

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchung der Wechselwirkungen
zwischen gleichzeitig betriebenen Sprink-
ler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen

118

AUSSCHUSS FEUERWEHRANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ
UND ZIVILE VERTEIDIGUNG DES ARBEITSKREISES V DER ARBEITS-
GEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">118</div>	Titel des Berichtes: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen	ISSN: <div style="text-align: center;">0170-0060</div>	
Autoren: <div style="text-align: center;">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;">167 (2/98)</div>	auftraggebende Institution: Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung des Arbeitskreises V der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer		
Datum des Berichtes: <div style="text-align: center;">Dezember 1999</div>			
Seitenzahl: <div style="text-align: center;">90</div>	Bilder: <div style="text-align: center;">19 + 2</div>	Tabellen: <div style="text-align: center;">4 + 8</div>	Literaturverweise: <div style="text-align: center;">18</div>
Kurzfassung: <p>Nach einem detaillierten Katalog möglicher gegenseitiger Beeinflussungen werden die Ergebnisse der 39 Großversuche bei UL in Northbrook/Illinois dargestellt und kommentiert. Sie sollten die Beeinflussung des Auslöseverhaltens der Sprinkler durch RWA und Rauchschürzen und umgekehrt die der RWA-Funktion durch Sprinkler und Rauchschürzen untersuchen.</p> <p>In deutlicher Vergrößerung wird bei der Interpretation der Versuchsergebnisse festgestellt, daß nur RWA direkt über dem Brandherd temperatur-gesteuert aufgehen und daß nur in diesem Fall der Sprinkler-Auslösezeitpunkt verzögert und die Gesamtzahl der ausgelösten Sprinkler verringert wird. Für eine wirksame Entrauchung zur Erleichterung der Personenrettung und der Brandbekämpfung hätten außerhalb des gesprinklerten Bereichs die RWA ansprechen müssen. Dies aber kann mit einzeln reagierenden RWA-Auslöseelementen nicht bewerkstelligt werden. Die Effektivität einer von aktiven Sprinklern umringten RWA bleibt weiterhin ungeklärt, da der Volumenstrom durch die RWA nicht ermittelt werden konnte. — Die Auswirkung von Rauchschürzen steht zum Teil in direktem Widerspruch zu den Ergebnissen der Versuche.</p> <p>Die Ergebnisse des bei NIST entwickelten CFD-Programms decken sich, wenn Raum und Zeit eng gefaßt werden (Auslöseverhalten beschränkt auf die Sprinkler im 1. Ring um den Brandherd, Wärmefreisetzung nur bis zum Auslösen dieser Sprinkler) mit den Versuchsergebnissen. Jenseits dieser Grenzen ist beim Vergleich der Simulation mit dem Experiment mit Standardabweichungen von bis zu 80 % zu rechnen. Das Programm ist also noch nicht in der Lage, mangelhafte Versuche zu korrigieren bzw. zu ersetzen.</p> <p>Für zukünftige Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und RWA-Systemen wurde an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ein Brenner entwickelt, mit dem eine definierte Wärmefreisetzungsrage eingestellt werden kann – sowohl als konstanter Wert als auch in vorgegebener Funktion von der Zeit.</p>			
Schlagwörter: <p>Auslöseelement, Beeinflussung, Brenner, CFD, Feldmodell, Großversuch, Rauchschürzen, RWA, Sprinkler, Sprühstrahl, Versuchsstand</p>			

Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und zivile Verteidigung des Arbeitskreises V der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

Forschungsbericht Nr. 118

**Untersuchung der Wechselwirkungen
zwischen gleichzeitig betriebenen Sprink-
ler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen**

von
Dipl.-Ing. C. Axel Föhl

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1999

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN	1
VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN	2
1. EINLEITUNG	4
2. DIE BRANDVERSUCHE BEI UNDERWRITERS LABORATORIES IN NORTHBROOK/ILLINOIS	10
2.1 Die Abmessungen der Versuchshalle	10
2.2 Die Abmessungen der Einbauten	10
2.3 Die Auslegung der Sprinkleranlage	12
2.4 Die Instrumentierung des Versuchsstandes	12
2.5 Der Zweck der angestellten Untersuchungen	14
2.6 Die Position des Brandes in der Versuchshalle	16
2.7 Die Art und Menge des eingesetzten Brandgutes	17
2.8 Der Brandverlauf	18
2.9 Die Sprinkleraktivierung	19
2.10 Die Aktivierung der RWA	38
2.11 Die thermodynamischen Angaben über das Rauchgas	51
2.12 Die sonstigen Messungen	51
2.13 Die Berechnungsmodelle und ihre Ergebnisse	52
2.14 Die Ergebnisinterpretationen und Schlußfolgerungen	58
3. ENTWURF EINES VERSUCHSSTANDES FÜR DEN GLEICHZEITIGEN BETRIEB VON RAUCH/WÄRME-ABFUHR- UND SPRINKLER- ANLAGEN	61
3.1 Wärmefreisetzung in Abhängigkeit vom Sauerstoffverbrauch	62
3.2 Die Größe der Brennstoff-Oberfläche im Wannenbrenner	66
4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	69
5. LITERATURVERZEICHNIS	72
6. VERZEICHNIS DER BILDER UND TABELLEN	74

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

Kürzel	Bedeutung
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
CFD	Computational Fluid Dynamics = Computermodell zur Berechnung eines Strömungsfeldes, auch "Feldmodell"
CSA	Canadian Standards Association
CTIF	Comité Technique International de Prévention et d'Extinction du Feu = internationales technisches Komitee für vorbeugenden Brandschutz und Feuerlöschwesen (internationaler Feuerwehrverband)
DFV	Deutscher Feuerwehrverband
DIN	Deutsches Institut für Normung, Berlin
ELO	Sprinkler mit großer Mündung (extra large orifice)
FFB	Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)
FMRC	Factory Mutual (Insurance) Research Corporation = Forschungsinstitut der US-Fabrikgebäude-Versicherung
IFS	Industrial Fire Simulator = CFD-Rechenmodell
IIT	Illinois Institute of Technology
LES	Large Eddy Simulation = CFD-Rechenmodell
NDIR	nicht-dispersives Infrarot-Photometer zur CO- und CO ₂ -Konzentrationsmessung
NFPA	National Fire Protection Association
NFPRF	National Fire Protection Research Foundation
NIST	National Institute of Standards and Technology
RTI	response time index = Trägheitsbeiwert
RWA	Dachöffnung einer Rauch- und Wärme-Abzugsanlage
SP	Sveriges Provnings- och Forsknings-Institut
UL	UNDERWRITERS LABORATORIES
VDI	Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Altenberge

VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN

Kürzel	Bedeutung	Dimension
α	halber Öffnungswinkel des Kegelstumpfes	°
A	Fläche des Brennstoffspiegels im Wannenbrenner	m ²
A _{ab}	Abgasrohr-Querschnitt	m ²
a	Anzahl von Sprinklern mit der "gleichen" Entfernung vom Brandzentrum	—
c	Beiwert für den Wärmeübergang zwischen dem Sprinkler-Auslöseelement und der Sprinkler-Halterung	(m/sec) ^{1/2}
Δ	Differenz	—
d _{ab}	Abgasrohr-Durchmesser	m
$\gamma_{C_2H_5OH}$	spezifisches Gewicht von Ethyl-Alkohol	N/m ³
g	Normalbeschleunigung	m/sec ²
H _u	(unterer) Heizwert	J/kmol
h	Höhe des Brennstoffspiegels über dem Trichtergrund	m
h ₀	Höhe der "Spitze" des Kegelstumpfes	m
I _{RT}	response time index (RTI) = Trägheitsbeiwert	(m·sec) ^{1/2}
I _{RT,RWA}	Trägheitsbeiwert des Auslöseelementes der RWA	(m·sec) ^{1/2}
I _{RT,Spr.}	Trägheitsbeiwert des Auslöseelementes der Sprinkler	(m·sec) ^{1/2}
k	Proportionalitätsfaktor	MW/sec ²
\dot{m}	Massenstrom	kmol/sec
p ₀	atmosphärischer Druck	mbar
p _{dyn.}	Druckdifferenz am PRANDTL-Rohr im Abgasstrom	N/m ²
p _{stat.}	statischer Druck am Trichtergrund	mbar
Q _A	bis zum Auslöszeitpunkt freigesetzte Wärme	J
\dot{Q}	Wärmestrom, Wärmefreisetzungsrate	W
$\dot{Q}_{const.}$	konstante Wärmefreisetzungsrate des Brenners für t > t _{const.}	W
ρ_{ab}	Dichte des Abgases	kg/m ³
$\rho_{C_2H_5OH}$	Dichte von Ethyl-Alkohol	kg/m ³
$\rho_{Luft,0^\circ}$	Dichte von Luft bei 0°C	kg/m ³
r	Radius des Brennstoffspiegels im Wannenbrenner	m
r ₀	kleiner Radius am Kegelstumpf	m

Kürzel	Bedeutung	Dimension
Σ	Summe	—
$\vartheta_{0;1;2;3}$	Temperatur an den Meßstellen 0;1;2;3 in der RWA	°C
ϑ_{AE}	Temperatur des Auslöseelementes	°C
$\vartheta_{A,n}$	nominale Auslösetemperatur	°C
$\vartheta_{A\emptyset}$	Mittelwert der Auslösetemperaturen	°C
$\vartheta_{A,RWA}$	Auslösetemperatur der RWA	°C
$\vartheta_{A,Spr.}$	Auslösetemperatur des Sprinklers	°C
$\vartheta_{max.\emptyset}$	Mittelwert der Maximaltemperaturen	°C
ϑ_{RG}	Temperatur des Rauchgases	°C
$T_{0^{\circ}}$	Schmelzpunkt-Temperatur von Wasser	°K
T_{∞}	Umgebungstemperatur	°K
T_{ab}	Abgastemperatur	°K
$T_{Luft,zu}$	Temperatur der zugeführten Frischluft	°K
T_{RG}	Temperatur der Rauchgase unter der Decke	°K
t	Zeit	sec
$t_{134^{\circ}C}$	Zeitpunkt, an dem das Auslöseelement des Sprinklers 134°C warm wird	min:sec
$t_{A,RWA}$	Auslöszeitpunkt der RWA	min:sec
$t_{A,Spr.}$	Auslöszeitpunkt des Sprinklers	min:sec
$t_{const.}$	Zeitpunkt, von dem an $\dot{Q} = \dot{Q}_{const.}$ gilt	sec
V	Volumen des Kegelstumpfes	m ³
V_M	Molvolumen	m ³ /kmol
\dot{V}_{ab}	Abgasvolumenstrom	m ³ /sec
$\dot{V}_{Luft,zu}$	zugeführter Frischluftstrom	m ³ /sec
\dot{V}_{RWA}	Volumenstrom durch die RWA-Dachöffnung	m ³ /sec
v	Strömungsgeschwindigkeit	m/sec
ξ	Heizwertminderung bei unvollständiger Verbrennung	—
x	Anteil des bei der Verbrennung verbrauchten Sauerstoffs	—
y	Verhältnis des verbleibenden Sauerstoff-Anteils zur Summe der Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlendioxid-Anteile im trockenen Abgas	—
$y(t)$	= y	%

1. EINLEITUNG

Für die Brandschutztechnik stellt die gegenseitige Beeinflussung von Rauch/Wärme-Abzugsanlagen (RWA) und Sprinkler-Systemen ein nahezu klassisches Forschungsthema dar, denn schon in den späten '50er Jahren wurden Untersuchungen – auch im Realmaßstab – hierüber angestellt. Doch ist bis heute die Diskussion über die Vor- und Nachteile eines kombinierten Sprinkler/RWA-Systems noch nicht beigelegt, wie die jüngste Veröffentlichung des schwedischen Prüfungs- und Forschungs-Instituts über den gegenwärtigen Wissensstand auf diesem Gebiet zeigt [1]. Auch in der Studie der Gesellschaft zur Förderung der Prozeß-, Sicherheits- und Umwelttechnik über die Evaluierung des Forschungsbedarfs bei den Feuerwehren [2], die von der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) und vom Deutschen Feuerwehrverband (DFV) gemeinsam in Auftrag gegeben worden war, nimmt das Thema "Wechselwirkung zwischen Rauch/Wärme-Abzugsanlagen und Sprinklern" die erste Priorität ein.

Obwohl Einigkeit über die den Feuerwehreinsatz bestimmenden Schutzziele

- Rettung gefährdeter Personen,
- Schutz des betroffenen Gebäudes (beispielsweise durch Verringerung der thermischen Belastung der Dachkonstruktion),
- Schutz vor Korrosion (zum Beispiel durch Chlor-Wasserstoff) und
- Minimierung des Wasserschadens

besteht, ist noch immer umstritten — sowohl die Ergebnisse der in Gent/Belgien durchgeführten Großversuche [3] als auch jener in Borås/Schweden [4] werden unterschiedlich interpretiert ("the uncertainties in the effects of the combined use have led to substantial disagreement in the fire safety community" [1]); gleiches gilt auch für die Test-Serie in Northbrook/Illinois [5] —,

- in welchem Maße die Rauch- und Wärmeabfuhr das Ansprechen von thermisch einzeln gesteuerten Sprinklern verzögert, deren Sprühstrahl den Brand in der Regel so lange eindämmen soll, bis die Feuerwehr eintrifft, um ihn vollständig zu löschen,
- ob der Gefahr, daß der Brand durch Ventilation angefacht wird, zuerst entgegengetreten werden muß oder
- ob die Freihaltung der Rettungswege, der Feuerwehrzugänge und der Umgebung des Brandherdes (Verbesserung der Orientierungs-

möglichkeit: Was brennt, wo, wieviel?) von mit dem Sprühwasser niedergeschlagenen Rauchschwaden Priorität genießt, um die Lösch- und Rettungsmaßnahmen der Feuerwehr nicht zu beeinträchtigen.

