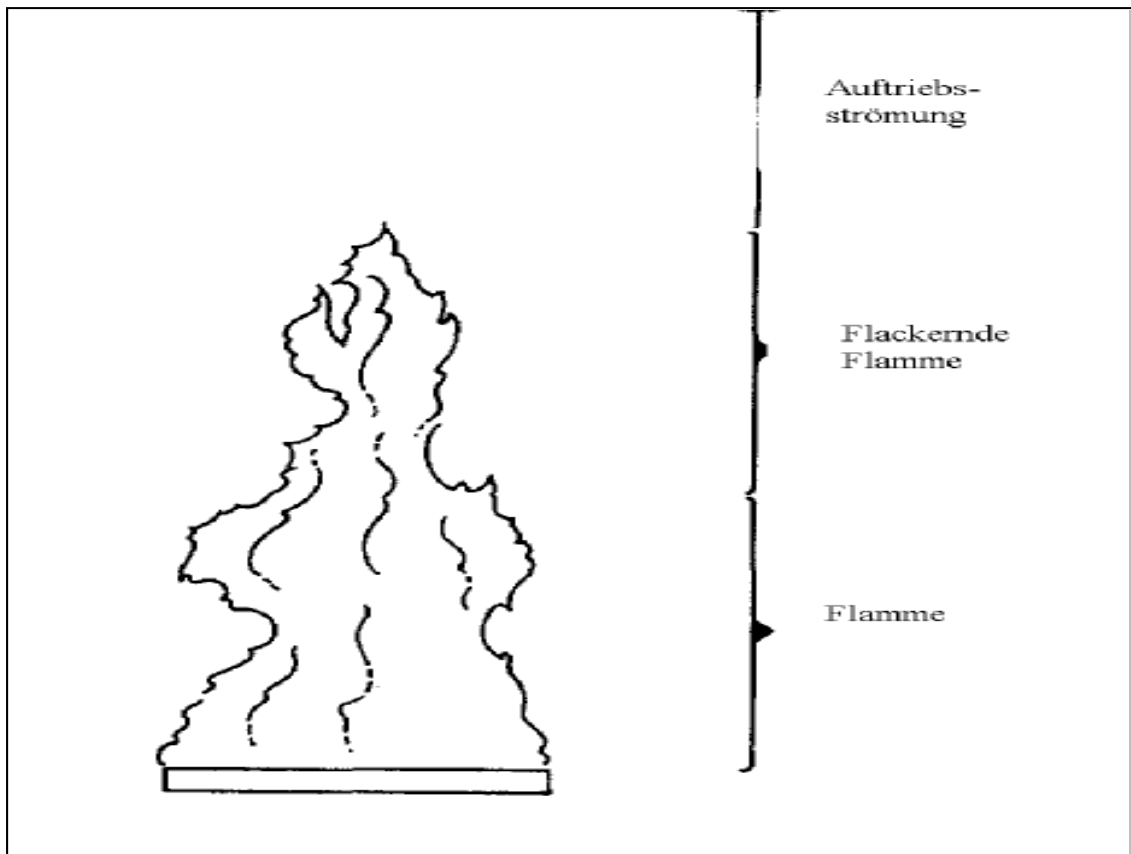


Bild 25. Bereiche der Rauchgassäule: Flamme I – Flackernde Flamme II – Auftriebsströmung III

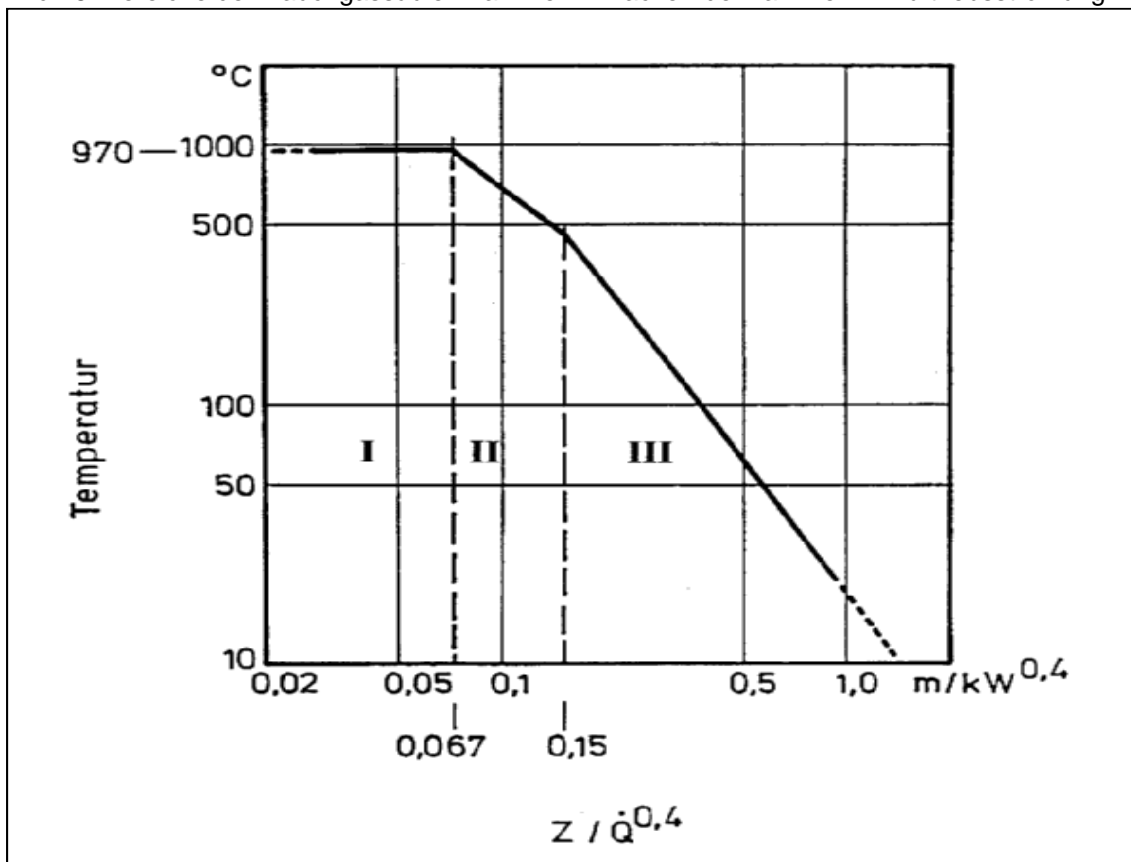


Bild 26. Temperaturverlauf der 3 Bereiche auf der Flammen-/Plumeachse nach Tanaka /19/.

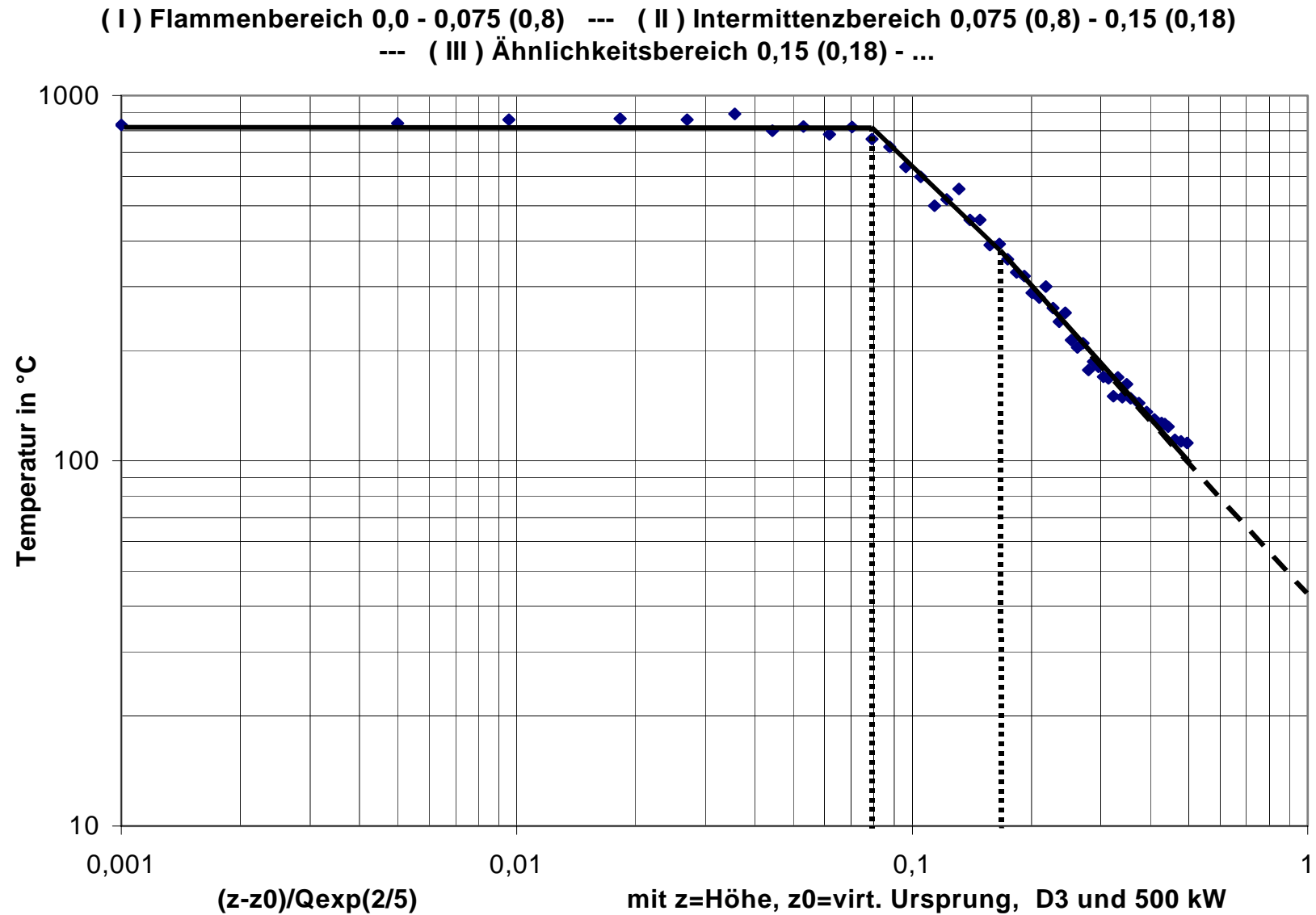


Bild 27. Temperaturverlauf auf der Achse für die 3 Bereiche bei Meßhöhen von 0,4 m bis 6,2 m.

