

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der
Länder, Arbeitskreis V, Ausschuß für Feuerwehrangelegenhei-
ten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 138

**Untersuchung der Wechselwirkungen
zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler-
und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen
— Versuche —**

von
Dipl.-Ing. C. Axel Föhl

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Februar 2005

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">138</div>	Titel des Berichtes: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen — Versuche —	ISSN: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">0170-0060</div>	
Autoren: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">Dipl.-Ing. C. Axel Föhl</div>	durchführende Institution: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Hertzstraße 16 D-76187 Karlsruhe		
Nummer des Auftrages: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">171 (2/99)+177 (3/2000)</div>	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Abschlußdatum: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">Februar 2005</div>			
Seitenzahl: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">91</div>	Bilder: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">34</div> *) sh. Kurzfassung	Tabellen: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">6 + 6</div>	Literaturverweise: <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">11</div>
Kurzfassung: <p>Bei Brennerleistungen ab 600 kW werden im allgemeinen alle Sprinkler im Umkreis von 3,75 m aktiviert, selbst wenn der Brenner sich direkt unter der offenen RWA befindet. – Schon in 3 m Entfernung von der Wärmequelle streuen die gemessenen Öffnungszeiten stark (1...6 min). Dies erfordert eine geringere Fertigungstoleranz bei den Auslöseelementen oder eine zahlenmäßige Kompensation. Die RWA braucht deshalb einen exakteren Öffnungsmechanismus.</p> <p>Bei den hier durchgeführten Experimenten wurden Versuche mit früh öffnenden RWA und solche mit RWA, die gleichzeitig mit benachbarten Sprinklern aufgehen, Versuchen ohne Rauchabzug gegenübergestellt. Es konnte keine Beeinflussung der Sprinkler-Funktion durch die RWA festgestellt werden. Im Brandfall kann also das primäre Schutzziel verfolgt werden kann, die Rettungswege und die Angriffswege der Feuerwehr rauchfrei zu halten; die gleichzeitig aktivierten Sprinkler verhindern, daß der Brand angefacht wird.</p> <p>Das hier verwendete Sprinkler-Berechnungsverfahren kann nicht als der Problemstellung angemessen bezeichnet werden, denn es berechnet es zu niedrige Rauchgas-Temperaturen. Schon in 2,25 m Entfernung liefert dieses Verfahren – auch bei 630 kW – keine Sprinkler-Reaktion mehr, obwohl die Versuche zeigen, daß bei dieser Leistung, in dieser Entfernung alle Sprinkler innerhalb von 2...8 Minuten anspringen. In einer temperatur-korrigierten Version vermag das Verfahren den Erwärmungsprozeß anschaulich wiederzugeben.</p> <p>*) Die in diesem Bericht nur schwarz/weiß wiedergegebenen Graphiken und Photographien können gegen 5 Euro bei der Forschungsstelle (Adr. sh. ob.) in mehrfarbiger Ausführung auf CD bezogen werden.</p>			
Schlagwörter: Auslöseelement, Auslösetemperatur, Brandschutzkonzept, Fertigungsgenauigkeit, Naturkonvektion, rauchfrei, Rauchgas-Absaugung, Rauchgas-Temperatur, Rauchschürzen, Rechenmodell, RWA, Sprinkler, Sprinkler-Auslösezeitpunkt, Sprinkler-Fäßchen, Sprinkler-Raster, Thermoelement, Trägheitsbeiwert, Versuche im Realmaßstab, Wärmefreisetzungsrate			

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

1.	EINLEITUNG	1
2.	BESCHREIBUNG DES VERSUCHSSTANDES	6
2.1	Decke des Versuchsstandes	6
2.2	Sprinkler, RWA und Meßinstrumente	6
2.3	Wärmequellen	10
2.4	Variation der Versuchsparameter	10
3.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	12
4.	VERSUCHSAUSWERTUNG	20
4.1	Erste, qualitative Beurteilung der Versuchsergebnisse	20
4.2	Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke	25
4.3	Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate – berechnet aus der Rauchgas-Temperatur	30
4.4	Berechnung des Sprinkler-Auslösezeitpunktes in Abhängigkeit von der Versuchsdauer	33
4.5	Berechnung des Sprinkler-Auslösezeitpunktes in Abhängigkeit von der Entfernung des Sprinklers von der Wärmequelle	38
5.	SCHLUSSFOLGERUNGEN	40
6.	ZUSAMMENFASSUNG	44
7.	LITERATURVERZEICHNIS	46
8.	TABELLEN UND BILDER.....	47

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

Kürzel	Bedeutung	Dimension
A	brennbare Oberfläche des Brennstoffes im Trichter-Brenner	m ²
CFD	Computational Fluid Dynamics = rechnergestützte Modellierung eines Strömungsfeldes	—
H	Abstand zwischen Brennstoffoberfläche und Decke	m
h	lichte Höhe des Versuchsstandes	m
Δh_1	Abstand der mobilen Sonde 1 von der Decke des Versuchsstandes	mm
$I_{RT,Spr.}$	Trägheitsbeiwert des Auslöseelementes im Sprinkler	(m·sec) ^{1/2}
$I_{RT,RWA}$	Trägheitsbeiwert des Auslöseelementes in der RWA	(m·sec) ^{1/2}
k_g	Temperatur-Koeffizient	—
k_v	Geschwindigkeits-Koeffizient	—
$p_{dyn.}(r)$	dynamischer Druck im Kalibrier-Rohr in Abhängigkeit vom Abstand von der Mittelachse	Pa
$p_{dyn.1}$	dynamischer Druck des Rauchgases unter der Decke des Versuchsstandes, gemessen mit der mobilen Sonde 1	Pa
$p_{dyn.2}$	dynamischer Druck des Rauchgases im Absaugkanal, gemessen mit der festen Sonde 2	Pa
$p_{stat.}$	statischer Druck unter der Brennstoffsäule im Trichter-Brenner	Pa
Q	Wärmefreisetzungsrate = Brennerleistung	kW

Kürzel	Bedeutung	Dimension
r	halber Durchmesser des Kalibrier-Rohres	mm
$r_1 \dots r_7$	horizontaler Abstand der Thermoelemente unter der Decke des Versuchsstandes von der Wärmequelle	m
RWA	Rauch- und Wärme-Abzugsanlage	—
ϑ_A	Auslösetemperatur	°C
$\vartheta_{A, Spr.}$	nominelle Auslösetemperatur des Sprinklers	°C
$\vartheta_{A, RWA}$	nominelle Auslösetemperatur der RWA	°C
ϑ_{AE}	Temperatur des Auslöseelementes	°C
ϑ_{RG}	Temperatur des Rauchgases	°C
ϑ_1	Temperatur des Rauchgases unter der Decke des Versuchsstandes, gemessen mit der mobilen Sonde 1	°C
ϑ_2	Temperatur des Rauchgases im Absaugkanal, gemessen mit der festen Sonde 2	°C
ϑ_∞	Umgebungstemperatur	°C
ϑ_{AE}	Erwärmung des Auslöseelementes	°C/sec
t	Versuchszeit	min; sec
t_A	Auslösezeit	min; sec
V	Rauchgas-Volumenstrom im Kalibrier-Rohr	m ³ /h
v(r)	Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases im Kalibrier-Rohr in Abhängigkeit vom Abstand von der Mittelachse	m/sec
v_{RG}	Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases unter der Decke des Versuchsstandes	m/sec
VR	Versuchsreihe	—

1. EINLEITUNG

Die gegenseitige Beeinflussung von Sprinkler-Systemen und Rauch/Wärme-Abzugsanlagen (RWA) stellt in der Brandschutztechnik quasi ein Dauerforschungsthema dar: Zum einen wurden schon in den späten 1950er Jahren Untersuchungen – auch im Realmaßstab – hierüber angestellt, zum anderen ist bis heute die Diskussion über die Vor- und Nachteile eines kombinierten Sprinkler/RWA-Systems nicht beigelegt, wie der einleitende Forschungsbericht [1] zu diesem Thema zeigt, in dem die jüngsten Großversuche bei Underwriters Laboratories in Northbrook/Illinois interpretiert werden [2].

Obwohl Einigkeit über die den Feuerwehreinsatz bestimmenden Prioritäten

1. Rettung gefährdeter Personen,
2. Schutz des betroffenen Gebäudes (beispielsweise durch Verringerung der thermischen Belastung der Dachkonstruktion),
3. Schutz vor Korrosion (zum Beispiel durch Chlor-Wasserstoff) und
4. Minimierung des Wasserschadens und Schutz der Nachbarschaft und Umwelt

besteht, ist noch immer umstritten [3],

- a) in welchem Maße die Rauch- und Wärmeabfuhr das Ansprechen von einzeln thermisch gesteuerten Sprinklern verzögert, deren Sprühstrahl den Brand in der Regel so lange eindämmen soll, bis die Feuerwehr eintrifft, um ihn vollständig zu löschen,
- b) ob der Gefahr, daß der Brand durch Ventilation angefacht wird, zuerst entgegengetreten werden muß oder
- c) ob die Freihaltung der Rettungswege, der Feuerwehruzugänge und der Umgebung des Brandherdes (Verbesserung der Orientierungsmöglichkeit: was brennt, wo, wieviel?) von mit dem Sprühwasser niedergeschlagenen Rauchschwaden Priorität genießt, um die Bedingungen für die Lösch- und Rettungsmaßnahmen der Feuerwehr zu optimieren.

Punkt c stellt das primäre Schutzziel des Feuerwehreinsatzes dar. Dieses kann verfolgt werden, wenn – entsprechend Punkt a – sichergestellt ist, daß das Auslöseverhalten von Sprinklern durch RWA nicht beeinträchtigt wird. Punkt b wird dann obsolet.

Sowohl mit Großversuchen als auch mit mathematischen Modellrechnungen wird deshalb seit Jahren versucht, das Zusammenwirken von Sprinkler-Systemen und Rauch/Wärme-Abzugsanlagen zu klären. Doch scheinen 2-Zonen-Modelle [4] der Komplexität der Problemstellung, insbesondere in unmittelbarer Nähe der Abzugsöffnungen, nicht gewachsen zu sein, während sich numerische Modelle (CFD) zur Berechnung des gesamten Strömungsfeldes derzeit noch als zu zeitaufwendig erweisen [5].

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages wird ein Versuchsstand entwickelt, der es zum einen ermöglichen soll, die gegenseitige Beeinflussung von Sprinklern und RWA zu untersuchen, und mit dem zum anderen geprüft werden soll, wie groß die Sicherheitsreserve in Ingenieurformeln ist, mit deren Hilfe das Auslöseverhalten von Sprinklern berechnet wird [6].

In diesem Versuchsstand soll durch Variation der Einflußgrößen

- Brände mit unterschiedlicher Wärmefreisetzung,
- Decke des Versuchsstandes mit oder ohne Rauchschränken,
- Sprinkler mit unterschiedlichem Auslöseverhalten,
- Rauch/Wärme-Abzugsanlagen mit verschiedenen thermischen Auslöseelementen,
- dreidimensional verschiedene Anordnung der Sprinkler und der RWA in Bezug zur Position des Brandherdes

untersucht werden, ob ein simultanes RWA/Sprinkler-System derart gesteuert werden kann,

- daß weder das Ansprechverhalten der Sprinkler durch den Wärmeabzug beeinträchtigt wird, noch
- daß der Brand in unzulässigem Maß angefacht wird, auch wenn die Rauchgase nicht nur infolge von natürlicher Konvektion,

sondern mit Hilfe eines leistungsfähigen Gebläses abgesaugt werden, damit die Feuerwehr ihre Arbeit möglichst unbehindert verrichten kann.

Die technisch mögliche Gliederung des Versuchsfeldes in ein Raster „Sprinkler pro Flächeneinheit“ und ein zweites Raster „RWA pro Flächeneinheit“, wobei jeweils eine Gruppe von Sprinklern und RWA signaltechnisch zusammengefaßt und von einem gemeinsamen Meßfühler (Thermoelement, Rauchmelder,...) gesteuert wird (Magnetventil, Stellmotor,...), wird – weil in der praktischen Realisierung zu teuer – nicht untersucht.

Das Auslöseverhalten der Sprinkler wird, je nach der Art des Auslöseelementes, das entweder aus

- einer vorgespannten Schmelzlot-Verbindung oder aus
- einem Glasfäßchen, gefüllt mit einer Flüssigkeit, die bei Erwärmung dieses Fäßchen sprengt,

bestehen kann, von der Schmelz- respektive Bersttemperatur und von einem Wert (Response Time Index – I_{RT}) charakterisiert, der berücksichtigt, wie lange es dauert, bis die treibende Temperaturdifferenz $\eta_{RG} - \eta_{AE}$ das Auslöseelement auf die Funktionstemperatur aufgeheizt hat – bei gleichzeitigem Wärmeverlust des Sprinklers an das Rohrnetz.

Die Abführung von Rauch und Wärme aus dem Brandraum erfolgt nicht wahlweise oder unabhängig voneinander, da die im Brand gebildeten Rauchgase das wesentliche Transportmedium für die dort entstehende Wärme darstellen. Im Rahmen der projektierten Versuche dienen Dachöffnungen als Abzugsanlagen, die mit Hilfe von Auslöseelementen gesteuert werden können, deren Funktionsprinzip dem der Sprinkler gleicht.

In großflächigen Gebäuden dienen Rauchschürzen dazu, das Volumen unter der Decke zu unterteilen, damit aufsteigender Rauch sich nicht über den gesamten Raum ausbreitet, was bei entsprechender Gestaltung auch mit Hilfe von Elementen der Deckenkonstruktion (Unterzüge) erzielt werden kann. Die Konzentration des Rauches über dem Brandherd bewirkt eine lokale Erhöhung der Rauchgas-Schichtdicke und -Temperatur

und sichert so die Aktivierung der Sprinkler in diesem Bereich. Rauchschürzen sollten – zum Beispiel in Regallagern – vorzugsweise über den Transportwegen angeordnet werden, damit über den Regalen der Sprinkler-Sprühstrahl nicht unterbrochen wird.

Um Vergleiche mit Berichten über anderweitig angestellte Großversuche zum Thema RWA/Sprinkler zu ermöglichen, sind im Aufbau und in der Durchführung der Versuche folgende Punkte zu konkretisieren:

1. die Abmessungen der Versuchshalle;
2. die Abmessungen der Einbauten, insbesondere jener unter der Decke (Dachbinder, Rauchschürzen, Rauch/Wärme-Abzugsanlagen, ihre Auslöseelemente und -temperaturen,...), aber auch der von Zuluftöffnungen oder feststehenden Lagerregalen;
3. die Auslegung der Sprinkleranlage (Rohrabmessungen, Einbauhöhe, Anzahl, Typ, Sprühbild, Auslöseelement und -temperatur der verwendeten Sprinkler);
4. die Art und die Position der installierten Meßtechnik;
5. die Position des Brandherdes im Versuchsgebäude und die Anordnung der Einbauten relativ hierzu, insbesondere die Höhenangaben;
6. die Art und Menge des eingesetzten Brandgutes;
7. der zeitliche, und gegebenenfalls örtliche, Verlauf der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Wärmefreisetzung des Brandes;
8. die Sprinkler-Aktivierung (wieviele, bei welcher Temperatur, zu welchem Zeitpunkt) in Abhängigkeit von
 - 8.1 der Wärmefreisetzung,
 - 8.2 der Raumhöhe,
 - 8.3 der Dicke der Rauchgas-Schicht unter der Decke,
 - 8.4 der Größe und Anordnung der Rauchschürzen oder anderer Bauteile, durch die die Aktivierung der Sprinkler oder die Ausformung des Sprühstrahls gestört werden kann,

- 8.5 der Anordnung und Funktion der installierten RWA und ihrer Auslöseelemente und von
- 8.6 der Fertigungsgenauigkeit der Sprinkler, insbesondere ihrer Auslöseelemente;
9. die Aktivierung der RWA (wieviele, bei welcher Temperatur, zu welchem Zeitpunkt) in Abhängigkeit von
 - 9.1 der Wärmefreisetzung,
 - 9.2 der Raumhöhe,
 - 9.3 der Dicke der Rauchgas-Schicht unter der Decke,
 - 9.4 der Größe und Anordnung der Rauchschrzen oder anderer Bauteile, durch die die Aktivierung der RWA gestört werden kann,
 - 9.5 der Entfernung zum Brandherd,
 - 9.6 der Anordnung und Funktion der installierten Sprinkler und von
 - 9.7 der Fertigungsgenauigkeit der RWA, insbesondere ihrer Auslöseelemente;
10. die Angaben über das Rauchgas (Menge, Aufstiegs- und Ausbreitungsgeschwindigkeit, Schichtdicke und Temperaturabstufungen unter der Decke, Anordnung der Meßpunkte,...);
11. die sonstigen Messungen;
12. die Berechnungsmodelle und deren Ergebnisse;
13. der Zweck der angestellten Untersuchungen und
14. die Ergebnisinterpretationen und Schlußfolgerungen, wobei insbesondere zu prüfen ist, ob mit den angestellten Versuchen die definierten Ziele erreicht werden und ob sie ausreichen, um das Problem „RWA-Sprinkler“ einer Lösung zuzuführen.

2. BESCHREIBUNG DES VERSUCHSSTANDES

2.1 Decke des Versuchsstandes

In der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik –

- Grundfläche: $30 \cdot 15 \text{ m}^2$,
- Höhe bis zur Kranbahn: 8 m,
- im Boden parallel zu den Längswänden zwei Kanäle (Querschnitt: $1,60 \cdot 1,40 \text{ m}^2$) für die Frischluftzufuhr,
- unter der gewölbten Decke (lichte Höhe: 12 m) die zwei parallelen Stränge (Durchmesser: 80 cm) der Rauchgas-Absauganlage (maximale Leistung: $30.000 \text{ m}^3/\text{h}$) –

wird in 7,25 m Höhe eine Zwischendecke eingezogen: 10 m lang und 7,5 m breit. **Bild 1** zeigt den Querschnitt, **Bild 2** den Grundriß der Versuchshalle mit dem Versuchsstand für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen. Die Decke besteht aus 5 Leichtbau-Gitterträgern und ruht auf 10 3-Rohr-Stützen – beides serienmäßige Elemente aus dem Gerüstbau.

Die Gitterträger tragen an ihren Untergurten 16 Vierkant-Rohre ($40 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm}$, St 37), an denen 30 Blechtafeln ($1.500 \text{ mm} \cdot 1.700 \text{ mm} \cdot 0,5 \text{ mm}$, St 37) befestigt werden – auf Stoß verschraubt unter den Vierkant-Rohren, in Längsrichtung überlappend, genietet. Die Vierkant-Rohre bestehen jeweils aus vier gegeneinander verschiebbaren Teilstücken, damit die Wärmedehnung aufgefangen werden kann. Dementsprechend sind auch die Nietverbindungen zwischen den Blechen nicht starr ausgeführt.

2.2 Sprinkler, RWA und Meßinstrumente

Die Decke des Versuchsstandes wird in ein Raster $1,5 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}$ gegliedert (sh. **Bild 3**). Dieses Raster wird mit $6 \cdot 7$ Thermoelementen bestückt. Auf den Positionen 2.2 bis 4.4 werden 9 Sprinkler installiert. Es kommen Sprinkler in handelsüblicher Ausführung (Job ASSP TWF, Glasfäßchen G 5 mit $\eta_{A,\text{Spr.}} = 68^\circ\text{C}$ und $I_{RT,\text{Spr.}} = 105 (\text{m} \cdot \text{sec})^{1/2}$) zum Einsatz. — Vorzugsweise werden Sprinkler hängend montiert, damit das Rohrnetz die

Ausbreitung des Sprinklerstrahls nicht stört. Dieselbe Montageweise wird auch auf dem Versuchsstand angewendet, damit die Sprinkler-Auslöseelemente sich im gleichen Abstand von der Decke befinden (8 cm) wie bei real ausgeführten Anlagen.

Das an die Sprinkler angeschlossene Leitungssystem enthält Wasser unter 5 bar. Es verbindet die Sprinkler mit einer Beobachtungstafel am Fuße des Versuchsstandes, auf der für jeden Sprinkler ein Manometer montiert ist – in derselben Anordnung wie die Sprinkler unter der Decke. So kann die Funktion des Sprinkler-Auslöseelementes nicht nur am Berstgeräusch und an dem kurzen Sprühstrahl (ein fortdauernder Wasserstrahl ist nicht vorgesehen), sondern auch am Zurückfallen der Manometer-Anzeige – kontinuierlich von einer Digitalkamera aufgezeichnet – erkannt werden.

Auf einem mobilen Stativ befindet sich ein weiteres Thermoelement, kombiniert mit einem PRANDTL-Rohr. Mit dieser auch in der Höhe variablen Sonde 1 werden die Temperatur η_1 und der dynamische Druck $p_{\text{dyn.1}}$ direkt unter der Decke ($\Delta h_1 = 2,8$ cm), üblicherweise vor der aktiven RWA, aufgezeichnet — nach dem Auslösen der Sprinkler auch an einer (von der RWA aus gesehen) Position hinter der Wärmequelle, dann in Höhe des Sprinkler-Fäßchens.

An den in Bild 3 gekennzeichneten Positionen werden 2 Öffnungen (1 m^2 und 2 m^2) für den Rauchabzug in die Decke geschnitten, die in ihren Abmessungen handelsüblichen RWA entsprechen. Mit passenden Blechklappen können diese Rauchabzüge geöffnet oder geschlossen werden. Über der Decke des Versuchsstandes sind – anfänglich – beide an den nördlichen Strang der Rauchgas-Abzugs- und -Reinigungsanlage der Versuchshalle angeschlossen – im weiteren Verlauf der Versuche (ab VR 4) nur noch die kleine Klappe¹⁾. In der VR 4 befindet sich allerdings über der großen Klappe noch die Haube, mit der der Klappenquerschnitt von 2 m^2 auf den Querschnitt der Absaugleitung ($0,07 \text{ m}^2$) reduziert wurde. Nach dieser Versuchsreihe wird die Haube entfernt, um durch die große Klappe freie Konvektion zu ermöglichen.

¹⁾ Die Parametervariationen für die Versuche bzw. Versuchsreihen sind in Kapitel 2.4 erläutert und in den Tabellen 1 und 2 am Ende des Berichts zusammengestellt.

Zwischen den RWA des Versuchstandes und ihrem Anschluß an den Rauchgas-Abzug unter der Decke der Versuchshalle wird ein gerades Rohr von 30 cm Durchmesser und 3 m Länge eingebaut, in dem der Rauchgas-Volumenstrom gemessen werden soll. Bei solchen Abmessungen kann sich die Strömung in diesem Kalibrier-Rohr noch nicht so weit verstetigen, daß sich im Querschnitt dieses Rohres eine Position finden ließe, an der repräsentativ die Strömungsgeschwindigkeit – und damit der Volumenstrom – gemessen werden könnte [7]. Es müssen deshalb die lokalen Geschwindigkeiten ermittelt und mit den entsprechenden Querschnitts-Teilflächen multipliziert werden. Das Integral über den Gesamtquerschnitt liefert dann den Volumenstrom.

Um die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über den Rohrquerschnitt zu untersuchen, wird unter verschiedenen Winkelstellungen mit Hilfe einer PRANDTL-Sonde der dynamische Druck in Abhängigkeit von der Entfernung dieser Sonde von der Mittelachse gemessen. Wegen des Durchmessers der Sonde selbst (8 mm) und wegen des nicht scharfkantig ausgeführten Überganges vom Sondenkopf zum -schaft (Rundungsradius: 15 mm) kann zu Beginn eines Meßdurchganges erst 19 mm und am Ende nur bis 4 mm vor der Rohrwand gemessen werden. Um die Messungen in der Grenzschicht einigermaßen gleich über den Umfang zu verteilen, werden folgende Winkelstellungen gewählt: 0°, 30°, 90°, 150°, 240° und 300° gegen die Horizontale.

Diese Messungen werden mit Luft bei nominellen Absaugleistungen der Rauchgas-Reinigungsanlage von 10.000–20.000 m³/h durchgeführt. Temperaturschwankungen während einer Messung (Dauer eines Meßdurchganges: 15 Minuten) werden vernachlässigt, Unterschiede von Tag zu Tag werden in der Dichte der Luft berücksichtigt. Die errechneten Volumenströme werden auf 20°C normiert. Jeder Meßdurchgang wird einmal wiederholt.

In **Bild 4 und 5** sind beispielhaft zwei solcher Meßprotokolle wiedergegeben: 10.000 m³/h gemessen unter 240° und 20.000 m³/h gemessen unter 90°. Die Sonde wird cm-weise vorgeschoben. Auf jeder Position verharrt sie 30 sec. Die Druckaufnahme erfolgt im Sekundentakt. Da sie auch während des Vorrückens nicht unterbrochen wird,

werden die ersten drei Meßwerte und der letzte in der jeweiligen Position nicht in die Mittelwertbildung an dieser Stelle einbezogen.

Parallel zu den dynamischen Drücken im Kalibrier-Rohr werden auch die direkt vor der Rauchgas-Reinigungsanlage gemessenen Werte (Staudruck \equiv dynamischer Druck vor der RR-Anlage) aufgezeichnet, auf die sich die Anzeige in der Meßwarte stützt. Da die Absaugleistung nicht völlig konstant ist (insbesondere im oberen Leistungsbereich), werden die im Kalibrier-Rohr gemessenen Drücke normiert — und zwar auf die jeweiligen Werte jener Staudruck-Meßreihe, die die geringste Standardabweichung aufweist und bei der gleichzeitig der in der Meßwarte angezeigte Wert möglichst wenig vom Sollwert abweicht. Im Bild 5 ist dieser Normierungseffekt am Unterschied zwischen den ausgefüllten und den nicht ausgefüllten Signaturen deutlich zu erkennen.

In den **Bildern 6...8** sind die vom Tabellen-Kalkulationssystem ausgeworfenen Trendlinien dieser normierten Meßprotokolle zusammengestellt: Für jede Leistungsstufe 6 Kurven für die unter den verschiedenen Winkeln ermittelten Druck/Radius-Zusammenhänge. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden die experimentell gewonnenen Kurven arithmetisch so korrigiert, daß sie sich für alle Winkel $0^\circ \dots 300^\circ$ bei $r = 0$ in demselben Wert schneiden. **Bild 9** enthält die bei $r = \text{const.}$ gemittelten Drücke und die daraus berechneten Strömungsgeschwindigkeiten. Bei dieser Mittelwertbildung werden von jeder Kurve in den Bildern 6...8 sowohl der linke als auch der rechte Ast einzeln gewertet. Die scheinbar symmetrische Geschwindigkeits-Verteilung $v(r)$ bildet die Grundlage für die Berechnung des Volumenstrom-Integrals

$$V = 2\pi \cdot \int r \cdot v(r) \, dr \quad \text{für} \quad 0 \leq r \leq r_{\max} \quad (1)$$

Die Ergebnisse (6.800; 9.700; 12.500 m³/h) liegen bei 68...62 % der in der Meßwarte angezeigten Werte. Diese Abweichung ist darauf zurückzuführen, daß bei den hier besprochenen Versuchen die Rauchgas-Absaugung nur über den nördlichen Strang – jenen über dem Versuchsstand – erfolgt, während der südliche durch eine Absperriklappe verschlossen bleibt. Bei einer Klappe der hier erforderlichen Größenordnung (Durchmesser: 80 cm) bleibt aus Gründen der Wärmedehnung und der Fertigungsgenauigkeit auch im geschlos-

senen Zustand ein Ringspalt, durch den der Differenz-Volumenstrom angesaugt wird: 32 % beim Nominalwert 10.000 m³/h bis 38 % bei 20.000 m³/h. Diese Schwankungsbreite kann als ausgesprochen gering bezeichnet werden. Sie liegt deutlich unterhalb dessen, was üblicherweise bei thermodynamischen Versuchen im Realmaßstab akzeptiert werden muß.

2.3 Wärmequellen

Für die Durchführung der hier vorgesehenen Versuche mit Wärmefreisetzungsraten von 100 kW bis über 1000 kW verfügt die FFB über eine Gas-Strahlwand (strahlende Fläche: 1,02-1,14 m²; Brennstoff: 92 % Propan, 8 % Butan) und einen trichterförmigen Spiritusbrenner. Eine detaillierte Beschreibung dieser Wärmequelle findet sich im vorausgegangenen Forschungsbericht [1]. Die Konstruktion des Untergestells des Trichter-Brenners ermöglicht es, die Höhe, in der der Spiritus brennt, so zu regulieren, daß bis zur Decke des Versuchsstandes dieselbe freie Höhe bleibt wie bei der Gas-Strahlwand: 5,35 m.

2.4 Variation der Versuchsparameter

Die Wärmefreisetzungsrate der beiden Brenner (=Leistung) stellt die wichtigste Versuchsvariable dar. Es werden zunächst die folgenden Leistungsstufen gewählt

- bei der Gas-Strahlwand: 100, 160, 210, 260 und 300 kW,
- beim Trichter-Brenner: 250, 420, 630, 880 und 1150 kW.

Als Standorte für die Wärmequelle werden zwei Varianten gewählt: eine Position „zentral“ und eine Position „West“. In der Position „zentral“ steht der Brenner mittig unter der Decke des Versuchsstandes und hat zu den Sprinklern in den zwei symmetrisch über ihm angeordneten Reihen horizontale Abstände von 0,75 m, 1,68 m und 3,1 m. Die Abstände zu den Vorderkanten der beiden RWA-Klappen betragen 1,5 m beziehungsweise 2 m. In der Position „West“ steht der Brenner in der Nähe des westlichen Randes

des Versuchsstandes (mittig zwischen den Positionen 2.3 und 2.4). Die horizontalen Abstände zu den Sprinklern sind die gleichen, die zu den Klappen erhöhen sich auf 4,5 m beziehungsweise 4,7 m.

Die ersten Versuchsreihen (VR 1...23) werden ohne Rauchschürzen durchgeführt. Für die weiteren Versuche (VR 24...47) werden 25 cm tiefe Rauchschürzen montiert. Bis auf die VR 30 und 34 umschließen die 25 cm tiefen Rauchschürzen die Decke des Versuchsstandes nicht nur am äußeren Rand, sondern auch am inneren Rand zu den RWA-Klappen hin.