Seit Jahren wird deshalb versucht, sowohl mit mathematischen Modellrechnungen als auch mit Großversuchen das Zusammenwirken von Sprinkler-Systemen und Rauch/Wärme-Abzugsanlagen zu klären. 2-Zonen-Modelle [6] scheinen der Komplexität der Problemstellung, insbesondere in unmittelbarer Nähe der Abzugsöffnungen, nicht gewachsen zu sein. Numerische Modelle (CFD) zur Berechnung des gesamten Strömungsfeldes erweisen sich derzeit noch als zu zeitaufwendig [7].

Im Rahmen dieses Forschungsauftrages soll geklärt werden, weshalb die genannten Großversuche die Brandschutzfachleute noch nicht einigen konnten. Hierfür wird die Literatur über diese Experimente ausgewertet. Gleichzeitig wird ein Versuchsstand entwickelt, der es zum einen ermöglichen soll, die in den oben genannten Experimenten ermittelten Zusammenhänge nachzuvollziehen, und mit dem zum anderen versucht werden soll, Ergebnisse zu verifizieren, die mit verschiedenen mathematischen Modellen erzielt wurden.

In diesem Versuchsstand wird durch Variation der Einflußgrößen

- Sprinkler mit unterschiedlichem Auslöseverhalten,
- Rauch/Wärme-Abzugsanlagen mit verschiedenen thermischen Auslöseelementen,
- Brände mit unterschiedlicher Wärmefreisetzung,
- dreidimensional verschiedene Anordnung der Sprinkler in Bezug auf die Position der RWA und des Brandherdes

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

- daß weder das Ansprechverhalten der Sprinkler durch den Wärmeabzug beeinträchtigt wird, weil deren Auslösetemperatur infolge des Abzugs der heißen Rauchgase nicht oder nicht lange genug erreicht wird, noch
- daß der Brand in unzulässigem Maß angefacht wird, auch wenn zum Beispiel der durch die Abkühlung der Rauchgase verursachten Auftriebsminderung mit Hilfe von Hochleistungslüftern entgegengewirkt wird, um die Zugangs- und Rettungswege so weit

rauchfrei zu halten, daß die Feuerwehr ihre Arbeit möglichst unbehindert verrichten kann.

Die technisch mögliche Aufteilung des Versuchsfeldes nach einem Raster "Sprinkler pro Flächeneinheit" und einem weiteren "RWA pro Flächeneinheit", in dem jeweils eine Gruppe von RWA und Sprinklern steuerungstechnisch zusammengefaßt und von einem gemeinsamen Meßfühler (Thermoelement, Rauchmelder,...) gesteuert wird (Stellmotor, Magnetventil,...), wird, weil in der praktischen Realisierung zu teuer, nicht untersucht. Deshalb kommen als Löschdüsen Sprinkler in handelsüblichen Ausführungen zum Einsatz, die hängend montiert werden, damit das Rohrnetz die Ausbreitung des Sprinklerstrahls nicht stört. Ihr Auslöseverhalten 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,

besteht, von der Schmelz- respektive Bersttemperatur und von einem Wert (Response Time Index – RTI) charakterisiert, der berücksichtigt, wie lange es dauert, bis die treibende Temperaturdifferenz $\vartheta_{RG} - \vartheta_{AE}$ das Auslöseelement auf die Funktionstemperatur aufgeheizt hat – bei gleichzeitigem Wärmeverlust vom Sprinkler 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, die mit Hilfe von Auslöseelementen gesteuert werden, deren Funktionsprinzip dem der Sprinkler gleicht, als Abzugsanlagen. Nach der allgemein vorherrschenden Meinung soll dadurch, daß $\vartheta_{A,RWA}$ und $I_{RT,RWA}$ nicht kleiner sein dürfen als $\vartheta_{A,Spr.}$ 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 Rauchgastemperatur möglicherweise unter $\vartheta_{A,RWA}$ abkühlt, sondern auch jene, daß das Auslöseelement der RWA von Tröpfchen aus dem Sprinklerstrahl getroffen und weiter 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.

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 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.

Als konstruktive Alternative können Rauchschürzen geringerer Tiefe angesehen werden, die lediglich die RWA umschließen. Damit 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. Die geringe Bauhöhe dieser Rauchschürzen erlaubt eine unbeeinträchtigte Ausbildung des Sprinkler-Sprühstrahls.

Bei der Durchsicht von Berichten über Großversuche zum Thema RWA/Sprinkler sind also vergleichend zu bewerten, *wobei die Anmerkungen des Autors des vorliegenden Forschungsberichtes kursiv angefügt werden:*

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 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. der Zweck der angestellten Untersuchungen;

6. die Position des Brandherdes in der Versuchshalle und die Anordnung der Einbauten relativ hierzu, insbesondere die Höhenangaben;
7. die Art und Menge des eingesetzten Brandgutes;
8. der zeitliche, und gegebenenfalls örtliche, Verlauf der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Wärmefreisetzung des Brandes;
9. die Sprinkleraktivierung (wieviele, bei welcher Temperatur, zu welchem Zeitpunkt) in Abhängigkeit von
 - 9.1 der Wärmefreisetzung,
 - 9.2 der Raumhöhe,
 - 9.3 der Dicke der Rauchgasschicht unter der Decke,
 - 9.4 der Größe und Anordnung der Rauchschürzen oder anderer Bauteile, durch die die Aktivierung der Sprinkler oder die Ausformung des Sprühstrahls gestört werden kann,
 - 9.5 der Anordnung und Funktion der installierten RWA und ihrer Auslöseelemente und von
 - 9.6 der Fertigungsgenauigkeit der Sprinkler, insbesondere ihrer Auslöseelemente;
10. die Aktivierung der RWA (wieviele, bei welcher Temperatur, zu welchem Zeitpunkt) in Abhängigkeit von
 - 10.1 der Wärmefreisetzung,
 - 10.2 der Raumhöhe,
 - 10.3 der Dicke der Rauchgasschicht unter der Decke,
 - 10.4 der Größe und Anordnung der Rauchschürzen oder anderer Bauteile, durch die die Aktivierung der RWA gestört werden kann,
 - 10.5 der Entfernung zum Brandherd,
 - 10.6 der Anordnung und Funktion der installierten Sprinkler und von
 - 10.7 der Fertigungsgenauigkeit der RWA, insbesondere ihrer Auslöseelemente;

11. die Angaben über das Rauchgas (Menge, Aufstiegs- und Ausbreitungsgeschwindigkeit, Schichtdicke und Temperaturabstufungen unter der Decke, Anordnung der Meßpunkte,...);
12. die sonstigen Messungen;
13. die Berechnungsmodelle und deren Ergebnisse und
14. die Ergebnisinterpretationen und Schlußfolgerungen der Autoren, wobei insbesondere zu prüfen ist, ob mit den angestellten Versuchen die selbst definierten Ziele erreicht werden, ob sie zutreffend interpretiert werden und ob sie ausreichen, um das Problem "RWA-Sprinkler" einer Lösung zuzuführen.

Die jüngsten Großversuche zum Zusammenwirken von Sprinklern, RWA und Rauchschrzen bei UNDERWRITERS LABORATORIES werden entsprechend den oben zusammengestellten Punkten 1...14 bewertet. Dabei zeigt sich, daß die dort verwendeten Schmelzlot-Auslöseelemente sowohl bei den Sprinklern als auch bei den RWA eine relativ große Auslöse-Bandbreite (Auslösezeitpunkte gleich positionierter Sprinkler weichen um bis zu 270 % voneinander ab) aufweisen. Im allgemeinen wird von den Sprinklern eine ausreichende Zahl aktiviert, um den Brand einzudämmen. — Die RWA sprechen häufig nicht an, so daß ihre Funktion, die für die Personenrettung und Brandbekämpfung erforderliche Rauchfreihaltung zu verbessern, nicht gewährleistet werden kann. — Der Einfluß von Rauchschrzen auf die Funktion von Sprinklern und RWA kann mit Hilfe dieser Versuche nicht abgeschätzt werden. Lediglich in einem Falle, in dem die Rauchschrze — absichtlich — direkt über der Brandlast montiert wurde, bestätigt sich deren negativer Einfluß auf die benachbarten Sprinkler. — Das parallel mit der Konzeption der Versuche entwickelte Feldmodell zur Vorausberechnung der Sprinklerfunktion stimmt mit den Experimentalergebnissen nur teilweise überein und ist deshalb noch nicht in der Lage, Großversuche zu erübrigen.

Im Anschluß an die Besprechung der UL-Experimente wird für zukünftige Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und RWA-Systemen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ein eigens entwickelter Versuchsstand vorgestellt, der es ermöglichen soll, eine definierte Wärmefreisetzungsrates einzustellen — sowohl als konstanten Wert als auch in vorgegebener Funktion von der Zeit. Beispielsweise kann damit auch der zeitliche Spielraum überprüft werden, innerhalb dessen die Auslöseelemente handelsüblicher Sprinkler reagieren.

2. DIE BRANDVERSUCHE BEI "UNDERWRITERS LABORATORIES" IN NORTHBROOK/ILLINOIS

Auf Initiative der National Fire Protection Research Foundation (NFPRF) fand sich eine Gruppe von Sponsoren aus der einschlägigen US-Industrie, um bei UNDERWRITERS LABORATORIES (UL) mit einer Reihe von Versuchen im Realmaßstab die gegenseitige Beeinflussung von Sprinklern, RWA und Rauchschürzen zu untersuchen. Mitbeteiligt an der technischen Leitung war auch das National Institute of Standards and Technology (NIST), von dem einerseits die Meßergebnisse ausgewertet wurden und von dem andererseits ein rechnergestütztes Brand-Simulationsmodell zur Ergänzung der Experimente entwickelt wurde.

2.1 Die Abmessungen der Versuchshalle

Die Brandversuchshalle der UL besteht aus einem quadratischen Raum mit einer Grundfläche von $36,58 \cdot 36,58 \text{ m}^2$ und einer Höhe von 15,24 m. Eine Installationsdecke von $30,48 \cdot 30,48 \text{ m}^2$, deren Höhe bei den hier zu beschreibenden Versuchen zwischen 7,62 m und 8,23 m eingestellt werden kann, trägt das Sprinkler-System, die Rauch- und Wärme-Abzugsanlagen und – je nach Versuch – die Rauchschürzen. Die Abmessungen im einzelnen sind in Bild 1 dargestellt, die ursprüngliche Fuß- und Zoll-Vermaßung ist dort in cm umgerechnet.

2.2 Die Abmessungen der Einbauten

Die Unterseite der Installationsdecke ist eben. 1,83 m tiefe Rauchschürzen umschließen das mit Sprinklern ausgestattete Areal der Installationsdecke

- Versuchsreihe I (Versuche I-1 bis I-22 mit Heptan-Zerstäubungsbrenner): $20,45 \cdot 21,69 \text{ m}^2$ mit 7·7 Sprinklern (vergl. Bild 1),

oder unterteilen es in vier ungleich große Teilareale

- Versuchsreihen II (Versuche II-1 bis II-12 mit Heptan-Zerstäubungsbrenner) und III (Versuche III-1 bis III-5 mit Regallager-Brände), größtes Feld: $21,34 \cdot 23,16 \text{ m}^2$ mit $7 \cdot 8$ Sprinklern (vergl. Bilder 2 und 3).

Offenbar wurden für diese beiden Versuchsreihen nicht nur zusätzliche RWA und neue Rauchschrürzen, sondern auch eine neue Sprinkleranlage eingebaut, was im NIST-Versuchsbericht nicht erwähnt, geschweige denn vermaßt ist.

Ein Teil der Versuche wird ohne Rauchschrürzen durchgeführt.

Die zweiflügeligen RWA¹⁾ sind $1,22 \cdot 2,44 \text{ m}^2$ groß, sie sind 30 cm in die Decke eingelassen und automatisch oder manuell zu öffnen. Bei manueller Steuerung werden Öffnungszeitpunkte entweder 25 sec vor oder nach dem Ansprechen des 1. Sprinklers gewählt. Die automatische Steuerung erfolgt einzeln, nicht gruppenweise, mit Hilfe von Schmelzlot-Auslöseelementen, die je nach Versuch bei 74°C oder bei 100°C ansprechen sollen. Bei der Untersuchung des Ansprechverhaltens der Auslöseelemente in einem auf 134°C erwärmten Strömungskanal löste sich die 74°C -Schmelzverbindung nach 102 sec bei senkrechter, nach 98 sec bei paralleler Anströmung (Strömungsgeschwindigkeit: $2,5 \text{ m/sec}$). Demnach beträgt der Trägheitsbeiwert der RWA $I_{RT,RWA}$ etwa $167 (\text{m}\cdot\text{sec})^{1/2}$ bis $180 (\text{m}\cdot\text{sec})^{1/2}$.