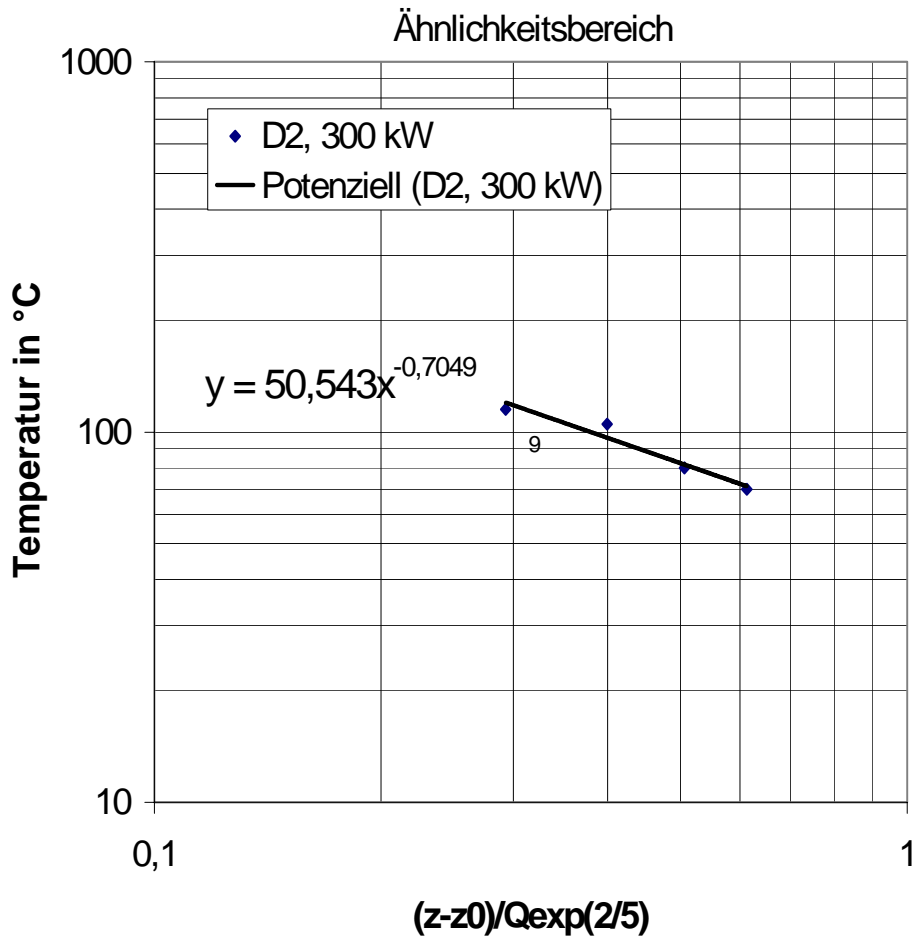


Bild 28a. Versuch 1: Temperaturverlauf

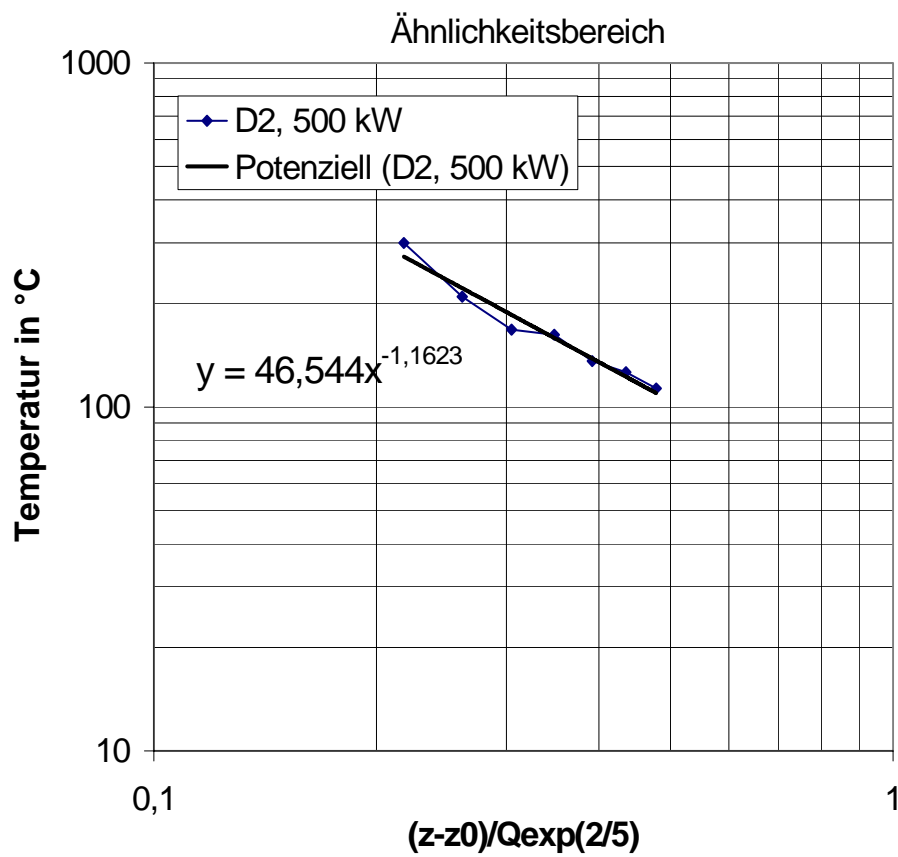


Bild 28b. Versuch 2: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

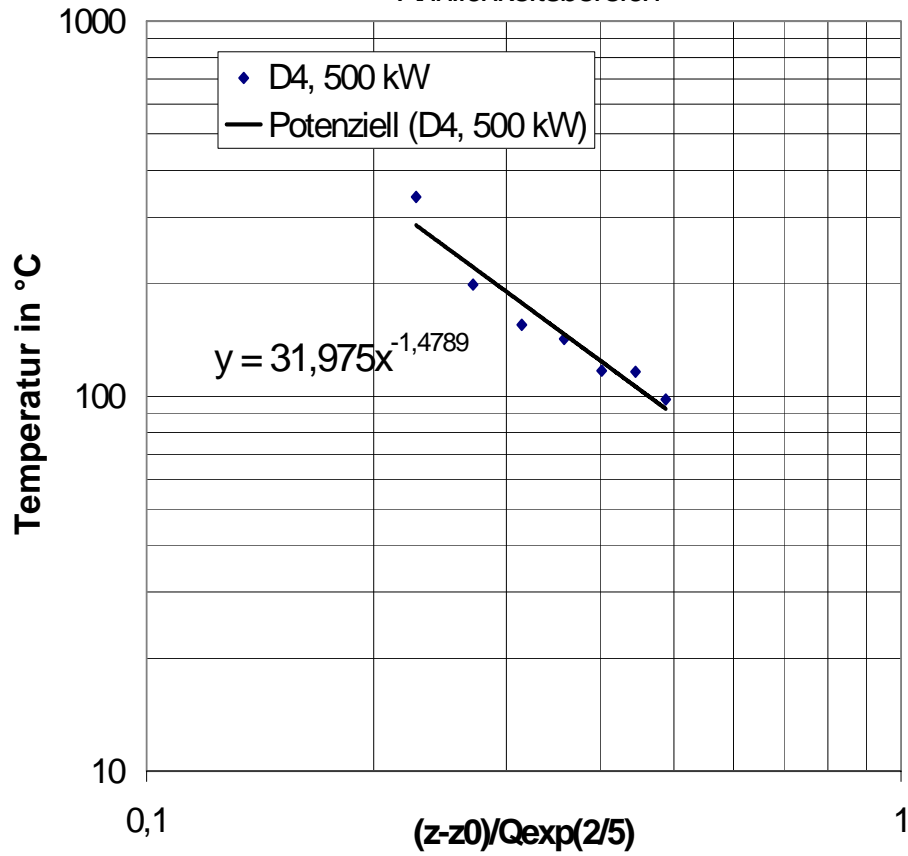


Bild 28c. Versuch 3: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

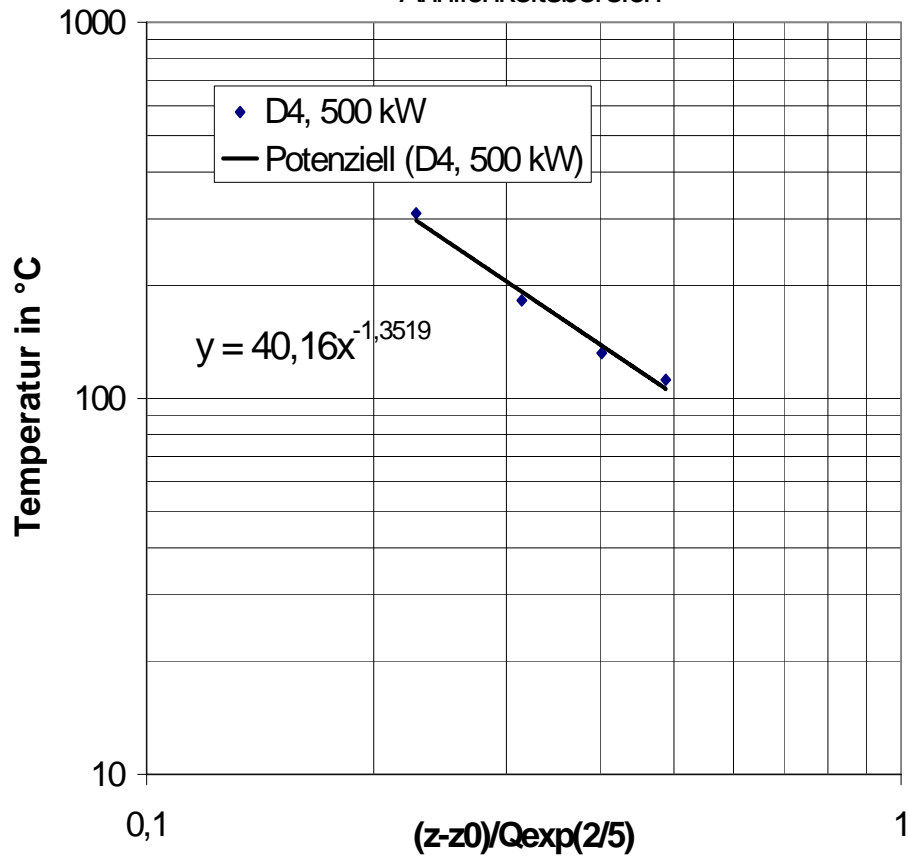


Bild 28d. Versuch 4: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

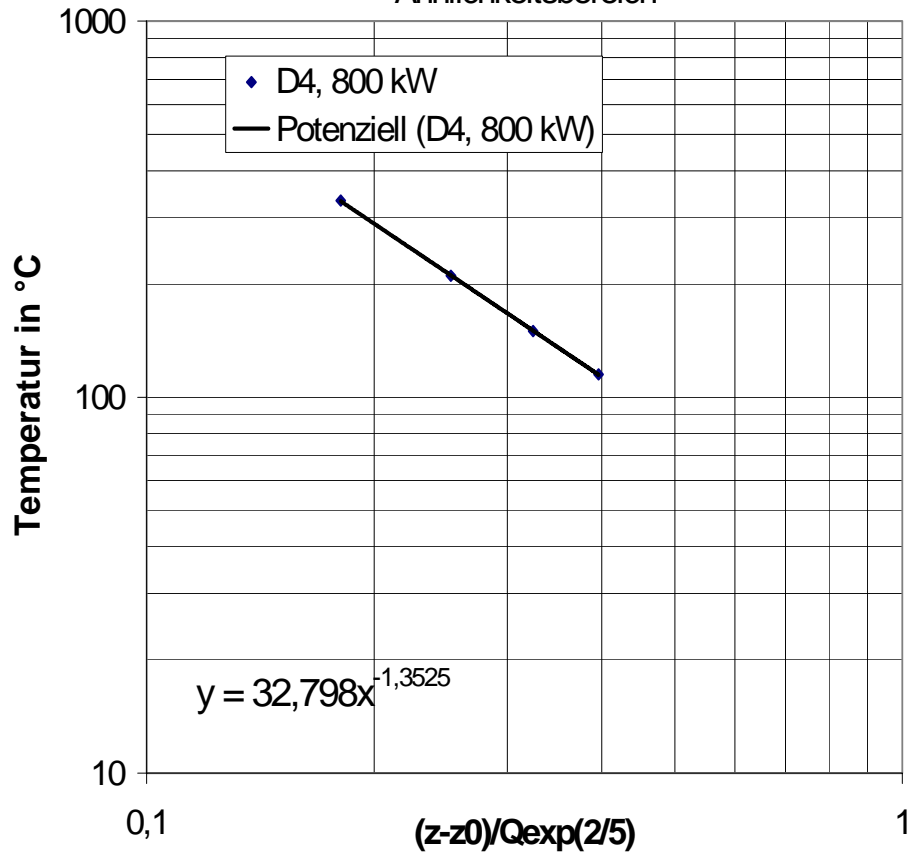