Die Rauchgas-Abführung wird auf folgende drei Möglichkeiten eingeschränkt:

- Die beiden RWA-Klappen bleiben geschlossen, die Rauchgase verteilen sich unter der Decke des Versuchsstandes und entweichen über deren Kante in das Hallenvolumen darüber.
- Die 2 m² große RWA wird vor Beginn des Versuches geöffnet und die Rauchgase durchströmen sie infolge ihrer natürlichen Konvektion.
- Wenn die mobile Sonde 1 vor der 1 m² großen RWA signalisiert, daß die nominelle Auslösetemperatur von $\approx 70^{\circ}\text{C}$ eines (nicht vorhandenen) Öffnungselementes erreicht ist (bei den Versuchen in VR 2...4 dient noch $\vartheta_1 \approx \text{const.}$ als Auslösekriterium – sh. Tabelle 2), wird diese geöffnet und die Rauchgas-Absaugung auf 15.000 m³/h hochgefahren (wenn nur durch diesen Strang abgesaugt wird, beträgt die effektive Leistung hier $\approx 9.700 \text{ m}^3/\text{h}$).

Die Variation der vorgenannten Versuchsparameter wird in 47 Versuchsreihen mit jeweils 1...6 Einzelversuchen durchgeführt (insgesamt 162 Versuche). **Tabelle 1** enthält die Zusammenstellung der durchgeführten Versuche mit der jeweiligen Konstellation der Versuchsparameter.

3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zu Beginn eines Versuches werden die Sprinkler – so weit erforderlich – mit neuen Fäßchen bestückt, die Verbindungsleitungen zu den Manometern werden mit Wasser gefüllt, die Zeitaufzeichnung an der Beobachtungskamera und in der Meßwerterfassung wird auf Null gestellt und beim Start-Kommando wird der Brenner gezündet und auf die vorgewählte Leistungsstufe hochgefahren. Entsprechend der folgenden Tabelle werden bei der Gas-Strahlwand die Gas- und Luft-Volumenströme und beim Trichter-Brenner (mit Hilfe des statischen Drucks im Trichtergrund) die Höhe des Spirituspegels eingestellt – und damit dessen brennbare Oberfläche.

Leistung [kW]	Gas-Strahlwand		Trichter-Brenner		
	V_{Gas} [m ³ /h]	V_{Luft} [m ³ /h]	h [mm]	$P_{\text{stat.}}$ [Pa]	A [m ²]
100	4	100			
160	6	150			
210	8	200			
250			75	2.760	0,44
260	10	250			
300	11,8	290			
420			100	2.960	0,75
630			125	3.170	1,12
880			150	3.380	1,55
1150			175	3.580	2,04

Für die spätere Auswertung der Versuche werden nur die Leistungsstufen von 250 kW bis 630 kW (fett gedruckt in obiger Zusammenstellung) herangezogen. Bei geringerer Leistung werden keine Sprinkler ausgelöst und bei höheren Leistungen brennt die Flamme im Trichter-Brenner zu unruhig.

Die Entwicklung des Temperaturfeldes unter der Decke wird von 40 Thermo-
elementen – montiert an den in Bild 3 markierten Positionen – aufgezeichnet. Es zeigt
sich, daß die Temperatur-Gradienten sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht
stetig genug sind, um die Werte bei den Positionen 6.3 und 6.4 aus ihren Nachbarwerten

rechnerisch bestimmen zu können. Bei diesen Interpolationen wird berücksichtigt, in welcher Position sich die Wärmequelle befindet: zentral, West, unter der großen RWA. Da das Meßwert-Erfassungsgerät nur über 40 Temperaturkanäle verfügt, wird ab VR 14 auch auf die Aufzeichnung der Temperaturkurven bei den Positionen 1.2 und 7.2 verzichtet, um an ihrer Stelle die Temperaturen an der mobilen Sonde 1 vor der aktiven RWA und an der festen Sonde 2 im Kalibrier-Rohr aufnehmen zu können.

Die 38 gemessenen und die 4 gemittelten Temperaturkurven werden zusammen in einem Diagramm angeordnet, in dem sie auf denselben Positionen stehen wie die signalgebenden Thermoelemente unter der Decke (**Bild 10**): Die Mitte jedes Einzeldiagramms entspricht der Thermoelement-Position. Dünn strichpunktiert ist die Anordnung der beiden RWA gekennzeichnet und die Position der Wärmequelle. Da das Raster der Einzeldiagramme in Bild 10 im Gegensatz zur Versuchsanordnung nicht quadratisch ist, sind auch die Proportionen der RWA entsprechend verzerrt, so daß sich die Thermoelemente 5.3 und 5.4 tatsächlich bei den Ecken der kleinen beziehungsweise großen RWA befinden (vergl. Bild 3). Die dicke strichpunktierte Linie umfaßt den Bereich, in dem die 9 Sprinkler installiert sind.

Mit aufgenommen in diese Versuchsprotokolle sind die gleichzeitig gemessenen Temperaturen und Drücke an den beiden Sonden und der statische Druck im Trichter-Brenner. Rechts unten enthält jedes Protokoll die Bezeichnung der Versuchsreihe (chronologisch durchnummeriert), die Nummer des Versuchs innerhalb der Reihe (geordnet nach der Leistungsstufe) und die Wärmefreisetzungsrate, bei der dieser Versuch gefahren wird. Trotz unterschiedlicher Leistungsstufen werden für die Abszissen und Ordinaten aller 162 Versuche einheitliche Maßstäbe gewählt, damit die aufgezeichneten Temperaturfelder problemlos miteinander verglichen werden können. Auf den Abszissen sämtlicher Einzeldiagramme dieser Versuchsprotokolle ist die Versuchszeit in Minuten aufgetragen. Die Ordinaten enthalten die gemessenen Temperaturen [$^{\circ}\text{C}$] beziehungsweise Drücke [Pa]. Die Versuche dauern üblicherweise 15...25 Minuten, dargestellt werden in den folgenden Bildern lediglich die ersten 15 Minuten, weil spätere Sprinkler-Reaktionen bei den eingestellten Temperaturniveaus nicht mehr berücksichtigt werden sollen.

Bild 10 veranschaulicht beispielsweise den 4. Versuch aus der Versuchsreihe 29 mit 25 cm tiefen Rauchschürzen. Als Wärmequelle dient die Gas-Strahlwand (deshalb keine Anzeige bei $p_{\text{stat.}}$), die in der Position „zentral“ 300 kW leistet. Sonde 1 steht – von der Wärmequelle aus gesehen – 10 cm vor der Vorderkante der kleinen RWA, fluchtend in der Verbindungslinie „Mitte Rauchsäule — Mitte RWA“. Die dort gemessene Temperatur liegt etwas höher als die vom benachbarten Thermoelement 5.3 angezeigte, weil dieses in der Höhe des Sprinkler-Fäßchens mißt (80 mm von der Decke), während der Abstand der Sonde 1 von der Decke nur 28 mm beträgt.

Wenn – nach 3 Minuten – vor der kleinen RWA $\approx 70^\circ\text{C}$ erreicht werden, wird diese Klappe geöffnet:

- Ein erster Schwall warmen Rauchgases wird von der Sonde 2 registriert. Im weiteren Verlauf des Versuches sinken die dort gemessenen Werte auf die Temperatur der abgesaugten Mischung aus deckennahem Rauchgas und Frischluft tieferer Schichten.
- Der Abgas-Volumenstrom wird auf $\approx 9.700\text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt – $p_{\text{dyn.2}}$ liegt etwa bei 920 Pa.
- Die Sonde 1 vor der aktiven RWA wird um 25 cm gesenkt, so daß sie jetzt Meßwerte von 3 cm unterhalb der Rauchschürzen-Unterkante anzeigt: Daß nicht nur die dort gemessene Temperatur, sondern auch die Strömungsgeschwindigkeit (aufgezeichnet als $p_{\text{dyn.1}}$) geringer ist als in der deckennahen Schicht, liegt daran, daß dort das PRANDTL-Rohr nicht axial, sondern von oben angeströmt wird.

Die Rauchgas-Temperaturen erreichen in der Nähe der Wärmequelle $70\cdots 75^\circ\text{C}$. Dort wird – nach 12 min bei einer Rauchgas-Temperatur von 74°C – der Sprinkler bei Position 4.3 ausgelöst — zu erkennen an dem kurzfristigen Temperaturabfall, verursacht von dem durch das Bersten des Sprinkler-Fäßchens freigesetzten Wasserstrahl. Schon in geringer Entfernung von der Gas-Strahlwand (Positionen 3.3 \cdots 5.4) bleiben die Deckentemperaturen

unter der Sprinkler-Auslöseschwelle. Am Rande des Versuchsfeldes liegen die Temperaturen etwa bei 50°C. Die Thermoelemente mit der größten Entfernung von der Wärmequelle zeigen – verglichen mit den direkt benachbarten – etwas erhöhte Werte, weil sich das warme Rauchgas im Winkel zwischen den Rauchschürzen staut.

In **Bild 11** wird der Versuch 2 aus der Versuchsreihe 30a dargestellt. Der Trichter-Brenner in der Position „zentral“ produziert eine Leistung von 420 kW ($p_{\text{stat.}} = 2.960 \text{ Pa}$). Beide RWA bleiben geschlossen (keine Anzeige bei $p_{\text{dyn.2}}$), Decke und RWA sind mit 25-cm-Rauchschürzen eingefasst. Sonde 1 steht 10 cm vor der großen RWA, fluchtend in der Verbindungslinie „Mitte Rauchsäule — Mitte RWA“. Die dort gemessene Temperatur liegt etwas höher als die vom benachbarten Thermoelement 5.4 angezeigte, weil dieses in der Höhe des Sprinkler-Fäßchens mißt, während der Abstand der Sonde 1 von der Decke nur 28 mm beträgt und weil die Distanz zum Brenner geringer ist als die des Thermoelementes 5.4.

In der Nähe des Brenners steigen die Rauchgas-Temperaturen bis auf etwa 100°C, am Rande des Versuchsareals auf etwa 65°C. Dort wo zwei Rauchschürzen aufeinandertreffen, liegen auch bei diesem Versuch die Deckentemperaturen etwas höher als bei den benachbarten Meßstellen (sh. Positionen 7.1, 7.6 und 1.6). Die Sprinkler bei den Positionen 4.4 – 4.3 – 3.4 und 3.3 lösen nach 4–12 min bei Rauchgas-Temperaturen von 79,1 – 78,3 – 78,7 und 72,2°C aus.

Nach 11,5 min wird die mobile Sonde 1 von ihrer ursprünglichen Position vor der großen RWA zur Position 2.4 hin verschoben, um in Höhe des Sprinkler-Fäßchens den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Deckenströmung zu messen. Wegen der größeren Distanz sowohl zum Brenner als auch zur Decke fällt die Temperatur. Der dynamische Druck nimmt etwas zu, weil am bisherigen Meßpunkt – 28 mm unter der Decke vor der mit Rauchschürzen eingefassten RWA, Sonde 1 auf die Wärmequelle ausgerichtet – praktisch keine, mit dem verwendeten Verfahren meßbare Strömungsgeschwindigkeit herrscht.

Bild 12 zeigt in der Versuchsreihe 21 ohne Rauchschürzen den Verlauf des 3. Versuchs mit einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 630 kW ($p_{\text{stat.}} = 3.170 \text{ Pa}$) in der Position „West“. Die große RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen – Naturkonvektion (keine Anzeige bei $p_{\text{dyn.2}}$). Sonde 1 steht 10 cm vor der großen RWA. Die dort gemessene Temperatur liegt – wegen des geringeren Abstandes zur Decke – etwas höher als die vom benachbarten Thermoelement 5.4 angezeigte.

Die Temperaturen unter der Decke erreichen in Brenner-Nähe 150°C, am Versuchsfeld-Rand – auch bei den am weitesten entfernten Thermoelementen – noch über 80°C. Die Sprinkler bei den Positionen 2.4 – 3.4 – 3.3 – 2.2 – 4.4 – 3.2 – 4.2 und 4.3 lösen nach 1...7 min aus – Sprinkler 2.3 ist defekt. Wären alle Positionen 1.1...7.6 mit Sprinklern bestückt, müßten bei diesen Temperaturen alle ansprechen. Im allgemeinen fallen die Temperaturen, bei denen die Sprinkler reagieren, mit zunehmender Reaktionszeit. Bei diesem Versuch jedoch (und bei einigen anderen) sprechen die Sprinkler in der oben genannten Reihenfolge bei Umgebungstemperaturen von 94 – 74,5 – 81,2 – 79,6 – 77,3 – 80,4 – 82,8 und 91,5°C an.

Nach 11 min wird die mobile Sonde 1 von ihrer ursprünglichen Position vor der großen RWA zur Position 4.3 hin verschoben, um in Höhe des Sprinkler-Fäßchens den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Deckenströmung zu messen. Diese Position liegt bei β der bisherigen Entfernung vom Brenner: Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur nehmen deshalb zu.

Eine besondere Konstellation wird mit den 4 Versuchen der Versuchsreihe 10 getestet: Der Trichter-Brenner (mit Leistungsstufen 170 – 280 – 490 – 700 kW) steht direkt unter der großen RWA, die während der gesamten Versuchszeit geöffnet bleibt. Wie **Bild 13** zeigt, werden schon bei knapp 500 kW ($p_{\text{stat.}} = 3.030 \text{ Pa}$) in der unmittelbaren Umgebung der RWA Deckentemperaturen erreicht, die dort installierte Sprinkler aktivieren müßten. (Bei 700 kW werden von allen Thermoelementen unter der Decke des Versuchsstandes Temperaturen gemessen, die die Auslöseschwelle weit übertreffen — 6 Sprinkler sprechen an, 3 nicht,

obwohl auch bei diesen die 68°C-Schwelle von der Rauchgas-Temperatur lange genug überschritten wird.)

Da sich an den Positionen 6.3 und 6.4 keine Thermoelemente befinden (sh. Bild 3), wird der Temperaturverlauf hier nach einer in der Brandschutztechnik geläufigen Formel [8]

$$\vartheta_{\text{RG}} = k_{\vartheta} \cdot (Q^2 / H^5)^{1/3} + \vartheta_{\infty} \quad (2)$$

mit $k_{\vartheta} = 16,9$ wenn $r/H < 0,18$

oder $k_{\vartheta} = 5,38 \cdot (H/r)^{2/3}$ wenn $r/H > 0,18$

berechnet. In das Temperaturdiagramm an der Stelle 6.3 ist neben dieser theoretischen Kurve auch der Temperaturverlauf von 5.4 eingetragen, da dieses Thermoelement zur Mittelachse der Rauchsäule exakt denselben Abstand hat wie die Position 6.3. Für Q wird eine Potentialfunktion angenommen

$$Q(t) = C \cdot t^n \quad (3)$$

mit einem geringen Exponenten ($n = 1/6$) für einen flachen, quasi konstanten Verlauf und einem Vorfaktor in einer Größe ($C = 340$), so daß sich nach 9 Minuten der Nominalwert ergibt. Es zeigt sich, daß die nach der obigen Formel berechneten Werte zwar tendenziell denselben Verlauf nehmen wie die im Experiment ermittelten, aber doch deutlich darunter bleiben (sh. a. Bild 17 und Kap. 4.3).

Der Versuch wird ohne Rauchschürzen durchgeführt. Druck und Temperatur der Sonde 2 sind noch nicht an das Meßwert-Erfassungsgerät angeschlossen — da bei diesem Versuch Naturkonvektion herrscht, kann jedoch auf diese Werte verzichtet werden. Die mobile Sonde 1 steht permanent neben dem Sprinkler 4.4 und zeigt deshalb denselben Temperaturverlauf wie das Thermoelement dort.

Um die Leistungsfähigkeit des Trichter-Brenners zu testen, werden auch einige Versuche (VR 39...45) durchgeführt, bei denen die Wärmefreisetzung nicht konstant gehalten, sondern kontinuierlich gesteigert wird. **Bild 14** zeigt beispielhaft den Verlauf des Versuchs VR 42;1 mit einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 250...900 kW ($p_{\text{stat.}} = 2.760 \dots 3.400 \text{ Pa}$) in der Position „zentral“. Die Decke und die RWA sind mit 25-cm-

Rauchschrürzen eingefaßt. Die kleine RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen — der Abgas-Volumenstrom beträgt permanent $\approx 9.700 \text{ m}^3/\text{h}$ ($p_{\text{dyn.2}}$ pendelt um 950 Pa). Die Temperatur im Absaugkanal entspricht einem Mischwert aus den in der Nachbarschaft der RWA gemessenen Temperaturen und der Temperatur der aus tieferen Schichten angesaugten Frischluft (Einfluß des „plug-holing“).

Sonde 1 steht 10 cm vor der kleinen RWA. Die dort gemessene Temperatur liegt — weil näher an der Decke aufgenommen — etwas höhere als die vom benachbarten Thermoelement 5.3. Nach 4 min — wenn $\approx 70^\circ\text{C}$ gemessen werden — wird die Sonde 1 um 25 cm gesenkt, um 3 cm unter der Unterkante der Rauchschrürze den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Rauchgas-Strömung zu messen. Wie in Bild 10 (VR 29 Versuch 4) fallen auch hier Druck und Temperatur — letztere allerdings nur kurzfristig, da die Leistungsabgabe des Brenners ja weiter gesteigert wird.

Innerhalb von 10 Minuten erreichen die Rauchgas-Temperaturen in der Näher der Wärmequelle mehr als 100°C und steigen dort bis zum Ende des Versuchs auf 170°C . Entsprechende Werte am Rande des Versuchsfeldes liegen nach 10 Minuten bei $70\cdots 80^\circ\text{C}$ beziehungsweise bei $120\cdots 145^\circ\text{C}$ nach 14 Minuten. Da einerseits nach 14 Minuten auch an den entferntesten Thermoelementen deutlich über der Sprinkler-Auslöseschwelle liegende Temperaturen gemessen werden, und da andererseits die Spiritusflamme im oberen Leistungsbereich sehr unruhig brennt, wird der Versuch hier abgebrochen.

Die Sprinkler bei den Positionen 4.3 – 4.4 – 3.4 – 3.3 – 4.2 – 3.2 – 2.3 – 2.4 und 2.2 lösen nach 5–11 min bei Rauchgas-Temperaturen von $80,4$ – $83,2$ – $79,2$ – $82,8$ – $84,8$ – $81,2$ – $79,2$ – $73,3$ und $87,9^\circ\text{C}$ aus.

In der **Tabelle 2** findet sich eine kurze Zusammenstellung der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Versuche. Es werden die Versuchsparameter und die Sprinkler-Reaktionen aufgelistet. In der Spalte „Sprinkler-Reaktionen“ werden die einzelnen Versuche innerhalb einer Versuchsreihe nach der Brennerleistung geordnet. Es wird die Anzahl der aktivierten Sprinkler genannt, ihr Auslösezeitpunkt t_A und ihre Auslöse-

temperatur ϑ_A . Bei den mit (c) gekennzeichneten Versuchen wird die Brennerleistung nicht konstant gehalten, sondern kontinuierlich gesteigert.

In der Spalte „Rauchgas-Absaugung“ bedeutet ∞ , daß das Auslösekriterium der RWA nicht erfüllt wird und daß deshalb weder die kleine Klappe geöffnet noch die Rauchgas-Absaugung eingeschaltet wird. Dies betrifft insbesondere Versuchsreihen mit der Gas-Strahlwand in Position „West“ (VR 16 und 28).

Bei den VR 2, 3, 29a und 34b wird die Absauganlage schon mit Versuchsbeginn in Betrieb gesetzt. Wenn vor der RWA-Klappe annähernd konstante Temperatur beziehungsweise die Auslösetemperatur von $\approx 70\text{EC}$ erreicht wird, wird die Absaugung in der Versuchshalle vom südlichen auf den nördlichen Strang – das heißt, auf jenen der mit der kleinen Klappe verbunden ist – umgeschaltet. In den VR 46 und 47 wird während der gesamten Versuchsdauer abgesaugt, jedoch nur über den südlichen Strang.

Die in Tabelle 2 fehlenden – in Tabelle 1 eingeklammerten – Versuchsreihen 25, 27, 31, 33 und 35 mit der Brennerposition „West“ unter 25 cm tiefen Rauchschürzen mußten aus Zeitgründen entfallen. Aus denselben Gründen wurde – im Rahmen dieses Forschungsauftrages – darauf verzichtet, die folgenden Parameter zu variieren:

- vertikale Position der Wärmequelle,
- verschiedene Zeitfunktionen für die Leistungssteigerung,
- verschiedene Auslösefunktionen am Sprinkler (Glasfäßchen, Schmelzlot),
- verschiedene nominelle Auslösetemperaturen am Sprinkler und an der RWA,
- Auslöseelemente mit verschiedenen Trägheitsbeiwerten.

Auch die Dicke der Rauchgas-Schicht unter der Decke, ihre Aufstiegs- und Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Temperaturabstufungen in dieser Schicht können hier nicht spezifiziert werden, denn weder produzieren die verwendeten Brennstoffe sichtbaren Rauch noch sind die für die Untersuchung der Rauchgas-Schicht erforderlichen zusätzlichen Meßfühler auf dem Versuchstand installiert.

Nach jedem Versuch wird die Halle gelüftet, damit der folgende Versuch wieder mit der gleichen Umgebungstemperatur gestartet werden kann wie der vorige. Dennoch sind – jahreszeitlich bedingt – gewisse Abweichungen bei der Ausgangstemperatur nicht zu vermeiden, die sich allerdings nur bei den unteren Leistungsstufen (≤ 300 kW) auswirken. So reichte beispielsweise diese Brennerleistung bei den Versuchsreihen 3 und 29a (durchgeführt im Februar bzw. Oktober) nicht aus, um einen Sprinkler zu aktivieren, weil hier die Rauchgas-Absauganlage während der gesamten Versuchsdauer eingeschaltet war und 12.500 (VR 3) beziehungsweise 9.700 m³/h (VR 29a) 10°C „kalte“ Frischluft in die Versuchshalle förderte.

4. VERSUCHSAUSWERTUNG

4.1 Erste, qualitative Beurteilung der Versuchsergebnisse

Bei Brennerleistungen unter 250 kW werden keine Sprinkler ausgelöst. Ab 300 kW sprechen im allgemeinen die beiden Sprinkler in unmittelbarer Nähe zum Brenner an (und evt. einer aus dem nächsten Kreis). Ab 630 kW werden bei fast allen Versuchen die 9 Sprinkler auf den Positionen 2.2–4.4 aktiviert. Die im restlichen Versuchsareal gemessenen Rauchgas-Temperaturen zeigen Werte, die deutlich über der Auslöseschwelle der Sprinkler liegen. Hier die summarische Zusammenstellung aller in jenen Versuchen ausgelöster Sprinkler, die in den anschließenden Kapiteln besprochen werden:

Brennerleistung [kW]	maximale Sprinklerzahl	davon ausgelöst
255	31 Versuche à 9 Sprinkler = 279	36 = 13 %
300	15 Versuche à 9 Sprinkler = 135	33 = 24 %
420	15 Versuche à 9 Sprinkler = 135	79 = 59 %
630	14 Versuche à 9 Sprinkler = 126	118 = 94 %
880	14 Versuche à 9 Sprinkler = 126	126 = 100 %

Je höher die Rauchgas-Temperaturen, entweder wegen hoher Brennerleistung oder wegen geringer Entfernung von der Wärmequelle, desto kürzer und einheitlicher wird die Sprinkler-Reaktionszeit. Bei geringer Leistung beziehungsweise mit größerer Entfernung nehmen nicht nur diese Zeiten, sondern auch ihre Streubreite stark zu.

Die Beeinflussung des Sprinkler-Auslöseverhaltens durch früh öffnende RWA wird bei den Versuchen durch den Extremfall, die von Beginn an offene große RWA dargestellt. Zu prüfen ist:

- Reagieren die Sprinkler verzögert, weil durch die RWA Wärme abzieht, oder schneller wegen des besseren Wärmeübergangs infolge der höheren Strömungsgeschwindigkeit?
- Löst die Staupunktverlagerung der Rauchsäule unter der Decke die falschen Sprinkler aus – möglicherweise auch mehr als ohne RWA –, die den Brand im Realfall jedoch nicht eindämmen könnten?

In der folgenden Tabelle ist zusammengestellt, an Hand welcher Versuche diese beiden Fragen beantwortet werden können:

Versuche mit		Versuchsparameter				
geschlossenen RWA	Naturkonv. durch große RWA	Gas-Strahlwand	Trichter-Brenner	Position		Rauchschürzen
Versuchsreihe				zentral	West	
1, 12	4, 7, 14	8		8		—
5, 13	6, 15	8			8	—
24	26	8		8		25 cm
8, 18	9, 20		8	8		—
19	11, 21		8		8	—
30, 30a, 47	32, 38, 46		8	8		25 cm

Verglichen werden die Temperaturverteilung unter der Decke und die Sprinkler-Reaktionen bei gleicher Leistung (deshalb die Unterscheidung Gas-Strahlwand / Trichter-Brenner), bei gleicher Brennerposition und mit gleichen Rauchschürzen.

Eine Gegenüberstellung entsprechender Versuchsreihen (z.B. VR 5 und 13 mit Gas-Strahlwand in Position West, ohne Rauchschürzen, beide RWA geschlossen und VR 6 und 15 dto. aber mit Naturkonvektion) findet sich in **Tabelle 3**. Bei den dort zusammengestellten Vergleichspaarungen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede:

- Die Temperaturfelder²⁾ bei geschlossener Decke und bei Naturkonvektion sind für alle Leistungsstufen über die gesamte Versuchsdauer nahezu gleich. Zweimal liegen die Werte bei geschlossener Decke etwas höher, zweimal etwas niedriger als bei Naturkonvektion – Temperaturunterschiede, die auch bei unveränderten Randbedingungen auftreten können.
- Bei von Anfang an offener großer RWA werden eher mehr als weniger Sprinkler aktiviert.
- Ein geringer Einfluß der gesteigerten Strömungsgeschwindigkeit (tatsächlich ist er – sh. Kapitel 4.4 – eher von zweitrangiger Bedeutung) kann bei den Versuchen mit der Wärmequelle in Position „West“ festgestellt werden: Bei den Versuchsreihen 6, 11, 15 und 21 reagieren einige der Sprinkler 3.3–4.4 etwas früher als in den VR 5, 13 und 19 – sofern sie dort überhaupt anspringen.
- Die Temperaturverteilungen in der näheren Umgebung der Wärmequelle sind einander jedoch so ähnlich, daß sichergestellt scheint, daß nicht die falschen Sprinkler ausgelöst werden.

Ein entsprechender Vergleich „geschlossene Decke – 15.000 m³/h“ ist nur für wenige Einzelversuche möglich, weil „15.000 m³/h“ im Rahmen der hier durchgeführten Versuche im allgemeinen bedeutet (sh. oben), daß die RWA erst geöffnet und die Absaugung eingeschaltet wird, wenn das Rauchgas vor der RWA die nominelle Auslösetemperatur erreicht. Da also als Kriterium nicht die Temperatur des (nicht vorhandenen) RWA-Auslöseelementes dient, sondern die des Rauchgases, heißt das, daß die RWA kurz vor den Sprinklern in

²⁾ Die Beurteilung der Temperaturfelder stützt sich bei den unteren Leistungsstufen (≤ 420 kW) auf die gesamte Versuchsdauer — bei den beiden oberen jedoch nur auf die ersten Minuten, in denen die Sprinkler ausgelöst werden.

unmittelbarer Nachbarschaft aufgeht. Praktisch fällt – wegen der Reaktions-Streubreite der Sprinkler – der Öffnungszeitpunkt der RWA dennoch mit jenem der Sprinkler zusammen. Insbesondere bei den oberen Leistungsstufen sind die Sprinkler aktiviert, bevor die Absauganlage ihre Nennleistung erreicht.

In der folgenden Zusammenstellung werden die Versuchsreihen genannt, bei denen durch die kleine RWA abgesaugt wird. Wenn das Auslöse-Kriterium nicht erfüllt wird, ist die entsprechende VR eingeklammert.

Versuche mit geschlossenen RWA		Versuchsparameter				
15.000 m ³ /h durch kleine RWA		Gas-Strahlwand	Trichter-Brenner	Position		Rauchschürzen
Versuchsreihe				zentral	West	
1, 12	2, 2a, 17 VR 4; Vers.5	8		8		—
5, 13	(16)	8			8	—
24	29, 29a	8		8		25 cm
8, 18	22		8	8		—
19	23		8		8	—
30, 30a , 47	34, 34a, 34b, 36, 37		8	8		25 cm

In **Tabelle 4** werden nur diejenigen Versuche zu einem Vergleich herangezogen (oben fett gedruckt), bei denen die Absaugung (Anzeige in der Meßwarte: 15.000 m³/h – effektiv in der kleinen RWA: 9.700 m³/h) von Versuchsbeginn an eingeschaltet ist, um sie Versuchen mit ansonsten gleichen Randbedingungen gegenüberzustellen. Auf die VR 36 trifft dies nur eingeschränkt zu, weil hier zwar die Klappe der kleinen RWA von Beginn an offen steht, die Absaugung jedoch erst hochgefahren wird, wenn vor der RWA $\approx 70^{\circ}\text{C}$ gemessen werden.

Da bei diesen fünf Versuchsreihen die Wärmequelle jeweils in zentraler Position steht, liegt zwischen ihr und der RWA kein Sprinkler, der auf eine gesteigerte Strömungsgeschwindigkeit reagieren könnte. Zweimal gehen zusätzliche Sprinkler auf, die sich jedoch auf der von der RWA abgewandten Seite befinden. Ansonsten sind die Temperaturfelder so ähnlich, daß ein Einfluß der Rauchgas-Absaugung nicht zu erkennen ist.

Welchen Einfluß haben Rauchschürzen auf das Sprinkler-Auslöseverhalten?

- Entwickeln sich bei Versuchen mit Rauchschürzen höhere Temperaturen unter der Decke, so daß die Sprinkler früher ansprechen oder wirkt im Gegenteil die verringerte Strömungsgeschwindigkeit verzögernd auf das Auslöseverhalten?
- Welcher dieser Einflüsse dominiert das Auslöseverhalten oder verschwinden die Effekte innerhalb der Fertigungsgenauigkeit des Auslöseelementes?