In der Versuchsreihe I befindet sich eine einzelne RWA in Position A (sh. Bild 1). Bei den Versuchsreihen II und III enthält die Installationsdecke jeweils vier RWA, womit sich ein RWA/Grund-Flächenverhältnis von etwa $1/42$ ergibt. *Warum die RWA nicht gleichmäßig über die Fläche verteilt werden, wie in Bild 2 strich-punktiert angedeutet, wird nicht erläutert.*

Über der Installationsdecke befindet sich die Absaugöffnung der Entrauchungsanlage (Absaugvolumen bei den Heptanversuchen: $11 \text{ m}^3/\text{sec}$, maximale Leistung: $28 \text{ m}^3/\text{sec}$, keine Angaben über Position und Durchmesser). 3 m über dem Grund der Halle befinden sich vier Zuluft-Öffnungen (Durchmesser: 1,5 m, keine Angaben über deren Position).

¹⁾ Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden mit "RWA" ausschließlich die Öffnungen in der Decke bezeichnet, durch die die auftriebs-behafteten Rauchgase abströmen können — weder bezieht sich dieser Begriff auf die Zuluftöffnungen noch auf evt. erforderliche Zwangsbelüftung.

In der Versuchsreihe III kommen Lagerregale zum Einsatz: Jeweils vier Stück (9,72 m lang, 1,07 m breit, 5,77 m hoch), zwei Regale im Abstand von 15,24 cm nebeneinander, die beiden anderen parallel dazu im Abstand von 2,44 m nördlich und südlich davon. Die verschiedenen Positionen sind in Bild 3 dargestellt.

2.3 Die Auslegung der Sprinkleranlage

In der Versuchsreihe I enthält die unter der höhenverstellbaren Decke (lichte Höhe: 7,62 m) installierte Sprinkleranlage 7·7 stehend montierte Sprinkler (Typ Central ELO-231, Mündungsdurchmesser: 16,26 mm, Sprühdichte: $0,34 \ell/(\text{sec} \cdot \text{m}^2)$ bei einem Vordruck von 1,3 bar, $\vartheta_{A,n,\text{Spr.}} = 74^\circ\text{C}$, $I_{RT,\text{Spr.}} = 148 (\text{m} \cdot \text{sec})^{1/2}$, $c = 0,7 (\text{m}/\text{sec})^{1/2}$), angeordnet in einem 3,05 m · 3,05 m-Raster. In den beiden folgenden Versuchsreihen (Deckenhöhe: 8,23 m) sind es im gleichen Raster 10·10 Sprinkler, wovon sich 7·8 in dem von den Rauchschrüzen umschlossenen Areal befinden. Die Sprinkler-Prallplatten befinden sich jeweils 8 cm, die Auslöseelemente 11 cm unter der Decke. Die Sprinkler werden von zwei Pumpen aus einem 757 m³-Reservoir gespeist, Volumenstrom jeweils: 190 ℓ/sec bei einem Förderdruck von 10,3 bar. Das Leitungssystem besteht aus 2"-Rohren, die von einer 2,5"-Hauptleitung abzweigen.

2.4 Die Instrumentierung des Versuchsstandes

Die Instrumentierung in der ersten Versuchsreihe besteht im wesentlichen aus 104 Inconel[®]-Thermoelementen mit 1,6 mm Durchmesser, um die Temperaturen in der Rauchsäule (jeweils 9 Meßpunkte in einer Kette über den 4 verschiedenen Brennerpositionen), in der Installationsdecke (jeweils 2 Meßpunkte direkt unter und über der Decke über den 3 Brennerpositionen B, C und D), in der RWA (7 Meßpunkte), unter der Decke (49 Meßpunkte in der Nähe der Sprinkler und 6 weitere in der Nähe der RWA) und in der Deckenströmung aufzunehmen. *Unklar bleibt, worin sich die Temperatur in der Deckenströmung von der unter der Decke unterscheiden soll, da sie ja mit denselben Thermoelementen gemessen wird.*

Unabhängig von der Position des Brenners in den einzelnen Versuchen wird bei den Sprinklern in der Nähe der RWA die Temperatur 10 cm unterhalb der Decke gemessen, also etwa in Höhe des Auslöseelementes, bei allen anderen Sprinklern in einer Entfernung von 5 cm von der Decke, das heißt, das Thermoelement befindet sich 3 cm über dem Sprinkler. *Bei den Versuchen I-9, I-10, I-11 und I-22, bei denen sich der Brenner in Position D befindet, ergibt sich dadurch eine unsymmetrische Anordnung der Thermolemente um das Brandzentrum: 4 Thermolemente mit 10 cm und 12 mit 5 cm Abstand zur Decke. Eine Erläuterung dieser Unterschiede – insbesondere im Hinblick auf die Rauchgastemperatur am Sprinkler-Auslöseelement – enthält der NIST-Bericht nicht und auch keine dafür, wie mit den Thermolementen direkt über der Prallplatte der stehend montierten Sprinkler deren Auslöszeitpunkte mit ähnlicher Genauigkeit bestimmt werden sollen, wie es mit Hilfe der sonst neben den Auslöseelementen angebrachten Thermolemente möglich ist.*

Entsprechend "detaillierte" Angaben über die Instrumentierung der zweiten und der dritten Versuchsreihe fehlen.

O₂-, CO₂- und CO-Meßstellen befinden sich 5 cm über dem Boden in einer Entfernung von 2 m vom Brenner und mittig unter der RWA, 15 cm unter der Decke. Die O₂-Konzentrationen werden mit paramagnetischen Analysatoren, die CO- und die CO₂-Konzentrationen mit nicht-dispersiven Infrarot-Photometern (NDIR) gemessen.

Mit einem Differential-Druckaufnehmer wird der Unterschied zwischen dem statischen Druck 15 cm unter und 15 cm über der RWA registriert.

Bei den Lagerbrand-Versuchen werden außer den Temperaturen in der Nähe der Sprinkler auch die der Bauelemente aufgenommen und die Menge und der Druck des Löschwassers werden gemessen, in und in der Nähe der RWA wird die Geschwindigkeit der Rauchgasströmung gemessen und die Dichte der Verqualmung wird mit Hilfe dreier optischer Sensoren bewertet.

Alle Meßwerte werden im Abstand von 2 sec aufgenommen.

2.5 Der Zweck der angestellten Untersuchungen

Nach Ansicht der Autoren des NIST-Berichtes werde aus früheren Untersuchungen gefolgert [8], daß die Sprinkler vor den RWA ansprechen müssen, weil sonst die von den geöffneten RWA hervorgerufene Abkühlung der oberen Rauchgasschicht die Sprinklerfunktion verzögert.

Die Befürworter des Einsatzes von RWA würden aus den zuletzt durchgeführten Großversuchen schließen [3], daß die Funktion der Sprinkler von RWA nicht wesentlich beeinflußt wird, daß sie jedoch die Zahl der in der Folgeminute nach dem ersten aktiven Sprinkler ausgelöst und die Zahl der insgesamt aktivierten Sprinkler deutlich reduzieren. Zur Beherrschung des Brandes und zum Schutz der Umgebung seien genügend Sprinkler ausgelöst worden.

Ähnliche Aussagen seien aus Rechenmodellen abgeleitet worden [9], die zu dem Ergebnis führten, die Verzögerung der Sprinklerfunktion durch RWA sei unwahrscheinlich, wenn der Raum so groß ist, daß die Rauchgase unter der Decke noch nicht die Wände erreicht haben, bevor die Sprinkler ansprechen. Bei geringeren Raumabmessungen (1), bei langsamerer Rauchausbreitung (2) oder beim Einbau von Rauchschürzen (3) könnten RWA eine geringe Verzögerung des Sprinkler-Auslösezeitpunktes verursachen, was aber verglichen mit der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der Sprinkler-Sprühcharakteristik von sekundärer Bedeutung sei. — (1) Aus dem NIST-Bericht geht nicht hervor, was die Raumgröße mit der Sprinklerbeeinflussung durch RWA zu tun hat – von Bedeutung ist wohl eher das Flächenverhältnis RWA/Raum. (2) Dieses Argument ist nur schlüssig, wenn bei langsamer Brandausbreitung der Temperaturanstieg am Auslöseelement des Sprinklers einen geringeren Gradienten hat als der am Auslöseelement der RWA. (3) In der Regel bewirkt der Einbau von Rauchschürzen das Gegenteil.

In anderer Interpretation derselben Versuche werde geschlußfolgert [10], daß die RWA bei schnell um sich greifendem Brand die Ansprechzeit der Sprinkler deutlich verlängerten, nämlich um 10...20 sec. In dieser Zeitspanne nehme die Wärmefreisetzungsrate von 10,2 MW auf 14,2 MW (= 40 %) zu (1). Bei RWA-Betrieb seien die Sprinkler nicht in der Lage gewesen, die Umgebung des Brandes zu schützen. — (1) Diese Steigerung der Brandausbreitung ist nur bei einem jener Versuch belegt und erlaubt deshalb nicht die hier postulierte Verallgemeinerung.

Die Kritik an Brandversuchen mit Regallagern, durchgeführt von der Forschungsabteilung der Feuerversicherung FMRC [11], beziehe sich darauf, daß die Lüftung durch Türen und Dachfenster erfolgte, anstatt durch Decken-RWA.

Versuche von IIT mit Sprinklern und RWA (beide mit 74°C-Auslöseelementen) würden auf großen Versuchsflächen eine geringe Reduzierung des Löschwasser-Verbrauchs ergeben, keine auf kleineren Flächen. Trotz der Reduzierung der Rauchgastemperatur in Deckennähe werde die Funktion von 74°C-Standardsprinklern durch die Decken-RWA nicht beeinträchtigt. Ihr Nutzen sei allerdings auch gering. Bei 141°C-Sprinklern über Propan-Brennern sei der Nutzen (geringere Deckentemperatur, reduzierter Wasserverbrauch) deutlicher [12].

Jüngste Versuche bei FMRC bezogen sich auf die Beeinflussung von Sprinklern durch Rauchschrzen ohne RWA [13]. Im Rahmen von Sprinklertests wurden Regalbrandversuche durchgeführt – zuerst ohne, dann mit Rauchschrzen. Mit Rauchschrzen seien mehr Sprinkler angesprungen und der Brand habe sich stärker ausgebreitet – offensichtlich wegen der Störung des Sprinkler-Sprühkegels.

Die meisten der zurückliegenden Untersuchungen befaßten sich mit der Beeinflussung der Sprinkler durch RWA und Rauchschrzen. Weit weniger Untersuchungen bewerteten die Beeinflussung von RWA durch Sprinkler. Bei SP wurde die Temperatur und Geschwindigkeit einer Rauchgaströmung durch eine RWA in Abhängigkeit von der Position eines Sprinklers untersucht [4]: Zwischen Brand und RWA montiert, sei sein Einfluß um so größer, je geringer der Abstand zur RWA sei. Der Einfluß eines jenseits der RWA montierten Sprinklers werde als vernachlässigbar eingestuft (1). Die Beeinflussung der thermisch gesteuerten Öffnungsautomatik werde nicht untersucht. — (1) *Dieses Versuchsergebnis hätte in vollem Umfang auch unseren Erwartungen entsprochen.*

Nach diesem Rückblick auf frühere, einschlägige Großversuche, werden die Ziele der im NIST-Bericht geschilderten Versuche und Modellrechnungen definiert:

1. Untersuchung der Beeinflussung des Auslöseverhaltens der Sprinkler (Zeitpunkt, Anzahl, welche,...) durch RWA und Rauchschrzen,

2. Untersuchung der Beeinflussung der Funktion der RWA (Öffnungszeitpunkt, Anzahl, Volumenstrom,...) durch Sprinkler und Rauchschürzen,
3. Entwicklung und Überprüfung eines Computer-Rechenmodells (IFS) zur Vorausberechnung der Sprinklerreaktionen und der Wärmefreisetzung sowohl vor als auch nach der Aktivierung der Sprinkler, wobei die Größe und Position des Brandes, die Position der Rauchschürzen und die Steuerung der RWA die variablen Parameter darstellen und
4. Aufbereitung der Versuchsergebnisse, um sie als Grundlage für die Weiterentwicklung der einschlägigen Bauvorschriften zur Verfügung stellen zu können.

Zur Vorbereitung der 5 Regallager-Brandversuche (Versuchsreihe III) werden in einer ersten Versuchsreihe 22 und in einer zweiten nochmal 12 Versuche mit Heptan-Zerstäubungsbrennern durchgeführt, um das Temperatur- und Strömungsfeld zu vermessen und es mit den IFS-Ergebnissen zu vergleichen.

2.6 Die Position des Brandes in der Versuchshalle

Bei den 22 Versuchen der Versuchsreihe I befindet sich der Heptan-Brenner entweder

- direkt unter der RWA (Position A: 7 Versuche),
- 3,05 m nördlich (Position B: 5 Versuche),
- 3,05 m östlich (Position C: 6 Versuche) oder
- 8,62 m südwestlich (Position D: 4 Versuche) davon.