Bild 28e. Versuch 5: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

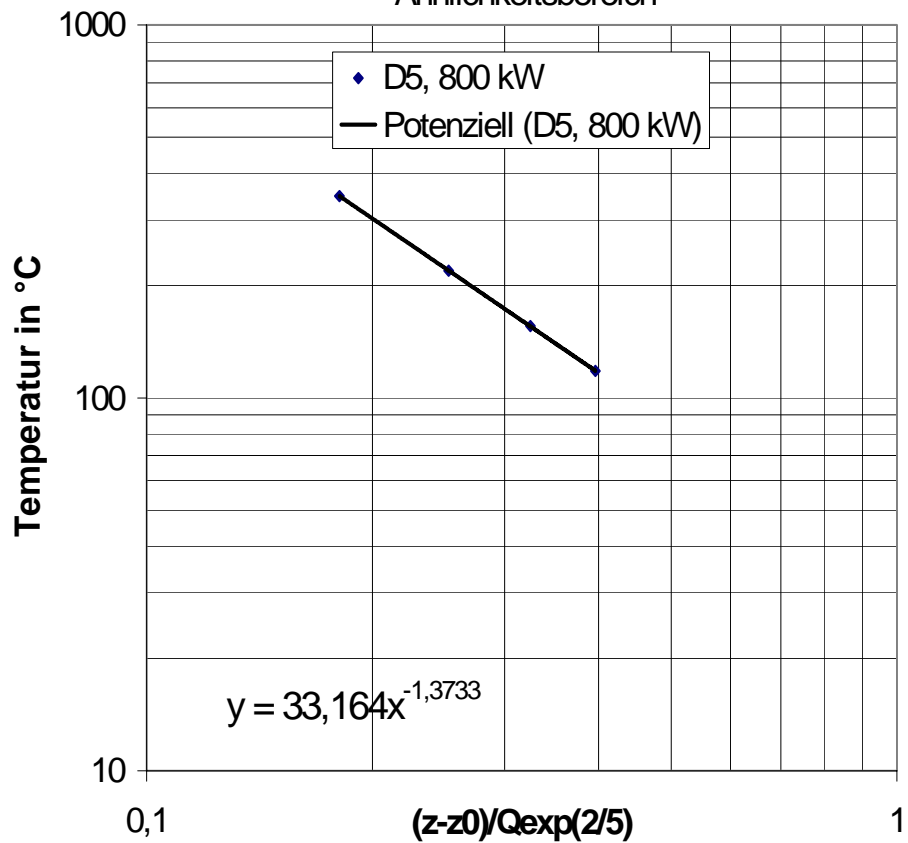


Bild 28f. Versuch 6: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

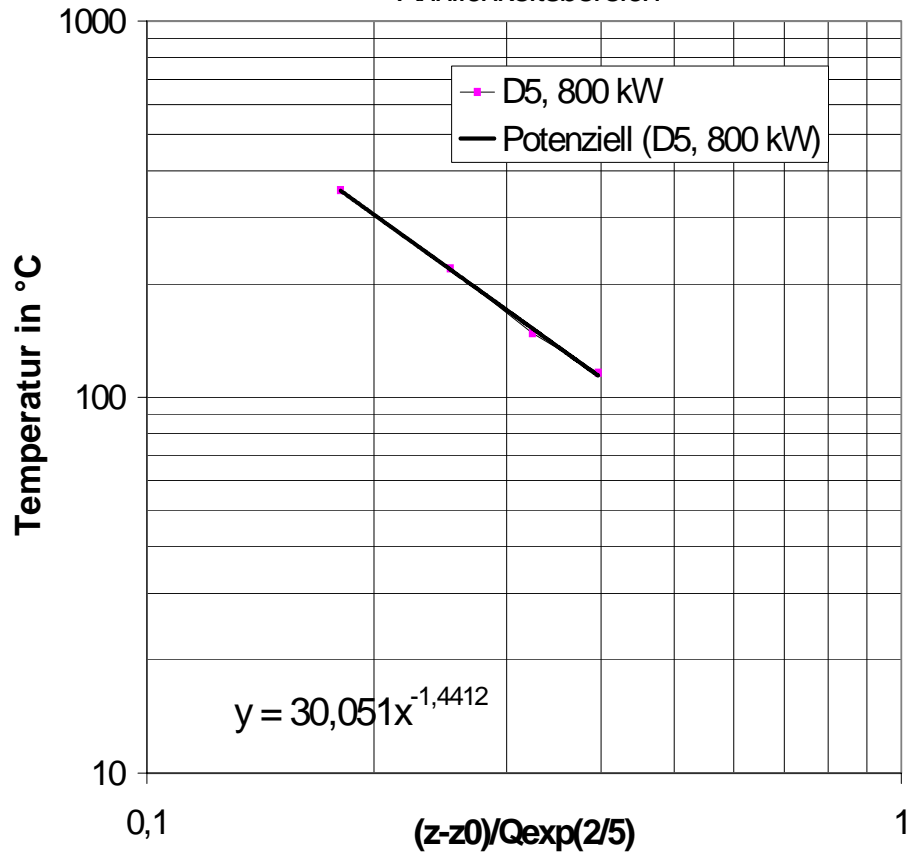


Bild 28g. Versuch 7: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

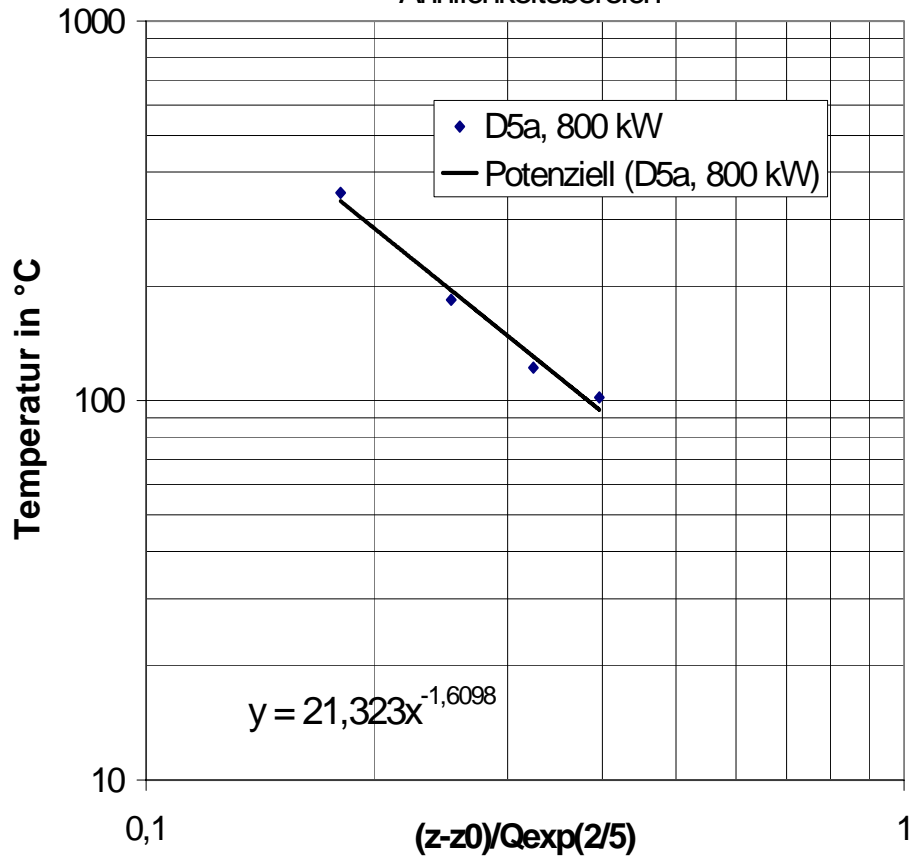


Bild 28h. Versuch 8: Temperaturverlauf

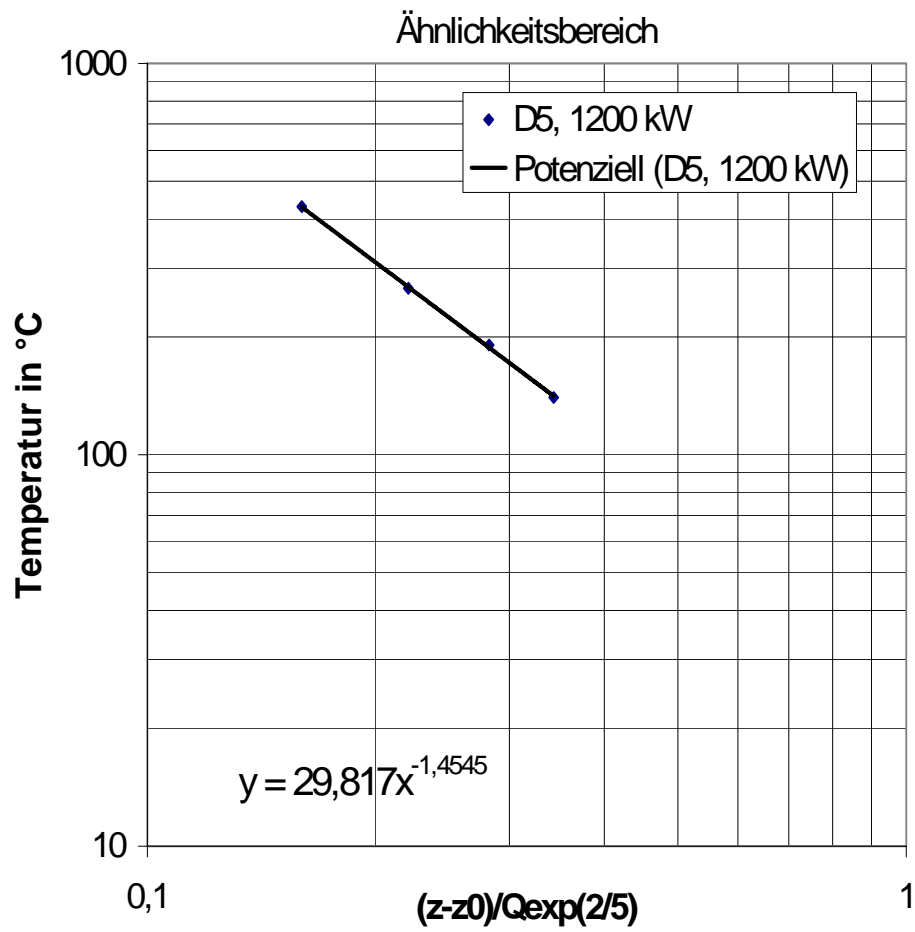