Zur Untersuchung dieser beiden Fragen können die in der folgenden Zusammenstellung aufgeführten Versuchsreihen einander gegenübergestellt werden.

Absaugung	Brenner-Position	Rauchschürzen	
		keine	25 cm
RWA geschlossen	zentral	1, 8, 12, 18	24, 30, 30a
	West	5, 13, 16, 19, 23	28
Naturkonvektion	zentral	7, 9, 14, 20	26, 32, 38
15.000 m ³ /h	zentral	2a, 17, 22	29, 34, 34a, 36

Werden zum Vergleich (in jeweils äquivalenten Leistungsstufen) die Rauchgas-Temperaturen in Brennernähe 5 Minuten nach der Zündung und jene am östlichen beziehungsweise westlichen Rand des Versuchsareals nach 10 Minuten Versuchsdauer herangezogen, ist festzustellen, daß die Temperaturunterschiede zwischen Versuchen mit und ohne Rauchschürzen nicht größer sind als die Schwankungen von Versuch zu Versuch bei gleicher Konstellation. Wird darüber hinaus auch noch die Reaktions-Streubreite der Sprinkler (wenn sie nicht in unmittelbarer Nähe des Brenners montiert sind) berücksichtigt, dann muß aus diesen Versuchen geschlossen werden, daß 25 cm tiefe Rauchschürzen keinen wesentlichen Einfluß auf das Auslöseverhalten von Sprinklern haben.

4.2 Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke

Von den insgesamt 47 durchgeführten Versuchsreihen können die folgenden 31

1, 2a, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,
21, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 30a, 32, 34, 34a, 36 und 38

herangezogen werden, um unter vergleichbaren Bedingungen –

- gleiche Leistungsstufe der Wärmequelle:
 - 255; 300; 420; 630 oder 880 kW (in der Maßzahl 255 werden Versuche mit 250 kW beim Trichter-Brenner und mit 260 kW bei der Gas-Strahlwand zusammengefaßt);
- gleiche Rauchschrzen:
 - keine Rauchschrzen,
 - 25 cm tiefe Rauchschrzen;
- gleiche Absaugung:
 - RWA geschlossen,
 - Naturkonvektion durch die groÙe RWA von Beginn des Versuches an,
 - 15.000 m³/h (laut Anzeige in der MeÙwarte – entsprechen real 9.700 m³/h) durch die kleine RWA, wenn dort Ausl÷setemperatur erreicht wird –

zu untersuchen, wie sich die Rauchgas-Temperatur in der H÷he des Sprinkler-Ausl÷seelementes 8 cm unter der Decke des Versuchsstandes im Laufe eines Versuches entwickelt.

Hierf÷r werden in 30 MeÙwertprotokollen, deren Bezeichnungen sich aus den oben aufgef÷hrten Versuchsparametern zusammensetzen, die 42 Temperatur-MeÙreihen (38 gemessene und 4 gemittelte) vergleichbarer Versuche zusammengestellt, wobei die MeÙreihen nach ihrem horizontalen Abstand zur W÷rmequelle geordnet werden. Zu ber÷cksichtigen ist hierbei, daÙ die Thermoelemente unterschiedliche Abst÷nde zum Brenner haben k÷nnen, je nach dem, ob dieser in der Position „zentral“ oder „West“ steht. Beispielsweise bedeutet [420-25-Natur.xls], daÙ diese Datei die MeÙreihen aller Versuche

enthält, die mit 420 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und Naturkonvektion gefahren wurden.

Das quadratische 1,5 · 1,5-m²-Raster, in dem die Thermoelemente angeordnet sind, ergibt 7 Abstände,

- $r_1 = 0,75$ m,
- $r_2 = 1,68$ m,
- $r_3 = 2,25$ m,
- $r_4 = 2,7 \dots 3,1$ m,
- $r_5 = 3,75 \dots 4,04$ m,
- $r_6 = 4,56 \dots 5,03$ m,
- $r_7 = 5,86 \dots 6,4$ m,

nach denen die Meßreihen geordnet werden können. Thermoelemente, deren Abstandsunterschied nicht mindestens 25 % beträgt, werden zu einem Abstand zusammengefaßt (sh. r_4 bis r_7).

Von den Meßwerten vergleichbarer Versuche werden an allen Abständen r_1 bis r_7 die Mittelwerte gebildet und (sh. **Bilder 15...18**) über der Versuchszeit aufgetragen. Um die Reproduzierbarkeit dieser Versuche zu kontrollieren, wird zu jedem Mittelwert die auf denselben bezogene Standardabweichung [%] berechnet. Wie in den Bildern 10...14 beschränken sich auch diese Diagramme auf die entscheidenden ersten 15 Minuten des Versuches. Der größere Abbildungsmaßstab erlaubt eine (einheitlich) bis 150°C reichende Ordinate. Jedes Diagramm enthält – entsprechend den oben genannten 7 Abständen – 7 Temperaturkurven (dünn ausgezogen) und die vom Tabellenkalkulations-System dazu angebotene Trendlinie (dick ausgezogen). Beispielhaft wird von einer dieser Trendlinien auch ihre Gleichung angezeigt. Mit aufgenommen in diese Diagramme werden die nominelle Sprinkler-Auslösetemperatur (Horizontale bei 68°C) und die tatsächlichen Temperatur/Zeit-Kombinationen der im Experiment ermittelten Sprinkler-Aktivierungen. Sie liegen in der Regel nicht auf den Temperaturkurven, denn diese stellen ja Mittelwerte dar. Um die Legende zu diesen Diagrammen nicht zu überfrachten, werden dort die Tempera-

turkurven nur dann aufgeführt, wenn in den entsprechenden Abständen keine Sprinkler ansprechen.

Bild 15 zeigt die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit

- etwa 255 kW Brennerleistung,
- ohne Rauchschrzen,
- die RWA-Klappen bleiben geschlossen

und zwar für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei insgesamt 9 vergleichbaren Versuchen werden in einem Zeitraum von 5...15 Minuten nach der Zündung im inneren Kreis 10 von 18 und im zweiten Kreis 1 von 18 möglichen Sprinklern aktiviert. Das Diagramm verdeutlicht die große Streubreite der Sprinkler-Reaktion, obwohl die Deckentemperaturen sich sehr gleichmäßig, plausibel und einheitlich entwickeln: Die maximalen Standardabweichungen vom Temperatur-Mittelwert liegen unter 2 %, die Trendlinien verlaufen nahezu deckungsgleich in den Kurven der Meßwerte.

Bild 16 stellt die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke dar bei Versuchen mit

- einer (gegenüber den Versuchen von Bild 15) erhöhten Brennerleistung von 420 kW,
- ohne Rauchschrzen,
- RWA-Klappen bleiben geschlossen

und zwar für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei 3 vergleichbaren Versuchen dieser Konstellation werden innerhalb von 1,5...4 Minuten im inneren Kreis alle 6, im zweiten Kreis 5 von 6 (3,5...8 min), im dritten Kreis 2 von 3 (12...13 min) und im vierten Kreis 2 von 9 möglichen Sprinklern aktiviert. In der Nähe des Brenners besteht eine deutlich verbesserte Übereinstimmung des Sprinkler-Auslöseverhaltens, in größerem Abstand läßt es wieder nach. Die Trendlinien stimmen mit den Meßwertkurven noch sehr gut überein. Die maximalen Standardabweichungen vom Temperatur-Mittelwert liegen bei 2 %.

Bild 17 gibt die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke wieder bei Versuchen mit

- auf 630 kW erhöhter Brennerleistung und
- 25-cm-Rauchschürzen, wobei die
- Rauchgas-Absaugung durch die kleine Klappe (nach dem Erreichen der Auslösetemperatur) laut Anzeige in der Meßwarte 15.000 m³/h

beträgt, und zwar für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei 2 vergleichbaren Versuchen werden 1,5–2 Minuten nach der Zündung im inneren Kreis alle 4, im zweiten Kreis 4 von 4 (2–4,5 min), im dritten Kreis 2 von 2 (3–8 min), im vierten Kreis 4 von 6 (3–11 min) und im fünften Kreis 1 von 2 möglichen Sprinklern aktiviert. Auch in diesen Versuchen besteht in der Nähe des Brenners eine gute Übereinstimmung des Sprinkler-Auslöseverhaltens, die in größerem Abstand wieder nachläßt. Die Meßwertkurven zeigen schon eine auffällige Schwankungsbreite um die Trendlinien – mit dem Temperaturniveau zunehmend. Die maximalen Standardabweichungen vom Temperatur-Mittelwert liegen bei 6 %.

Die beiden Temperaturkurven für r_6 und r_7 liegen (obwohl zwischen den Werten bei den anderen Abständen deutliche Unterschiede bestehen) relativ dicht beieinander — mit verursacht durch die Rauchschürzen, vor denen sich das warme Rauchgas staut. Auch bei Versuchen ohne Rauchschürzen bestehen nur geringe Unterschiede zwischen diesen beiden Temperaturen – allerdings nicht so geringe wie hier.

Die beiden dick gezeichneten, flach verlaufenden Kurven in diesem Diagramm geben die Temperaturentwicklung wieder, wenn sie mit derselben Formel wie an Position 6.3 und 6.4 im Bild 13 berechnet wird – hier beispielsweise bei r_1 und bei r_7 . Die ermittelten Temperatursteigerungen gegenüber der Raumtemperatur zu Versuchsbeginn liegen gegen Versuchsende bei nur 30–75 % der tatsächlich im Versuch gemessenen Temperaturerhöhungen.

In Bild 18 ist die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei einem Versuch mit

- 880 kW Brennerleistung,
- 25-cm-Rauchschrzen,
- natrlicher Konvektion des Rauchgases durch die groe RWA-Klappe, die von Versuchsbeginn an offen steht

fur verschiedene Abstnde von der Mittelachse der Rauchgassaeule dargestellt, aufgetragen uer der Versuchszeit. Bei diesem Versuch werden die beiden Sprinkler im inneren Kreis nach 1 Minute ausgelst, die im zweiten Kreis nach 1,5–3 Minuten, der Sprinkler im dritten Kreis springt kurz vorher an, die 3 Sprinkler bei r_4 reagieren 1 Minute spater und weitere 1½ Minuten spater der letzte bei r_5 – es wurden alle 9 Sprinkler aktiviert.

Die MeBwertkurven zeigen eine noch groere Schwankungsbreite um die Trendlinien als bei den 630-kW-Versuchen. Die maximalen Standardabweichungen vom Temperatur-Mittelwert liegen hier bei 10 %. Die beiden Temperaturkurven fur r_6 und r_7 liegen wieder sehr dicht beieinander.

Um Ausreier bei der Mittelwertberechnung zu eliminieren, werden die auf die Sprinkler-Aktivierung folgenden verringerten Temperaturen nicht berucksichtigt. An ihrer Stelle wird die entsprechende Zeitspanne bis zum Wiedererreichen des alten Temperaturniveaus linear interpolierend uberbruckt. In Parameter-Konstellationen, die in mehreren Versuchen beibehalten werden, verschwinden diese Linearanteile in der Fluktuation der von den anderen Versuchen gelieferten MeBwerte, da ja nicht alle Sprinkler gleichzeitig anspringen. Wenn dies aber doch der Fall ist, und wenn die ursprungliche Temperatur erst mit Verzogerung wieder erreicht wird – wie in diesem Versuch bei den beiden Sprinklern bei r_1 – ist es im Diagramm als gerades Kurvenstuck zu erkennen.

4.3 Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate – berechnet aus der Rauchgas-Temperatur

Nach Literaturangaben [8, 9] wird die Temperaturverteilung in der Deckenströmung über einem Brand aus der Brandleistung und aus den geometrischen Daten des Brandraumes berechnet.

$$\vartheta_{\text{RG}} = k_{\vartheta} \cdot (Q^2 / H^5)^{1/3} + \vartheta_{\infty} \quad (4)$$

Entsprechendes gilt für die Geschwindigkeit dieser Strömung.

$$v_{\text{RG}} = k_v \cdot (Q/H)^{1/3} \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung seines Trägheitsbeiwertes läßt sich aus diesen beiden Werten die Erwärmung ϑ_{AE} eines thermisch gesteuerten Auslöseelementes bestimmen [6]. Die Differentialgleichung seiner Temperatur/Zeit-Funktion lautet

$$\vartheta_{\text{AE}}(t) = \{ \vartheta_{\text{RG}}(t) - \vartheta_{\text{AE}}(t) \} \cdot \{ v_{\text{RG}}(t) \}^{1/2} / I_{\text{RT}} \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \vartheta_{\text{AE}}(t) = \{ 1 / I_{\text{RT}} \} \cdot \int \{ \vartheta_{\text{RG}}(t) - \vartheta_{\text{AE}}(t) \} \cdot \{ v_{\text{RG}}(t) \}^{1/2} dt \quad (7)$$

Das Integral läßt sich numerisch mit Hilfe eines Iterationsverfahrens berechnen, in dem für kleine Zeitschritte die Temperaturfunktion linearisiert wird:

$$\vartheta_{\text{AE}}(t + \Delta t) = \vartheta_{\text{AE}}(t) + \vartheta_{\text{AE}}(t) \cdot \Delta t \quad (8)$$

Die Zeitspanne, die der Thermoschalter benötigt, um auf die nominelle Auslösetemperatur erwärmt zu werden wird als Auslösezeit t_A definiert.

Für die Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate $Q(t)$ können unterschiedliche Zeitgesetze angenommen werden – konstant, linear, quadratisch, exponentiell,... – mit Faktoren, die die räumlichen Bedingungen berücksichtigen [6]. Da die Entwicklung des Temperaturfeldes unter der Decke des Versuchsstandes umfassend dokumentiert ist, braucht die Deckentemperatur nicht nach Gleichung (4) berechnet zu werden — statt dessen kann diese Gleichung dazu herangezogen werden, um aus der Temperatur auf die von den Brennern freigesetzte Leistung zu schließen, die während eines Versuches eigentlich konstant bleiben sollte, am Versuchsbeginn aber sicher eine Phase zeigt, in der sie auf den Nominalwert hochfährt:

$$Q(t) = \{H^5 \cdot [\vartheta_{RG}(t) - \vartheta_{\infty}]^3 / k_g^3\}^{1/2} \quad (9)$$

Werden in diese Gleichung für $\vartheta_{RG}(t)$ die vom Tabellenkalkulations-System ausgeworfenen Gleichungen der Trendlinien aus den Experimenten (sh. Bilder 15–18) eingesetzt, so zeigt sich, daß die so berechneten Brennerleistungen zum einen beim 2–5-fachen dessen liegen, was während des Versuches eingestellt wurde (an Hand der Volumenströme in der Gas-Strahlwand bzw. der Pegelhöhe im Trichter-Brenner relativ zuverlässig zu regeln), und zum anderen, daß sie – näherungsweise – nur bei geringen Leistungsstufen und bei geringen Entfernungen von der Wärmequelle einem konstanten Wert zustreben. Das heißt, daß bei unseren Versuchen höhere Rauchgas-Temperaturen unter der Decke gemessen wurden als nach Gleichung (4) zu erwarten wäre — mit Abweichungen, die mit zunehmender Brennerleistung und mit zunehmendem Abstand vom Brenner wachsen. Bei stark rußenden Brennstoffen mit einem nennenswerten Anteil von Strahlungswärme, die zur Temperatursteigerung unter der Decke kaum beiträgt, wäre dies verständlich – auf die hier verwendeten Brennstoffe Spiritus und Propan trifft dies jedoch nicht zu.

Daraus ist zu folgern, daß – physikalisch korrekte Beschreibung des Temperatur/Leistungs-Zusammenhangs vorausgesetzt – die Koeffizienten k_g in Gleichung (4), die die geometrischen Randbedingungen berücksichtigen (sh. unter Gl. 2), auf einem Versuchsstand ermittelt wurden, der diesbezüglich mit dem an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik entwickelten nicht übereinstimmt. Mit entsprechend angepaßten Koeffizienten kann dieser Unterschied ausgeglichen werden.

Wird die Deckentemperatur nicht als Funktion der zeitabhängigen Brennerleistung, sondern als Funktion des Abstandes vom Brenner – Gleichung (4) mit k_g für $r/H > 0,18$

$$\vartheta_{RG} = 5,38 \cdot (H/r)^{2/3} \cdot (Q^2 / H^5)^{1/3} + \vartheta_{\infty} \quad (10)$$

aufgetragen, so ergibt das für einen fortgeschrittenen Versuchszeitpunkt, wenn der erste steile Temperaturanstieg abgeklungen ist (etwa 9 Minuten nach der Zündung) – mit dort als konstant angenommener Nominalleistung –, Kurven, die von denselben Koeffizienten bestimmt werden wie die Zeitfunktionen. In **Bild 19** sind diese Kurven für die Versuchs-

konstellation „geschlossene RWA-Klappen, keine Rauchschürzen“ aufgetragen — für die 4 Leistungsstufen 255; 300; 420 und 630 kW jeweils nach der Originalgleichung (10) und entsprechend den tatsächlich gemessenen Werten. Die Originalkurven liegen zu tief und fallen zu schnell.

Dies kann zum einen korrigiert werden, indem in dem Faktor k_9 (sh. Gl. 10) die feste Zahl 5,38 auf etwa 12 vergrößert wird, und zum anderen dadurch, daß der Exponent bei H/r auf α verringert wird (entsprechendes gilt für k_9 , wenn $r/H < 0,18$: $16,9 \Rightarrow \approx 23$). Diese angepaßten Koeffizienten sollten – innerhalb einer Rauchschürzen/Absaugungs-Kombination – von r und Q unabhängig sein. Mit einer Standardabweichung vom Mittelwert von $< 0,5\%$ trifft dies auf die Unabhängigkeit vom Radius einigermaßen zu. Variationen der Leistung verursachen jedoch bis zu fünf mal so hohe Standardabweichungen. Deshalb wird innerhalb jeder Versuchskonstellation für jede Leistungsstufe ein eigenes Koeffizientenpaar gewählt: für $r = r_1$ und für $r = r_2 \dots r_7$.

Bild 20 zeigt die damit – im Vergleich zu Bild 19 – erzielte Übereinstimmung zwischen der angepaßten Temperaturfunktion und den gemessenen Werten. Bei $r_1 = 0,75$ m stimmen sie genau überein, für $r_2 \leq r \leq r_7$ bestehen geringe Abweichungen, weil nicht für jeden Abstand innerhalb einer Versuchskonstellation individuelle Anpassungsfaktoren gewählt werden, sondern ein gemeinsamer, gemittelter für diese 6 Abstände.

Die Anwendung dieser Koeffizienten-Anpassung auf die 6 Versuchskonstellationen (3 Absaugvarianten, 2 Rauchschürzenvarianten) und auf alle 4 Leistungsstufen ergibt 24 Koeffizientenpaare, mit welchen aus den gemessenen $\vartheta_{RG}(t)$ -Kurven – genauer: aus den Trendlinien-Gleichungen der Mittelwerte der im gleichen Abstand gemessenen Temperaturen – die Leistungsentwicklung während der Versuche (eigentlich konstant, aber hochfahren zu Versuchsbeginn) berechnet werden kann: Jeweils eine Schar von 7 Kurven, wovon diejenige für r_1 bei $t = 9$ min die Nominalleistung exakt zeigt (da die Koeffizienten-Anpassung für den $\vartheta_{RG}(Q)$ -Zusammenhang bei $t = 9$ min durchgeführt wurde), während die Kurven für $r_2 \dots r_7$ von diesem Wert um so weiter abweichen, je weniger der individuelle Anpassungsfaktor in Gleichung (10) mit dem gemittelten

übereinstimmt. **Bild 21** zeigt beispielsweise für die Versuche mit Naturkonvektion, ohne Rauchschrzen und mit 630 kW die so berechneten Leistungskurven. Nach 9 Minuten erreichen die Brenner-Leistungskurven ihren Nominalwert — die Kurve für r_1 genau, die Kurven für die Abstände $r_2 \dots r_7$ näherungsweise.

Neben diesen Leistungskurven, die auf den durchgeführten Messungen fußen, zeigt das Diagramm auch den schon für die Bilder 13 und 17 berechneten Leistungsanstieg nach Gleichung (3): Die dünne – eigentlich gestrichelte – Linie, die nach dem Nominalwert bei $t = 9 \text{ min}$ weiter steigt.

Da die Steigerung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke innerhalb der ersten 15 Versuchs-Minuten (die Zeitspanne, die im Hinblick auf die zu überprüfende Sprinkler-Reaktion von Interesse ist) nur für die unteren Leistungsstufen als abgeschlossen gelten kann – und auch dort nur näherungsweise –, haben die Temperatur-Trendlinien (und demzufolge die Leistungskurven) bei den höheren Leistungsstufen weiter steigenden Charakter — insbesondere dann, wenn in der höchsten Leistungsstufe – bei 880 kW – der Versuch nach dem frühzeitigen Anspringen aller 9 Sprinkler abgebrochen wird. Deshalb, und weil die Verbrennung auf dem erhitzten Brenner bei dieser Wärmefreisetzung sehr unruhig wird (sh. Bild 18), werden die Versuche mit 880 kW in den weiteren Vergleich nicht mit einbezogen.

4.4 Berechnung des Sprinkler-Auslösezeitpunktes in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Mit dem im vorigen Kapitel erwähnten Iterationsverfahren [6] wird nicht nur das Integral in Gleichung (7) berechnet, sondern – wie dort angesprochen – auch der Auslösezeitpunkt t_A eines Thermoschalters. Hierfür muß neben der Temperatur des Rauchgases unter der Decke auch seine Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein. Mit Hilfe von Gleichung (5) kann sie aus den oben ermittelten Brennerleistungen (Gl. 9) berechnet werden.

Nach den beim Vergleich „Theorie – Praxis“ bei der Bestimmung der Rauchgas-Temperatur gesammelten Erfahrungen, ist davon auszugehen, daß auch der Koeffizient k_v (im Original [10]: 0,95 für $r/H < 0,15$; $0,197 \cdot (r/H)^{5/6}$ für $r/H \geq 0,15$; falsch in [9]) den Randbedingungen auf unserem Versuchsstand angepaßt werden muß. Nachdem Versuchsrechnungen mit variierten Koeffizienten gezeigt haben, daß der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit verglichen mit dem der Rauchgas-Temperatur von zweitrangiger Bedeutung ist, stützt sich die Wahl der modifizierten Koeffizienten für $v_{RG}(t)$ auf die folgende Überlegung: Ausgehend von der Tatsache, daß die Wärmefreisetzung Q_9 , die die Temperaturerhöhung unter der Decke des Versuchsstandes verursacht, im stationären Zustand identisch ist mit jener Q_v , die die Strömungsgeschwindigkeit der Rauchgase dort bewirkt (sh. Gl. 4 u. 5),

$$Q_9 = \{H^5 \cdot (\Delta\vartheta_{RG}/16,9)^3\}^{1/2} = Q_v = H \cdot (v_{RG}/0,95)^3 \quad (11)$$

kann über der Rauchsäule folgender „Zusammenhang“ zwischen $\Delta\vartheta_{RG}$ und v_{RG} berechnet werden.

$$v_{RG} = 0,95 \cdot \{\Delta\vartheta_{RG} \cdot H / 16,9\}^{1/2} \quad (12)$$

und in etwas größerer Entfernung von der Rauchsäule

$$v_{RG} = 0,197 \cdot H \cdot \{\Delta\vartheta_{RG} / 5,38 r\}^{1/2} \quad (13)$$

Wenn im modifizierten Rechenprogramm zur Bestimmung des Auslösezeitpunktes derselbe „Zusammenhang“ zwischen $\Delta\vartheta_{RG}$ und v_{RG} bestehen soll wie im Original, müssen in den Gleichungen (12) und (13) für $\Delta\vartheta_{RG}$ die Formeln mit den angepaßten Koeffizienten eingesetzt werden.

Die **Bilder 22...28** veranschaulichen die Ergebnisse dieser Auslösezeitpunkt-Berechnungen an Hand der Versuche mit 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung (Anzeige in der Meßwarte) durch die kleine RWA für verschiedene Abstände zwischen Wärmequelle und Sprinkler. Die dünn ausgezogenen Kurven zeigen den Verlauf der Rauchgas-Temperatur — die obere Kurve entspricht dem im Experiment gemessenen Verlauf, die untere wird nach Gleichung (4) errechnet. Die

dick gezeichneten Kurven stellen die mit Hilfe des Iterationsverfahrens berechneten asymptotischen Näherungen der Temperatur des Auslöseelementes an die Rauchgas-Temperatur dar. Dort wo sie die eingezeichnete nominelle Auslösetemperatur (68°C) schneiden, liegen die berechneten Auslösezeitpunkte.

In den nach Gleichung (4) berechneten Rauchgas-Temperaturen in diesen Diagrammen wird für die Leistungsentwicklung wieder der Verlauf nach Gleichung (3) gewählt, der bei $t=9$ min den Nominalwert erreicht — zuerst mit steilerem dann mit flacherem Anstieg — also näher an der Idealvorstellung liegt „konstante Leistungsabgabe nach der Zündung des Brenners“ als das Experiment selbst. Obwohl diese Leistungskurve (sh. Bild 21) nicht beim Nominalwert gekappt wird, bleiben die aus ihr berechneten Rauchgas-Temperaturen deutlich unter den experimentell ermittelten, weil der Faktor k_9 in Gleichung (4) zu gering ist (sh. a. S. 34). Dasselbe gilt, wenn die Leistung nicht nach einer Zeitfunktion wächst, sondern sofort auf den Nennwert springt: Zwar wird der Anstieg der $\vartheta_{\text{AE}}(t)$ -Funktion zu Versuchsbeginn dann steiler, doch bleibt auch hier die berechnete Rauchgas-Temperatur so weit unter der gemessenen, daß schon in geringer Entfernung vom Brenner keine Sprinkler-Auslösung mehr errechnet wird.

Die Berechnung der Auslösezeitpunkte (und ihre graphische Veranschaulichung) muß für jede der 6 Versuchskonstellationen, jede Leistungsstufe und jeden Abstand vom Brenner separat durchgeführt werden: 168 Diagramme, von denen die folgenden beispielhaft erläutert werden:

Bild 22 zeigt die Temperaturkurven im Abstand $r_1 = 0,75$ m von der Mittelachse der Rauchsäule. Die – durch eine dünne Linie dargestellte – gemessene Rauchgas-Temperatur stimmt überein mit der obersten Kurve in Bild 17, die nach Gleichung (4) berechnete mit der dort als „theta-1 nach [6]“ bezeichneten. Als Auslösezeiten werden nach den Originalformeln 1,5 min und nach den modifizierten Formeln 1,3 min berechnet. Diese Werte liegen noch nahe beieinander und auch nahe bei den tatsächlichen Auslösezeiten der Sprinkler in den Versuchen. Jedoch sind die Rauchgas-Temperaturen – insbesondere in

der unmittelbaren Nachbarschaft der frühen Sprinkler (siehe markierte Positionen im Diagramm) – deutlich höher als die berechneten Temperaturen des Auslöseelementes.

Im Bild 23 fallen die nach den beiden Verfahren berechneten Auslösezeiten beim Abstand $r_2 = 1,68$ m schon spürbar auseinander: Der Originalwert liegt bei 5,6 min und der modifizierte bei 2,3 min. Die in den Versuchen festgestellten Sprinkler-Reaktionen liegen sowohl der Auslösezeit als auch der Temperatur nach teils unter teils über den errechneten Werten.

Bild 24 verdeutlicht weiter die Diskrepanz zwischen den Original-Berechnungen und den modifizierten: Während die angepaßte Kurve beim Abstand $r_3 = 2,25$ m einen Auslösezeitpunkt liefert (3,2 min), der nahe bei einem experimentell ermittelten Wert liegt – Verlauf der Temperatur des Auslöseelementes etwa auf Höhe der tatsächlich bei den Sprinklern gemessenen Rauchgas-Temperaturen – erreicht die Originalkurve das Auslösekriterium nicht mehr, sie bleibt unter 68°C .

In den Bildern 25 und 26 – Abstände r_4 und $r_5 = 2,7 \dots 4,04$ m – setzt sich dieser Trend fort: Die Originalkurven bleiben unter 60°C beziehungsweise 55°C , das modifizierte Rechenverfahren liefert dagegen Auslösezeiten von 4,2 min und 6 min. In den Versuchen lösen dort montierte Sprinkler nach 3–11 min aus.

Die Bilder 27 und 28 zeigen schließlich, daß bei Abständen bis zu $r_7 \leq 6,4$ m eine Sprinkler-Aktivierung erfolgen müßte, denn die realen Temperaturkurven schneiden die Auslösetemperatur etwa bei 7,5 Minuten, während die Originalkurven keine 45°C erreichen. Wegen der in diesen Versuchen montierten Rauchschrzen liegen die Rauchgas-Temperaturen in Bild 27 und 28 sehr dicht beieinander.

Die weiteren bei der Auswertung der Versuche ermittelten Ergebnisse sind in **Tabelle 5** zusammengestellt. Für verschiedene Brennerleistungen und Abstände „Brenner – Sprinkler“ sind hier die in den Versuchen (Spalte „Exp.“) gemessenen und die mit dem Iterationsverfahren berechneten Auslösezeiten aufgeführt (Spalte „Iterat. [6]“). Bei letzteren wird unterschieden zwischen den mit den Originalformeln berechneten und jenen

unter Verwendung der modifizierten Formeln. Mit aufgenommen in diese Tabelle werden auch Werte (Spalte „FPHbook“), die von einer im Fire Protection Handbook verzeichneten Formel geliefert werden [9]:

$$t_A = \ln\{(\vartheta_{RG} - \vartheta_{\infty}) / (\vartheta_{RG} - \vartheta_{A,n})\} \cdot I_{RT} / (v_{RG})^{1/2} \quad (14)$$

Da diese Formel ebenfalls auf der Berechnung der Rauchgas-Temperatur nach Gleichung (4) beruht, werden neben den Originalergebnissen auch hier modifizierte berechnet, indem in dieser Gleichung für ϑ_{RG} die in den Versuchen gewonnenen Trendlinien eingesetzt werden.