Bei den 12 Versuchen der Versuchsreihe II befindet sich der Heptan-Brenner entweder

- direkt unter der mit Meßinstrumenten ausgestatteten RWA (Position A: 2 Versuche),
- 3,05 m nördlich (Position B: 2 Versuche),
- 4,31 m (Position C: 2 Versuche) oder
- 8,62 m (Position D: 4 Versuche) südöstlich davon,

- 5,49 m südwestlich dieser RWA unter der westlichen Rauchschrze (Position E: 1 Versuch) oder
- 5,49 m nordwestlich dieser RWA unter dem Schnittpunkt der nördlichen und der westlichen Rauchschrze (Position F: 1 Versuch).

Bei den 5 Lagerbrand-Versuchen der Versuchsreihe III befindet sich die Zündquelle entweder

- direkt unter der mit Meßinstrumenten ausgestatteten RWA (Position A im Versuch III-2),
- 3,05 m nördlich davon (Position B im Versuch III-3) oder
- 8,62 m südöstlich davon (Position D in den Versuchen III-1, III-4 und III-5).

2.7 Die Art und Menge des eingesetzten Brandgutes

Die Brenner-Konstruktion für die 34 Versuche mit Heptan-Zerstäubungsbrennern ist in Bild 4 dargestellt. Der Brenner befindet sich 60 cm über dem Boden. Je nach Wärmefreisetzungsrate kann die Zahl der Zerstäubungsdüsen variiert werden: für $\dot{Q} \leq 5 \text{ MW}$ werden die Düsen A, B, C und G benutzt, für größere Werte alle 8 Düsen.

Bei den 5 Versuchen mit kartonierten Kunststoff-Artikeln in Regalen bestehen die Kunststoff-Artikel aus Hartpolystyrol-Bechern, die in Kartons zu je 125 verpackt werden. Diese werden in 2 Schichten zu je 2•2 Kartons auf Paletten gestapelt. Die Grundfläche einer Palette beträgt $1,14 \text{ m}^2$, ihre Höhe einschließlich Fracht 1,19 m und ihr Volumen $1,36 \text{ m}^3$. Mit dem volumenbezogenen Heizwert von 500 MJ/m^3 ergibt dies einen Heizwert von 680 MJ/Palette beziehungsweise 85 MJ/Karton . *Geht man allerdings von den im NIST-Bericht genannten Gewichtsangaben aus (80 kg/Palette, davon 36 % Polystyrol und 64 % Holz und Papier) und multipliziert mit den Heizwerten aus der Fachliteratur [14, 15], so ergeben sich 2.000 MJ/Palette und 250 MJ/Karton .*

2.8 Der Brandverlauf

In den Versuchsreihen I und II wird die Wärmefreisetzungsrate zu Versuchsbeginn quadratisch gesteigert,

$$\dot{Q}(t) = k \cdot t^2 \quad \text{mit } k = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ MW/sec}^2 \quad (1)$$

(im Versuch I-16: $k = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ MW/sec}^2$)

bis zu einem vorgewählten Maximalwert $\dot{Q}_{\text{const.}}$ oder bis der 1. Sprinkler aktiviert wird, und von diesem Zeitpunkt an konstant gehalten, bis der Versuch beendet wird, wenn sich entweder die Deckentemperatur nicht mehr erhöht oder bis keine weiteren Sprinkler mehr ansprechen, *was nach den $\vartheta(t)$ -Diagrammen wohl einer Versuchsdauer von 5 min entspricht*. Die Steuerung der \dot{Q} -Steigerung erfolgt manuell mit in Vorversuchen geeichten Durchflußmessern.

Für alle Versuche der Versuchsreihen I und II sind in Bild 4 die $\dot{Q}(t)$ -Kurven zusammengestellt. In der Versuchsreihe II wird die Wärmefreisetzungsrate 75 sec lang entsprechend Gleichung (1) gesteigert und beim dann erreichten Maximalwert $\dot{Q}_{\text{const.}} = 10 \text{ MW}$ konstant gehalten. *Diese Versuche dauern laut NIST-Bericht 10 min — die $\vartheta(t)$ -Diagramme belegen jedoch nur einen Zeitraum von 6...8 min.*

In der Versuchsreihe III dauern die Versuche 30 min, *die auch von den $\vartheta(t)$ -Diagrammen wiedergegeben werden.*

Für die Versuche mit Heptanbrennern wird zwar vermerkt, daß der konvektive Anteil der insgesamt freigesetzten Wärme 65 % beträgt, *doch enthält der NIST-Bericht keine Hinweise darauf, welchen Einfluß die Strahlung auf die Sprinkler- und/oder RWA-Aktivierung hat – beispielsweise bei einer Orientierung des Auslöseelementes parallel oder senkrecht zur Strahlung. Bei den Lagerbrand-Versuchen werden zum konvektiven respektive Strahlungs-Anteil der freigesetzten Wärme keine Angaben gemacht.*

2.9 Die Sprinkleraktivierung

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse, geordnet nach der im NIST-Bericht verwendeten Numerierung — mit dem Unterschied (Spalte 1), daß die dort mit P-... bezeichneten Lager-Brandversuche hier unter III-... firmieren. In Spalte 2 wird der eingesetzte Brennstoff gekennzeichnet: Heptan bei den Versuchen mit Zerstäubungsbrennern (beim Heptanbrenner-Versuch I-16 beträgt die Steigerung der Wärmefreisetzungsrate nur ein Viertel derjenigen der anderen Versuche in Versuchsreihe D), Paletten mit kartonierten Kunststoff-Artikeln bei den Lagerbränden. Spalte 3 enthält die Wärmefreisetzung bis zum Auslösen des 1. Sprinklers, berechnet durch Integration der Gleichung (1), die laut NIST-Bericht auch für die Entwicklung der Wärmefreisetzung bei den Lager-Brandversuchen gelten soll. Da sich der Einfluß der Sprinkler auf die Wärmefreisetzung nicht quantifizieren läßt, ist über den weiteren Verlauf von $\dot{Q}(t)$ keine Aussage möglich.

In Spalte 4 wird die Entfernung zwischen der Position des Brenners, beziehungsweise der Zündquelle und der RWA genannt: Entfernungen von 3,05 m bis 5,49 m (entsprechend den Positionen B, C, E und F im NIST-Bericht) werden als "nahe", größere (= 8,62 m, entspricht Position D) als "fern" bezeichnet.

Die Spalten 5...7 enthalten die Öffnungszeitpunkte der RWA $t_{A,RWA}$ (eingeklammerte Werte deuten auf manuelle Steuerung): Spalte 5 enthält RWA-Öffnungszeitpunkte, die vor dem Öffnungszeitpunkt des zuerst reagierenden Sprinklers liegen — insbesondere werden RWA, die in diesen Versuchen von Beginn an offen standen, durch (0:00) gekennzeichnet. Die $t_{A,RWA}$ -Werte in Spalte 6 sind entweder *gleich* dem Öffnungszeitpunkt des 1. Sprinklers *oder liegen zwischen* diesem und dem durchschnittlichen Öffnungszeitpunkt der Sprinkler im 2. Ring um den Brand. Die in Spalte 7 eingetragenen $t_{A,RWA}$ -Werte sind *größer* als die zuletzt genannten, das heißt, die RWA reagiert erst nach den Sprinklern in der Nähe des Brandes. ∞ bedeutet, daß das Auslöseelement der RWA nicht anspricht, (∞) daß die RWA während der gesamten Versuchsdauer geschlossen gehalten wird. Wenn die RWA statt des sonst üblichen 74°C- ein 100°C-Auslöseelement enthält, werden die RWA-Auslösezeitpunkte unterstrichen.

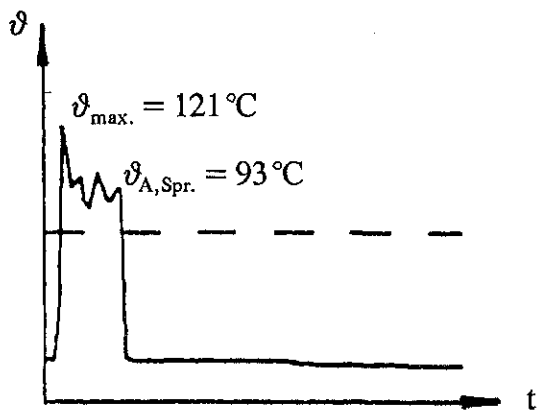
Spalte 8 in Tabelle 1 gibt Auskunft darüber, ob der Versuch mit oder ohne Rauchschrzen durchgeführt wird. Bei Versuchen ohne Rauchschrzen deutet ein angefügtes

R darauf hin, daß sich die Brennerposition in der Nähe des Randes der Installationsdecke befindet.

In den Spalten 9...24 sind die Reaktionen der Sprinkler aufgelistet, aufgeschlüsselt nach ihrer Entfernung zum Brenner beziehungsweise zur Zündquelle. Die Anzahl der im 1. Ring um den Brand aktivierten Sprinkler steht in Spalte 9, der *durchschnittliche* Zeitpunkt ihrer Aktivierung in Spalte 10.

Je nach der Anordnung des Brenners / der Zündquelle unter dem Raster der Sprinklerinstallation kann die Zahl a der Sprinkler, die hier zum ersten oder zweiten "Ring" um das Brandzentrum gerechnet werden, die also am nächsten oder "zweit" nächsten zum Brand liegen, unterschiedlich groß sein:

Versuchsaufbau	Versuchsreihe I	Versuchsreihe II	Versuche II-9 und II-10	Versuchsreihe III
a im 1. "Ring"	4	2	4	2
a im 2. "Ring"	12	10	12	10



Temperaturverlauf am 7. Sprinkler im Versuch III-3, --- $\vartheta_{A,n} = 74^{\circ}\text{C}$ ---

Unter $\vartheta_{A\emptyset}$ sind in Spalte 12 die Mittelwerte der im *Auslösezeitpunkt* der Sprinkler gemessenen Temperaturen $\vartheta_{A, Spr.}$ eingetragen, weil für das *Ansprechverhalten* der Sprinkler nicht die in den entsprechenden Tabellen im *NIST-Bericht* wiedergegebenen, kurzfristig herrschenden *Maximaltemperaturen* ϑ_{max} kennzeichnend sind, sondern jene *Temperatur/Zeit-Kombination* – korrekt: das *Integral* der $\vartheta(t)$ -Kurve, die das *Auslösen* tatsächlich

bewirkt. Wegen der Schwierigkeit, aus den briefmarken-großen $\vartheta(t)$ -Diagrammen der Versuchsreihe II die richtigen Temperaturen zu entnehmen, enthält die Tabelle für diese Versuche jedoch die im *NIST-Bericht* genannten ϑ_{max} -Werte.

Da im *NIST-Bericht* mehrfach Differenzen zwischen den $\vartheta(t)$ -Diagrammen in der Nähe der Sprinkler und jenen Bildern, in denen die Sprinkler-Öffnungszeitpunkte der verschiedenen Versuche zusammengestellt werden, festzustellen sind, werden für Tabelle 1

(und die daraus abgeleiteten Tabellen 2 und 3) nicht diese $t_{A, Spr.}$ -Werte verwendet sondern jene, die aus den Diagrammen abgegriffen werden können. Zwar beruhen diese Differenzen in Einzelfällen auf einfachen Übertragungsfehlern, darüber hinaus jedoch auf dem systematischen Fehler, nicht den wirkliche Zeitpunkt zu notieren, an dem das Auslöseelement des Sprinklers anspricht, sondern jenen Zeitpunkt, an dem das Thermo-element einen vorgewählten Temperatur-Grenzwert unterschreitet. Die Differenz zwischen diesen beiden Zeitpunkten hängt sowohl von der Differenz zwischen diesem Grenzwert und der Auslösetemperatur ab als auch vom Gradienten²⁾ der Temperaturkurve in dieser Zeitspanne.

Die Standardabweichungen der Ansprechzeiten im 1. Ring (Spalte 11) und die Standardabweichungen der Auslösetemperaturen im 1. Ring (Spalte 13, bezogen auf absolute Temperaturen) werden, wenn sie den Mittelwert aller Standardabweichungen in diesen Spalten (8,4 % in Spalte 11, 1,9 % in Spalte 13) um mehr als das Doppelte über- oder um mehr als $\frac{2}{3}$ unterschreiten, durch eine graue Schattierung hervorgehoben.

Entsprechendes gilt für die Werte der im 2. Ring aktivierten Sprinkler in den Spalten 14...18. Der Mittelwert der Standardabweichung für die Ansprechzeiten liegt bei 18 % (*das ist mehr als das Doppelte des entsprechenden Wertes im 1. Ring — besonders große Werte von 31...45 % bei den Versuchen I-3, I-10, I-14, III-1 und III-3*), der für die Temperaturen bei 2,4 %. Wenn im 2. Ring nur noch ein Sprinkler aktiviert wird, steht bei der Standardabweichung ./.