Bild 28i. Versuch 9: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

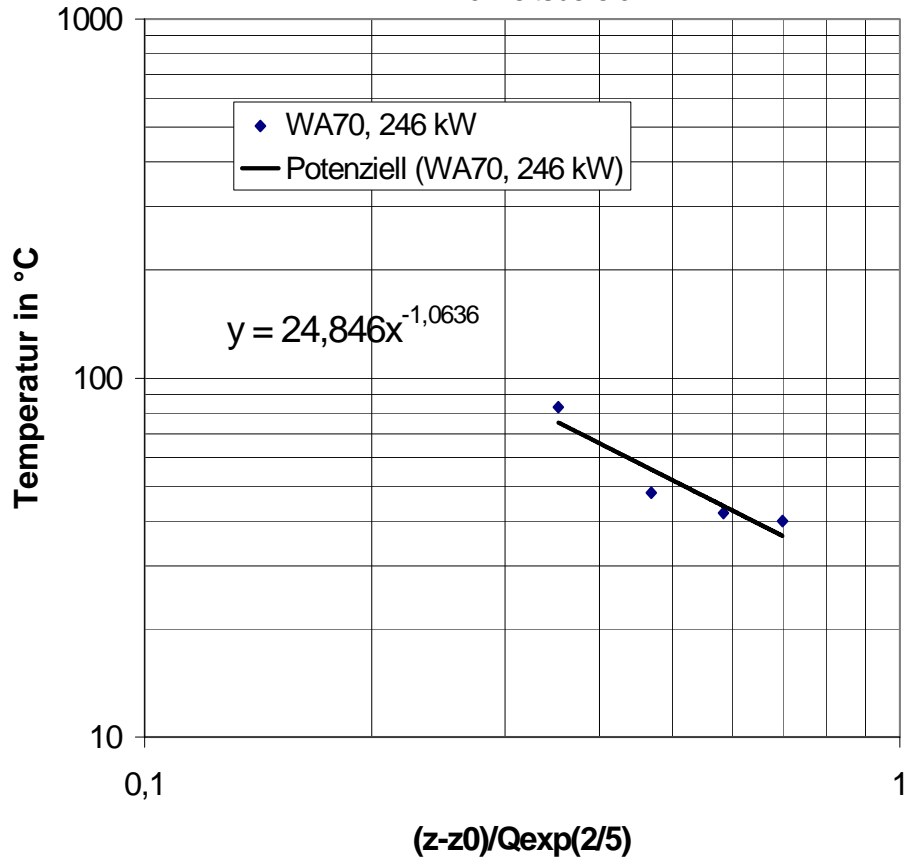


Bild 28j. Versuch 10: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

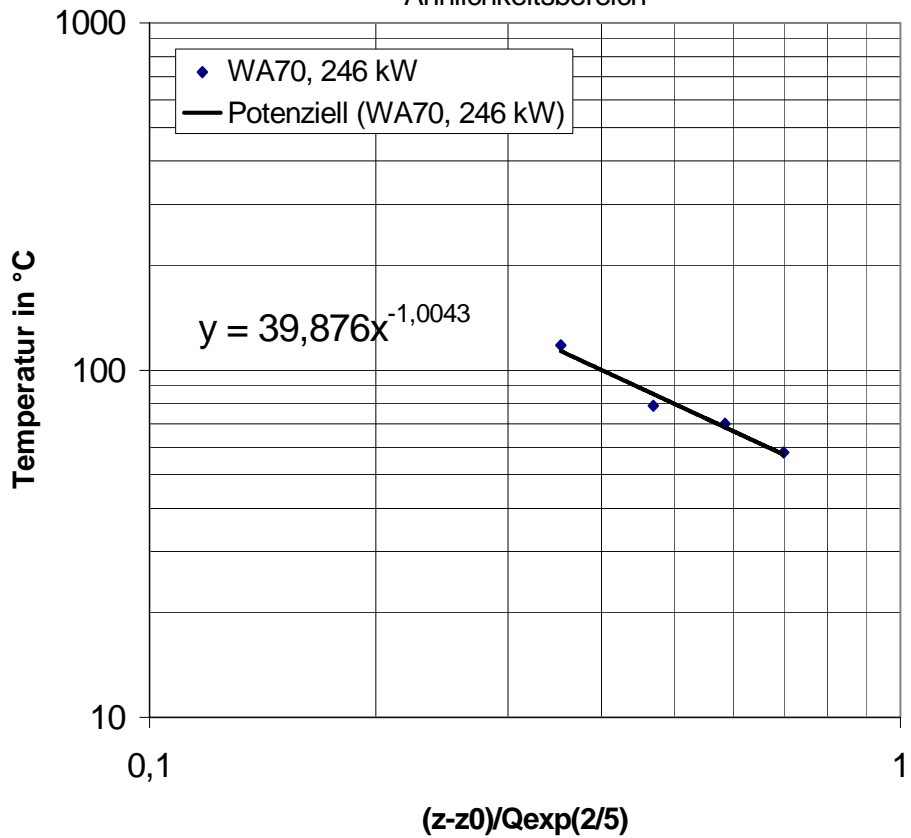


Bild 28k. Versuch 11: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

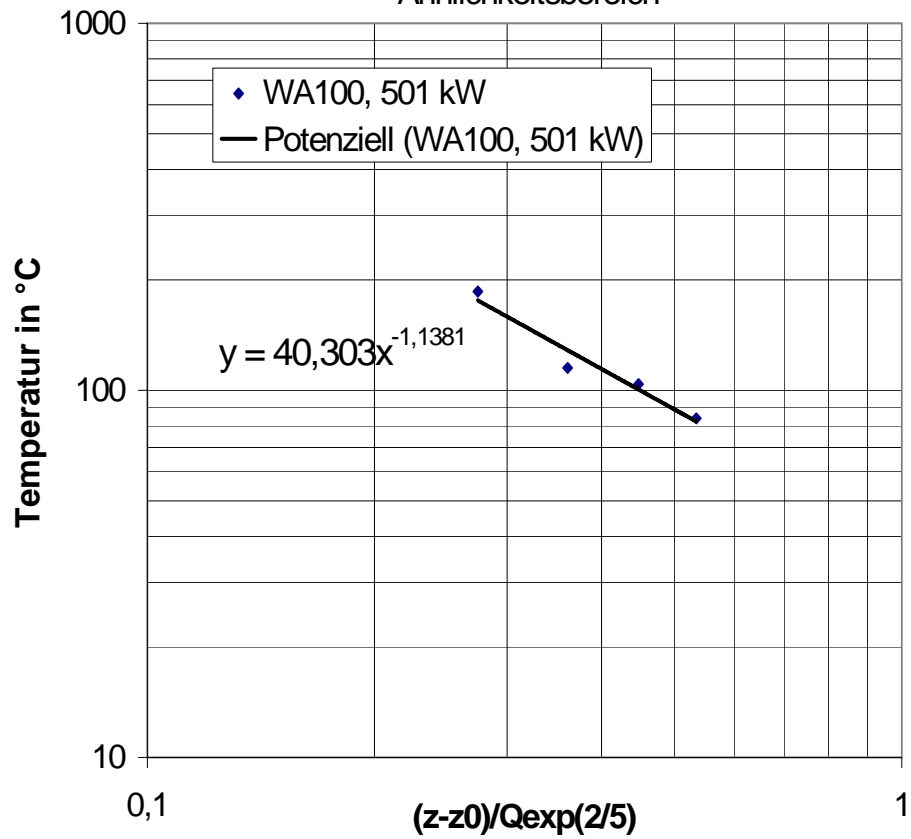


Bild 28l. Versuch 12: Temperaturverlauf

Ähnlichkeitsbereich

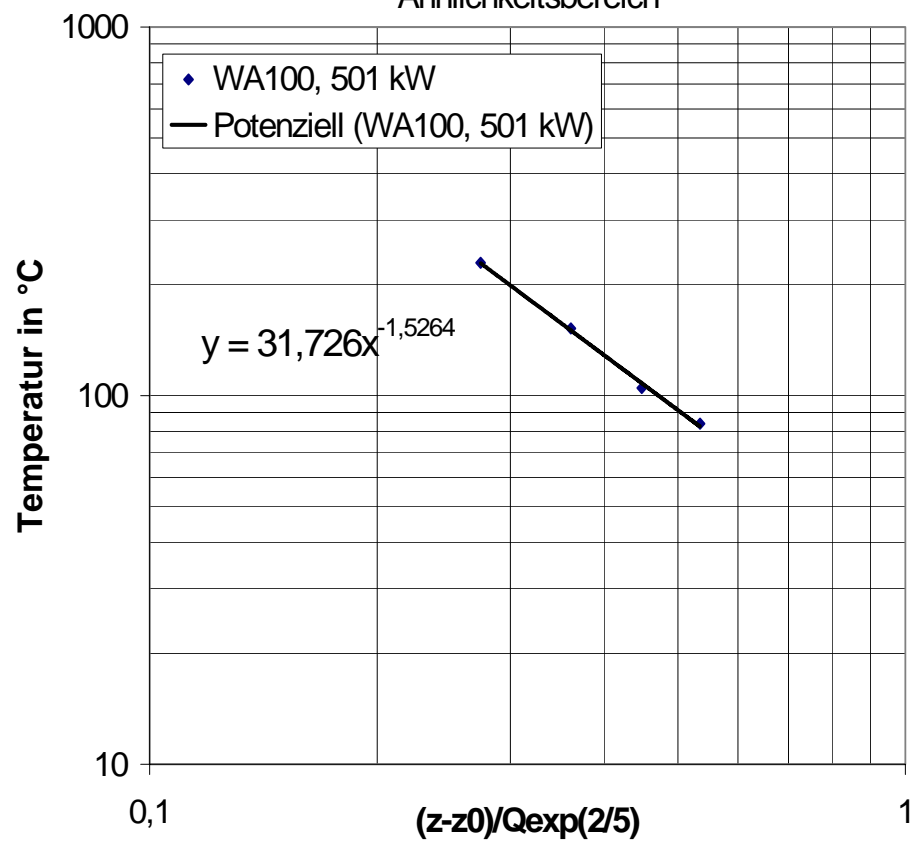