Tabelle 5 verdeutlicht, daß nur bei hohen Leistungsstufen und gleichzeitig geringem Abstand zum Brenner die Berechnungen nach [6] im Original und in der angepaßten Version ähnliche, mit den Versuchsergebnissen übereinstimmende Werte für die Auslösezeiten liefern (vergl. Bild 22). Die mit Gleichung (14) berechneten Originalwerte (Spalte „FPHbook“) liegen schon $\approx 50\%$ darüber, die modifizierten liegen zwischen diesen und den Versuchsergebnissen. Sobald der Abstand vergrößert wird – noch bei hoher Leistung –, treffen nur noch die korrigierten Berechnungen die experimentellen Ergebnisse, ihre Streubreite ist sogar etwas geringer als im Experiment; die mit den Originalformeln errechneten Auslösezeiten liegen schon deutlich darüber — bei 420 kW sollen die Sprinkler auf dem Radius $r_2 = 1,68$ m schon gar nicht mehr ansprechen, während in den Versuchen Sprinkler-Reaktionen bis zum Radius $r_7 = 5,86 \dots 6,4$ m zu verzeichnen sind.

Die beiden Berechnungsverfahren liefern in ihrer Originalversion jeweils einen konkreten Wert in Abhängigkeit von der unterstellten Temperatur und vom Abstand. Die angepaßten Versionen berechnen einen gewissen Streubereich, weil in dieser Tabelle unter einer Leistungsstufe Versuche unterschiedlicher Konstellation zusammengefaßt werden, bei denen je nach Versuchsparameter (Absaugung, Rauchschürzen) andere Temperatur-Trendlinien ermittelt werden. Wenn die Rechenverfahren keine Auslösezeit mehr auswerfen, steht in der entsprechenden Rubrik ∞ . Dagegen bedeutet ./., daß auf dem Versuchstand in diesem Abstand vom Brenner keine Sprinkler mehr montiert waren. Wie die an

das tatsächliche Temperaturniveau angepaßten Berechnungsverfahren zeigen (beide), hätten dort aber durchaus noch in akzeptabler Zeit Sprinkler reagieren müssen.

Bei den beiden unteren Leistungsstufen springen Sprinkler nur im ersten und zweiten Ring um die Wärmequelle an. Die mit beiden korrigierten Verfahren berechneten Werte liegen in der Größenordnung wie die experimentell gewonnenen. Nach den Originalversionen dürften hier keine Sprinkler (1 Ausnahme) ausgelöst werden.

Sprinkler-Auslösezeiten können noch nach einer weiteren Methode berechnet werden [11]: Dieses sehr grobe Verfahren, das in seine Kalkulation weder die nominelle Auslösetemperatur noch den Trägheitsbeiwert des Auslöseelementes und auch nicht den Abstand zur Wärmequelle einbezieht, produziert Ergebnisse die bei der höchsten Leistungsstufe direkt über der Wärmequelle mit den korrigierten Werten aus Gleichung (7) übereinstimmen. Ebenso in derselben Position bei der zweithöchsten Leistungsstufe — wo aber auch schon ∞ ausgeworfen wird, wenn das Auslösekriterium ($\vartheta_{RG} \geq 100^\circ\text{C}$) nicht erfüllt wird.

4.5 Die Berechnung des Sprinkler-Auslösezeitpunktes in Abhängigkeit von der Entfernung des Sprinklers von der Wärmequelle

Werden die Sprinkler-Reaktionen – gemessen oder berechnet – in Analogie zu den Bildern 19 und 20, wo die Anpassung des Iterationsverfahrens an das in den Experimenten herrschende Temperaturniveau dargestellt wird, nicht über der Zeit sondern über dem Abstand zum Brenner aufgetragen, dann ergibt dies die in den **Bildern 29...34** wiedergegebenen Kurven.

Die ausgezogenen Kurven enthalten die mit dem angepaßten Iterationsverfahren berechneten Auslösezeiten. Im Unterschied zu Tabelle 5 wird hier keine Ergebnis-Bandbreite angegeben, denn die auf diesen Kurven markierten Werte stellen das Ergebnis individueller Berechnungen dar — für eine bestimmte Kombination aus Rauchschürzenvariante, Absaugvariante und Leistungsstufe. Die Kurven liegen um so tiefer und ver-

laufen um so flacher, je höher das Leistungsniveau ist, das sie repräsentieren. Bei den unteren Leistungsstufen reichen die Kurven (wenn überhaupt) nur bis zum Radius $r_2 = 1,68$ m, bei 420 kW bis $r_4 = 2,7 \dots 3,1$ m oder $r_5 = 3,75 \dots 4,04$ m, bei 630 kW immer bis $r_7 = 5,86 \dots 6,4$ m. Bei Versuchen mit Rauchschürzen steigen diese Kurven zwischen r_6 und r_7 nicht mehr, in einigen Fällen fallen sie sogar: Erstens weil der Rauchgasstau vor der Rauchschürze dort die Temperatur erhöht, und zweitens weil das Berechnungsverfahren aus dieser örtlichen Temperaturerhöhung auf eine höhere Brennerleistung schließt, aus der wiederum eine (trotz Rauchschürzen) höhere Strömungsgeschwindigkeit berechnet wird. Diese beiden Argumente werden bei der Berechnung des Auslösezeitpunktes multiplikativ verknüpft, wodurch der Rauchschürzeneffekt über Gebühr betont wird.

Die Markierungen für die in den Versuchen tatsächlich aktivierten Sprinkler (für jede Leistungsstufe die gleichen Symbole wie bei den Rechenergebnissen aber nicht ausgefüllt, sondern hohl) liegen bei geringen Abständen von der Wärmequelle und bei hoher Leistung in der Regel nahe bei den berechneten Werten, zum Teil auch darunter (vergl. Bild 22). Mit zunehmendem Abstand beziehungsweise bei geringerer Leistung (schon bei 420 kW!) wird jedoch die Bandbreite der experimentell ermittelten Auslösezeiten so groß, daß ein beträchtlicher Teil dieser Werte über den berechneten liegt (vergl. Bilder 23...25). Letzteres ist in den Diagrammen nur bis zum Abstand $r_5 = 3,75 \dots 4,04$ m zu verfolgen, weil in größeren Abständen keine Sprinkler mehr installiert waren.

Die berechneten Auslösezeiten sind am kürzesten bei den Versuchen mit 25-cm-Rauchschürzen und geschlossener Decke (Bild 30), weil dort die höchsten Deckentemperaturen erzielt werden. Es folgen die Versuche ohne Rauchschürzen mit 15.000 m³/h Absaugung (Bild 32) oder geschlossener Decke (Bild 33). Die längsten Auslösezeiten liefern die Versuche mit Rauchschürzen und Naturkonvektion (Bild 31). In geringem Abstand von der Wärmequelle verschwinden diese Unterschiede in der Streubreite der Reaktionszeiten innerhalb einer Versuchskonstellation. Bei größerem Abstand scheinen sich die verschiedenen Versuchsparameter deutlicher bemerkbar zu machen, doch liegt auch hier – wie man an der Streubreite der tatsächlichen Sprinkler-Reaktionen sehen kann – die Varia-

tionsbreite im Rahmen dessen, was bei Versuchen im Realmaßstab in Kauf genommen werden muß.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der beschriebene Versuchsstand mit Sprinklern nur auf einem Teilareal der ansonsten mit Thermoelementen komplett ausgestatteten Deckenfläche ist geeignet, um das Sprinklerverhalten auf dem Gesamtareal ($7,5 \cdot 10 \text{ m}^2$) zu beurteilen, da von den 9 Sprinklern und den bei ihnen gemessenen Temperaturkurven auf die restlichen Positionen geschlossen werden kann: Je nach Brennerleistung hätten innerhalb von 15 Minuten Sprinkler auch auf entfernteren Positionen reagiert

- bei 420 kW noch in 3 m Entfernung,
- bei 570 kW noch in 5 m Entfernung,
- bei 630 kW noch in 8,4 m Entfernung,
- bei 880 kW noch in 8,4 m Entfernung jedoch bereits nach 5 min.

Die Streubreite der Sprinkler-Auslösezeiten würde, weil die Erwärmung auf diesen entfernteren Positionen langsamer stattfindet als in der Nähe der Wärmequelle, zunehmen, wie **Tabelle 6** zu entnehmen ist, in der die gemessenen Sprinkler-Öffnungszeiten nach Versuchskonstellation und Abstand von der Wärmequelle geordnet sind.

Diese Zusammenstellung zeigt auch, daß weder die Absaug- noch die Rauchschränkenvariante einen signifikanten Einfluß auf das Sprinklerverhalten ausübt. Vielmehr müssen die unterschiedlichen Reaktionszeiten als Bandbreite von Realmaßstab-Versuchen beziehungsweise von Fertigungstoleranzen der Auslöseelemente interpretiert werden. Die Bandbreite der Versuchsergebnisse wird nur schmal, wenn sehr schnell und sehr deutlich ($> 100^\circ\text{C}$) die nominelle Auslöseschwelle überschritten wird.

Im Abstand von 2,25 m von der Rauchsäule reagieren bei 630 kW noch alle Sprinkler, bei 420 kW nur noch die Hälfte. Auch bei $r=2,7\cdots 3,1$ m springen bei 630 kW noch alle Sprinkler an – mit zunehmender Streuung, bei 420 kW nur noch ein Drittel. Bei Sprinklern, die von der RWA aus gesehen jenseits der Rauchsäule stehen, bewirkt die Absaugung des warmen Rauchgases einen etwas verzögerten Temperaturanstieg, was aber nur bei geringer Brennerleistung zu erkennen ist.

Schon in 3 m Entfernung von der Wärmequelle streuen die gemessenen Werte – auch bei der höchsten der untersuchten Leistungsstufen: 880 kW – so stark (1–6 min), daß von einem vorhersehbaren Verhalten der Sprinkler eigentlich nicht gesprochen werden kann.

- Beispielsweise reagiert im 2. Versuch der VR 9 der Sprinkler 4.4 nach 1:56 min bei 89°C Rauchgas-Temperatur. Der bezüglich der Wärmequelle symmetrisch angeordnete Sprinkler 4.3 reagiert bei derselben Rauchgas-Temperatur erst bei $t_A=8:17$ min, das heißt, mehr als 6 Minuten später.
- Im 4. Versuch der VR 16 wird der Sprinkler 2.4 nach 3:47 min bei 75°C Rauchgas-Temperatur ausgelöst — der zu ihm symmetrische, an dem viel früher 80°C erreicht werden, bleibt eine halbe Minute länger geschlossen. Auf den Positionen 3.3 und 3.4 befinden sich ebenfalls zwei symmetrisch montierte Sprinkler, von denen der eine nach 11:05 min aufgeht, während der andere trotz gleicher Rauchgas-Temperatur (10 min lang $>68^\circ\text{C}$) nicht reagiert.
- Dagegen gibt es im Versuch 1 der VR 23 einen Sprinkler, der obwohl die Rauchgas-Temperatur 68°C kaum überschreitet, schon 4 Minuten danach aufgeht.

29 mal reagieren Sprinkler nicht, obwohl die bei ihnen gemessene Rauchgas-Temperatur die nominelle Auslösetemperatur 10 Minuten lang um 5–10°C übertrifft. In 4 weiteren Fällen wurde nach dem Versuch festgestellt, daß zwar das Sprinkler-Fäßchen gerissen war – jedoch ohne den Sprinkler auszulösen.

Da diese Befunde praktisch deckungsgleich sind mit der Beurteilung der bei UL durchgeführten Experimente [1], wäre im Hinblick auf eine höhere Auslegungssicherheit mit Hilfe weiterer Untersuchungen zu klären, ob durch eine gesteigerte Fertigungsgenauigkeit der Sprinkler-Fäßchen diese Streubreite eingengt werden kann, oder ob möglicherweise mit Schmelzlot-Auslöseelementen diesbezüglich Verbesserungen zu erzielen sind.

Die halbe Diagonale im üblichen 3 m · 3 m–Sprinkler-Raster beträgt 2,1 m. Nach den hier besprochenen Versuchen streuen die Auslösezeiten in dieser Entfernung schon stark (2–8 min bei 630 kW) — erst über 400 kW werden hier überhaupt Sprinkler aktiviert.

Bei thermodynamischen Experimenten im Realmaßstab dürfen die Unterschiede zwischen variierten Versuchsparametern nicht zu gering sein. So wie – bei der Abstufung der Abstände von der Wärmequelle – Distanzen, die sich um weniger als 25% unterscheiden, zu einem Abstand gebündelt werden, wäre es sinnvoll gewesen, in die leistungsmäßige Zusammenfassung der Versuche mit 250 kW und 260 kW auch noch die mit 300 kW einzubeziehen, da die Versuche zeigen, daß ihre Ergebnisse keine erkennbaren Unterschiede aufweisen.

Nach der allgemein vorherrschenden Meinung soll dadurch, daß $\eta_{A,RWA}$ und $I_{RT,RWA}$ nicht kleiner sein dürfen als $\eta_{A,Spr.}$ respektive $I_{RT,Spr.}$, sichergestellt werden, daß die RWA nicht vor den Sprinklern ansprechen und durch Absenkung der Deckentemperatur deren Aktivierung verzögern oder gar verhindern. Umgekehrt besteht, wenn diese Werte bei der RWA größer sind als bei den Sprinklern, nicht nur die Gefahr, daß das Auslöseelement der RWA nicht reagiert, weil die Aktivierung der Sprinkler die Rauchgas-Temperatur möglicherweise unter $\eta_{A,RWA}$ abkühlt, sondern auch jene, daß das Auslöseelement der RWA von Tröpfchen aus dem Sprinklerstrahl getroffen und zusätzlich abgekühlt wird.

Um dieses diffizile Steuerungsproblem zu entschärfen, erscheint es erwägenswert, für die RWA kein unabhängig funktionierendes Auslöseelement vorzusehen, sondern ihre

Aktivierung an die der Sprinkler zu koppeln — beispielsweise über einen Strömungs- oder Druckwächter im entsprechenden Sprinklerstrang. Da in einem Brandabschnitt wesentlich weniger RWA als Sprinkler installiert werden, könnte dadurch die Auslösebandbreite, die bei den Sprinklern durch deren große Zahl ausgeglichen werden kann, für die RWA minimiert werden.

Bei den hier durchgeführten Experimenten wurden Versuchen mit früh öffnenden RWA (genauer: von Beginn an offenen) und solchen mit RWA, die gleichzeitig mit benachbarten Sprinklern aufgingen, Versuche gegenübergestellt, bei denen kein Rauchabzug stattfand. Weder in dem einen noch in dem anderen Fall konnte eine Beeinflussung der Sprinkler-Funktion durch die RWA festgestellt werden: Bei geringer Leistung beziehungsweise bei großem Abstand zwischen Brenner und RWA streuten die Auslösezeiten bei allen drei Absaugvarianten etwa im gleichen Maß um denselben Mittelwert. Mit zunehmender Leistung nahmen auch die Unterschiede zwischen den erzielten Rauchgas-Temperaturen zu: 20...40°C bei derselben Brennerleistung — wobei die größten Unterschiede nicht zwischen Versuchen mit verschiedenen Versuchsbedingungen auftraten, sondern bei Versuchswiederholungen mit unveränderten Versuchsbedingungen.

Der Einfluß der 25-cm-Rauchschürzen auf das Auslöseverhalten der Sprinkler verschwand in der Streubreite der gemessenen Ergebnisse. Daraus ist zu folgern, daß erst Rauchschürzen größerer Tiefe das Strömungs- und das Temperaturfeld über einem Brand wirklich beeinflussen.

Rauchschürzen geringerer Tiefe können als konstruktive Alternative angesehen werden: Wenn sie lediglich die RWA umschließen, werden zwar dort die Strömungsbedingungen verschlechtert, aber durch die verbleibende warme Deckenschicht in der Umgebung der RWA wird sichergestellt, daß die in unmittelbarer Nähe montierten Sprinkler auch dann aktiviert werden, wenn die RWA – um Rettungswege rauchfrei zu halten – schon vor den ersten Sprinklern geöffnet werden. Entsprechendes gilt für eine Einfassung lediglich der unmittelbaren Sprinklerumgebung mit solch einer niedrigen Rauchschürze – beispielsweise in Hochregallagern, wo Sprinkler auch in abgestufter Raumhöhe montiert

werden sollen. In beiden Fällen gewährleistet die geringe Bauhöhe dieser Rauchschürzen eine unbeeinträchtigte Ausbildung des Sprinkler-Sprühstrahls.

Das hier verwendete Verfahren zur Berechnung der Sprinkler-Auslösezeitpunkte liefert unter brandschutztechnischer Sicht keine befriedigenden Lösungen. Dementsprechend kann ein darauf fußendes Brandschutzkonzept nicht als der Problemstellung angemessen bezeichnet werden. In seiner Originalversion berechnet das Verfahren zu niedrige Rauchgas-Temperaturen und zu langsam steigende Temperaturen des Auslöseelementes. Endliche Sprinkler-Reaktionszeiten werden überhaupt nur unmittelbar über der Wärmequelle ermittelt. Schon in 2,25 m Entfernung liefert dieses Verfahren – auch bei 630 kW – keine Sprinkler-Reaktion mehr, obwohl die durchgeführten Versuche zeigen, daß bei dieser Leistung, in dieser Entfernung alle Sprinkler innerhalb von 2...8 Minuten anspringen.

In einer temperatur-korrigierten Version zeigt das Verfahren, daß es den Erwärmungsprozeß anschaulich wiederzugeben vermag. Die so berechneten Temperaturen des Auslöseelementes liegen im Bereich der experimentell ermittelten — streuen aber nicht so stark wie diese. Sicherheit bietet ein hiermit konzipiertes Sprinkler-System nur, wenn diese Streubreite der handelsüblichen Sprinkler-Fäßchen berücksichtigt und – möglicherweise – durch eine hohe Sprinkleranzahl kompensiert wird.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Ab 300 kW Brennerleistung reagieren auf dem beschriebenen Versuchsstand die ersten Sprinkler (Ausnahme: 2 Versuche, bei denen – bei niedrigen Außentemperaturen – von Versuchsbeginn an die Rauchgas-Absaugung eingeschaltet war), bei Brennerleistungen von ≥ 600 kW werden im allgemeinen alle Sprinkler im Umkreis von 3,75 m aktiviert, selbst wenn der Brenner sich direkt unter der offenen RWA befindet.

Aus diesen Versuchsergebnissen kann geschlossen werden, daß Sprinkler nicht verzögert reagieren, wenn RWA unter den gleichen thermischen Bedingungen in Betrieb genommen werden wie die Sprinkler. Dies bedeutet, daß im Brandfall das primäre Schutzziel verfolgt werden kann, die Rettungswege und die Angriffswege der Feuerwehr rauchfrei zu halten, weil die gleichzeitig aktivierten Sprinkler verhindern, daß der Brand angefacht wird.

Bei der Evaluierung eines in der Fachliteratur angebotenen Berechnungsverfahrens für den Auslösezeitpunkt von Sprinklern in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzungsrate, von der Sprinkler-Charakteristik und von den geometrischen Randbedingungen wird festgestellt, daß die so berechneten Werte deutliche Abweichungen gegenüber den Experimenten zeigen. Mit einer Korrektur dieses Verfahrens, die sich auf die in den Versuchen tatsächlich gemessenen Rauchgas-Temperaturen stützt, lassen sich Rechenergebnisse erzielen, die im Bereich der experimentell gewonnenen liegen.

Die Streubreite dieser Versuchsergebnisse – soweit es sich nicht um Sprinkler in unmittelbarer Nähe zur Wärmequelle handelt – erfordert eine geringere Fertigungstoleranz bei den Auslöseelementen oder eine zahlenmäßige Kompensation. Die RWA sollte deshalb mit einem anderen, exakter funktionierenden Öffnungsmechanismus ausgestattet sein.

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik dankt der Firma Job für die großzügige Versorgung mit Versuchsmaterial. Der Verfasser dankt seinen Kollegen H. Müller und R. Schätzle für den sorgfältigen Aufbau des Versuchsstandes, O. Klein für die akkurate Fertigung der Versuchsprotokolle und T. Muth für viele wertvolle Hinweise bei der Bearbeitung der Versuchsdiagramme.

Die vollständige Dokumentation der RWA/Sprinkler-Versuche (u.a. 162 Protokolle und 168 Auswertungs-Diagramme) kann bei der Forschungsstelle für Brandschutztechnik eingesehen werden.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Föhl, C.Axel:
Untersuchung der Wechselwirkungen
zwischen gleichzeitig betriebenen
Sprinkler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-
Systemen,
Forschungsbericht Nr. 118 der
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien
der Bundesländer, Arbeitskreis V –
Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile
Verteidigung, Karlsruhe 1999
- [2] McGrattan, Kevin B.; Anthony Hamins
und David Stroup:
Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft
Curtain Interaction – Large Scale
Experiments and Model Development,
NIST Interagency Internal Report 6196-1,
U.S. Department of Commerce, National
Institute of Standards and Technology
(NIST), Building and Fire Research
Laboratory,
Gaithersburg (Maryland), USA 1998
- [3] Stahl, Karl Heinz:
Zusammenwirken von Löschanlagen und
Rauch- und Wärmeabzugsanlagen,
Vortrag auf der VdS-Fachtagung „Rauch-
und Wärmeabzugsanlagen“ am 14.
November 2000 im Maternushaus, Köln
- [4] Cooper, Leonard Y.:
VENTCF2 – an Algorithm and Associated
Computer-Subroutine for Calculation
Flow through a Horizontal Ceiling/Floor
Vent in a Zone-Type Compartment Fire
Model,
NIST Interagency Internal Report 5470,
U.S. Department of Commerce, National
Institute of Standards and Technology
(NIST), Building and Fire Research
Laboratory,
Gaithersburg (Maryland), USA 1994
- [5] Tuovinen, Heimo:
Validations of Ceiling Jet Flow in a
large Corridor with Vents using the
Computational-Fluid-Dynamics-Code
JASMINE,
Fire Technology, Band 32 (Januar
1996), Heft 1, Seite 25···49
- [6] Mowrer, Frederick W.:
Spreadsheet Templates for Fire
Dynamics Calculations,
www.fireriskforum.com, 2003
- [7] Hengstenberg, Josef et al.:
Messen, Steuern und Regeln in der
Chemischen Technik, 3. Aufl.,
Springer-Vlg., Berlin···New York 1980
- [8] DiNunno, Philip J. et al.:
SFPE-Handbook of Fire Protection
Engineering, 3rd Ed.,
Society of Fire Protection Engineers,
Bethesda (Maryland), USA 2002
- [9] Cote, Arthur E. et al.:
Fire Protection Handbook, 17th Ed.,
National Fire Protection Association,
Quincy (Massachusetts), USA 1991
- [10] Alpert, Ronald L.:
Calculation of Response Time of
Ceiling-Mounted Fire Detectors,
Fire Technology, Band 8 (August 1972),
Heft 3, Seite 181···195
- [11] Milke, James A.:
Smoke Management for Covered Malls
and Atria,
Fire Technology, Band 26 (August
1990), Heft 3, Seite 223···243

8. TABELLEN UND BILDER

<u>Tabelle 1:</u>	Variation der Versuchsparameter Rauchschürzentiefe, Brennerleistung und -position und Rauchgas-Abführung in den 162 RWA/Sprinkler-Versuchen	53
<u>Tabelle 2:</u>	Kurze Zusammenstellung der Versuchsparameter und der Sprinkler-Reaktionen	54
<u>Tabelle 3:</u>	Der Vergleich von RWA/Sprinkler-Versuchen, bei denen das Rauchgas infolge von Naturkonvektion abzieht - von Versuchsbeginn an, mit solchen Versuchen, bei denen die RWA geschlossen bleiben	62
<u>Tabelle 4:</u>	Der Vergleich von RWA/Sprinkler-Versuchen, bei denen von Versuchsbeginn an das Rauchgas mit Hilfe der Rauchgas-Reinigungsanlage abgezogen wird, mit solchen Versuchen, bei denen die RWA geschlossen bleiben	64
<u>Tabelle 5:</u>	Der Vergleich der im Experiment ermittelten Sprinkler-Auslösezeiten [min] mit berechneten Werten — mit Hilfe der Formeln im Fire Protection Handbook, nach dem Iterationsverfahren [6], jeweils unter Verwendung der Originalformel für die Rauchgas-Temperatur und einer an das Experiment angepaßten Temperatur	65
<u>Tabelle 6:</u>	Die Streubreite der Sprinkler-Auslösezeiten in Minuten bei den durchgeführten Versuchen in Abhängigkeit von der Versuchskonstellation und vom Abstand von der Wärmequelle für die beiden höchsten Leistungstufen (jeweils in der oberen Zeile) und die Anzahl der aktivierten Sprinkler bezogen auf ihre maximal mögliche Zahl (in der unteren Zeile)	66
<u>Bild 1:</u>	Querschnitt durch die Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik mit dem Versuchsstand für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen	67
<u>Bild 2:</u>	Grundriß der Brandversuchshalle mit dem Versuchsstand für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen	67
<u>Bild 3:</u>	Die Decke des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen mit der Kennzeichnung der Position der Thermolemente, der Sprinkler, der RWA-Öffnungen und der mobilen Sonde	68

<u>Bild 4:</u>	Die Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 240° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 10.000 m ³ /h	69
<u>Bild 5:</u>	Die Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 90° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 20.000 m ³ /h	69
<u>Bild 6:</u>	Die 6 Trendlinien der Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 0°, 30°, 90°, 150°, 240° und 300° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 10.000 m ³ /h	70
<u>Bild 7:</u>	Die 6 Trendlinien der Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 0°, 30°, 90°, 150°, 240° und 300° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 15.000 m ³ /h	70
<u>Bild 8:</u>	Die 6 Trendlinien der Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 0°, 30°, 90°, 150°, 240° und 300° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 20.000 m ³ /h	71
<u>Bild 9:</u>	Die Volumenstrom-Kalibrierung am Versuchsstand für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – aufgetragen als dynamischer Druck bzw. Strömungsgeschwindigkeit – für nominelle Absaugleistungen der Rauchgas-Reinigungsanlage von 10.000, 15.000 und 20.000 m ³ /h	71
<u>Bild 10:</u>	Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe der Gas-Strahlwand ($p_{\text{stat.}} = 0$) von 300 kW in der Position „zentral“. Decke und RWA mit 25-cm-Rauchschrüzen eingefasst. Wenn – nach 3 min – vor der kleinen RWA $\approx 70^{\circ}\text{C}$ erreicht werden, wird ihre Klappe geöffnet und ein Abgasvolumenstrom von $\approx 9.700\text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt ($p_{\text{dyn.2}} \approx 920\text{ Pa}$). — In dem strichpunktiert eingefassten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Der Sprinkler bei Position 4.3 löst nach 12 min bei einer Rauchgas-Temperatur von 74°C aus. Nach 3 min wird die mobile Sonde 1 vor der kleinen RWA um 25 cm gesenkt, um 3 cm unter der Unterkante der Rauchschrüze den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Rauchgas-Strömung zu messen.	72

- Bild 11:** Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 420 kW ($p_{\text{stat.}} = 2.960 \text{ Pa}$) in der Position „zentral“. Beide RWA geschlossen ($p_{\text{dyn.2}} = 0$), Decke und RWA mit 25-cm-Rauchschrzen eingefafst. — In dem strichpunktiert eingefafsten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Die Sprinkler bei den Positionen 4.4...3.3 l6sen nach 4...12 min bei Rauchgas-Temperaturen von 79...72°C aus. Nach 11,5 min wird die mobile Sonde 1 von vor der grofien RWA zur Position 2.4 verfahren, um in H6he der Sprinkler-Fafstchen den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Deckenstr6mung zu messen.73
- Bild 12:** Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 630 kW ($p_{\text{stat.}} = 3.170 \text{ Pa}$) in der Position „West“. Die grofie RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen – Naturkonvektion ($p_{\text{dyn.2}} = 0$), keine Rauchschrzen. — In dem strichpunktiert eingefafsten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Die Sprinkler bei den Positionen 2.4...4.3 l6sen nach 1...7 min bei Rauchgas-Temperaturen von 94...74°C aus. Nach 11 min wird die mobile Sonde 1 von vor der grofien RWA zur Position 4.3 verfahren, um in H6he der Sprinkler-Fafstchen den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Deckenstr6mung zu messen.74
- Bild 13:** Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 490 kW ($p_{\text{stat.}} = 3.030 \text{ Pa}$) direkt unter der grofien RWA. Die grofie RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen – Naturkonvektion ($p_{\text{dyn.2}} = 0$), keine Rauchschrzen. — In dem strichpunktiert eingefafsten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert, von denen bei diesem Versuch keiner aktiviert wird. Die mobile Sonde 1 steht permanent beim Thermoelement 4.4.75
- Bild 14:** Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 250...900 kW ($p_{\text{stat.}} = 2.760...3.400 \text{ Pa}$) in der Position „zentral“. Decke und RWA mit 25-cm-Rauchschrzen eingefafst. Die kleine RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen – der Abgasvolumenstrom betrftgt kontinuierlich $\approx 9.700 \text{ m}^3/\text{h}$ ($p_{\text{dyn.2}} \approx 950 \text{ Pa}$). — In dem strichpunktiert eingefafsten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Die Sprinkler bei Position 4.3...2.2 l6sen nach 5...11 min bei Rauchgas-Temperaturen von 85...73°C aus. Nach 4 min wird die mobile Sonde 1 vor der kleinen RWA um 25 cm gesenkt, um 3 cm unter der Unterkante der Rauchschrze den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Rauchgas-Str6mung zu messen.76