Die Spalten 19...21 enthalten Anzahl, Auslösezeitpunkt und -temperatur der Sprinkler, die vom Brenner aus gesehen jenseits der RWA liegen. Relevant sind diese Angaben nur bei geöffneter RWA, um sie mit Ergebnissen aus ähnlich konzipierten Versuchen mit nicht geöffneten RWA zu vergleichen. Die Angaben in Spalte 19 sind bei Versuchen, bei denen die RWA wenigstens bis zum Ansprechen dieser Sprinkler geschlossen bleibt, eingeklammert, weil hier die Verteilung der heißen Rauchgase, von denen die Sprinkler aktiviert werden, quasi unter einer geschlossenen Decke ohne RWA stattfindet, so daß von "jenseits" nicht gesprochen werden kann.

²⁾ wie sich selbst kleinste t_A -Unterschiede auswirken, sh. Seite 25 beim Vergleich der Versuche der Versuchsreihe I

In den Spalten 22...24 ist verzeichnet, wieviel Sprinkler — durchschnittlich wie lange nach dem Zünden des Brandes und bei welcher Auslöse- beziehungsweise Maximaltemperatur — insgesamt aktiviert werden. *Im NIST-Bericht werden bei den Versuchen der Versuchsreihe III nicht nur statt der Durchschnittswerte der Auslösetemperaturen der aktivierten Sprinkler diejenigen der Maximaltemperaturen aller Sprinkler, also auch der nicht aktivierten, wiedergegeben, sondern es werden in die Berechnung des Durchschnitts auch nur jene 56 Sprinkler einbezogen, die in dem (von Rauchschrzen umgebenen) größten Teilareal der Installationsdecke montiert sind — auch wenn der spezielle Versuch ohne Rauchschrzen gefahren wird. Würde, wenn schon, statt dessen über alle 100 Temperaturen gemittelt — und zwar auch bei den Versuchen mit Rauchschrzen, weil beispielsweise in Versuch III-3 Sprinkler auch außerhalb der Rauchschrzen aktiviert werden —, so bliebe nicht verborgen, daß in den beiden Versuchen III-1 und III-2 das Thermoelement 6/1 (gezählt in Süd/Ost-Richtung) nicht funktioniert. Die Differenzen zwischen den so berechneten Temperaturen und jenen im NIST-Bericht betragen bei den Versuchen ohne Rauchschrzen bis zu 13°C, bei den Versuchen mit Rauchschrzen bis zu 26°C.*

Darüber hinaus erscheint die Herkunft der im NIST-Bericht verzeichneten Temperaturen dubios, denn trotz der starken Verkleinerung der $\vartheta(t)$ -Diagramme in der Beschreibung der Versuchsreihe III ist zu erkennen, daß — im Gegensatz zu den Diagrammen der Versuchsreihe II — die genannten Temperaturen nicht den wiedergegebenen Kurven entsprechen. So werden beispielsweise für ϑ_{max} im Versuch III-3 213°C genannt, obwohl die Diagramme nur bis 200°C skaliert sind. Die höchste Abweichung findet sich bei Versuch III-1: 234°C statt, wie gezeichnet, 116°C! — Die in die Tabellen 1...3 übernommenen Werte entsprechen jenen in den Diagrammen des NIST-Berichtes.

2.9.1 Die Sprinkleraktivierung in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzung

Der NIST-Bericht macht im Detail hierzu keine Angaben. *Überschlagsrechnungen, wie in der Fachliteratur angeboten, führen zu keinen befriedigenden Ergebnissen: Werden nach den dort wiedergegebenen Faustformeln [16] die Sprinkler-Ansprechzeiten in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzung, der Höhe über dem Brenner, dem Abstand von der Mittelachse der Rauchsäule und dem Trägheitsbeiwert und der nominellen Auslöse-*

temperatur der Sprinkler berechnet, so erhält man Öffnungszeitpunkte, die in der Versuchsreihe I etwa beim 1,7-fachen und in der Versuchsreihe II etwa beim 1,4-fachen der gemessenen Werte liegen. Die Übernahme der am Sprinkler gemessenen an Stelle der berechneten Temperaturen in diese Formeln ergibt Öffnungszeitpunkte von 40 % beziehungsweise von 50 % der im Experiment ermittelten Werte.

Zur Beurteilung der Sprinkleraktivierung in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzung können die verschiedenen Versuche mit Hilfe einer Fallunterscheidung in Gruppen eingeteilt werden, in denen bis auf den freien Parameter "Wärmefreisetzung" die sonstigen Randbedingungen übereinstimmen:

- Installationsdecke über dem Versuch von Rauchschürzen eingefaßt oder nicht — im letzteren Fall: Entfernung des Brandzentrums vom Rand der Installationsdecke,
- Öffnungszeitpunkt der RWA vor dem des 1. Sprinklers, vor dem Durchschnitt der Sprinkler im zweiten Ring um das Brandzentrum oder später,
- Abstand der RWA vom Brandzentrum.

In Tabelle 2 sind die durchgeführten Versuche deshalb nach den folgenden Kriterien geordnet:

- Erstes Sortierkriterium ist der Öffnungszeitpunkt der RWA (geschlossen - vor dem 2. Sprinklerring - vor dem 1. Sprinkler), wobei als "geschl." alle RWA eingeordnet werden, die nach dem mittleren Öffnungszeitpunkt der Sprinkler im 2. Ring geöffnet werden;
- die Verwendung von Rauchschürzen (nein - ja) folgt mit zweiter Priorität;
- als drittes Kriterium dient die Entfernung (fern - nahe - unter) zwischen Brand und RWA und
- als letztes die Wärmefreisetzung.

Die Tabelle enthält zu Beginn alle Versuche, bei denen die RWA erst nach den Sprinklern im 2. Ring öffnen oder überhaupt geschlossen bleiben, wobei die Versuche ohne Rauchschürzen zuerst genannt werden. Es folgt die Gruppe jener Versuche, bei denen der RWA-Öffnungszeitpunkt zwischen der Aktivierung des 1. Sprinklers und der der

Sprinkler im 2. Ring liegt. Die letzte Gruppe umfaßt diejenigen Versuche, bei denen die RWA vor dem 1. Sprinkler anspricht oder von Anfang an geöffnet ist. In allen Gruppen wird zuerst nach der Distanz RWA-Brandzentrum geordnet (obsolet bei den Versuchen mit geschlossenen RWA) und dann nach der Wärmefreisetzung Q_A bis zur Aktivierung des 1. Sprinklers.

Bei der Berechnung der bis zum Auslösezeitpunkt $t_{A,1.Spr.}$ freigesetzten Wärmemenge Q_A ist zu unterscheiden, ob der 1. Sprinkler vor oder nach dem Zeitpunkt $t_{const.}$ aktiviert wird, zu dem die Wärmefreisetzungsrates von der Zeit unabhängig wird. $t_{const.}$ läßt sich für jeden Versuch mit Hilfe der im NIST-Bericht genannten $\dot{Q}_{const.}$ -Werte bestimmen:

$$t_{const.} = (\dot{Q}_{const.}/k)^{1/2} \quad (2)$$

Für $t_{A,1.Spr.} \leq t_{const.}$ ergibt sich die Wärmefreisetzung Q_A direkt aus der Integration der Gleichung (1):

$$Q_A = \frac{1}{3} \cdot k \cdot t_{A,1.Spr.}^3 \quad (3)$$

Für $t_{A,1.Spr.} > t_{const.}$ ist noch ein linearer Anteil zu addieren:

$$Q_A = \frac{1}{3} \cdot k \cdot t_{const.}^3 + \dot{Q}_{const.} \cdot (t_{A,1.Spr.} - t_{const.}) \quad (4)$$

Da sich also die vom Brenner oder vom Lagerbrand freigesetzte Wärmemenge Q_A als direkte Zeitfunktion darstellt, kann bei Experimenten mit gleicher $\dot{Q}(t)$ -Funktion des Brenners und unveränderter Versuchsgeometrie der Auslösezeitpunkt der Sprinkler nicht – in Umkehrung der Gleichung (3) beziehungsweise (4) – zur Beurteilung der Folgen unterschiedlicher Wärmemengen Q_A herangezogen werden, was in entsprechender Weise auch auf die unter der Decke erreichten Temperaturen zutrifft. Voneinander abweichende Sprinklerauslöse-Zeitpunkte und -Temperaturen können deshalb nur auf Inhomogenitäten im Temperatur- und Strömungsfeld in der Rauchgasschicht oder auf Fertigungstoleranzen und Ausrichtungsunterschiede der Auslöseelemente zurückgeführt werden. Über die Strömungsgeschwindigkeit unter der Decke enthält der NIST-Bericht keine Angaben und über die dort herrschenden Temperaturen nur zum Teil (Versuchsreihe I) beziehungsweise nur bis zu dem Zeitpunkt, an dem das Thermoelement benetzt wird. Die Temperaturangaben in den Tabellen 1–3 beziehen sich auf den Sprinkler-Auslösezeitpunkt und können zum Q_A -Vergleich nur bedingt herangezogen werden.

Mit Ausnahme des Versuchs I-16 reagieren die Sprinkler in der Versuchsreihe I durchweg nach dem Zeitpunkt, zu dem die Wärmefreisetzungsrates konstant wird. Es zeigt

sich, daß selbst ein geringer Unterschied zwischen den Öffnungszeitpunkten der ersten Sprinkler noch eine spürbare Differenz bei der Wärmefreisetzung bewirkt:

- Bei den Versuchen I-19, I-17, I-21 und I-22, RWA geschlossen, keine Rauchschürzen, wird $\dot{Q}_{\text{const.}} = 4,6 \text{ MW}$ nach $t_{\text{const.}} = 51 \text{ sec}$ erreicht. Die Auslöseelemente der 1. Sprinkler reagieren nach $53 \dots 58 \text{ sec}$, das heißt, $2 \dots 7 \text{ sec}$ nachdem $\dot{Q}(t)$ seinen Maximalwert annimmt, wodurch sich die Zunahme von $Q_A = 88 \text{ MJ}$ bei Versuch I-19 bis $Q_A = 111 \text{ MJ}$ bei Versuch I-22 erklärt. Die Auslösetemperaturen korrelieren hiermit nicht.
- Bei den Versuchen I-4, I-8, I-1, I-12, I-7 und I-9 mit Rauchschürzen, RWA ebenfalls geschlossen, wird $\dot{Q}_{\text{const.}} = 4,4 \text{ MW}$ nach $t_{\text{const.}} = 50 \text{ sec}$ erreicht. Die 1. Sprinkler reagieren nach $58 \dots 69 \text{ sec}$, das heißt, $8 \dots 19 \text{ sec}$ nachdem $\dot{Q}(t)$ seinen Maximalwert annimmt, was die Zunahme von $Q_A = 109 \text{ MJ}$ bei Versuch I-4 bis $Q_A = 158 \text{ MJ}$ bei Versuch I-9 erklärt. Die Auslösetemperaturen korrelieren hiermit nicht.

In der Versuchsreihe II gilt für alle zwölf Versuche exakt dieselbe $\dot{Q}(t)$ -Funktion mit übereinstimmenden Werten für $t_{\text{const.}} = 75 \text{ sec}$ und $\dot{Q}_{\text{const.}} = 10 \text{ MW}$. Die 1. Sprinkler reagieren in allen Versuchen vor $t_{\text{const.}}$, was zu größeren Q_A -Unterschieden führt als in der Versuchsreihe I.

- Bezüglich des Auslösezeitpunktes der 1. Sprinkler und folglich auch bei den Werten für Q_A stimmen die beiden Versuche II-4 und II-11 überein – nicht jedoch bei den Auslösetemperaturen.
- Bei den Versuchen II-9, II-7, II-5, II-1 und II-10 nimmt die Auslösezeit von 67 sec bis 74 sec und Q_A von 178 MJ bis 240 MJ zu. Die Auslösetemperaturen korrelieren damit nicht.

In der ersten Gruppe von Versuchen in Tabelle 2 (RWA geschlossen, keine Rauchschürzen, Brenner fern vom Rand der Installationsdecke) zeigt der Vergleich der Versuche I-19 und I-22, daß sich die Q_A -Differenz von 26% im 1. Ring *nicht* auswirkt: Bei ähnlichen Temperaturen werden zu ähnlichen Zeiten jeweils gleich viele Sprinkler aktiviert. *Trotz* gleicher konstanter Wärmefreisetzungsrates bei beiden Versuchen werden

nach den Sprinklern im 1. Ring im Versuch I-19 dreimal so viel Sprinkler aktiviert wie im Versuch I-22, *obwohl* dort die durchschnittlichen Auslösetemperaturen um 20°C höher liegen. — *Weshalb sie aber bei diesen beiden Versuchen und bei Versuch I-14 verglichen mit den anderen so niedrig liegen, wird im NIST-Bericht nicht erläutert. Sie korrelieren weder mit besonders geringen Wärmefreisetzungen noch mit auffällig geringen Gesamtaktivierungszahlen.*

Der Vergleich der Versuche I-17, I-18 und I-21 (RWA geschlossen, keine Rauchschürzen, Brennerposition jedoch nahe beim Rand der Installationsdecke) zeigt ebenfalls, daß bei allen drei Versuchen im 1. Ring zu ähnlichen Zeiten die gleiche Anzahl von Sprinklern aktiviert wird. *Zwar* liegt die durchschnittliche Auslösetemperatur beim Versuch I-17 mit etwa 10 % niedrigerer Wärmefreisetzung 9°C unter der im Versuch I-21, doch besteht diese Differenz genauso zwischen den Versuchen I-17 und I-18, die nach der Wärmefreisetzung nahezu übereinstimmen. Bei den Versuchen I-17 und I-21 ist die konstante Wärmefreisetzungsrate nach dem Ansprechen des 1. Sprinklers gleich ($\dot{Q}_{\text{const.}} = 4,6 \text{ MW}$), bei Versuch I-18 20 % niedriger. *Dennoch* gleichen sich der Zahl der Sprinkler nach, die nach jenen im 1. Ring ansprechen, die Versuche I-18 und I-17 anstatt der Versuche I-17 und I-21³⁾: Bei letzterem werden im 2. Ring 6 Sprinkler ausgelöst, wogegen bei den beiden anderen Versuchen dort keiner anspringt.