Bild 28m. Versuch 13: Temperaturverlauf

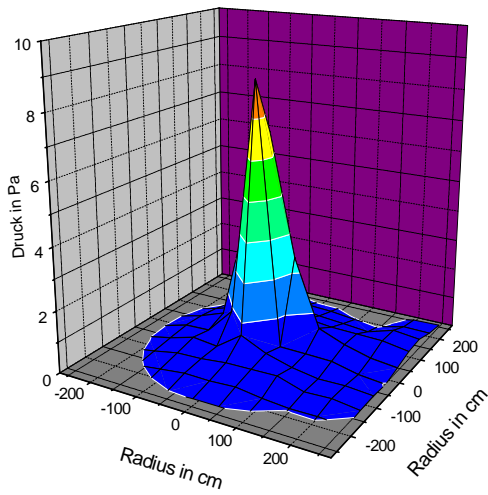


Bild 29a. Höhe 3 m

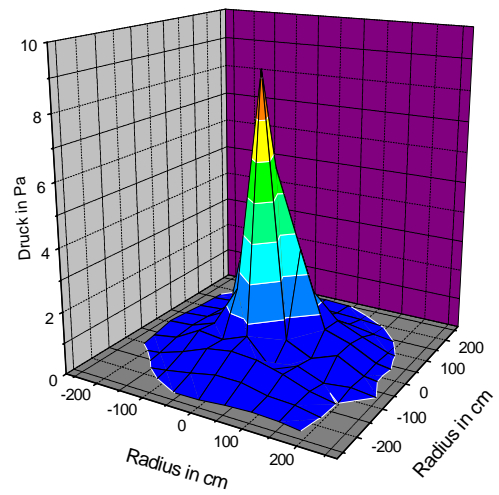


Bild 29b. Höhe 4 m

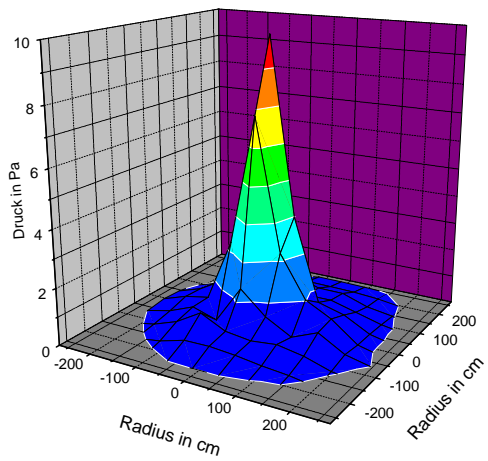


Bild 29c. Höhe 5 m

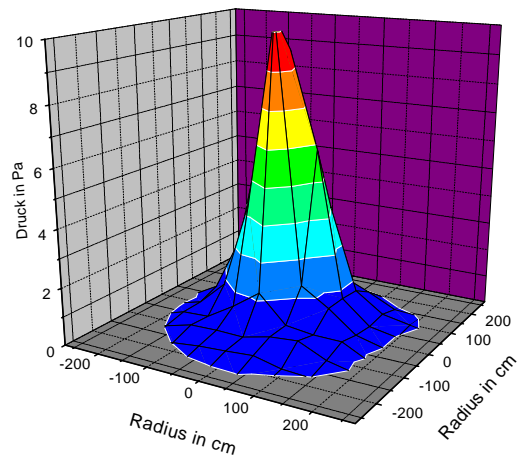


Bild 29 d. Höhe 6 m

Bild 29. Versuch 6: Dreidimensionale Darstellung des Druckes in Abhängigkeit vom Radius bei einer Brandleistung von 800 kW.

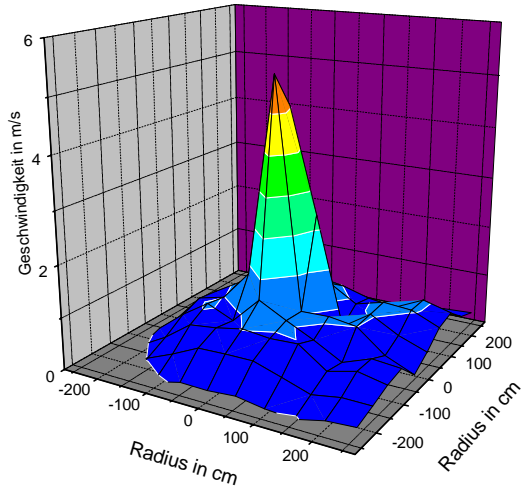


Bild 30a. Höhe 3 m.