- Bild 15: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit ≈ 255 kW Brennerleistung, ohne Rauchschürzen, RWA-Klappen geschlossen für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei 9 vergleichbaren Versuchen werden im inneren Kreis 10 von 18 und im zweiten Kreis 1 von 18 möglichen Sprinklern aktiviert.77
- Bild 16: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit 420 kW Brennerleistung, ohne Rauchschürzen, RWA-Klappen geschlossen für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei 3 vergleichbaren Versuchen werden im inneren Kreis 6 von 6, im zweiten Kreis 5 von 6, im dritten Kreis 2 von 3 und im vierten Kreis 2 von 9 möglichen Sprinklern aktiviert.77
- Bild 17: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen, Rauchgas-Absaugung durch die kleine Klappe (15.000 m³/h nach dem Erreichen der Auslösetemperatur) für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei 2 vergleichbaren Versuchen werden im inneren Kreis 4 von 4, im zweiten Kreis 4 von 4, im dritten Kreis 2 von 2, im vierten Kreis 4 von 6 und im fünften Kreis 1 von 2 möglichen Sprinklern aktiviert.78
- Bild 18: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit 880 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen, natürliche Konvektion des Rauchgases durch die große RWA-Klappe von Versuchsbeginn an für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei diesem Versuch werden im inneren Kreis 2 von 2, im zweiten Kreis 2 von 2, im dritten Kreis 1 von 1, im vierten Kreis 3 von 3 und im fünften Kreis 1 von 1 möglichen Sprinklern aktiviert.78
- Bild 19: Die Berechnung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke mit Hilfe der im Fire Protection Handbook verzeichneten Formel im Vergleich zu den auf dem Versuchsstand gemessenen Temperaturen für die 4 Leistungsstufen 255; 300; 420 und 630 kW: Die berechneten Kurven liegen zu tief und fallen zu schnell.79
- Bild 20: Die Berechnung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke mit Hilfe der modifizierten Formel aus dem Fire Protection Handbook im Vergleich zu den auf dem Versuchsstand gemessenen Temperaturen für die 4 Leistungsstufen 255; 300; 420 und 630 kW79

- Bild 21: Die Leistungsentwicklung bei einer Brenner-Nominalleistung von 630 kW berechnet aus der Rauchgas-Temperatur unter der Decke mit Hilfe der modifizierten Formel aus dem Fire Protection Handbook für Naturkonvektion, ohne Rauchschürzen (dünne Kurve: Leistungsentwicklung nach Gleichung 3)80
- Bild 22: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_1 = 0,75$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.80
- Bild 23: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_2 = 1,68$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.81
- Bild 24: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_3 = 2,25$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.81
- Bild 25: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_4 = 2,7 \dots 3,1$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.82
- Bild 26: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_5 = 3,75 \dots 4,04$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.82
- Bild 27: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_6 = 4,56 \dots 5,03$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.83
- Bild 28: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_7 = 5,86 \dots 6,4$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.83
- Bild 29: Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche mit 25-cm-Rauchschürzen, 15.000 m³/h Absaugung und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte84

<u>Bild 30:</u>	Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche mit 25-cm-Rauchschrürzen, geschlossenen RWA und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte	84
<u>Bild 31:</u>	Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche mit 25-cm-Rauchschrürzen, Naturkonvektion und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte	85
<u>Bild 32:</u>	Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche ohne Rauchschrürzen, mit 15.000 m ³ /h Absaugung und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte	85
<u>Bild 33:</u>	Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche ohne Rauchschrürzen, RWA geschlossen und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte	86
<u>Bild 34:</u>	Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche ohne Rauchschrürzen, mit Naturkonvektion und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte	86

Tabelle 1: Variation der Versuchsparameter Rauchschürzentiefe, Brennerleistung und -position und Rauchgas-Abführung in den 162 RWA/Sprinkler-Versuchen

Rauchschürzen	Wärmequelle	Position	offene RWA	Versuchsreihe	
—	Gas-Strahlwand	zentral	—	1, 12	
			große	3, 4, 7, 14	
			kleine	2, 2a, 17	
		West	—	5, 13	
			große	6, 15	
			kleine	16	
	Trichter-Brenner	zentral	—	8, 18	
			große	9, 20	
			kleine	22	
		West	—	19	
			große	11, 21	
			kleine	23	
	unter großer RWA	große	10		
	25 cm	Gas-Strahlwand	zentral	—	24
				große	26
kleine				29, 29a	
West			—	(25)	
			große	(27)	
			kleine	28	
Trichter-Brenner		zentral	—	30, 30a, 40, 47	
			große	32, 38, 39, 46	
			kleine	34, 34a, 34b, 36, 37, 41, 42	
		West	—	(31), 44	
			große	(33), 45	
			kleine	(35), 43	

Tabelle 2: Kurze Zusammenstellung der Versuchsparameter und der Sprinkler-Reaktionen

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q}^A [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 1 V 1AAA5	keine	Gas-Strahlwand zentral	RWA geschlossen	100	keiner		
				160	keiner		
				210	keiner		
				260	2	10AAA13	79AAA76
				300	2	4AAA6	86AAA83
VR 2 V 1AAA5	keine	Gas-Strahlwand zentral	von Beginn an 6.800 m ³ /h über südlichen Strang, wenn $\vartheta_1 \approx \text{const.}$ (≈ 6 min), kleine Klappe auf, umschalten auf nördlichen Strang	100	keiner		
				160	keiner		
				210	keiner		
				260	keiner		
				300	2	≈ 9	78AAA74
VR 2a V 1AAA5	keine	Gas-Strahlwand zentral	wenn $\vartheta_1 \approx 70\text{EC}$ ($\infty \dots 2$ min), kleine Klappe auf, auf 6.800 m ³ /h hochfahren	100	keiner		
				160	keiner		
				210	keiner		
				260	keiner		
				300	1	≈ 6	74
VR 3 V 1AAA3	keine	Gas-Strahlwand zentral	von Beginn an 12.500 m ³ /h über südlichen Strang, wenn $\vartheta_1 \approx \text{const.}$ (≈ 7 min), große Klappe auf, umschalten auf nördlichen Strang	210	keiner		
				260	keiner		
				300	keiner		

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q}_A [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 4 V 1AAA4 V 5	keine	Gas-Strahlwand zentral	wenn $\vartheta_1 \approx \text{const.}$ ($\approx 6 \dots 3$ min), große Klappe auf von Beginn an 6.800 m ³ /h durch kleine Klappe	160	keiner		
				210	keiner		
				260	1	6,5	76
				300	2	2AAA4	76AAA81
				300	3	2AAA10	81AAA73
VR 5 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand West	RWA geschlossen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	keiner		
				300	4	9AAA18	83AAA74
VR 6 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand West	große Klappe von Beginn an offen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	1	6	77
				300	3	5AAA13	77AAA78
VR 7 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand zentral	große Klappe von Beginn an offen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	keiner		
				300	2	7AAA9	80AAA81
VR 8 V 1AAA6	keine	Trichter-Brenner zentral	RWA geschlossen	55	keiner		
				117	keiner		
				250	keiner		
				420	3	2AAA8	85AAA76
				630	8	1AAA9	90AAA83
				880	9	1AAA4	112AAA84

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q}_A [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 9 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner zentral	große Klappe von Beginn an offen	250	keiner		
				420	4	2AAA10	89AAA78
				610	9	1AAA14	96AAA80
				830	9	1AAA5	108AAA82
VR 10 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner unter großer RWA	große Klappe von Beginn an offen	170	keiner		
				280	keiner		
				490	keiner		
				700	7	4AAA15	83AAA88
VR 11 V 1AAA4a	keine	Trichter-Brenner West	große Klappe von Beginn an offen	230	2	10AAA13	81AAA78
				360	5	1AAA9	85AAA71
				570	9	1AAA12	101AAA79
				815	9	1AAA6	97AAA74
				930	9	1AAA6	103AAA84
VR 12 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand zentral	RWA geschlossen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	1	15	76
				300	3	7AAA17	84AAA73
VR 13 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand West	RWA geschlossen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	1	15	78
				300	4	4AAA19	78AAA74

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q} [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 14 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand zentral	große Klappe von Beginn an offen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	2	≈ 7	79AAA83
				300	4	5AAA15	82AAA75
VR 15 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand West	große Klappe von Beginn an offen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	2	9AAA10	76AAA77
				300	3	3AAA12	79AAA73
VR 16 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand West	wenn $\vartheta_1 \approx 70EC$ ($\infty \rightarrow$ kleine Klappe bleibt zu, nicht auf 9.700 m ³ /h hochfahren)	160	keiner		
				210	keiner		
				260	2	7AAA8	77AAA76
				300	3	4AAA11	75AAA80
VR 17 V 1AAA4	keine	Gas-Strahlwand zentral	wenn $\vartheta_1 \approx 70EC$ ($\infty \dots 3$ min), kleine Klappe auf, auf 9.700 m ³ /h hochfahren	160	keiner		
				210	keiner		
				260	keiner		
				300	2	8AAA10	75AAA81
VR 18 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner zentral	RWA geschlossen	250	2	10AAA12	77AAA79
				420	6	2AAA13	89AAA74
				630	9	1AAA9	102AAA80
				880	9	1AAA3	110AAA85
VR 19 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner West	RWA geschlossen	250	2	12AAA13	78AAA76
				420	6	1AAA12	87AAA75
				630	9	1AAA7	107AAA77
				880	9	1AAA3	107AAA89

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q} [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 20 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner zentral	große Klappe von Beginn an offen	250	3	6AAA14	82AAA70
				420	6	2AAA14	90AAA76
				630	8	1AAA8	100AAA80
				880	9	1AAA4	104AAA93
VR 21 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner West	große Klappe von Beginn an offen	250	4	5AAA18	79AAA71
				420	8	2AAA13	90AAA69
				630	9	1AAA7	94AAA77
				880	9	1AAA2	102AAA83
VR 22 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner zentral	wenn $\vartheta_1 \approx 70\text{EC}$ ($\approx 5 \dots 0,5$ min), kleine Klappe auf, auf 9.700 m ³ /h hochfahren	250	2	7AAA11	≈ 78
				420	4	2AAA11	86AAA75
				630	9	1AAA11	101AAA73
				880	9	1AAA3	115AAA85
VR 23 V 1AAA4	keine	Trichter-Brenner West	wenn $\vartheta_1 \approx 70\text{EC}$ ($\infty \dots 1,5$ min), kleine Klappe auf, auf 9.700 m ³ /h hochfahren	250	3	6AAA15	76AAA69
				420	7	2AAA14	85AAA74
				630	9	1AAA6	105AAA76
				880	9	1AAA2	125AAA92
VR 24 V 1AAA4	25 cm	Gas-Strahlwand zentral	RWA geschlossen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	1	13	75
				300	2	≈ 7	79AAA81
VR 26 V 1AAA4	25 cm	Gas-Strahlwand zentral	große Klappe von Beginn an offen	160	keiner		
				210	keiner		
				260	1	13	74
				300	2	9AAA10	73AAA79

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q} [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 28 V 1AAA4	25 cm	Gas-Strahlwand West	wenn $\vartheta_1 \approx 70\text{EC}$ ($\infty \Rightarrow$ kleine Klappe bleibt zu, nicht auf 9.700 m ³ /h hochfahren)	160	keiner		
				210	keiner		
				260	1	13	75
				300	2	≈ 9	78AAA77
VR 29 V 1AAA4	25 cm	Gas-Strahlwand zentral	wenn $\vartheta_1 \approx 70\text{EC}$ ($\infty \dots 4$ min), kleine Klappe auf, auf 9.700 m ³ /h hochfahren	160	keiner		
				210	keiner		
				260	keiner		
				300	1	12	74
VR 29a V 1AAA4	25 cm	Gas-Strahlwand zentral	wie VR 29 – jedoch von Beginn an 9.700 m ³ /h über südlichen Strang, wenn $\vartheta_1 \approx 70\text{EC}$ ($\infty \Rightarrow$ kleine Klappe bleibt zu, nicht auf nördlichen Strang umschalten)	160	keiner		
				210	keiner		
				260	keiner		
				300	keiner		
VR 30 V 1AAA4	25 cm nicht um RWA	Trichter-Brenner zentral	RWA geschlossen	250	4	5AAA13	84AAA76
				420	9	1AAA15	88AAA77
				630	9	1AAA5	103AAA82
				880	9	1AAA3	105AAA82
VR 30a V 1AAA4	25 cm wie VR 30 jedoch mit Rauch- schürzen um RWA	Trichter-Brenner zentral	RWA geschlossen	250	keiner		
				420	4	4AAA12	79AAA72
				630	9	1AAA15	95AAA80
				880	9	1AAA6	98AAA84
VR 32 V 1AAA4	25 cm	Trichter-Brenner zentral	große Klappe von Beginn an offen	250	keiner		
				420	5	4AAA17	82AAA74
				630	8	2AAA15	88AAA80
				880	9	1AAA6	98AAA87

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q} [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 34 V 1AAA4	25 cm nicht um RWA	Trichter-Brenner zentral	wenn $\vartheta_1 \approx 70\text{EC}$ ($\approx 2,5 \dots 0,3$ min), kleine Klappe auf, auf 9.700 m ³ /h hochfahren	250	3	3AAA13	79AAA71
				420	8	2AAA15	84AAA73
				630	9	1AAA6	102AAA76
				880	9	1AAA2	108AAA77
VR 34a V 1AAA4	25 cm wie VR 34 jedoch mit Rauch- schürzen um RWA	Trichter-Brenner zentral	wenn $\vartheta_1 \approx 70^\circ\text{C}$ ($\infty \dots 2$ min), kleine Klappe auf, auf 9.700 m ³ /h hochfahren	250	keiner		
				420	2	5	80AAA85
				630	7	2AAA17	95AAA79
				880	9	1AAA6	101AAA78
VR 34b V 1AAA4	25 cm	Trichter-Brenner zentral	wie VR 34a – jedoch von Beginn an 9.700 m ³ /h über südlichen Strang, wenn $\vartheta_1 \approx 70^\circ\text{C}$ ($\infty \dots 0,5$ min), kleine Klappe auf, umschalten auf nördlichen Strang	250	keiner		
				420	2	6AAA7	74AAA83
				630	6	2AAA11	94AAA79
				880	9	1AAA8	101AAA84
VR 36 V 1+2	25 cm	Trichter-Brenner zentral	kleine Klappe von Beginn an offen, wenn $\vartheta_1 \approx 70^\circ\text{C}$ ($\approx 8 \dots 2$ min), auf 9.700 m ³ /h hochfahren	250	1	12,5	78
				420	5	3AAA17	87AAA69
VR 37 V 1+2	25 cm	Trichter-Brenner zentral	von Beginn an 9.700 m ³ /h durch kleine Klappe	250	keiner		
				420	4	4AAA13	85AAA73
VR 38 V 1+2	25 cm	Trichter-Brenner zentral	große Klappe von Beginn an offen	250	keiner		
				420	6	5AAA16	88AAA69
VR 39 V 1	25 cm	Trichter-Brenner zentral (c)	große Klappe von Beginn an offen	250	9	3AAA12	86AAA72
				⋮			
				880			

Versuchsreihe Versuche	Rauch- schürzen	Wärmequelle Position	Rauchgas-Absaugung	Sprinkler-Reaktionen			
				\dot{Q}^A [kW]	Anzahl	t_A [min]	ϑ_A [EC]
VR 40 V 1	25 cm	Trichter-Brenner zentral (c)	RWA geschlossen	250 ⋮ 880	9	5AAA11	92AAA71
VR 41 V 1	25 cm	Trichter-Brenner zentral (c)	kleine Klappe von Beginn an offen, wenn $\vartheta_1 \approx 70^\circ\text{C}$ (≈ 4 min), auf 9.700 m ³ /h hochfahren	250 ⋮ 880	9	5AAA13	87AAA74
VR 42 V 1	25 cm	Trichter-Brenner zentral (c)	von Beginn an 9.700 m ³ /h durch kleine Klappe	250 ⋮ 880	9	5AAA11	83AAA73
VR 43 V 1	25 cm	Trichter-Brenner West (c)	von Beginn an 9.700 m ³ /h durch kleine Klappe	250 ⋮ 880	9	5AAA10	90AAA78
VR 44 V 1	25 cm	Trichter-Brenner West (c)	RWA geschlossen	250 ⋮ 880	9	6AAA17	84AAA76
VR 45 V 1	25 cm	Trichter-Brenner West (c)	große Klappe von Beginn an offen	250 ⋮ 880	9	6AAA15	83AAA75
VR 46 V 1	25 cm	Trichter-Brenner zentral	große Klappe von Beginn an offen – wie VR 32, aber gleichzeitig 9.700 m ³ /h nur über südlichen Strang	420	4	4AAA17	82AAA73
VR 47 V 1+2	25 cm	Trichter-Brenner zentral	RWA geschlossen – wie VR 30 aber, von Beginn an 9.700 m ³ /h über südlichen Strang:	420	2	7AAA8	≈ 83
				420	2	7AAA11	77AAA80

Tabelle 3: Der Vergleich von RWA/Sprinkler-Versuchen, bei denen das Rauchgas von Versuchsbeginn an infolge von Naturkonvektion abzieht, mit solchen Versuchen, bei denen die RWA geschlossen bleiben

Leistungsstufen [kW]	VR 1, 12: RWA geschlossen	VR 4, 7, 14: Naturkonv. durch große RWA	
	Gas-Strahlwand, zentral, keine Rauchschürzen		
160	praktisch kein Unterschied		
210			
260			
300			Sprinkler-Reaktion eher früher
	VR 5, 13: RWA geschlossen	VR 6, 15: Naturkonvekt. durch große RWA	
	Gas-Strahlwand, West, keine Rauchschürzen		
160	praktisch kein Unterschied		
210			
260			bei ähnl. $\vartheta(t)$ – 1 Sprinkler mehr
300			Sprinkler 2.3+2.4 deutlich früher
	VR 24: RWA geschlossen	VR 26: Naturkonvekt. durch große RWA	
	Gas-Strahlwand, zentral, 25-cm-Rauchschürzen		
160	praktisch kein Unterschied		
210			
260			
300			alle Temperaturen etwas geringer, Sprinkler-Reaktion 2...3 min später

noch Tabelle 3:

Leistungsstufen [kW]	VR 8, 18: RWA geschlossen Trichter-Brenner, zentral, keine Rauchschürzen	VR 9, 20: Naturkonvekt. durch große RWA
250	1 Sprinkler mehr	
420	1 Sprinkler mehr	
630	praktisch kein Unterschied	
880		
	VR 19: RWA geschlossen Trichter-Brenner, West, keine Rauchschürzen	VR 11, 21: Naturkonv. durch große RWA
250	bei	2 Sprinkler mehr, z.T. 5 min früher
420	ähnlichen	nahe RWA 2 Sprinkler mehr
630	Temperatur-	ähnliche Sprinkler-
880	kurven	Reaktionen
	VR 30a: RWA geschlossen Trichter-Brenner, zentral, 25-cm-Rauchschürzen	VR 32: Naturkonvekt. durch große RWA
250	praktisch kein Unterschied	
420		
630	alle Temperaturen etwas geringer, 8 statt 9 Sprinkler reagieren	
880	alle Temperaturen wieder ähnlich ebenso Sprinkler-Reaktionen	

Tabelle 4: Der Vergleich von RWA/Sprinkler-Versuchen, bei denen von Versuchsbeginn an das Rauchgas mit Hilfe der Rauchgas-Reinigungsanlage abgezogen wird, mit solchen Versuchen, bei denen die RWA geschlossen bleiben

Leistungsstufen [kW]	VR 1, 12: RWA geschlossen	VR 4;5: 6.800 m ³ /h durch kleine RWA
	Gas-Strahlwand, zentral, keine Rauchschürzen	
300	Temperaturverteilung und Sprinkler-Reaktionen sehr ähnlich	
	VR 30a: RWA geschlossen	VR 37: 9.700 m ³ /h durch kleine RWA
	Trichter-Brenner, zentral, 25-cm-Rauchschürzen	
250	Temperaturverteilung sehr ähnlich	
420	Temperaturverteilung und Sprinkler-Reaktion sehr ähnlich	
	VR 30a: RWA geschlossen	VR 36: 9.700 m ³ /h, wenn $\vartheta_1 \approx 70^\circ\text{C}$
	Trichter-Brenner, zentral, 25-cm-Rauchschürzen	
250	Temperaturen etwas höher, 1 Sprinkler aktiviert	
420	Temperaturverteilung und Sprinkler-Reaktion sehr ähnlich	

Tabelle 5: Der Vergleich der im Experiment ermittelten Sprinkler-Auslösezeiten [min] mit berechneten Werten — mit Hilfe der Formeln im Fire Protection Handbook, nach dem Iterationsverfahren [6], jeweils unter Verwendung der Originalformel für die Rauchgas-Temperatur und einer an das Experiment angepaßten Temperatur

	255 kW					300 kW					420 kW					630 kW				
	Iterat. [6]		FPHbook		Exp.	Iterat. [6].		FPHbook		Exp.	Iterat. [6].		FPHbook		Exp.	Iterat. [6].		FPHbook		Exp.
	orig.	korr.	orig.	korr.		orig.	korr.	orig.	korr.		orig.	korr.	orig.	korr.		orig.	korr.			
r ₁	∞	3,5 ...9,5	∞	6 ...13,5	4 ...13	13,5	2,5 ...5	∞	4 ...9	3,5 ...13	3,2	1,5 ...2,5	5,3	1,5 ...5	1 ...8	1,5	1,2 ...1,6	2,3	2 ...2,5	0,7 ...2
r ₂	∞	14 ...∞	∞	∞	12 ...15	∞	6 ...∞	∞	10 ...∞	11 ...15	∞	3 ...5	∞	5 ...10	4 ...12	5,6	2 ...3	9,3	3 ...4,5	1,5 ...5
r ₃											∞	5 ...9,5	∞	8 ...13,5	7 ...13	∞	2,5 ...4	∞	4 ...6,5	2 ...8
r ₄											∞	7 ...13	∞	11 ...18	9 ...15	∞	3 ...10	∞	5 ...8,5	3 ...15
r ₅											∞	12 ...∞	∞	16 ...∞	15 ...∞	∞	4,5 ...9	∞	7 ...13	5 ...15
r ₆											∞	14,5 ...∞	∞	20 ...∞	./.	∞	5,5 ...11	∞	8,5 ...16	./.
r ₇																∞	5,5 ...10	∞	8,5 ...15	./.

Tabelle 6: Die Streubreite der Sprinkler-Auslösezeiten in Minuten bei den durchgeführten Versuchen in Abhängigkeit von der Versuchskonstellation und vom Abstand von der Wärmequelle für die beiden höchsten Leistungstufen (jeweils in der oberen Zeile) und die Anzahl der aktivierten Sprinkler bezogen auf ihre maximal mögliche Zahl (in der unteren Zeile)

Abstand r [m]	Leistung [kW]	geschlossene Decke		Naturkonvektion		15.000 m ³ /h	
		25 cm	keine	25 cm	keine	25 cm	keine
0,75	630	1...1,5 4/4	0,7...1 6/6	≈2 2/2	1...1,5 7/8	1...2 4/4	≈1 4/4
	420	1...6 4/4	1,5...4 6/6	4...5 3/4	1,5...8 6/6	1,5...5 6/6	1...2,5 4/4
1,68	630	2...4,5 4/4	1,5...3 6/6	4...5 2/2	1,5...3 7/8	2...4,5 4/4	1,5...3,5 4/4
	420	4,5...12 4/4	4,5...8 5/6	7,5...12 4/4	5...8 5/6	5,5...10 4/6	4...11 4/4
2,25	630	3...5 2/2	2...6 3/3	6 1/1	3...4,5 4/4	3...8 2/2	2...4,5 2/2
	420	7 1/2	11,5...13 2/3	12,5 1/2	8,5...9,5 2/3	11 1/3	7 1/2
2,7...3,1	630	3...13 6/6	3,5...8,5 9/9	10...15 3/3	4...10 12/12	3...11 4/6	3...10 6/6
	420	10,5 3/6	≈13 2/9	./. 0/6	11...15 5/9	14...15 3/9	9...13 2/6
3,75...4,04	630	5...15 2/2	7...9 2/3	./. 0/1	6,5...14 4/4	6 1/2	10,5 1/2
	420	15 1/2	./. 0/3	./. 0/2	./. 0/3	./. 0/3	./. 0/2

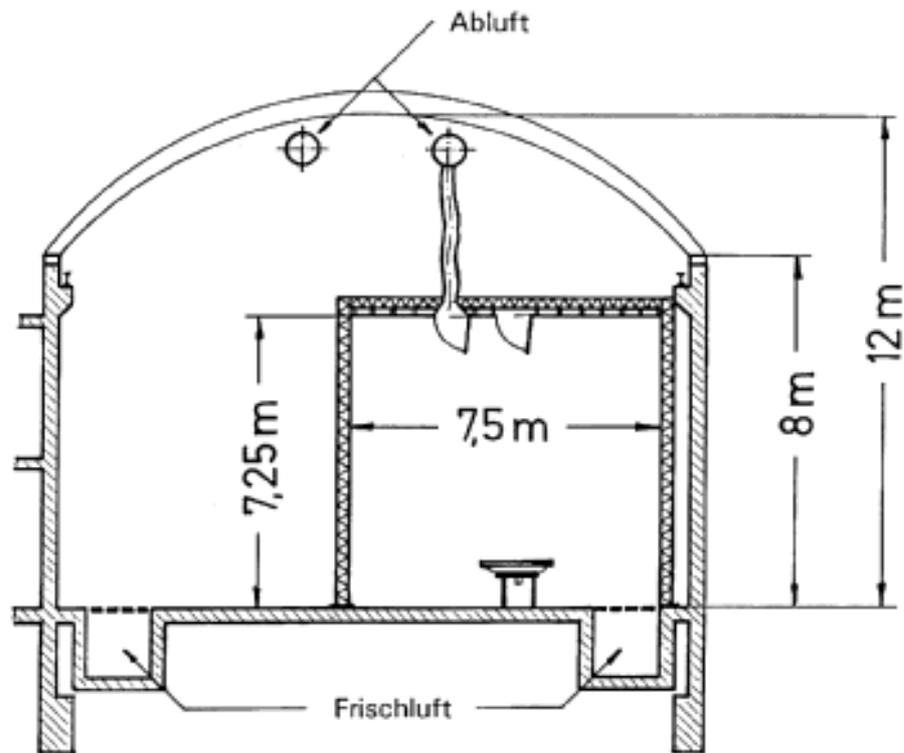


Bild 1: Querschnitt durch die Brandversuchshalle mit dem Versuchstand für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen

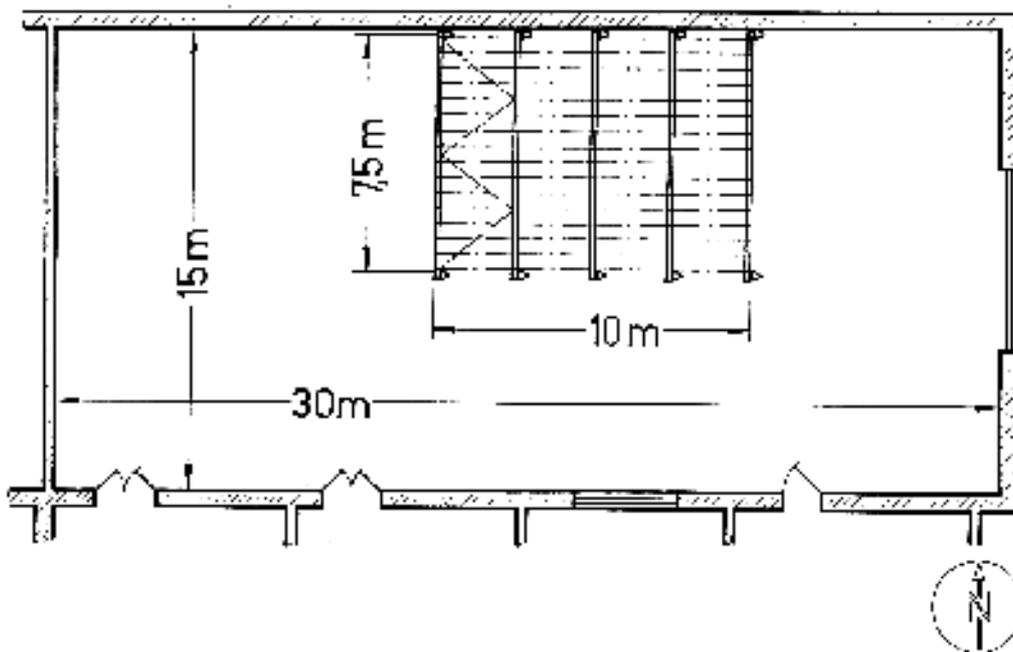


Bild 2: Grundriss der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik mit dem Versuchstand für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen

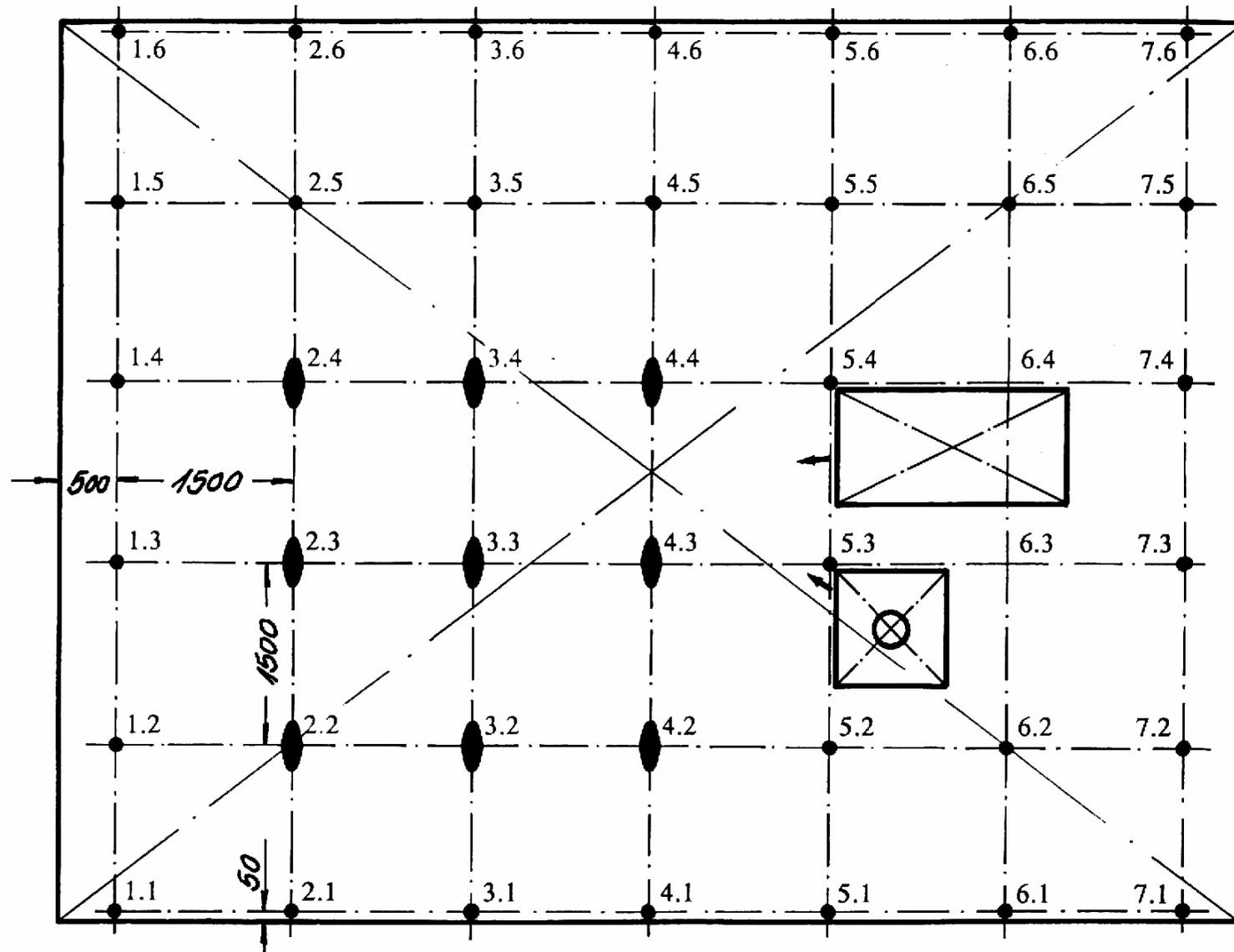


Bild 3: Zwischendecke (Fläche: 7,5·10 m², Höhe:7,25 m) in der Brandversuchshalle der FFB zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinklern und RWA

- Position der Thermoelemente, 8 cm unter der Decke
- Position der Thermoelemente neben Sprinklern, Auslöseelemente 8 cm unter der Decke
- ← Position des Thermoelementes neben dem PRANDTL-Rohr, 2,8 cm unter der Decke

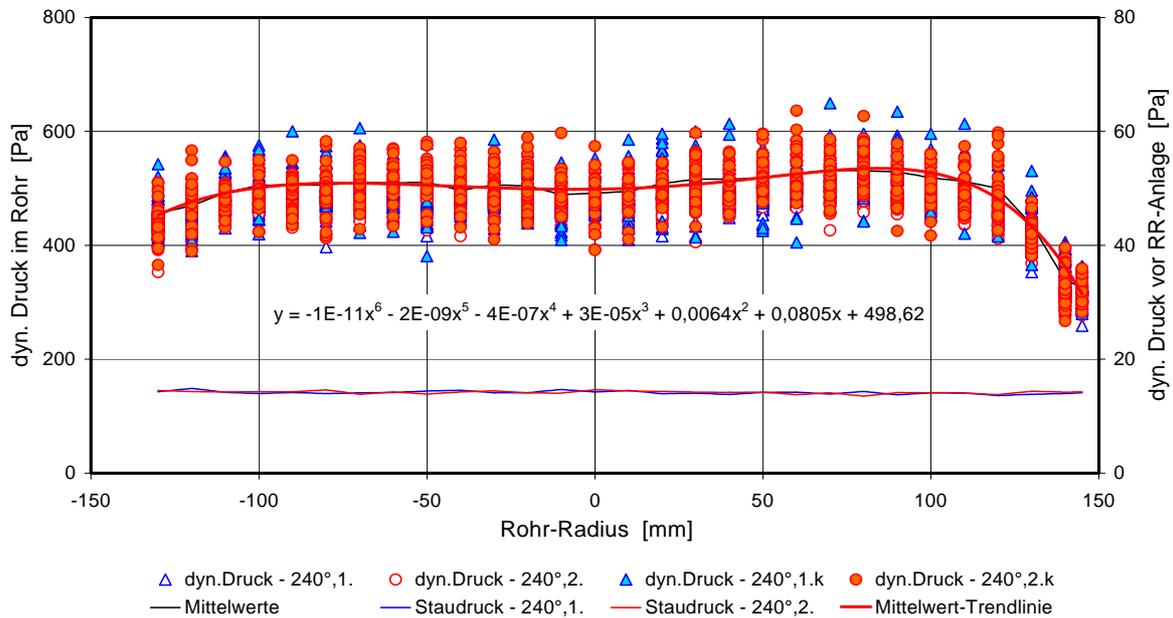


Bild 4: Die Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 240° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 10.000 m³/h

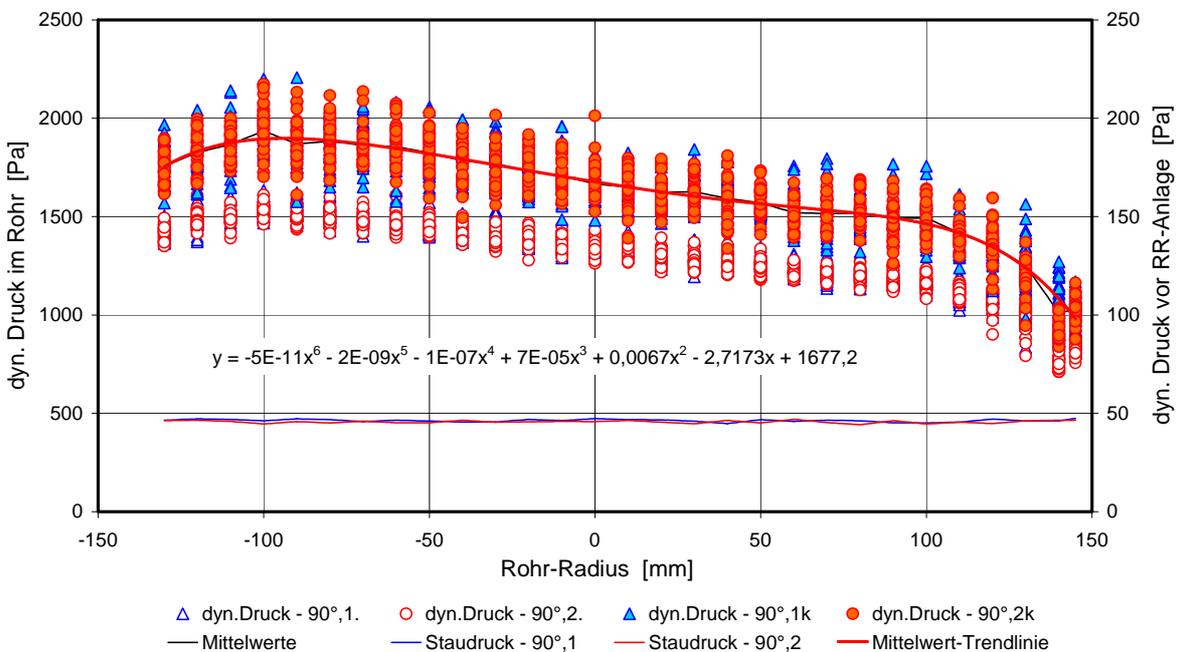


Bild 5: Die Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchsstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 90° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 20.000 m³/h

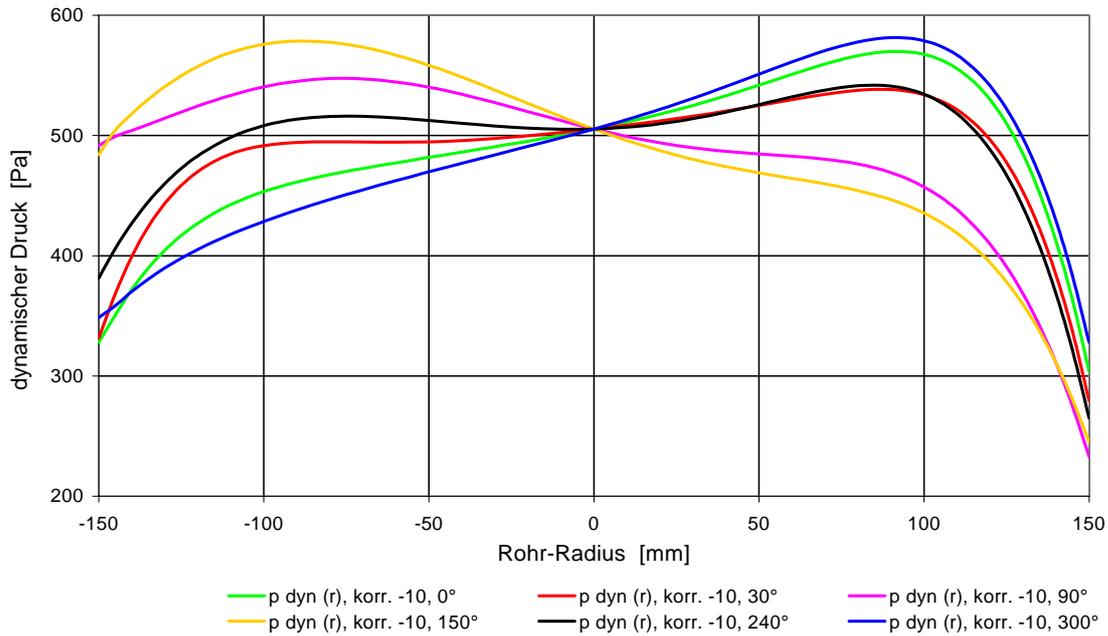


Bild 6: Die 6 Trendlinien der Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 0°, 30°, 90°, 150°, 240° und 300° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 10.000 m³/h

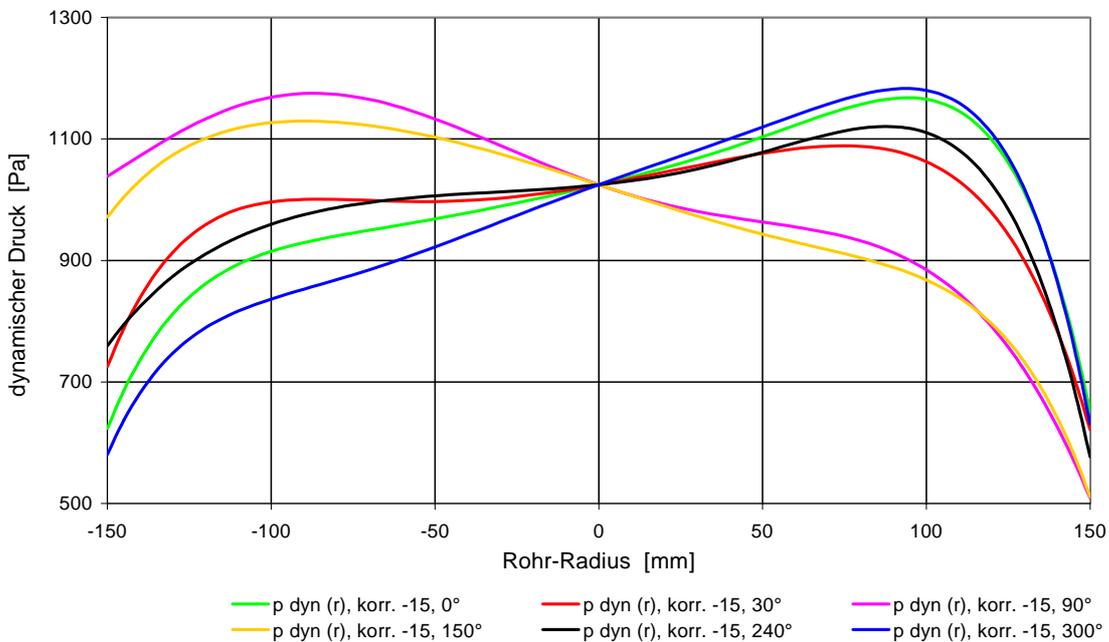


Bild 7: Die 6 Trendlinien der Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 0°, 30°, 90°, 150°, 240° und 300° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 15.000 m³/h

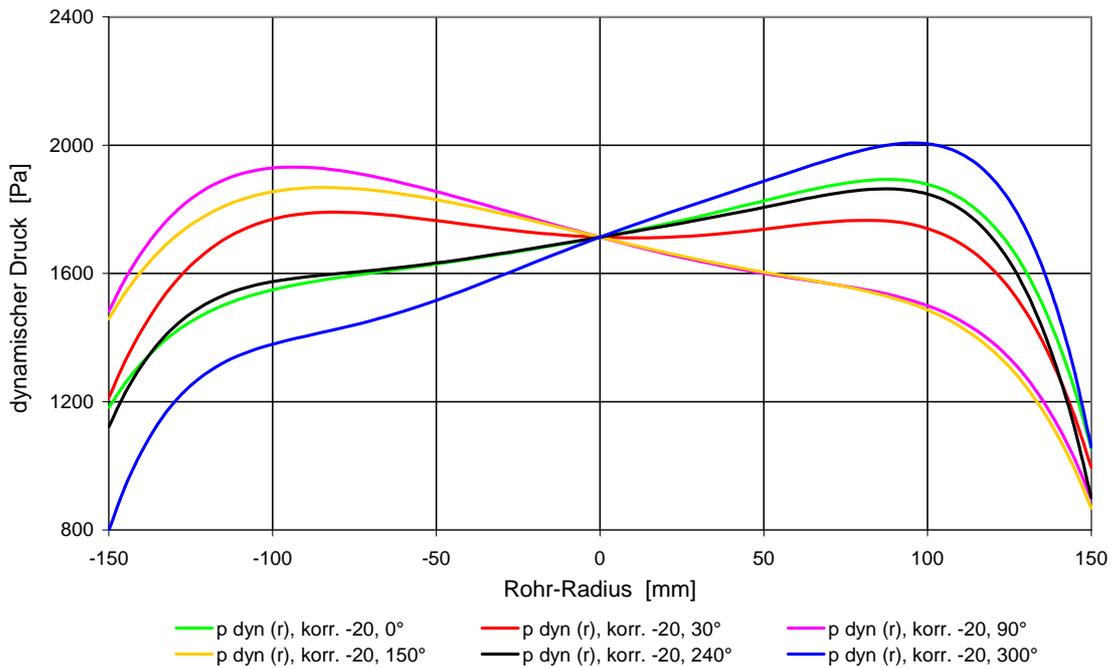


Bild 8: Die 6 Trendlinien der Volumenstrom-Messung im Kalibrier-Rohr des Versuchstandes für die RWA/Sprinkler-Untersuchungen – unter 0°, 30°, 90°, 150°, 240° und 300° gegen die Horizontale bei einer nominellen Absaugleistung der Rauchgas-Reinigungsanlage von 20.000 m³/h

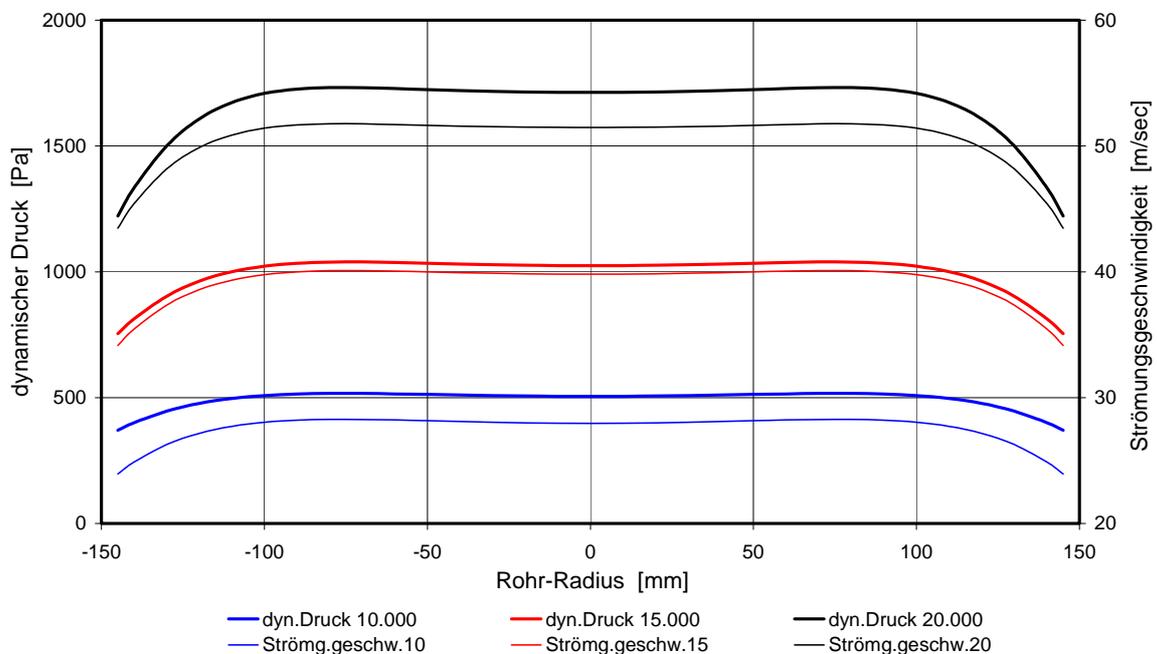
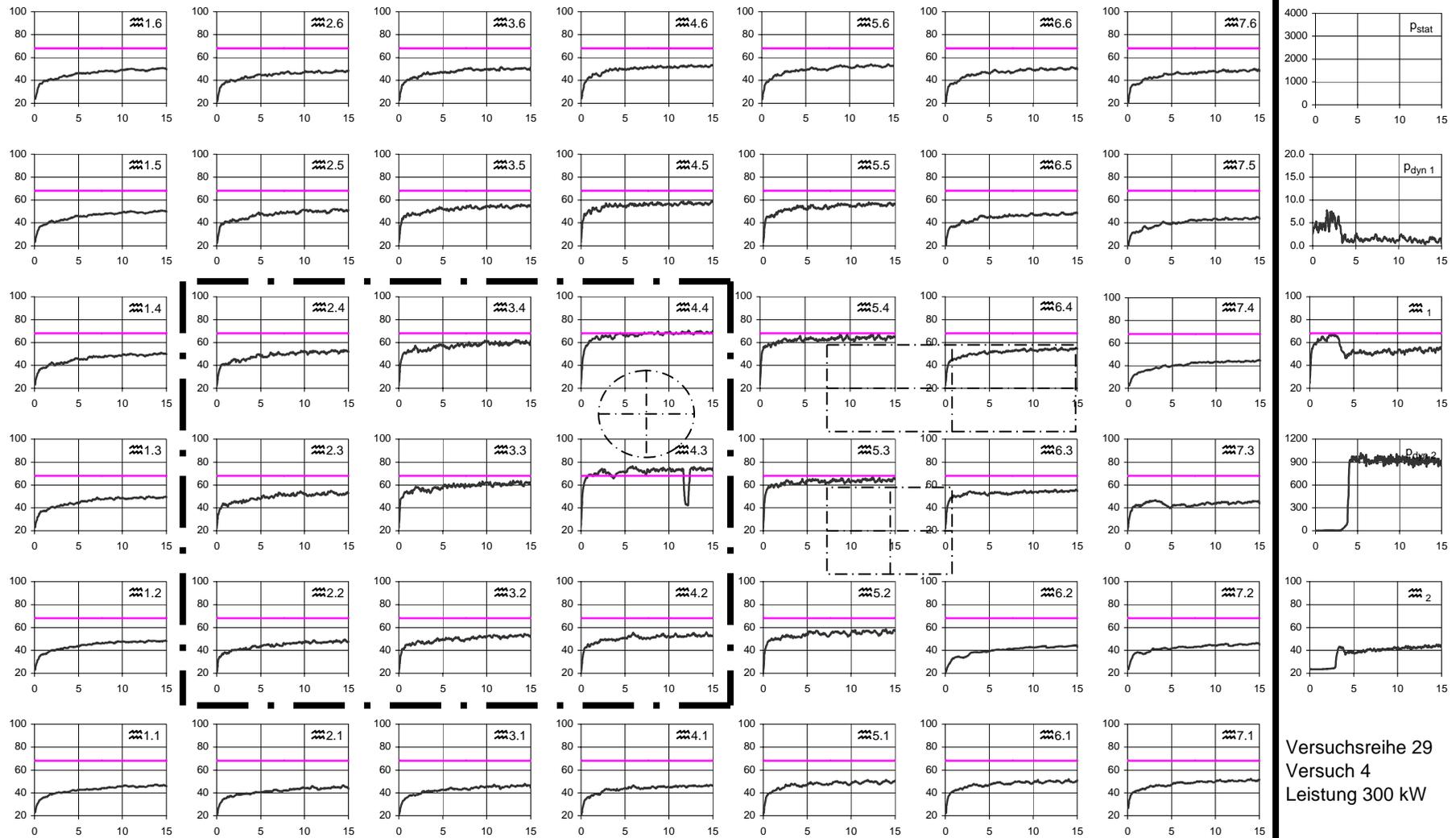
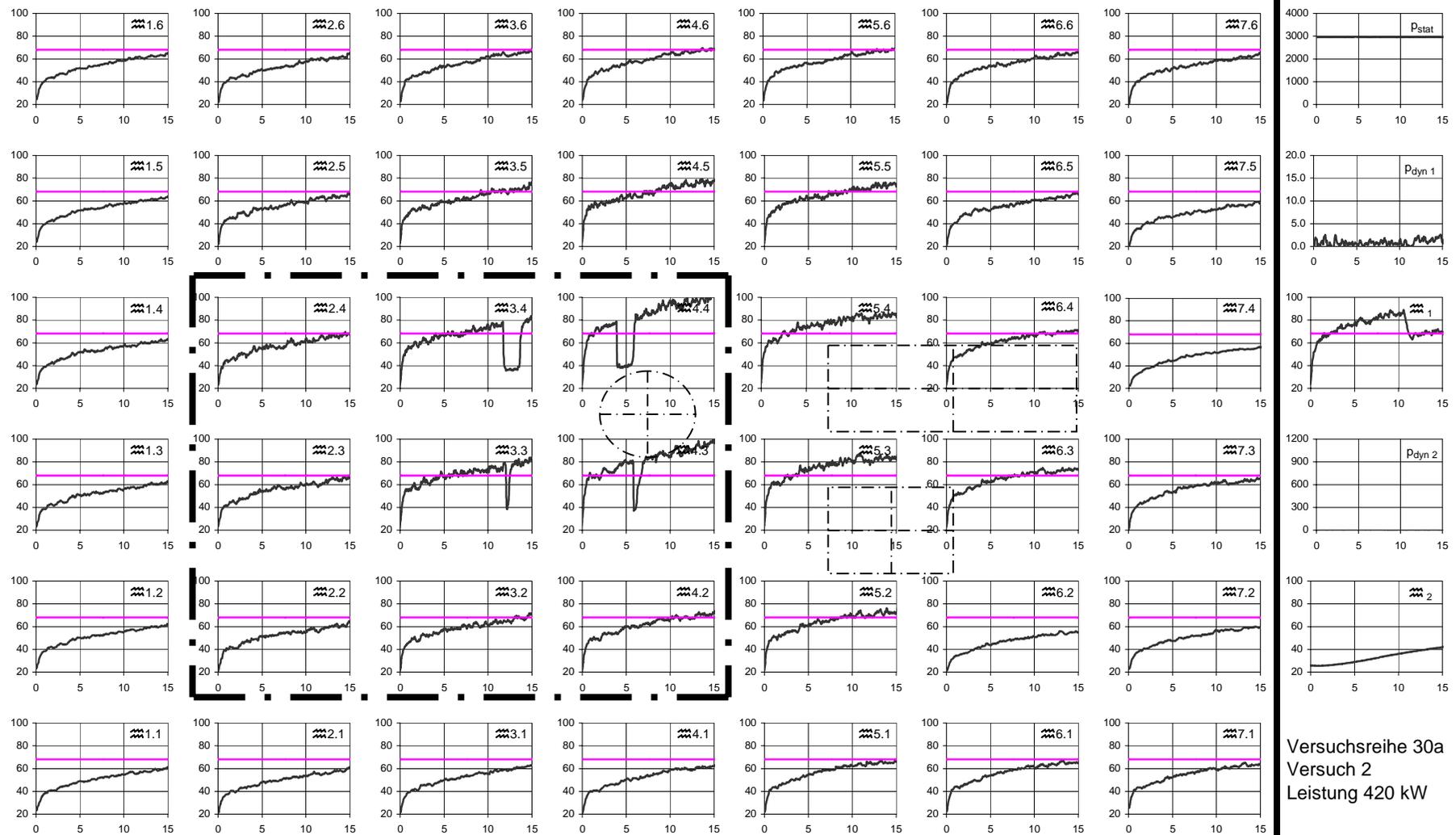


Bild 9: Die Volumenstrom-Kalibrierung am Versuchstand für die RWA/ Sprinkler-Untersuchungen – aufgetragen als dynamischer Druck bzw. Strömungsgeschwindigkeit – für nominelle Absaugleistungen der Rauchgas-Reinigungsanlage von 10.000, 15.000 und 20.000 m³/h



Versuchsreihe 29
 Versuch 4
 Leistung 300 kW

Bild 10: Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe der Gas-Strahlwand ($p_{\text{stat.}} = 0$) von 300 kW in der Position „zentral“. Decke und RWA mit 25-cm-Rauchschürzen eingefaßt. Wenn – nach 3 min – vor der kleinen RWA $\approx 70^\circ\text{C}$ erreicht werden, wird ihre Klappe geöffnet und ein Abgasvolumenstrom von $\approx 9.700 \text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt ($p_{\text{dyn.2}} \approx 920 \text{ Pa}$). — In dem strichpunktiert eingefaßten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Der Sprinkler bei Position 4.3 löst nach 12 min bei einer Rauchgas-Temperatur von 74°C aus. Nach 3 min wird die mobile Sonde 1 vor der kleinen RWA um 25 cm gesenkt, um 3 cm unter der Unterkante der Rauchschürze den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Rauchgas-Strömung zu messen.



Versuchsreihe 30a
 Versuch 2
 Leistung 420 kW

Bild 11: Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 420 kW ($p_{stat.} = 2.960 \text{ Pa}$) in der Position „zentral“. Beide RWA geschlossen ($p_{dyn.2} = 0$), Decke und RWA mit 25-cm-Rauchschürzen eingefasst. — In dem strichpunktiert umrahmten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Die Sprinkler bei den Positionen 4.4·3.3 lösen nach 4·12 min bei Rauchgas-Temperaturen von 79·72°C aus. Nach 11,5 min wird die mobile Sonde 1 von vor der großen RWA zur Position 2.4 verfahren, um in Höhe der Sprinkler-Fäßchen den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Deckenströmung zu messen.

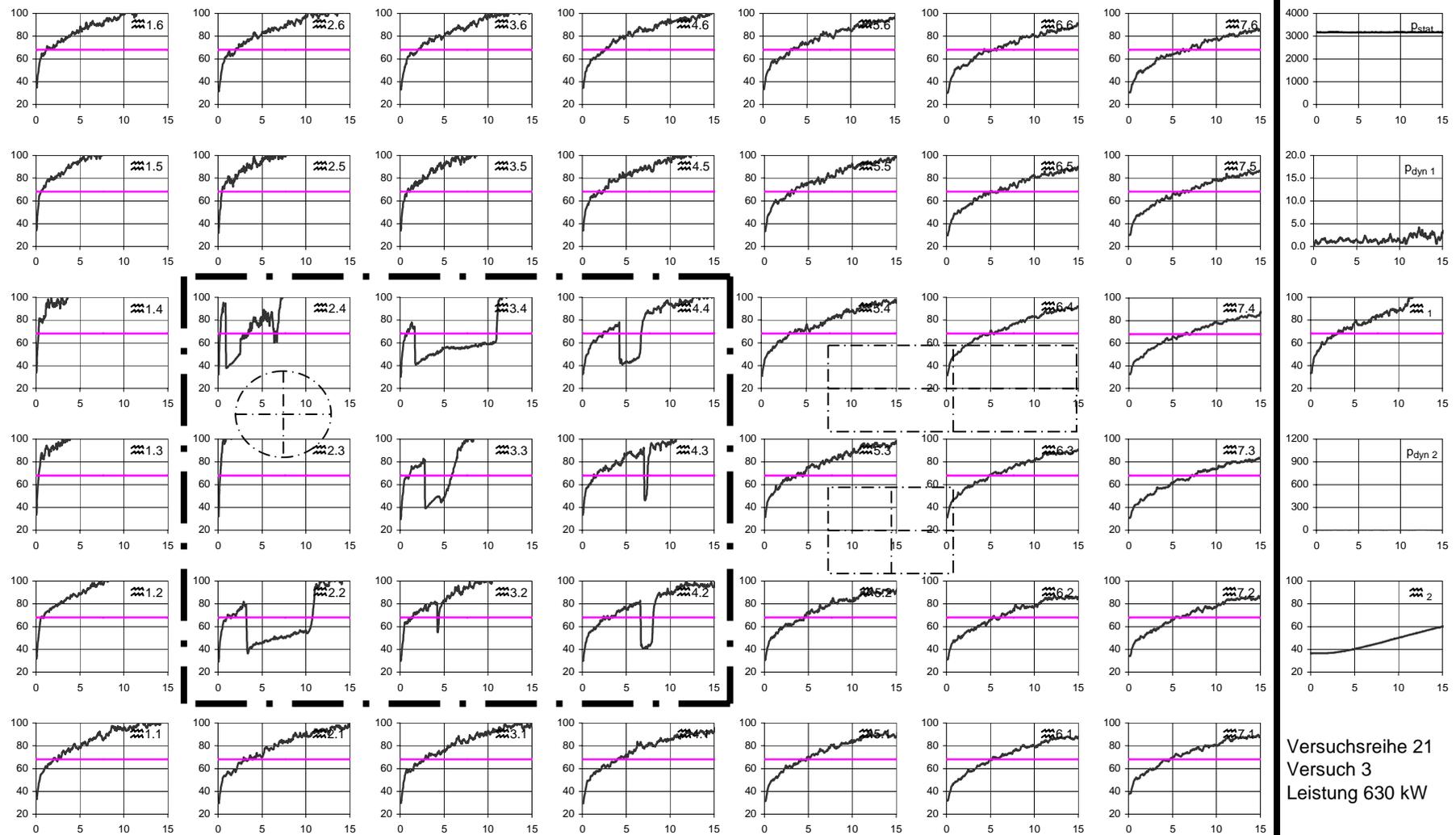


Bild 12: Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 630 kW ($p_{\text{stat.}} = 3.170 \text{ Pa}$) in der Position „West“. Die große RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen – Naturkonvektion ($p_{\text{dyn.2}} = 0$), keine Rauchschürzen. — In dem strichpunktiert eingefassten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Die Sprinkler bei den Positionen 2.4···4.3 lösen nach 1···7 min bei Rauchgas-Temperaturen von 94···74°C aus. Nach 11 min wird die mobile Sonde 1 von vor der großen RWA zur Position 4.3 verfahren, um in Höhe der Sprinkler-Fäßchen den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Deckenströmung zu messen.