Bei den beiden Lagerbrand-Versuchen III-1 und III-2 werden trotz fehlender Rauchschürzen von allen Versuchen aus der Versuchsreihe III die meisten Sprinkler ausgelöst. Die im Vergleich zu den Heptan-Versuchen um den Faktor 2...6 höhere Wärmefreisetzung bewirkt *keine* entsprechend höheren Sprinkler-Auslösetemperaturen — sie liegen im Gegenteil um 10...50°C darunter, selbst bei der insgesamt höchsten Wärmefreisetzung ($Q_A \approx 593 \text{ MJ}$) im Versuch III-2. Die beiden Sprinkler im 1. Ring reagieren später als in den Versuchsreihen I und II – und beim Versuch III-1 zeitlich deutlich gegeneinander versetzt.

In der Gruppe der Versuche mit Rauchschürzen und geschlossenen RWA (Versuche I-4 bis I-11 in Tabelle 2) finden sich Wärmefreisetzungen bis zum Auslösen des 1. Sprinklers von 109...477 MJ (der Versuch I-11 wird in Kapitel 2.10.1 besprochen). Eine

³⁾ Nach 4 Minuten steigt bei einem der Sprinkler im 1. Ring die Temperatur wieder auf 180°C, obwohl alle benachbarten Sprinkler arbeiten und Temperaturen von weniger als 20°C anzeigen.

Korrelation der Steigerung der Wärmefreisetzung auf über 400 % mit der Auslösetemperatur der Sprinkler im 1. Ring ist *nicht* zu erkennen. Die Steigerung der konstanten Wärmefreisetzungsrates von 4,4 MW (in der Versuchsreihe I: I-4, I-8, I-1, I-12, I-7 und I-9) auf 10 MW (Versuchsreihe II: alle Versuche) führt dann näherungsweise zu einer Verdoppelung der Zahl der insgesamt aktivierten Sprinkler.

Der Versuch I-20 kann mit anderen Versuchen nicht verglichen werden, weil die RWA in keinem weiteren Versuch ohne Rauchschrüzen mit den Sprinklern im 1. Ring aufgeht.

In der Gruppe der Versuche mit Rauchschrüzen, geringem Abstand zwischen RWA und Brenner und RWA-Öffnungszeiten, die zwischen jener des 1. Sprinklers und jenen der Sprinkler im 2. Ring liegen, zeigen die Versuche I-6⁴⁾ und I-3, daß im 1. Ring ähnliche Wärmefreisetzungen zur gleichen Zahl ausgelöster Sprinkler mit ähnlichen Auslösetemperaturen führen. Die gleichen konstanten Wärmefreisetzungsraten ($\dot{Q}_{\text{const.}} = 4,4 \text{ MW}$ ab $t_{\text{const.}} = 50 \text{ sec}$) aktivieren im 2. Ring von Versuch I-3 7 Sprinkler, im Versuch I-6 *dagegen* nur 4, weil die Temperaturen an den Sprinklern jenseits der quer angeströmten RWA mit deren Öffnung stärker fallen als bei der längs angeströmten in Versuch I-3. *Dieser Effekt, der besonders deutlich bei den beiden Sprinklern direkt hinter der RWA zutage tritt, findet im NIST-Bericht genausowenig Erwähnung wie die Abweichung von der Modellrechnung, derzufolge diese beiden Sprinkler auslösen sollten.*

Der Versuch III-3 kann zu Vergleichen nicht herangezogen werden, weil die RWA in keinem anderen Lagerbrand-Versuch aufgeht.

In der folgenden Gruppe von Versuchen (Versuche I-15 bis II-3 in Tabelle 2), bei denen sich der Brenner direkt unter der RWA befindet, springen in den Versuchen I-15 und II-3 – *trotz unterschiedlicher Wärmefreisetzungen ($\Delta Q_A > 33 \%$)* – bei ähnlichen *Auslösetemperaturen*⁵⁾ alle Sprinkler im 1. Ring an. In der sich anschließenden Phase zeitlich konstanter Wärmefreisetzung entspricht die unterschiedliche Zahl aktivierter Sprinkler der Differenz der Wärmefreisetzungsrates — *möglicherweise aber nur deshalb, weil im*

⁴⁾ Kanal 65 verzeichnet während der ersten 1½ Minuten dieses Versuchs keine Temperatur und dann einen Ausreißer bis 200°C, ohne daß der entsprechende Sprinkler ausgelöst wird – *ein Phänomen, das im NIST-Bericht keine Erwähnung findet.*

⁵⁾ Beim Versuch II-3 sind in *diesem* Falle die Auslöse- mit den Maximaltemperaturen identisch.

Versuch I-15 die meisten der Sprinkler im 2. Ring nicht anspringen, obwohl sie gleich hohen Temperaturen ausgesetzt sind wie der einzige dort aktivierte Sprinkler und zum Teil deutlich höheren Temperaturen als einige der im Versuch II-3 aktivierten Sprinkler. (Anmerkungen zum Versuch I-16 sh. unten)

Bei den Versuchen II-10, I-2, II-6 und III-5⁶⁾ mit großem Abstand zwischen Brenner und RWA, bei denen die RWA geöffnet wird, bevor der 1. Sprinkler anspricht, korreliert – mit Ausnahme des Lagerbrand-Versuches – die Sprinkler-Auslösetemperatur mit der bis dahin freigesetzten Wärme und die Zahl der insgesamt aktivierten Sprinkler mit der Höhe der konstanten Wärmefreisetzungsrate.

Bei den entsprechenden Versuchen mit geringem Abstand zwischen Brenner und RWA (II-12, I-2 und I-5) stimmt ebenfalls die Korrelation zwischen der Höhe der konstanten Wärmefreisetzungsrate und der Zahl der insgesamt aktivierten Sprinkler — *nicht jedoch* die zwischen der Wärmefreisetzung bis zum Auslösen des 1. Sprinklers und dessen Auslösetemperatur: Die höchsten Temperaturen im 1. Ring werden nicht in dem Versuch mit der höchsten Wärmefreisetzung (I-5: 162 MJ) erzielt, sondern im Versuch I-2 mit 131 MJ. Bei insgesamt gleicher Wärmefreisetzung während der gesamten Versuchsdauer werden im Versuch I-2 jenseits der geöffneten RWA höhere Temperaturen erreicht als im Versuch I-5, die *im Unterschied* zu dort noch die Aktivierung von drei weiteren Sprinklern bewirken.

Bei den in Tabelle 2 zuletzt genannten Versuchen (I-13 und I-14), bei denen sich der Brenner – bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen – unter der RWA befindet, korreliert *weder* die Auslösetemperaturen im 1. Ring mit der Wärmefreisetzung bis zur Aktivierung des 1. Sprinklers, *noch* die Zahl der im 2. Ring aktivierten Sprinkler mit der konstanten Wärmefreisetzungsrate.

Die verzögerte Reaktion der Sprinkler im Versuch I-16 resultiert aus der reduzierten Steigerung der Wärmefreisetzungsrate. Deswegen, so der NIST-Bericht, lasse sich dieser Versuch mit den anderen nicht vergleichen. *In der Tat wird keine Erklärung dafür geboten, weshalb insgesamt noch weniger Sprinkler ausgelöst werden als in den übrigen Versuchen mit dem Brenner unter offener RWA, obwohl die Wärmefreisetzung bis zum*

⁶⁾ ähnliches Temperatur-Phänomen wie bei Versuch I-6

Ansprechen des 1. Sprinklers in einer Größenordnung wie im Versuch I-13 rangiert und die Temperaturen an den Sprinklern mit 92°C ähnliche Werte erreichen wie in den Versuchen I-19 und I-22. — Ein Versuch, der mit anderen nicht verglichen werden kann, leistet keinen Beitrag zur Erhellung der zu untersuchenden Problematik.

Zusammengezählt verzeichnet die obige Zusammenstellung mehr *Widersprüche* als Bestätigungen der schlichten Annahme, eine Steigerung der Wärmefreisetzung hätte eine Erhöhung der Sprinkleraktivierung zur Folge, *und dokumentiert die Notwendigkeit, diesen Zusammenhang noch gründlicher zu untersuchen, wofür sicherlich eine größere Zahl von Versuchswiederholungen erforderlich ist, denn zum Teil beruhen die hier zusammengestellten Schlußfolgerungen auf Versuchs"reihen", die nur aus einem oder zwei Versuchen bestehen.*

2.9.2 Die Sprinkleraktivierung in Abhängigkeit von der Raumhöhe

Dieser Zusammenhang wird im Rahmen des besprochenen NIST-Forschungsberichtes nicht geprüft. Zwar werden Versuchsreihen bei verschiedenen Raumhöhen gefahren, doch werden dabei auch andere wichtige Parameter wie beispielsweise die Wärmefreisetzung verändert, so daß eine Bewertung des Einflusses der Raumhöhe auf den Zeitpunkt der Sprinklerauslösung nicht möglich ist.

2.9.3 Die Sprinkleraktivierung in Abhängigkeit von der Dicke der Rauchgasschicht unter der Decke

Der NIST-Bericht enthält hierzu, bis auf die im folgenden Kapitel zusammengestellten, keine weiteren Angaben.

2.9.4 Die Sprinkleraktivierung in Abhängigkeit von der Größe und Anordnung der Rauchschrürzen oder anderer Bauteile

Die Versuche werden mit oder ohne Rauchschrürzen durchgeführt. Ihre Abmessungen werden nicht variiert. Verglichen mit den Unterschieden bei der Variation der anderen Parameter (Abstand Brenner-RWA, Wärmefreisetzung,...) kann der Größenunterschied der mit Rauchschrürzen eingefassten Areale der Installationsdecke zwischen den Versuchsreihen I und II vernachlässigt werden.

Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, werden mit Rauchschrürzen Sprinkler-Auslösetemperaturen erreicht, die im 1. Ring durchschnittlich 20°C, insgesamt jedoch weniger als 10°C über jenen ansonsten gleicher Versuche ohne Rauchschrürzen liegen. Daraus ergeben sich Steigerungsfaktoren für die Anzahl der aktivierten Sprinkler von 1 (Versuchspaar zum Vergleich: I-19/I-7 — trotz unterschiedlicher Wärmefreisetzung bis zum Auslösen des 1. Sprinklers!) bis 1,8 (Versuchspaar mit gleicher Wärmefreisetzung: I-22 und I-8). *Im Gegensatz zur Darstellung im NIST-Bericht kommt aber auch der umgekehrte Fall vor: Beim Versuch III-4 mit Rauchschrürzen springen nur 5 Sprinkler an, während es beim Versuch III-1 ohne Rauchschrürzen und bei darüber hinaus geringerer Wärmefreisetzung 20 sind — bei Versuch III-2 sogar 23. Eine Deutung dieser großen Streubreite der Versuchsergebnisse enthält der NIST-Bericht nur für den Versuch III-1: Unerklärliche Verzögerung beim Ansprechen des zweiten Sprinklers.*

Einige Versuche (I-1, I-2, I-3, I-8, II-4, II-8 und III-3) zeigen, daß die heißen Rauchgase durch die Rauchschrürzen nicht nur zusammengehalten, sondern – wenn sich der Brandherd in ihrer Nähe befindet – auch kanalisiert werden, so daß in der Deckenströmung entlang der Rauchschrürzen auch noch Sprinkler in größerer Entfernung anspringen als bei Versuchen mit Abstand zwischen Brand und Rauchschrürzen. *Die größte Entfernung eines aktiven Sprinklers vom Brandherd beträgt jedoch nicht 7,6m (gemeint sind 7,77), sondern 12,29m in den Versuchen II-4 und II-8.*

Wenn sich der Brenner in der Nähe des Randes der Installationsdecke befindet, so daß die heißen Rauchgase bei fehlenden Rauchschrürzen besonders leicht abströmen können, werden zwar im 1. Ring ähnlich viele, aber insgesamt – verglichen mit Versuchen, bei denen der Brenner mehr zentral aufgestellt wird – deutlich reduzierte Sprinkler-

aktivierungen erreicht. Jedoch tritt im Einzelfall – *im NIST-Bericht nicht kommentiert* – auch das Gegenteil ein (Vergleich: Versuche I-21 und I-22).