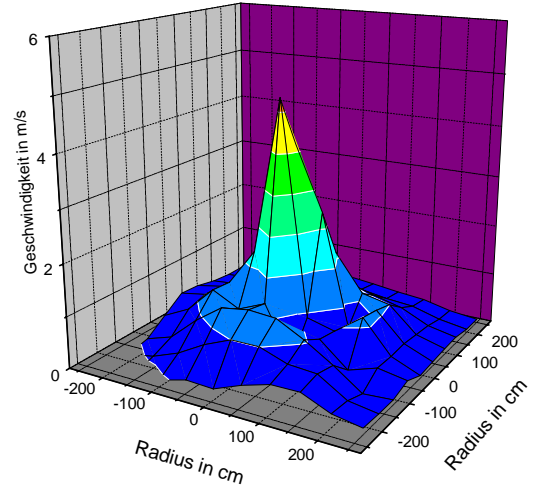


Bild 30b. Höhe 4 m.

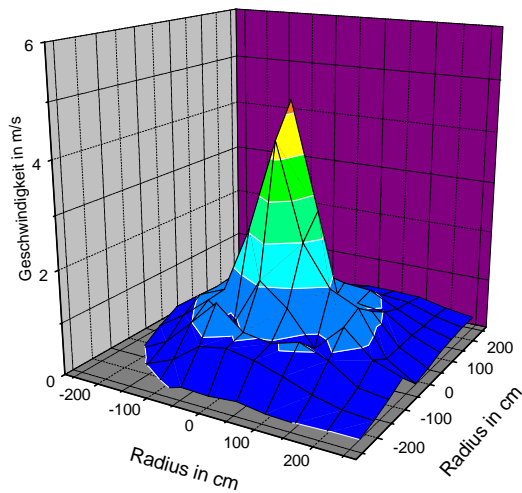


Bild 30c. Höhe 5 m.

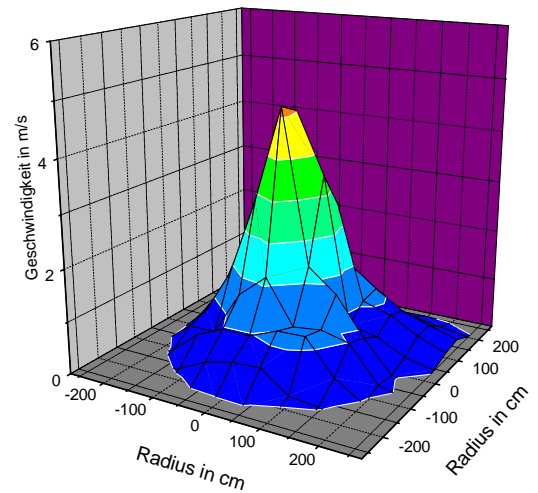


Bild 30d. Höhe 6 m.

Bild 30. Versuch 6: Dreidimensionale Darstellung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand (Radius) bei einer Brandleistung von 800 kW.

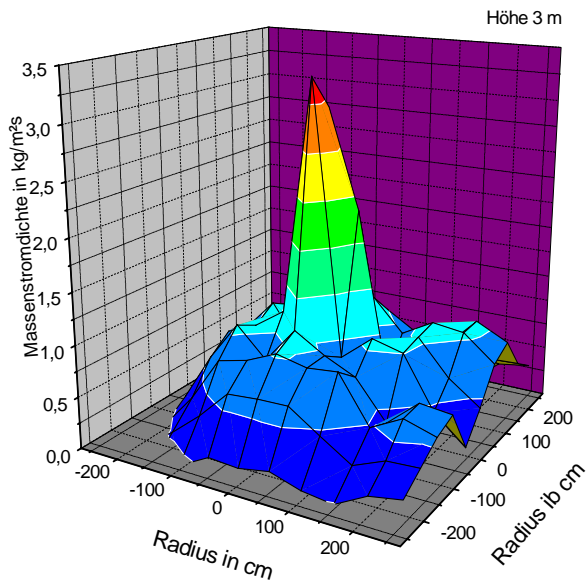


Bild 31a. Höhe 3 m.

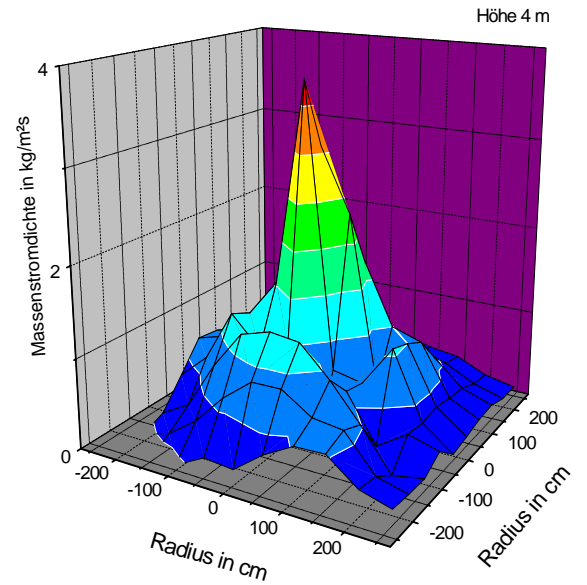


Bild 31b. Höhe 4 m.

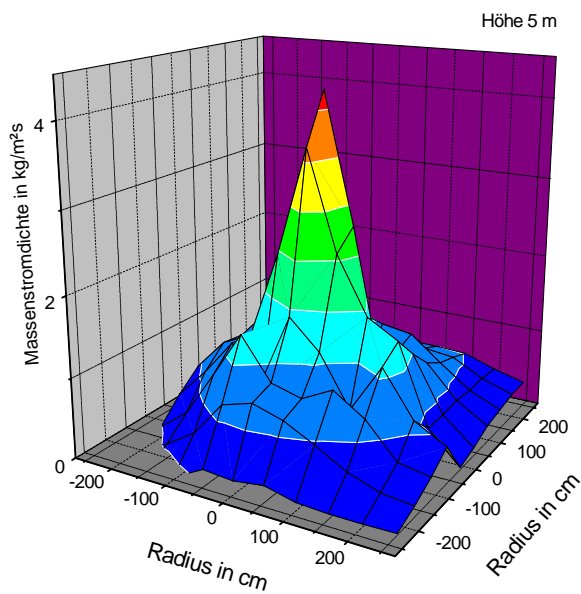


Bild 31c. Höhe 5 m.

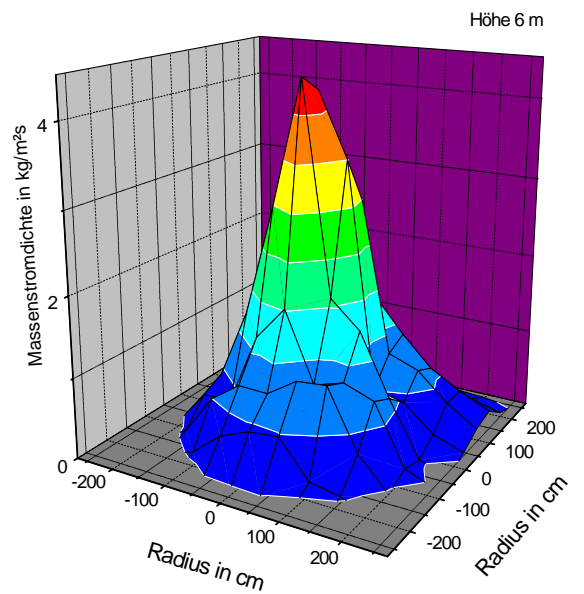


Bild 31d. Höhe 6 m.

Bild 31. Versuch 6: Dreidimensionale Darstellung der Massenstromdichte in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand (Radius) bei einer Brandleistung von 800kW.