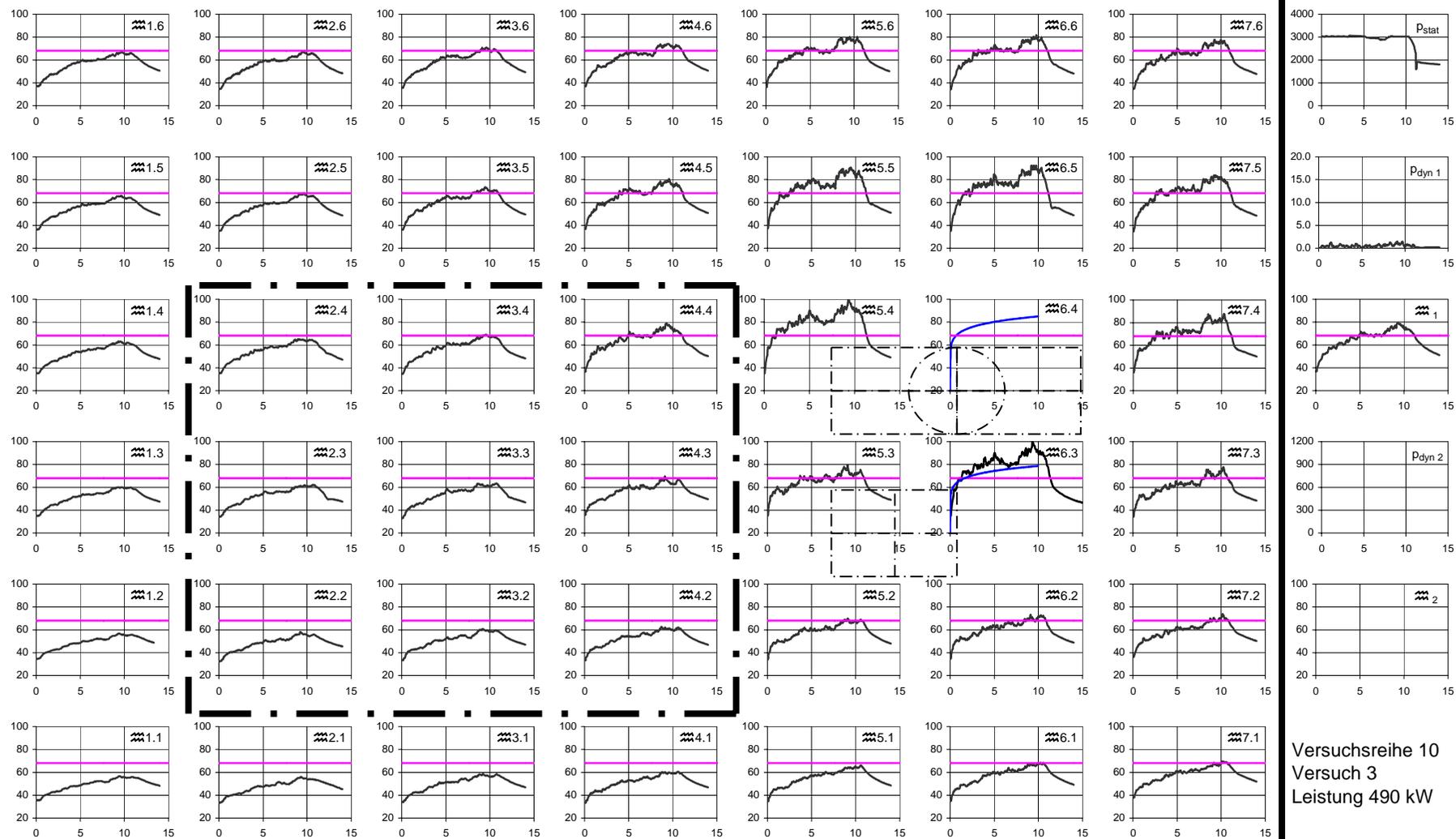


Bild 13: Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 490 kW ($p_{\text{stat.}} = 3.030 \text{ Pa}$) direkt unter der großen RWA. Die große RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen – Naturkonvektion ($p_{\text{dyn.2}} = 0$), keine Rauchschürzen. — In dem strichpunktiert eingefassten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert, von denen bei diesem Versuch keiner aktiviert wird. Die mobile Sonde 1 steht permanent beim Thermoelement 4.4.

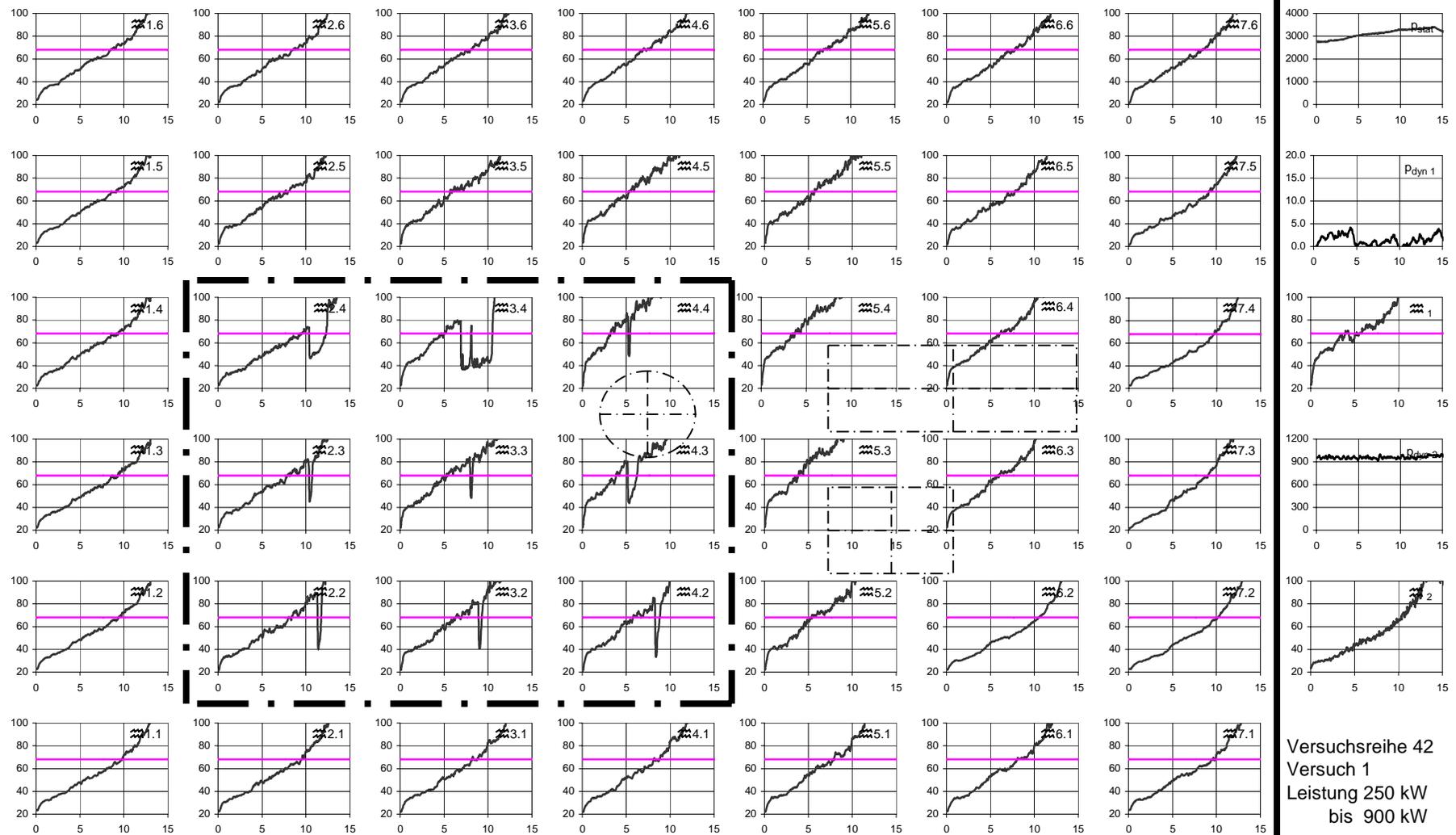


Bild 14: Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen unter der Decke des Versuchsstandes bei einer Leistungsabgabe des Trichter-Brenners von 250···900 kW ($p_{\text{stat.}} = 2.760 \cdots 3.400 \text{ Pa}$) in der Position „zentral“. Decke und RWA mit 25-cm-Rauchschürzen eingefaßt. Die kleine RWA-Klappe steht von Versuchsbeginn an offen – der Abgasvolumenstrom beträgt kontinuierlich $\approx 9.700 \text{ m}^3/\text{h}$ ($p_{\text{dyn.2}} \approx 950 \text{ Pa}$). — In dem strichpunktiert eingefaßten Feld sind neben den Thermoelementen die Sprinkler montiert. Die Sprinkler bei Position 4.3···2.2 lösen nach 5···11 min bei Rauchgas-Temperaturen von 85···73°C aus. Nach 4 min wird die mobile Sonde 1 vor der kleinen RWA um 25 cm gesenkt, um 3 cm unter der Unterkante der Rauchschürze den dynamischen Druck (und die Temperatur) in der Rauchgas-Strömung zu messen.

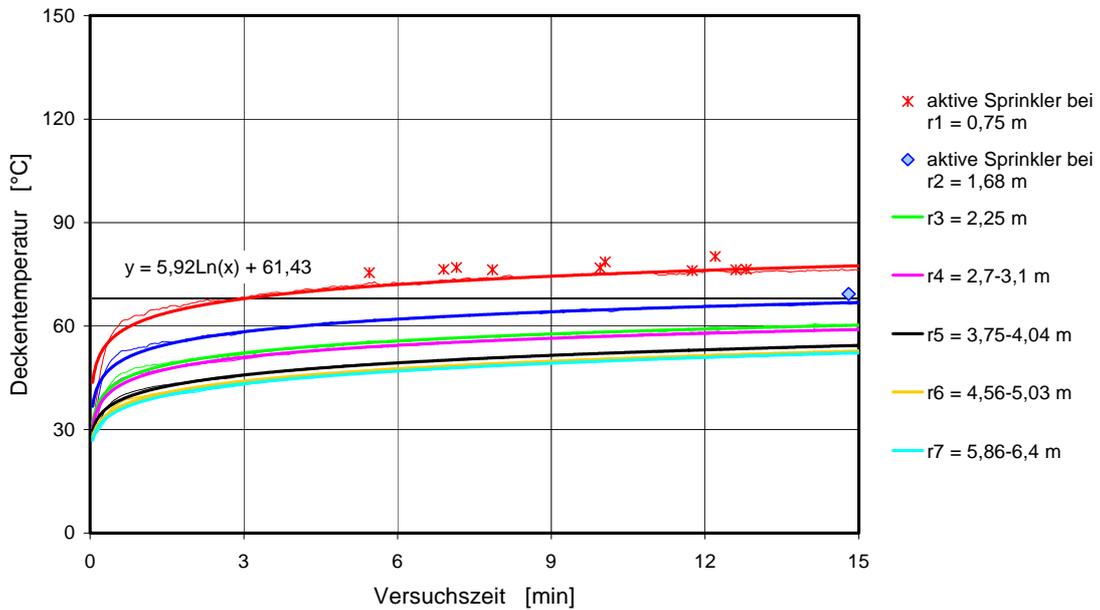


Bild 15: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit ≈ 255 kW Brennerleistung, ohne Rauchschürzen, RWA-Klappen geschlossen für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei 9 vergleichbaren Versuchen werden im inneren Kreis 10 von 18 und im zweiten Kreis 1 von 18 möglichen Sprinklern aktiviert.

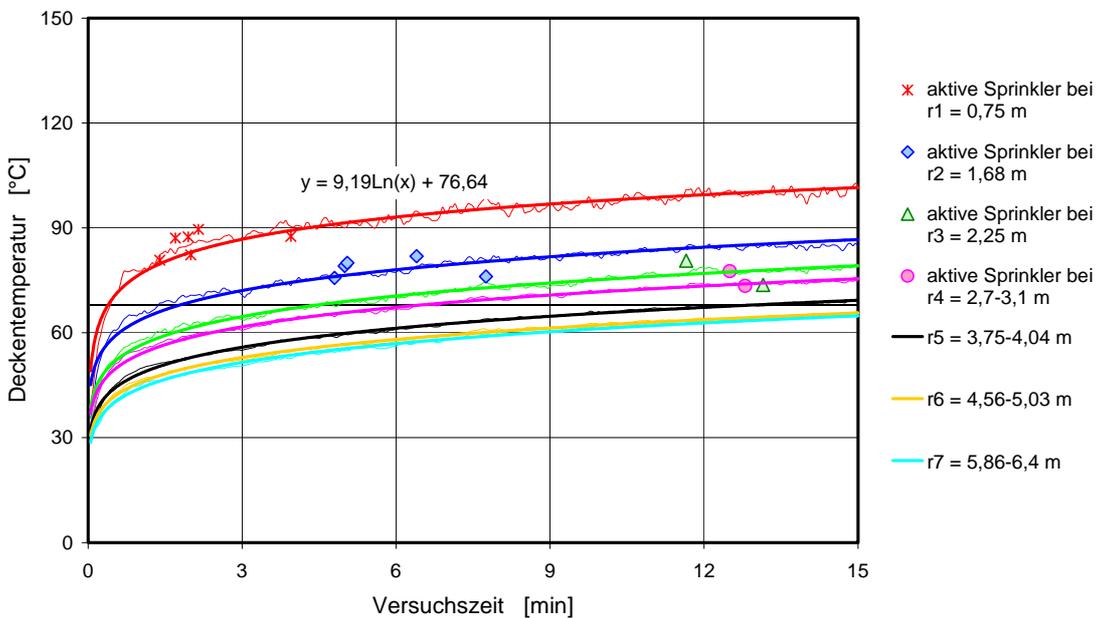


Bild 16: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit 420 kW Brennerleistung, ohne Rauchschürzen, RWA-Klappen geschlossen für verschiedene Abstände von der Mittelachse der Rauchgassäule, aufgetragen über der Versuchszeit. Bei 3 vergleichbaren Versuchen werden im inneren Kreis 6 von 6, im zweiten Kreis 5 von 6, im dritten Kreis 2 von 3 und im vierten Kreis 2 von 9 möglichen Sprinklern aktiviert.

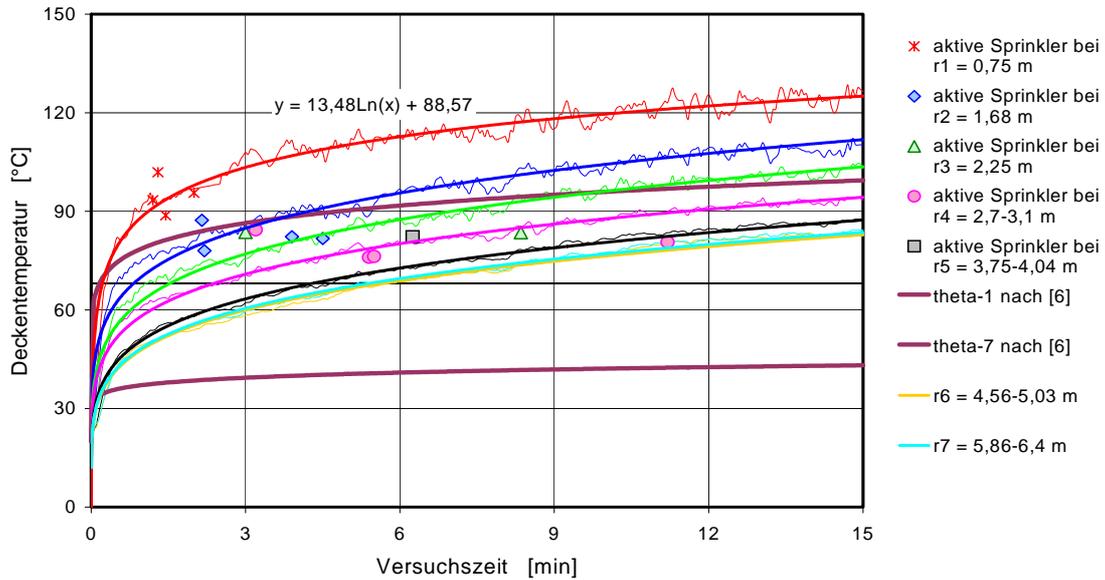


Bild 17: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschrzen, Rauchgas-Absaugung durch die kleine Klappe (15.000 m³/h nach dem Erreichen der Auslsetetemperatur) ffr verschiedene Abstnde von der Mittelachse der Rauchgassule, aufgetragen ber der Versuchszeit. Bei 2 vergleichbaren Versuchen werden im inneren Kreis 4 von 4, im zweiten Kreis 4 von 4, im dritten Kreis 2 von 2, im vierten Kreis 4 von 6 und im fnften Kreis 1 von 2 mglichen Sprinklern aktiviert.

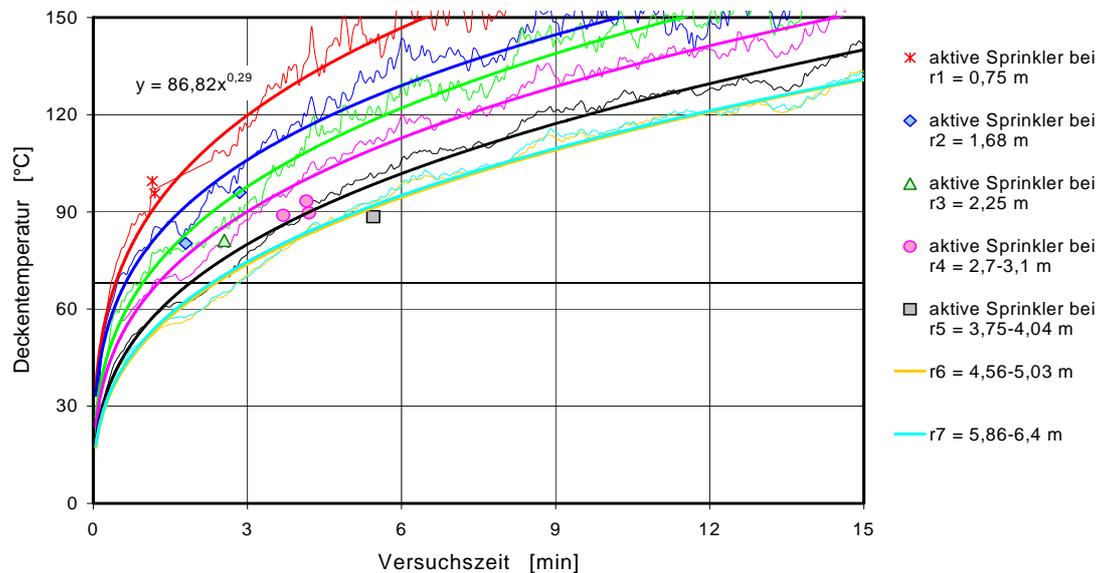


Bild 18: Die Entwicklung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke bei Versuchen mit 880 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschrzen, natrliche Konvektion des Rauchgases durch die groe RWA-Klappe von Versuchsbeginn an fr verschiedene Abstnde von der Mittelachse der Rauchgassule, aufgetragen ber der Versuchszeit. Bei diesem Versuch werden im inneren Kreis 2 von 2, im zweiten Kreis 2 von 2, im dritten Kreis 1 von 1, im vierten Kreis 3 von 3 und im fnften Kreis 1 von 1 mglichen Sprinklern aktiviert.

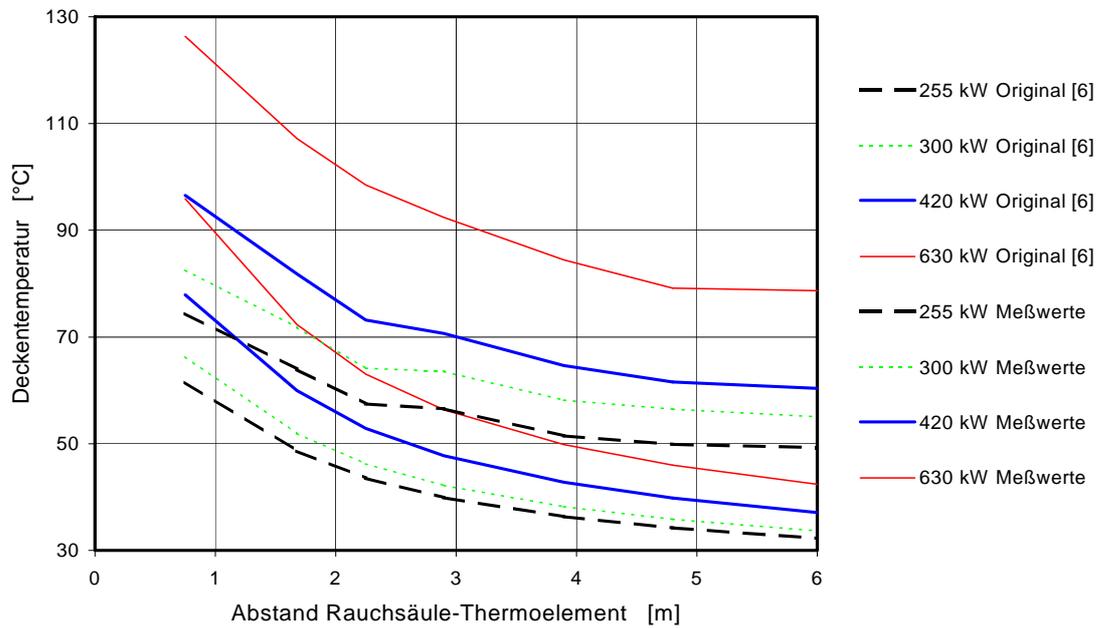


Bild 19: Die Berechnung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke mit Hilfe der im Fire Protection Handbook verzeichneten Formel im Vergleich zu den auf dem Versuchsstand gemessenen Temperaturen für die 4 Leistungsstufen 255; 300; 420 und 630 kW: Die berechneten Kurven liegen zu tief und fallen zu schnell.

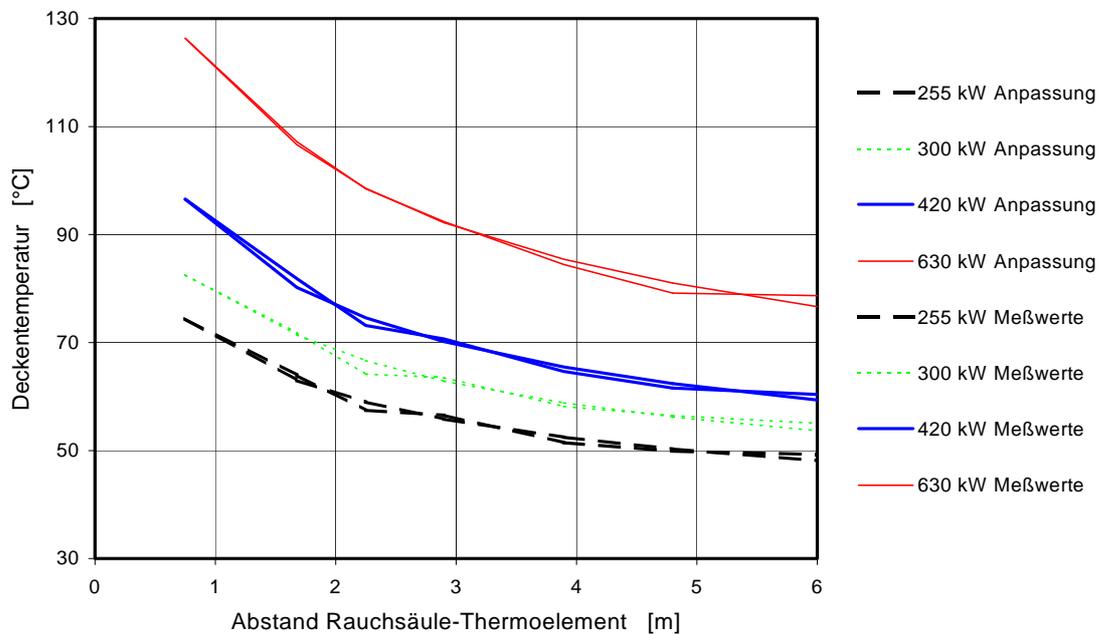


Bild 20: Die Berechnung der Rauchgas-Temperatur unter der Decke mit Hilfe der modifizierten Formel aus dem Fire Protection Handbook im Vergleich zu den auf dem Versuchsstand gemessenen Temperaturen für die 4 Leistungsstufen 255; 300; 420 und 630 kW

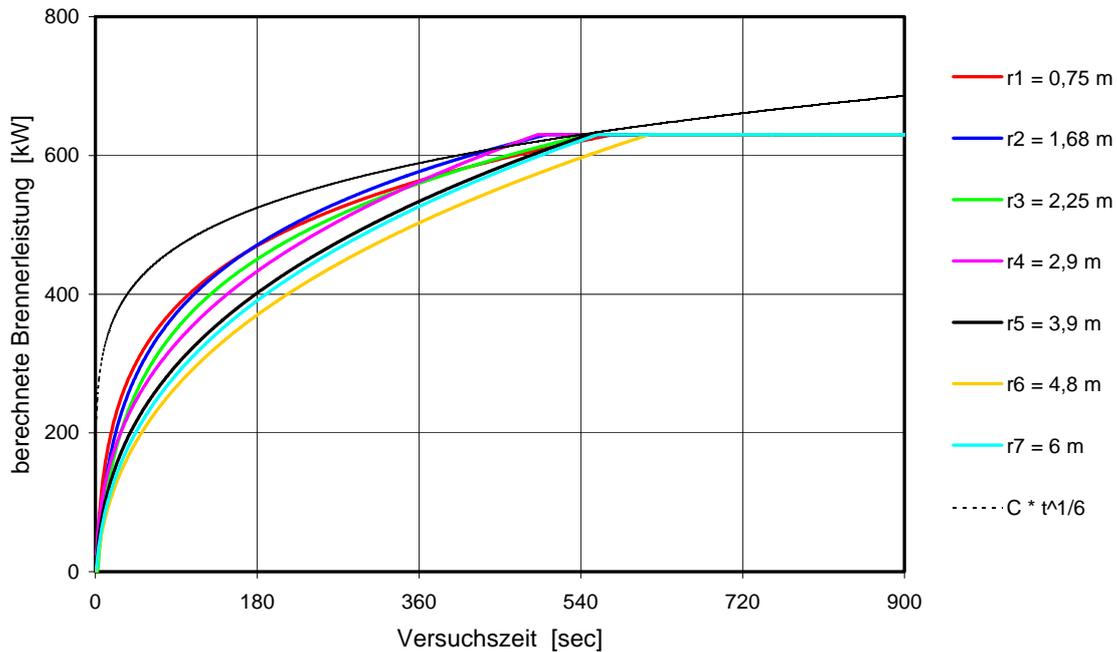


Bild 21: Die Leistungsentwicklung bei einer Brenner-Nominalleistung von 630 kW berechnet aus der Rauchgas-Temperatur unter der Decke mit Hilfe der modifizierten Formel aus dem Fire Protection Handbook für Naturkonvektion, ohne Rauchschürzen (dünne Kurve: Leistungsentwicklung nach Gleichung 3)

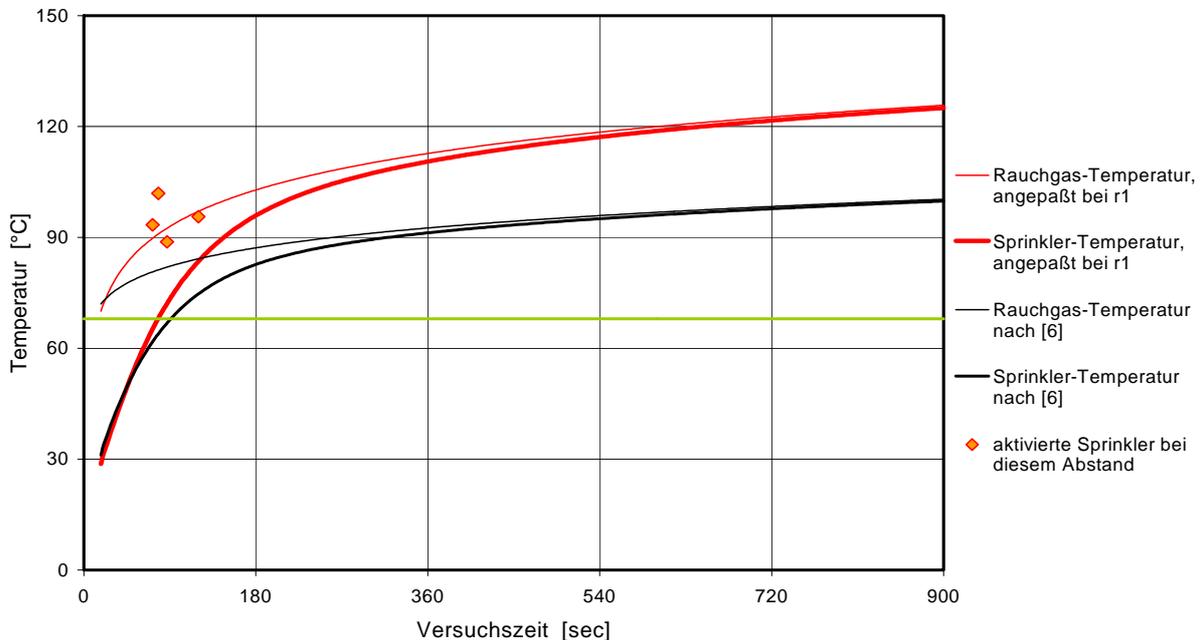


Bild 22: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_1 = 0,75$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.