2.9.5 Die Sprinkleraktivierung in Abhängigkeit von der Anordnung und Funktion der installierten RWA

In Tabelle 3 werden die Versuche nach dem Versuchsaufbau, insbesondere nach der Entfernung Brenner-RWA, und nach dem RWA-Öffnungszeitpunkt geordnet: Die Sortierkriterien stehen ihrer Priorität nach in den Spalten 1, 4, 7, 6 und 5. Daraus ist zu entnehmen, daß die Anzahl der aktivierten Sprinkler in keiner der drei Versuchsreihen – mit Ausnahme von Versuch II-8 – vom Öffnungszeitpunkt der RWA beeinflußt wird, wenn zwischen dem Brenner (beziehungsweise der Zündquelle bei den Lagerbränden) und der RWA ein geringer bis großer Abstand besteht. Unabhängig davon ob die RWA

- vor dem 1. Sprinkler anspricht oder – manuell gesteuert – sogar von Versuchsbeginn an offen steht,
- vor den Sprinklern im 2. Ring oder erst
- nach den Sprinklern im 2. Ring oder gar nicht reagiert,

werden vergleichbare Auslöse- beziehungsweise Maximaltemperaturen an den Sprinklern erreicht und eine ähnliche Zahl von Sprinklern springt nach vergleichbaren Zeitspannen an (Vergleichsbeispiel: Versuche I-9 und I-2 mit insgesamt 14 bzw. 12 Sprinklern nach etwa 3:14 min bzw. 2:18 min bei $\vartheta_{A, Spr.} \approx 125 \dots 138^\circ\text{C}$).

Zwar sind, wenn sich die Versuche nur durch den RWA-Öffnungszeitpunkt unterscheiden, auch geringe Unterschiede in den Sprinklerreaktionen zu verzeichnen (Vergleichsbeispiel: Versuche I-1 und I-5 mit insgesamt 11 bzw. 9 Sprinklern nach 1:51 min bzw. 2:22 min bei etwa 140°C), doch treten Differenzen dieser Größenordnung auch zwischen Versuchen auf, die unter vergleichbaren, sogar identischen Bedingungen durchgeführt werden, wie die folgenden Beispiele zeigen:

- Versuche I-3 und I-6 mit insgesamt 12 bzw. 8 Sprinklern nach etwa 2 min bei $\vartheta_{A, Spr.} \approx 145^\circ\text{C}$,
- Versuche II-11 und II-10 mit insgesamt 23 bzw. 19 Sprinklern nach etwa 2 min bei $\vartheta_{A, Spr.} \approx 150^\circ\text{C}$,

- Versuche II-8 und II-12 mit insgesamt 13 bzw. 23 Sprinklern nach etwa 2 min mit $\vartheta_{\max.} = 149^{\circ}\text{C}$ bzw. 140°C .

Von besonderem Interesse für die Beurteilung der Beeinflussung der Sprinkleraktivierung durch frühzeitig öffnende RWA in geringem Abstand vom Brand ist der Vergleich dieser Versuche mit solchen, in denen die RWA geschlossen bleibt. Es zeigt sich, daß in den Versuchen II-9, II-11, II-10 und II-4 (RWA nahe beim Brenner, geschlossen) von den Sprinklern jenseits der RWA nicht mehr ansprangen als in den Versuchen II-8 und II-12 (RWA nahe beim Brenner, mit den Sprinklern im 2. Ring bzw. von Anfang an geöffnet) — in zwei Fällen (Versuche II-9 und II-10) sogar weniger. Im Versuch III-3, dem einzigen Lagerbrandversuch mit geringem Abstand zwischen RWA und Zündquelle, geht die RWA mit den Sprinklern im 2. Ring auf und jenseits dieser RWA springen dann noch zwei Sprinkler an — *ein Vergleichsversuch (RWA nahe bei der Zündquelle, geschlossen) wird nicht durchgeführt.*

Im Versuch III-5, bei dem sich das Brandzentrum etwa in der Mitte des Versuchsareals befindet, so daß vergleichbare⁷⁾ Entfernungen zu allen RWA bestehen (8,62...12,93 m), werden mit dem Anspringen des 1. Sprinklers manuell alle 4 RWA geöffnet. Wie im Versuch III-4 wird von den ersten, innerhalb kurzer Zeit ansprechenden Sprinklern der Brand rasch eingedämmt, weitere Sprinkler werden nicht mehr aktiviert. Interessanterweise werden im Versuch III-5 trotz der geöffneten RWA 1,4-mal mehr Sprinkler ausgelöst als im Versuch III-4, bei dem alle RWA geschlossen bleiben. Obwohl die Gesamt-Brandlast im Versuch III-5 nur 79 % von jener im Versuch III-4 beträgt — die bis zum Auslösen des 1. Sprinklers freigesetzte Wärme sogar nur 50 % —, werden an den Sprinklern nahezu identische Auslösetemperaturen gemessen. *Bei den Lagerbrandversuchen ist eine Beurteilung des RWA-Einflusses auf die Sprinklerfunktion praktisch nicht möglich, weil schon bei geschlossener RWA die Zahl der insgesamt aktivierten Sprinkler zwischen 5 und 23 variiert.*

Im Unterschied zu den Versuchen mit geringer bis großer Entfernung zwischen RWA und Brand zeigen jene vier Versuche mit Rauchschrzen, in denen sich der Brenner direkt unter der RWA befindet, eine Beeinflussung der Zahl der aktivierten Sprinkler

⁷⁾ nicht gleich (sh. Bild 3) und deshalb auch nicht "farthest from the vents", wie es im NIST-Bericht heißt, — aber vergleichbar insofern, als in keinem der 38 gesprinklerten Versuche eine RWA reagiert, die weiter als 6,1 m (Versuch III-2) vom Brandzentrum entfernt ist

durch den Auslösezeitpunkt der RWA. In der Versuchsreihe I (Versuche I-15, I-16, I-13 und I-14) geht ihre Zahl auf 3...7 zurück, verglichen mit 10...14 bei den Versuchen mit geschlossenen RWA (Versuche I-9, I-1, I-4, I-7, I-8 und I-12). *Im Gegensatz zur Interpretation im NIST-Bericht korreliert allerdings weder die Zahl der insgesamt ausgelösten Sprinkler noch die Reihenfolge der Auslösezeitpunkte der ersten Sprinkler mit dem Öffnungszeitpunkt: Indirekt wird die Behauptung aufgestellt, im Versuch I-15 verursache die 90sec nach Versuchsbeginn geöffnete RWA eine Verzögerung des durchschnittlichen Auslösezeitpunktes der Sprinkler im 1. Ring von 71 sec auf 66 sec!*

Beim einzigen entsprechenden Versuch der Reihe II (II-3) geht die Zahl der aktivierten Sprinkler etwa auf die Hälfte des sonst üblichen zurück, wenn die RWA gleichzeitig mit den Sprinklern im 1. Ring anspricht. Derselbe Effekt tritt in dieser Versuchsreihe allerdings auch bei II-8 mit geringer Entfernung zwischen RWA und Brenner auf — *konterkariert von Versuch II-12. Ein Versuch mit dem Brenner unter der RWA und einem RWA-Auslösezeitpunkt noch vor der Aktivierung des 1. Sprinklers wird nicht durchgeführt. In der Versuchsreihe III wird zur Untersuchung dieses Zusammenhanges kein einziger Versuch gefahren.*

Für die Konstellation innerhalb der Versuchsreihe I (mit Rauchschürzen), bei der sich die RWA nahe beim Brenner befindet und erst nach den Sprinklern im 2. Ring öffnet oder ganz geschlossen bleibt, werden ebenfalls vier Versuche (I-1, I-4, I-7 und I-8) angestellt. *Die Versuche I-9 und I-12 mitgezählt, bei denen sich die RWA lediglich in anderer Entfernung vom Brenner befindet aber ebenfalls geschlossen bleibt, müßten sechsmal die gleichen Sprinkler anspringen, was jedoch nicht der Fall ist. Tatsächlich schwankt die Zahl der aktivierten Sprinkler zwischen 10 und 14, die Ansprechzeit im Mittel zwischen 1:51min und 3:19min und die mittlere Auslösetemperatur zwischen 125°C und 148°C. Die Wärmefreisetzungsrate nach Gleichung (1) ist bei allen diesen Versuchen gleich und mündet bei $t_{\text{const.}} \approx 50 \text{ sec}$ in $\dot{Q}_{\text{const.}} = 4,4 \text{ MW}$.*

Besonders krass sind die Unterschiede bei den 5 entsprechenden Versuchen ohne Rauchschürzen (I-22, I-17, I-18, I-21 und I-19): 4...10 aktivierte Sprinkler mit mittleren Ansprechzeiten zwischen 1:03 min und 5:16 min und gemittelten Auslösetemperaturen zwischen 113°C und 154°C. *Erwartungsgemäß werden bei dem Versuch mit der geringsten konstanten Wärmefreisetzungsrate (I-18: $\dot{Q}_{\text{const.}} = 3,7 \text{ MW}$) und einer Brennerposition nahe beim Rand der Installationsdecke die wenigsten Sprinkler aktiviert — genau*

so wenige wie beim Versuch I-17 mit gleicher Brennerposition aber höherer Leistung ($\dot{Q}_{const.} = 4,6 MW$). In dem der Brennerposition und -leistung nach gleichen Versuch I-21 ist dagegen die höchste Zahl aktivierter Sprinkler zu verzeichnen.

Die entsprechenden Schwankungen in der Versuchsreihe II (Versuche II-1, II-5, II-9, II-11, II-10 und II-4 – alle mit Rauchschürzen) reichen von 16 bis 28 Sprinkler, aktiviert im Mittel nach 1:57 min bis 2:53 min bei Maximaltemperaturen an den Sprinklern von 142°C bis 154°C. Zwar werden in den Versuchen (II-10 und II-4), in denen die RWA nach den Sprinklern im 2. Ring doch noch aufgeht, die wenigsten aktivierten Sprinkler gezählt, doch liegt dies nicht an der RWA-Funktion, sondern daran, daß schon im 2. Ring nicht alle Sprinkler anspringen — bei Versuch II-4 wohl deswegen, weil bis zum Auslösen des 1. Sprinklers nur 141 MJ freigesetzt werden. Im Gegensatz hierzu weist Versuch II-10 mit 240 MJ die höchste Wärmefreisetzung bis zu diesem Zeitpunkt auf.

Die Versuche I-17, I-18, I-19 und I-22, in denen die RWA mit einem 100°C-Auslöseelement ausgestattet ist, gehören alle zur Versuchsreihe I, alle ohne Rauchschürzen, zwei mit geringem Abstand zwischen der Brennerposition und dem Rand der Installationsdecke. Nur in einem Fall (Versuch I-19, Brenner unter RWA) reagiert das Auslöseelement (etwa 8:40 min später als das 74°C-Auslöseelement im ansonsten vergleichbaren Versuch I-20), doch schon bei geringem Abstand zwischen Brenner und RWA bleibt sie geschlossen. Bei der Bewertung der Versuchsergebnisse ist die Beeinflussung der Sprinkleraktivierung durch die nominelle Auslösetemperatur der RWA dadurch berücksichtigt, daß der Aufbau von Tabelle 3 sich am RWA-Auslösezeitpunkt orientiert.

2.9.6 Die Sprinkleraktivierung in Abhängigkeit von der Fertigungsgenauigkeit der Auslöseelemente

Der NIST-Bericht macht hierzu keine Aussagen, doch läßt sich aus einigen auffälligen Diskrepanzen zwischen Sprinklern, an denen vergleichbare thermodynamische Bedingungen herrschen, schließen, daß entweder lokal Temperaturschwankungen auftreten, die von den Thermoelementen nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit aufgezeichnet beziehungsweise in den Temperaturkurven wiedergegeben werden, oder daß nicht-vernachlässigbare Differenzen zwischen den örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten in der

Rauchgasschicht unter der Decke bestehen – über die der NIST-Bericht keine Angaben macht –, oder daß die Auslöseelemente mit erheblichen Funktionstoleranzen gefertigt werden. Darauf weisen unter anderem die schattierten Felder in der Tabelle 1 hin: “besonders große Abweichung vom Mittelwert des Auslösezeitpunktes” für die Sprinkler im 1. Ring bei den Versuchen I-14, I-20 und III-1 (die anderen Schattierungen betonen dagegen besonders geringe Abweichungen).

In der Auswertung von Versuch III-1 legt der NIST-Bericht dar, daß sich der Brand wegen des nicht gleichzeitigen Auslösens der beiden ersten, der Zündquelle symmetrisch benachbarten, Sprinkler wesentlich stärker ausbreite als in den Versuchen, in welchen dieser Zeitverzug beim 2. Sprinkler nicht auftritt. Der Vergleich der Temperaturkurven an der Position der beiden Sprinkler veranschaulicht, wieviel länger am zweiten Sprinkler als am ersten eine Temperatur über $\vartheta_{A,n}$ herrscht (und sogar deutlich über jener am 1. Sprinkler — die Zahlenangaben im NIST-Bericht sind offensichtlich falsch: In Wirklichkeit beträgt die Maximal- und Auslösetemperatur, $\vartheta_{max.,1.Spr.} = \vartheta_{A,1.Spr.}$, am zuerst ansprechenden Sprinkler knapp 120°C und an dem danach aktivierten $\vartheta_{max.,2.Spr.} = 140^{\circ}\text{C}$ bzw. $\vartheta_{A,2.Spr.} = 97^{\circ}\text{C}$). Eine Erklärung, weshalb dem zweiten Sprinkler etwa die doppelte Wärmemenge, verglichen mit dem ersten⁸⁾, zugeführt werden muß, bevor er anspringt, bietet der NIST-Bericht nicht.