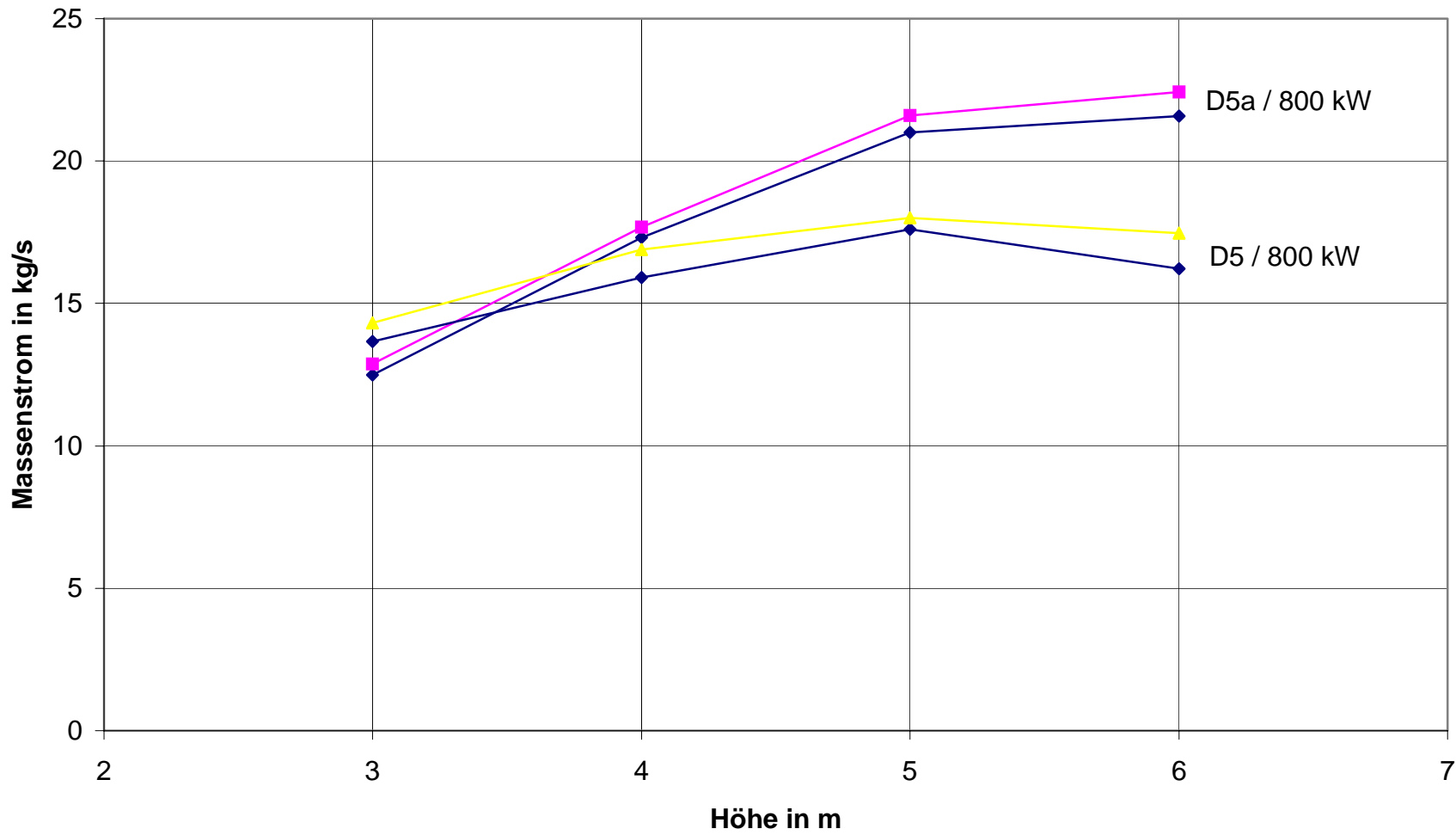


Bild 32. Massenstrom in Abhängigkeit von der Höhe bei einer Brandleistung von 800 kW mit 2 Sprühdüsen und unterschiedlichem Sprühwinkel (s. Tabelle 2).

Massenstrom nach McCaffrey, Zukoski, Thomas-Hinkley; Anwendungsbereiche

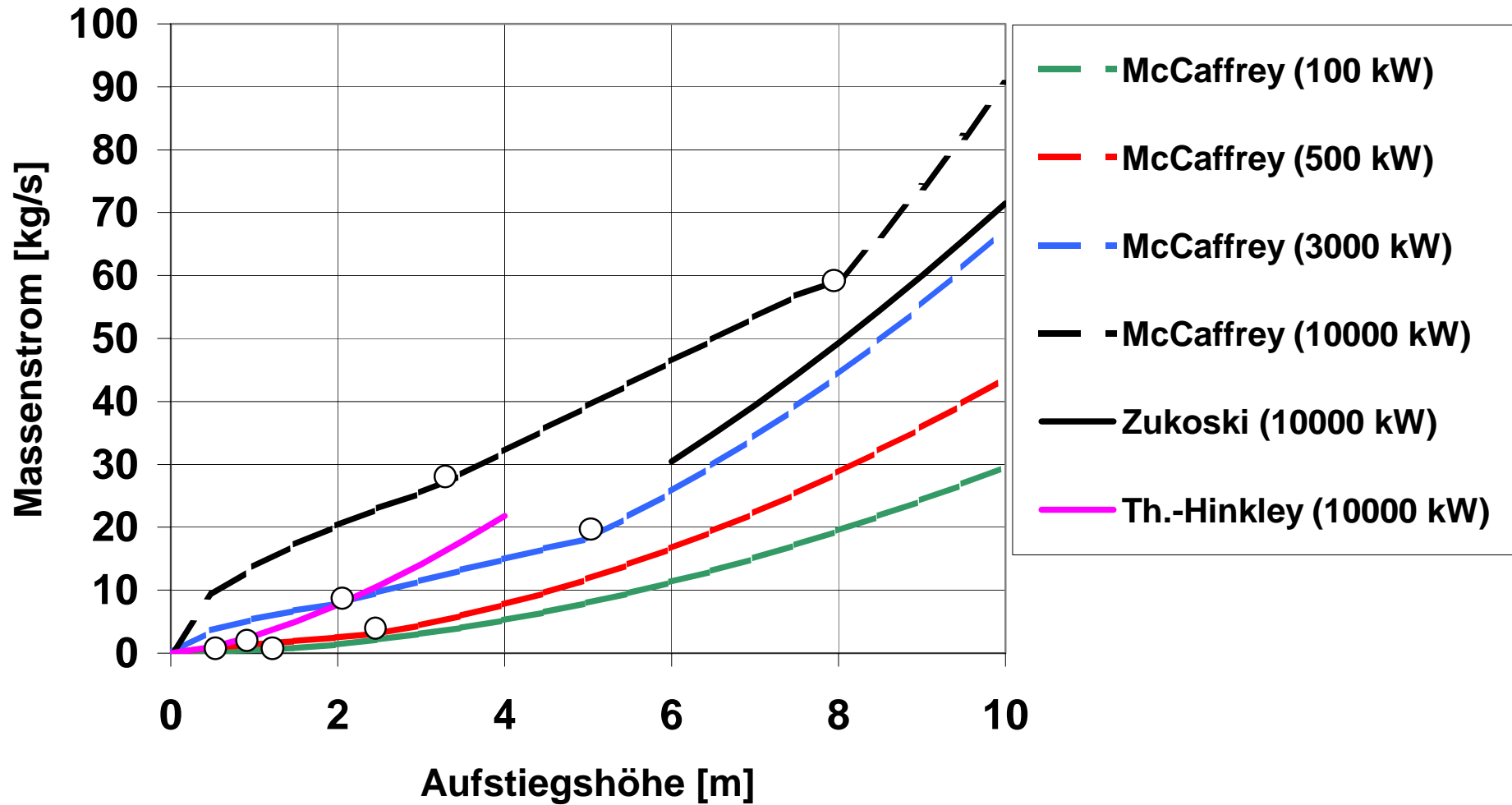


Bild 33. Massenstrom in Abhängigkeit von der Aufstiegshöhe bei unterschiedlichen Brandleistungen.

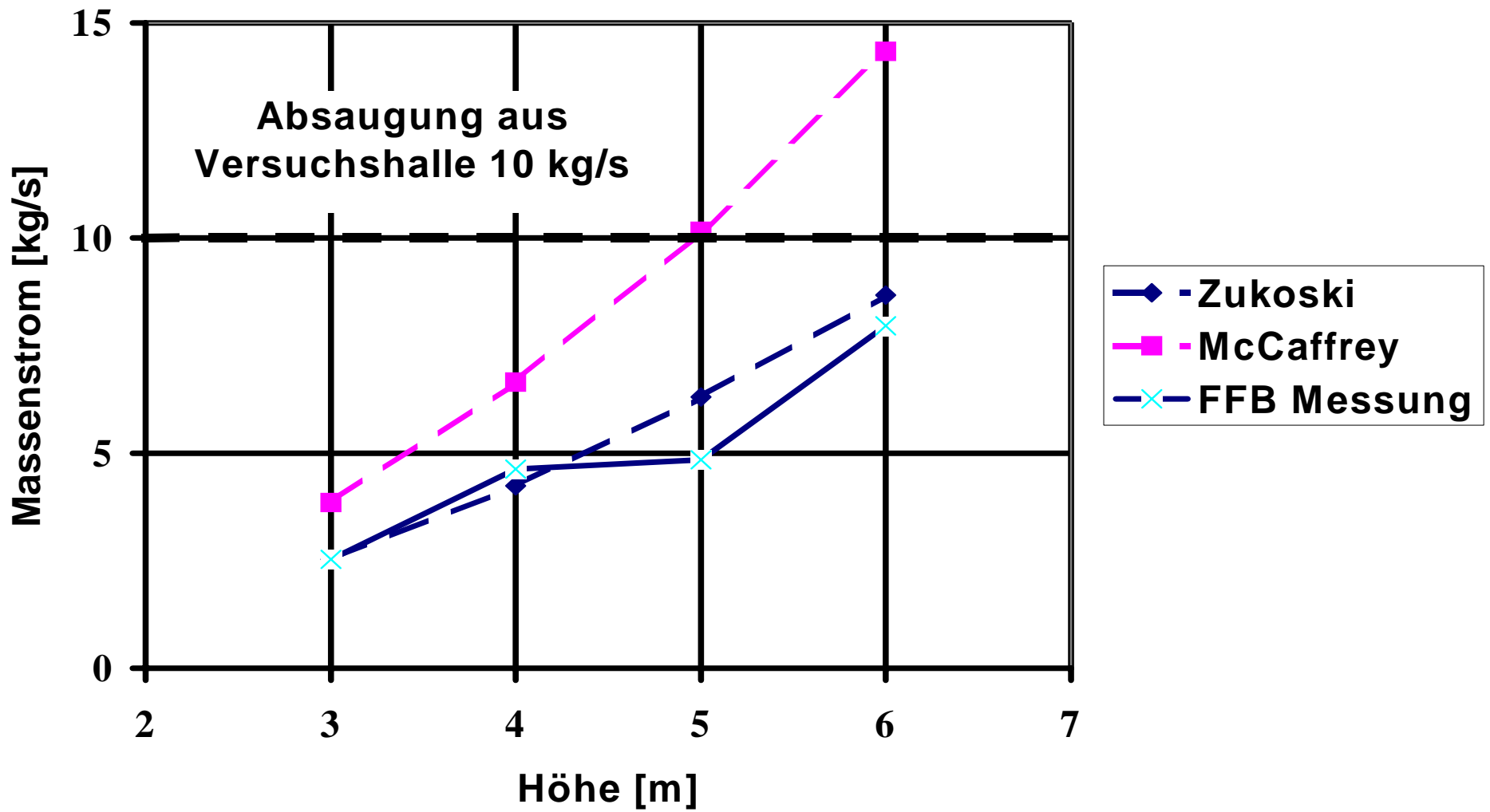


Bild 34. Vergleich der Massenströme in Abhängigkeit von der Höhe.