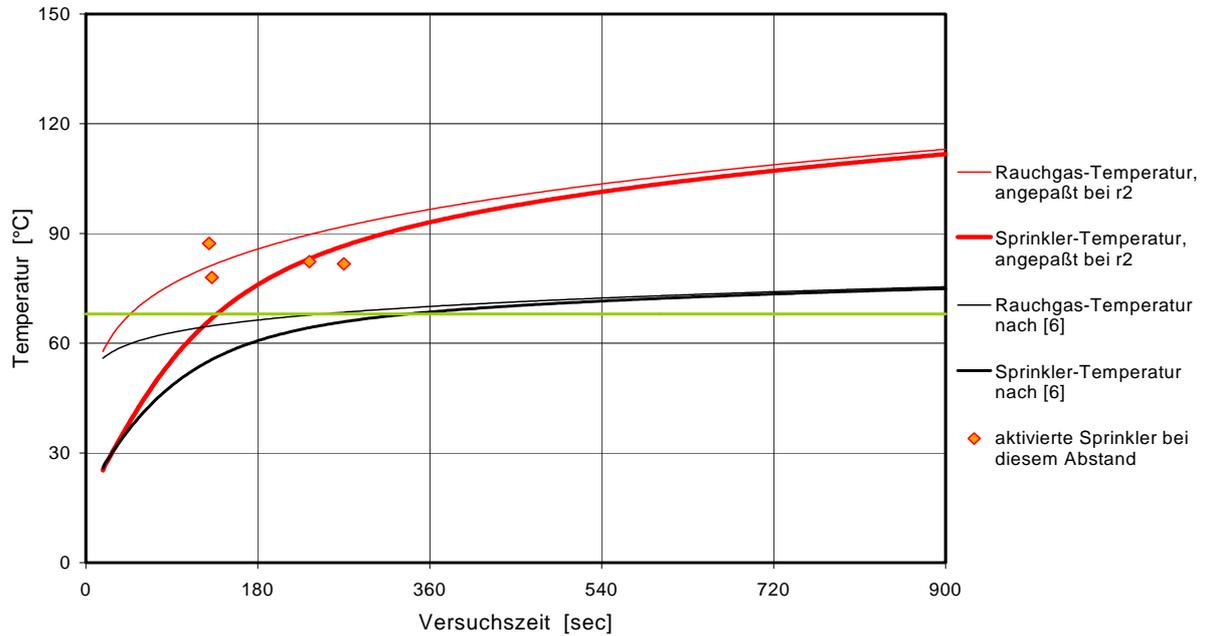


Bild 23: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_2 = 1,68$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.

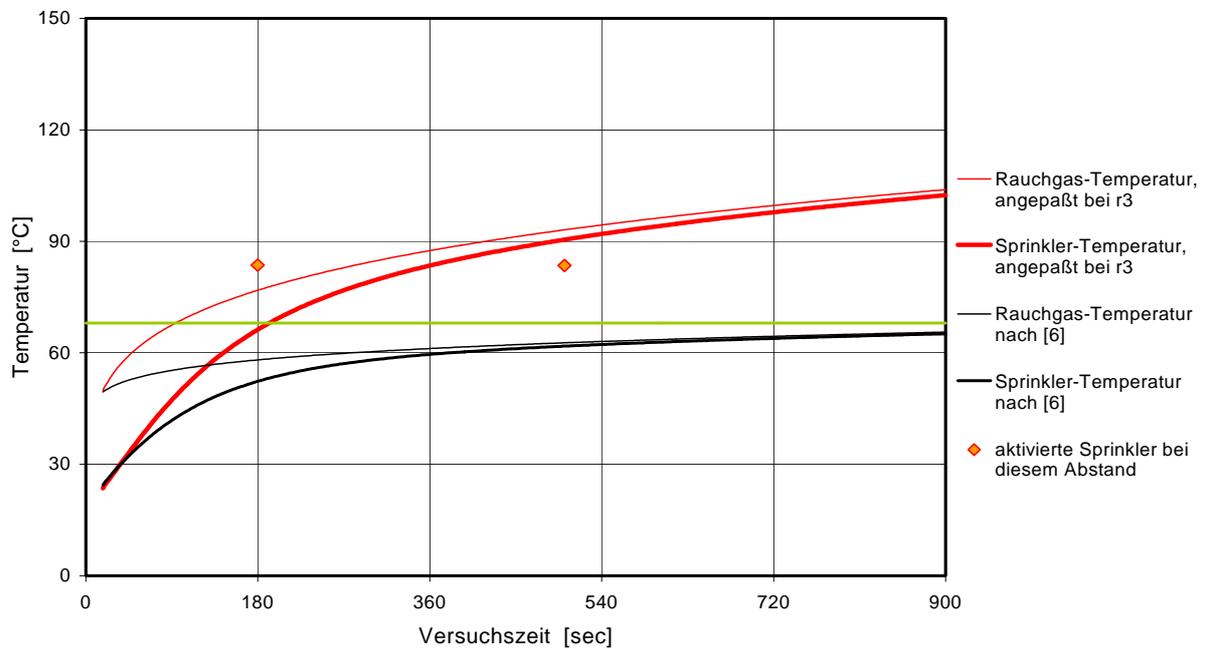


Bild 24: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_3 = 2,25$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.

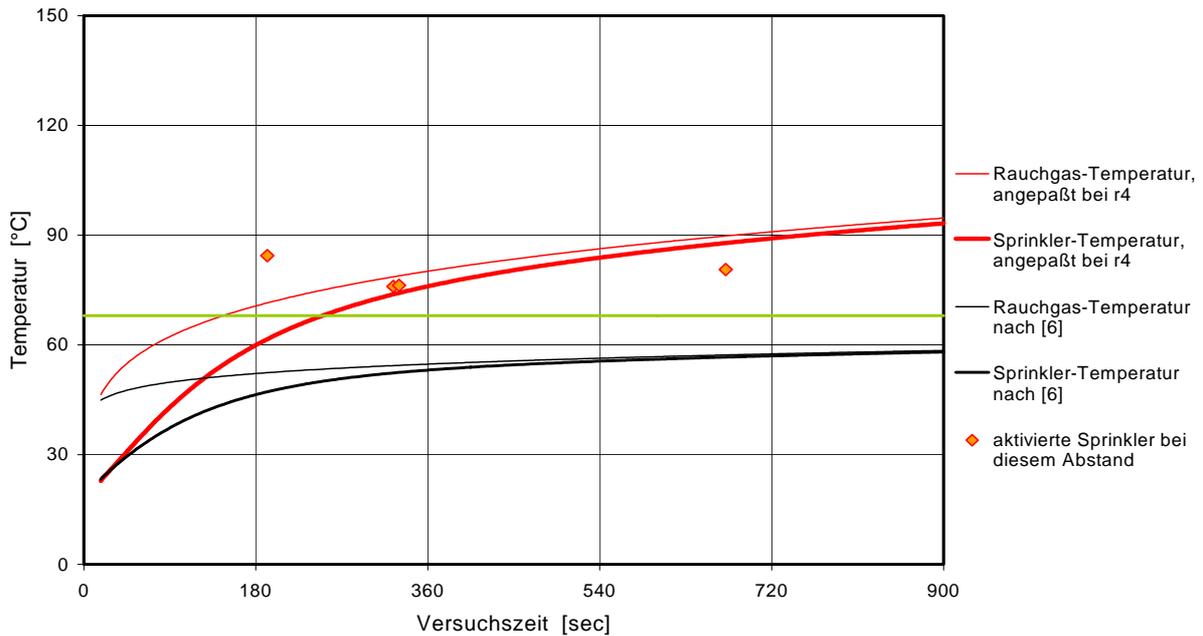


Bild 25: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_4 = 2,7 \dots 3,1$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.

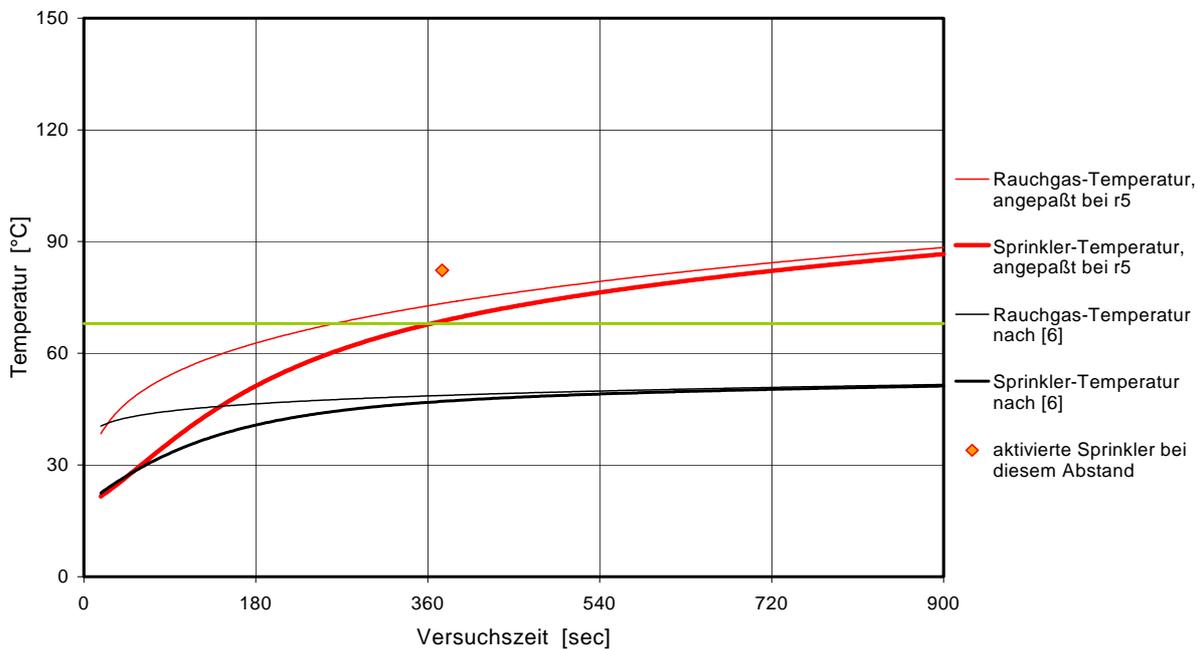


Bild 26: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_5 = 3,75 \dots 4,04$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.

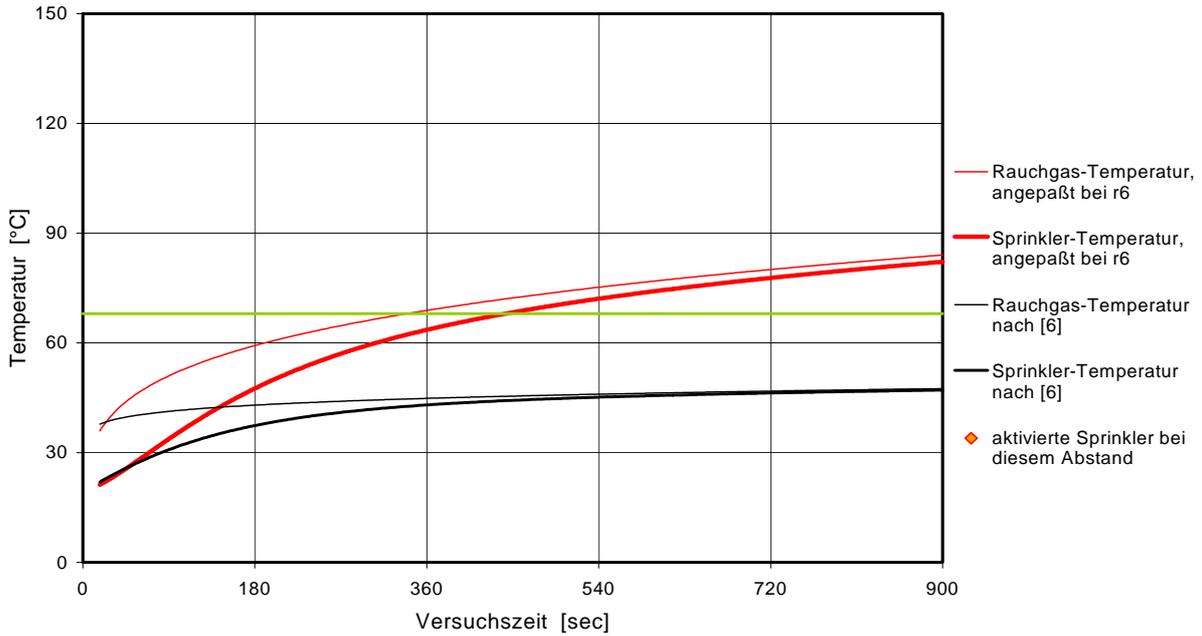


Bild 27: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_6 = 4,56 \dots 5,03$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.

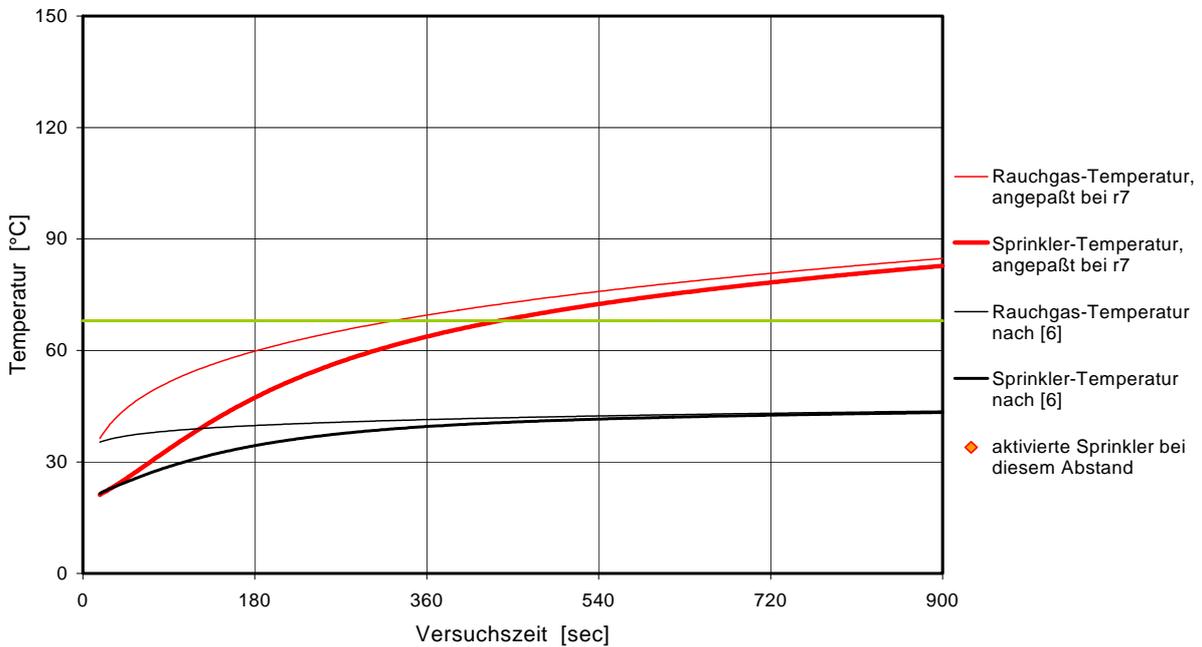


Bild 28: Die Sprinkler-Aktivierung im Abstand $r_7 = 5,86 \dots 6,4$ m bei 630 kW Brennerleistung, 25-cm-Rauchschürzen und 15.000 m³/h Absaugung durch die kleine RWA, wobei die beiden unteren Kurven nach der Originalformel, die oberen nach der modifizierten berechnet werden.

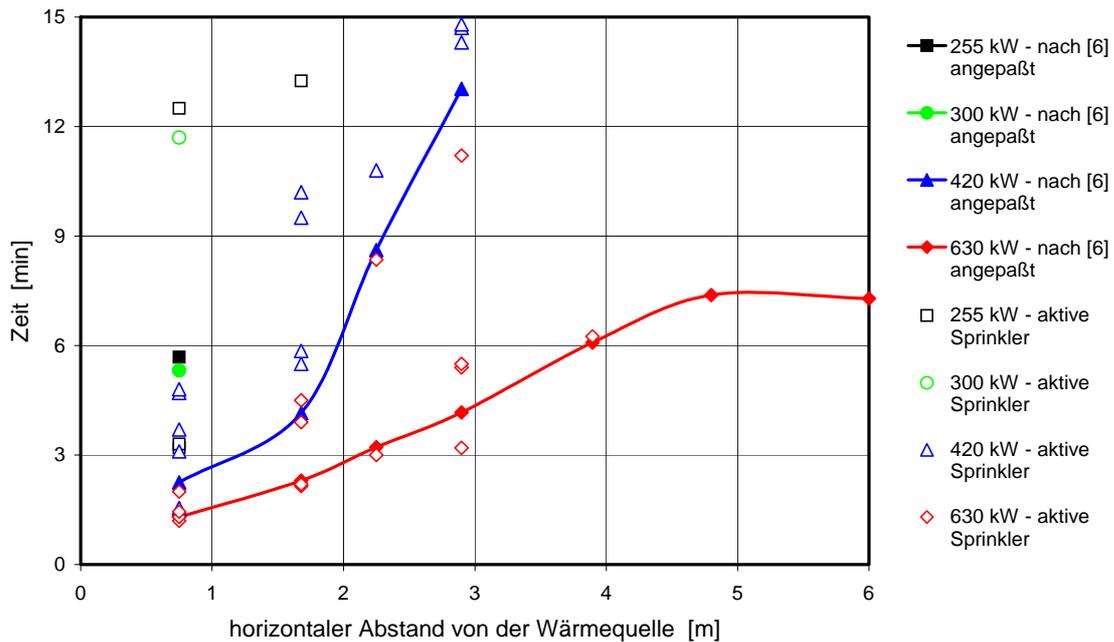


Bild 29: Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche mit 25-cm-Rauchschürzen, 15.000 m³/h Absaugung und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte

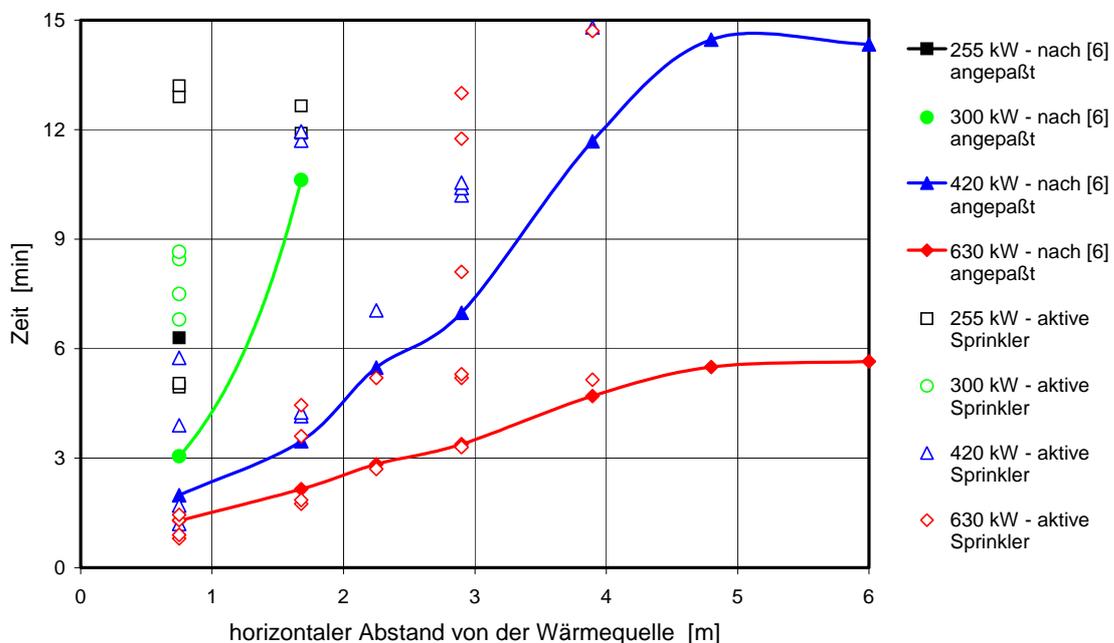


Bild 30: Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche mit 25-cm-Rauchschürzen, geschlossenen RWA und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte

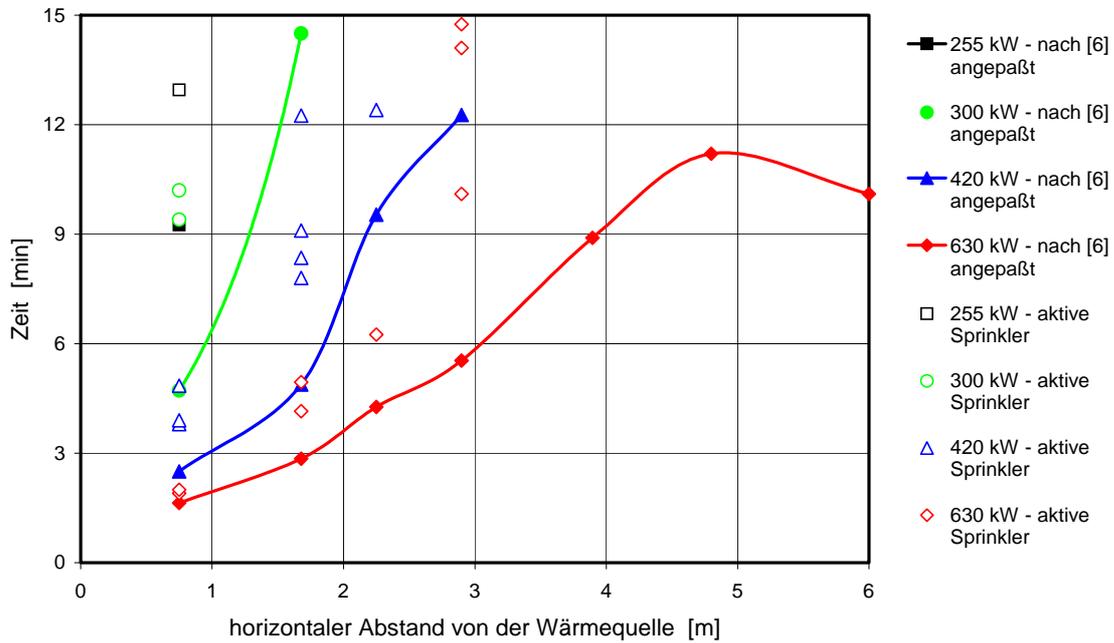


Bild 31: Die Sprinkler-Auslöszeitpunkte für Versuche mit 25-cm-Rauchschürzen, Naturkonvektion und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte

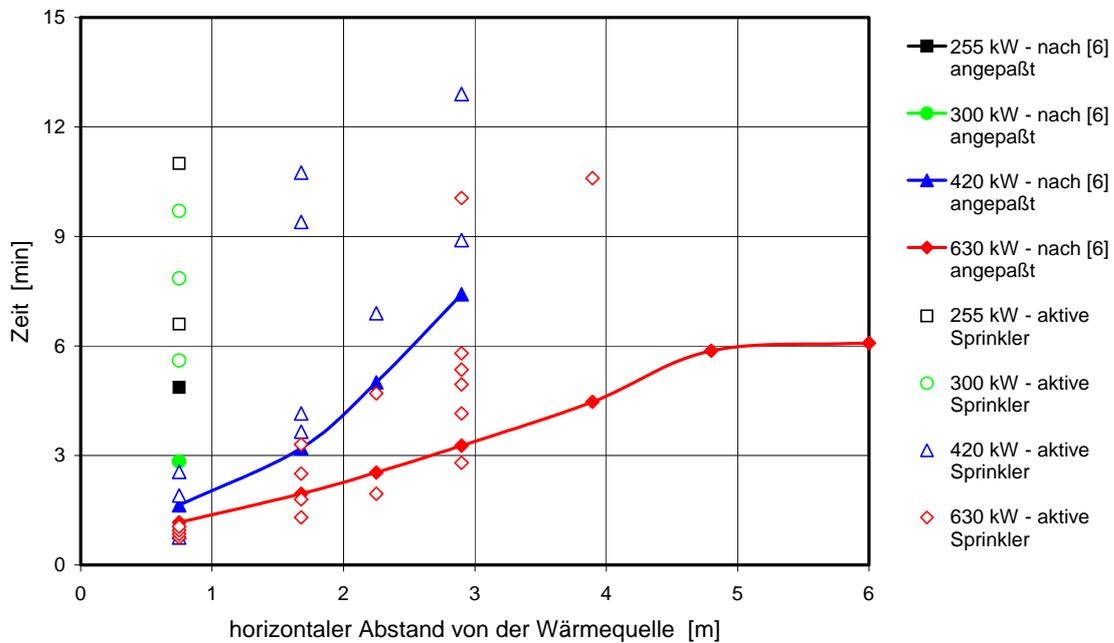


Bild 32: Die Sprinkler-Auslöszeitpunkte für Versuche ohne Rauchschürzen, mit 15.000 m³/h Absaugung und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte

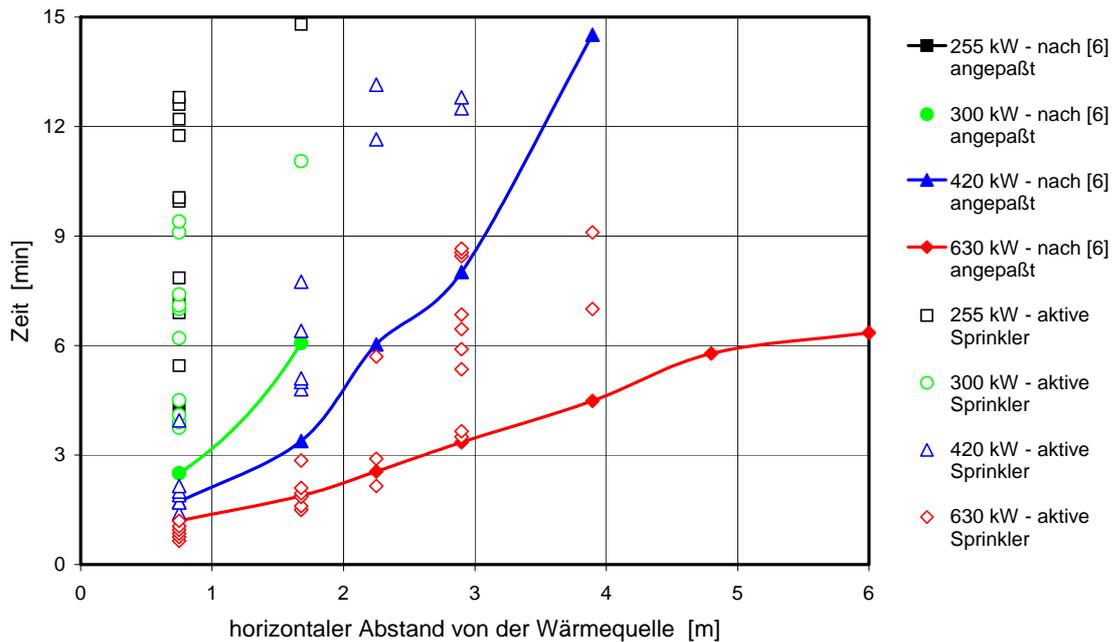


Bild 33: Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche ohne Rauchschürzen, RWA geschlossen und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte

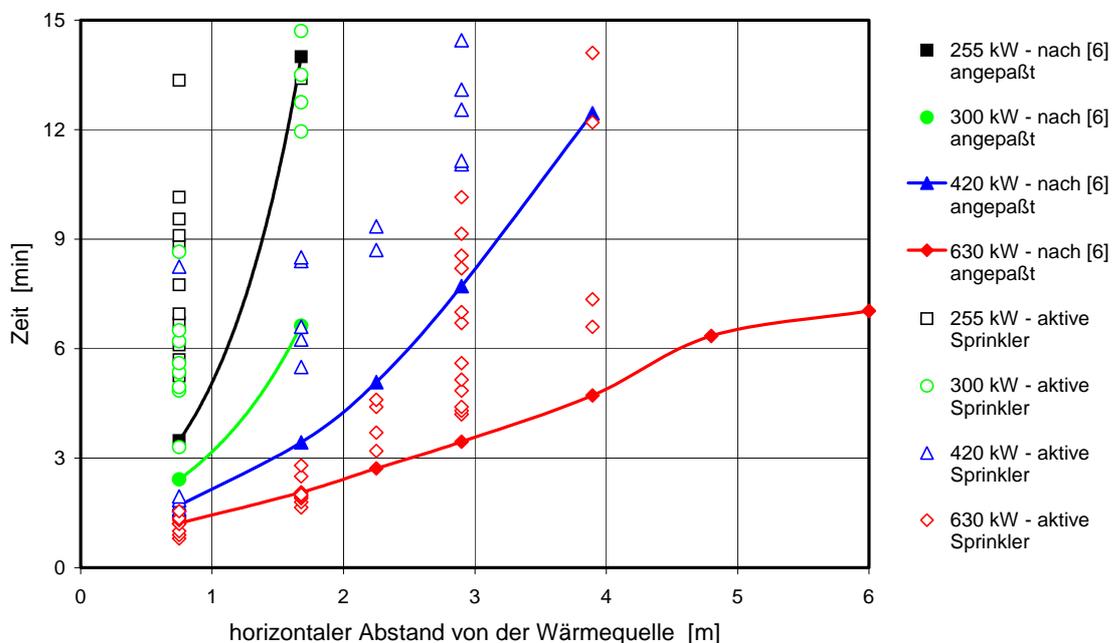


Bild 34: Die Sprinkler-Auslösezeitpunkte für Versuche ohne Rauchschürzen, mit Naturkonvektion und unterschiedlichen Brennerleistungen, berechnet mit der modifizierten Temperatur/Leistungs-Formel – und experimentell bestimmte Werte