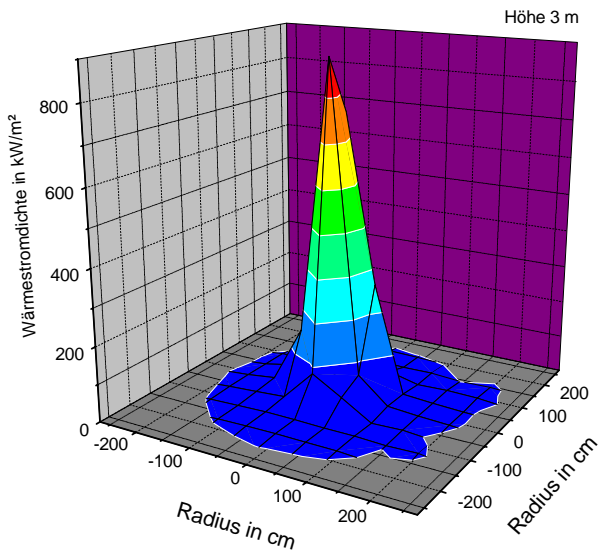


Bild 35a. Höhe 3 m.

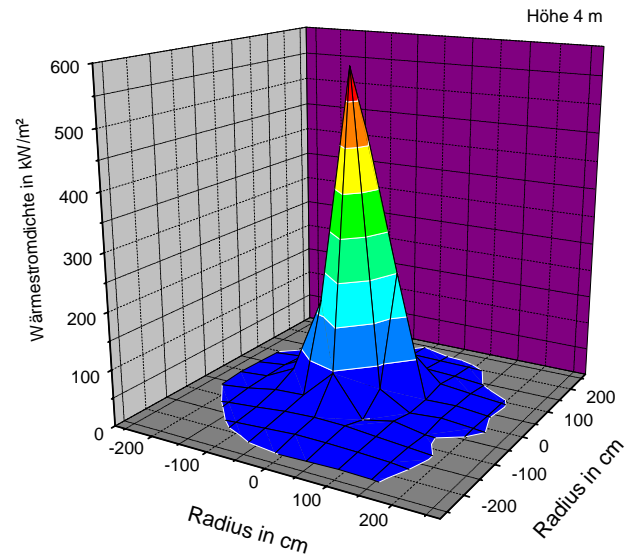


Bild 35b. Höhe 4 m.

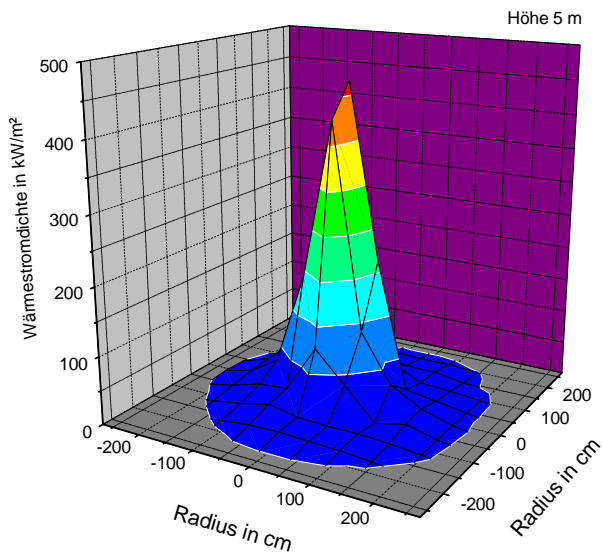


Bild 35c. Höhe 5 m.

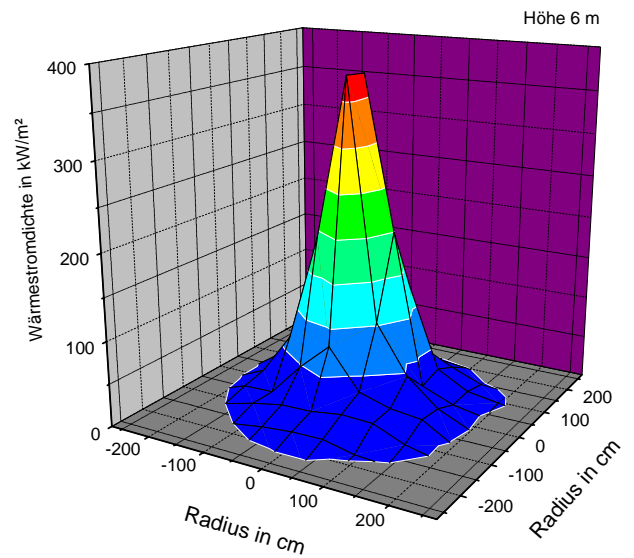


Bild 35d.

Bilder 35. Massenstromdichte in Abhängigkeit vom radialen Abstand in den Höhen 3 m, 4 m, 5 m, 6 m.

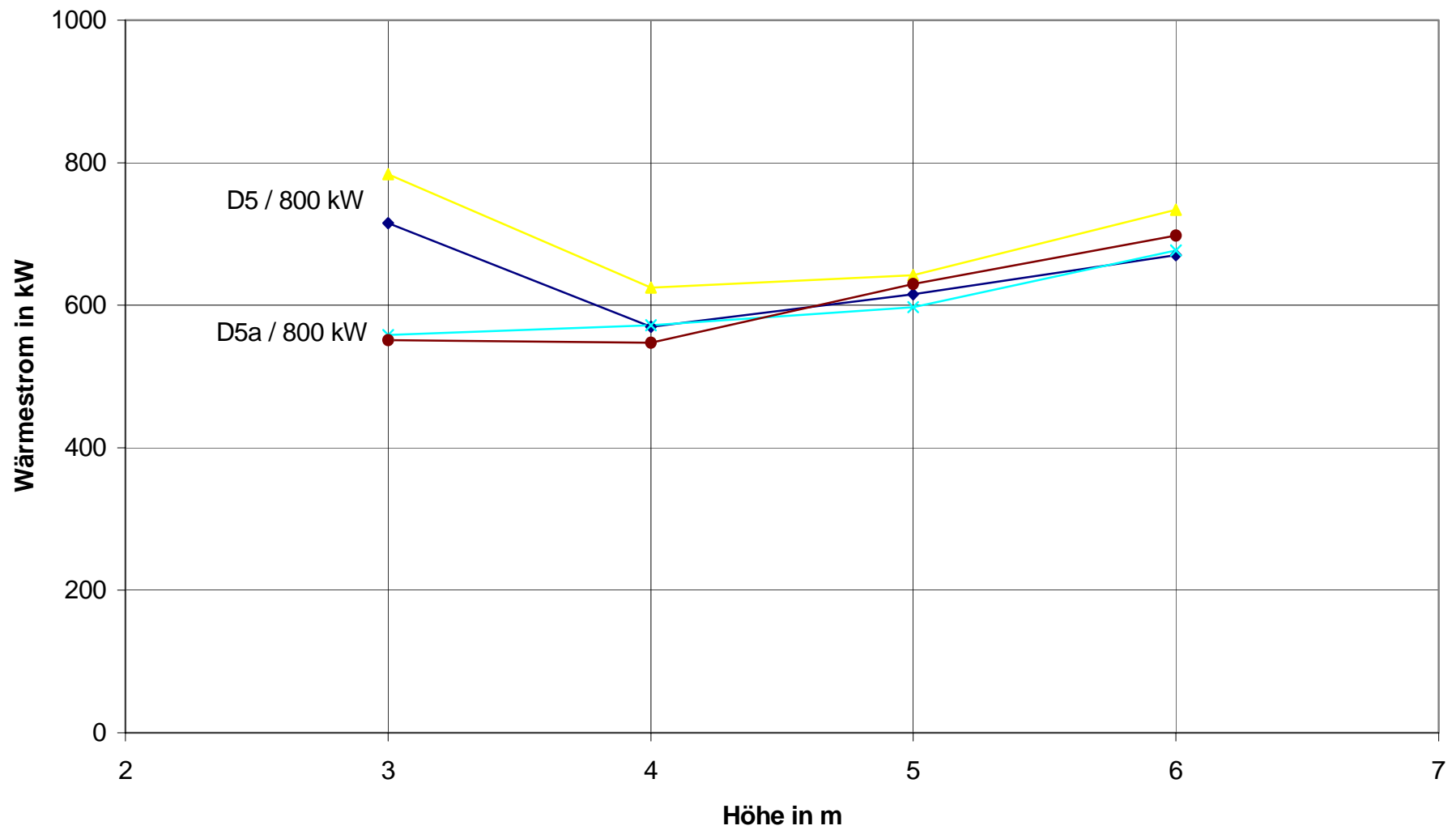


Bild 36. Massenstrom in Abhängigkeit von der Höhe bei einer Brandleistung von 800 kW mit 2 Sprühdüsen und unterschiedlichem Sprühwinkel (s. Tabelle 2).