Weitere Fälle “unsymmetrischen Auslöseverhaltens” sind in folgenden Versuchen zu konstatieren:

- der 14. Sprinkler im Versuch I-9 sollte eigentlich gleichzeitig mit dem 8. ansprechen, reagiert aber trotz ähnlicher $\vartheta(t)$ -Kurve erst 8 min später;
- der 12. Sprinkler im Versuch I-10 sollte eigentlich gleichzeitig mit dem 7. ansprechen, reagiert aber trotz ähnlicher $\vartheta(t)$ -Kurve erst 3 min später;
- in den Versuchen I-13, I-14 und I-16 springt jeweils der Sprinkler mit dem Temperaturmeßkanal 55 als erster an – etwa bei 75 % der Zeit, die die restlichen Sprinkler im 1. Ring benötigen;

⁸⁾ Wenn an zwei Auslöseelementen die Strömungsgeschwindigkeiten der Rauchgase, deren Temperaturdifferenz zum Auslöseelement, die Wärmeübergangszahlen und die wärmeaustauschenden Flächen gleich groß sind, ist die übertragene Wärme nur noch der Zeit proportional.

- im Versuch I-14 reagiert der 4. Sprinkler trotz ähnlicher $\vartheta(t)$ -Kurve erst 80 sec nach dem durchschnittlichen Öffnungszeitpunkt der anderen Sprinkler im 1. Ring;
- im Versuch I-20 reagiert der 4. Sprinkler trotz ähnlicher $\vartheta(t)$ -Kurve erst 2 min nach dem durchschnittlichen Öffnungszeitpunkt der anderen Sprinkler im 1. Ring;
- in den Versuchen I-8, I-14, I-19 und I-22 lösen die Sprinkler im 2. Ring besonders spät aus – bis zu 5 Minuten später als sonst üblich;
- im Versuch II-4 spricht der 15. Sprinkler mit $\vartheta_{\max.} = 132^{\circ}\text{C}$ nach 5:00 min an, wohingegen der 14. Sprinkler mit $\vartheta_{\max.} = 102^{\circ}\text{C}$ bereits nach 4:09 min reagiert;
- im Versuch III-5 reagiert der 5. Sprinkler erst 55 sec nach dem 3. Sprinkler, obwohl beide – in gleicher Entfernung von der Zündquelle – die Auslösetemperatur gleichzeitig erreichen. (*Auch hier stimmen die angegebenen Werte für $\vartheta_{\max.}$ wieder nicht mit den aus den Temperaturkurven zu entnehmenden überein: 122°C statt 103°C beim 3. Sprinkler und 129°C statt 113°C beim 5.*) Die vom 5. Sprinkler zum Auslösen benötigte Wärmemenge ist etwa doppelt so groß wie jene vom 3. Da es sich hierbei nicht um die beiden ersten Sprinkler handelt, sind die Auswirkungen auf den Brandverlauf weniger gravierend als im Versuch III-1.

Lösen, wenn auch verspätet, die eben besprochen Sprinkler noch aus, so unterbleibt dies bei einigen anderen, bei denen es jedoch dem Verlauf der Temperaturkurve nach zu erwarten wäre, da die Auslösetemperatur der Höhe und der Dauer nach in ausreichendem Maße überschritten wird, wie folgende Beispiele zeigen:

- Im Versuch I-4 bleibt der Sprinkler mit $\vartheta_{\max.} = 120^{\circ}\text{C}$ (im 2. Ring, westlich von Sprinkler 4) geschlossen;
- im Versuch I-14 bleibt der Sprinkler mit $\vartheta_{\max.} = 115^{\circ}\text{C}$ (im 2. Ring, östlich von Sprinkler 2) geschlossen;
- bei Versuch I-15 löst im 2. Ring nur 1 Sprinkler aus, obwohl auch die $\vartheta(t)$ -Kurven aller anderen Sprinkler Maximalwerte in ausreichender Höhe aufweisen;

- der 4. Sprinkler im 1. Ring beim Versuch I-16 springt nicht an, obwohl die Maximaltemperatur am Auslöseelement 7°C über der des benachbarten, aktivierten Sprinklers liegt;
- im Versuch III-1 springt weder der Sprinkler westlich neben dem an 13. Stelle auslösenden Sprinkler noch der Sprinkler nördlich des 10. Sprinklers an, obwohl ihre $\vartheta_{\text{max.}}$ -Werte (100°C bzw. 101°C) jenen am 5. Sprinkler (97°C in Wirklichkeit 90°C) deutlich übertreffen;
- im Versuch III-4 weist der Sprinkler westlich neben dem an 3. Stelle auslösenden Sprinkler dieselbe Maximaltemperatur von 112°C auf, bleibt aber geschlossen und
- im Versuch III-5 wird die Maximaltemperatur des 7. Sprinklers von derjenigen des östlich benachbarten um 8°C übertroffen – dennoch bleibt er geschlossen.

Wegen der weitgehenden Übereinstimmung aller Versuchsparameter (Brennerposition, Rauchschürzen, Steigerung der Wärmefreisetzungsrate, $\dot{Q}_{\text{const.}}$) bietet sich auch der Vergleich der Versuche II-4 und II-8 an. Ein Unterschied besteht lediglich in der Wärmefreisetzung bis zum Auslösen des 1. Sprinklers. Obwohl sie in den beiden Versuchen deutlich differiert, werden unter der Installationsdecke sehr ähnliche Temperaturen gemessen. Sie liegen zum Zeitpunkt der Aktivierung der Sprinkler im 2. Ring sogar im Versuch II-8 mit inzwischen geöffneter RWA höher als zum entsprechenden Zeitpunkt im Versuch II-4, wo die RWA noch geschlossen ist:

- Bei Versuch II-4 springen diese 7 Sprinkler durchschnittlich nach 1:25 min bei 162°C an, die RWA folgt 23 sec später, 9 weitere Sprinkler werden noch aktiviert;
- die ersten 6 Sprinkler im Versuch II-8 sprechen im Mittel nach 1:28 min bei 169°C an, die RWA reagiert bereits nach 1:12 min, d.h. 2 sec nach dem 1. Sprinkler, 7 weitere Sprinkler werden noch ausgelöst.

Der Unterschied in der Gesamtzahl der aktivierten Sprinkler (d.h., daß im Versuch II-8 der 7., der 14. und der 16. Sprinkler von Versuch II-4 nicht ansprechen) resultiert zweifellos aus Fertigungstoleranzen der Auslöseelemente, denn er entsteht in beiden

Versuchen nach dem Öffnen der RWA und ist mit den dann herrschenden thermodynamischen Bedingungen nicht zu erklären, denn diese stimmen sogar so weit überein, daß auch jenseits der RWA in beiden Versuchen nahezu dieselben Sprinkler ausgelöst werden.

In Bild 5 sind die an den, in diesen beiden Versuchen aktivierten, Sprinklern gemessenen Temperaturen aufgetragen und zueinander ins Verhältnis gesetzt. Für den Gesamtvergleich dieser 16 Sprinkler beträgt die Standardabweichung 4 %. In gleicher Weise sind in Bild 6 die Auslösezeitpunkte dieser Sprinkler, ihr Verhältnis und ihre Standardabweichung dargestellt. Letztere beträgt 19 % für jene 13 Sprinkler, die in beiden Versuchen anspringen⁹⁾. *Mit höherer Fertigungsgenauigkeit der Sprinkler-Auslöselemente könnte für die Standardabweichung von $t_{A, Spr.}$ ein ähnlich geringer Wert erreicht werden wie für $\vartheta_{max.}$ — Wie auch bei einigen weiteren Versuchen werden im NIST-Bericht die Auslösezeitpunkte in den Versuchen II-4 und II-8 nicht fehlerfrei von den $\vartheta(t)$ -Diagrammen (Bilder 85...118) in die Sprinkler-Aktivierungsprotokolle (Bilder 5...11 und 13...18) übertragen.*

2.10 Die Aktivierung der RWA

2.10.1 Die Aktivierung der RWA in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzung

Wegen der Q_A/t_A -Koppelung kann auch hier nur der Zusammenhang zwischen der Auslösetemperatur und der Wärmefreisetzung untersucht werden, und zwar nur bei denjenigen Versuchen, bei denen das RWA-Auslöseelement anspricht, bevor der 1. Sprinkler aktiviert wird, weil nur bis zu diesem Zeitpunkt die Zeitabhängigkeit der Wärmefreisetzung nach Gleichung (1) als bekannt angesehen werden kann. Streng trifft dies nur auf die Versuche I-11 und I-13 zu, bedingt auch noch auf die Versuche I-16, I-20, II-3 und II-8, wenn man anstatt des Auslösezeitpunktes des 1. Sprinklers den durchschnittlichen Auslösezeitpunkt aller Sprinkler im 1. Ring gelten läßt. $\vartheta(t)$ -Kurven am RWA-Auslöseelement existieren im NIST-Bericht allerdings nur für die Versuchs-

⁹⁾ Die Ordinaten der Sprinkler, die im Versuch II-8 nicht ansprechen, enthalten über ihren (eingeklammerten) Abszissenwerten keine Meßwerte.

reihe II und für den Versuch III-2, bei den beiden anderen Versuchsreihen können sie für $t < t_{A,1.Spr.}$ nur aus den Temperaturkurven der benachbarten Sprinkler interpoliert werden, *auch wenn dieses Verfahren – wie sich bei seiner Anwendung auf die Versuche II-3 und II-8 zeigt (sh. Seite 40) – zu keinen befriedigenden Ergebnissen führt.*

Im Versuch I-11 mit *großem* Abstand zwischen dem Brenner und der RWA reagiert das RWA-Auslöseelement, wenn alle Sprinklerreaktionen unterdrückt werden, nach 4:48 min = 288 sec bei einer Wärmefreisetzung von 1.174 MJ bis zu diesem Zeitpunkt. Das Auslöseelement dieser RWA-Klappe, das in einem Strömungskanal (2,5 m/sec, 134°C) 35 sec benötigt, um seine nominelle Funktionstemperatur von 74°C zu erreichen (gemessen mit einem auf seiner Oberfläche befestigten Thermoelement), und das je nach Ausrichtung nach weiteren 63...68 sec anspricht, also in der 134°C-Atmosphäre nach insgesamt etwa 100 sec, reagiert hier erst nach dem 1,84-fachen dieser Zeit, wenn 104 sec für das Erreichen der Strömungskanal-Temperatur abgezogen werden¹⁰⁾. *Versuche zur Beurteilung des RWA-Auslöseverhaltens ohne Sprinklerbeeinflussung, bei denen zwischen Brenner und RWA nur ein geringer oder kein Abstand besteht, werden laut NIST-Bericht nicht durchgeführt.*

Exakte Angaben über die Temperatur, die zum Zeitpunkt $t_{A,RWA} = 288 \text{ sec}$ an/in der RWA herrscht, enthält der NIST-Bericht nicht. Die Wiedergabe einer Graphik mit Isothermen für die Umgebung der RWA beruht auf einer Modellrechnung und entspricht nicht den tatsächlich vorgefundenen Temperaturen. Mit Hilfe der experimentell ermittelten Werte an den Sprinklern in der Umgebung des Brenners läßt sich als grobe Näherung für den RWA-Auslösezeitpunkt eine Temperatur $\vartheta_{A,RWA}$ von etwa 170°C extrapolieren, während die CFD-berechnete Isotherme durch die RWA bei 100°C liegt.

Wenn sich das Brandzentrum *direkt unter* der RWA befindet (Versuche I-13, I-16, I-20 und II-3), reagiert das RWA-Auslöseelement deutlich schneller – zu vergleichbaren Zeiten wie die ersten Sprinkler:

¹⁰⁾ Auch wenn die für den Plunge-Test gewählte Prüfkanal-Strömungsgeschwindigkeit der Größenordnung nach jener unter der Installationsdecke entspricht, ist der Vergleich der Reaktionszeiten hier mit jenen dort nur eine grobe Näherung, weil die wirklichen Strömungsverhältnisse unter der Decke eben nicht berücksichtigt werden können.

- im Versuch I-13 mit $t_{A,RWA} = 1:04$ min bei $\vartheta_{A,RWA} \approx 157^{\circ}\text{C}$ — 3 sec nach dem Überschreiten der Strömungskanal-Temperatur, Wärmefreisetzung bis dahin 152 MJ;
- im Versuch I-16 mit $t_{A,RWA} = 1:46$ min bei $\vartheta_{A,RWA} \approx 136^{\circ}\text{C}$ — nahezu gleichzeitig mit dem Überschreiten der Strömungskanal-Temperatur, Wärmefreisetzung bis dahin 176 MJ;
- im Versuch I-20 mit $t_{A,RWA} = 1:20$ min bei $\vartheta_{A,RWA} \approx 104^{\circ}\text{C}$ — 26 sec nach dem Erreichen der Strömungskanal-Temperatur, die in diesem Fall aber schon nach 10 sec wieder unterschritten wird, Wärmefreisetzung bis dahin 200 MJ;
- im Versuch II-3 mit $t_{A,RWA} = 1:15$ min bei $\vartheta_{A,RWA} = 310^{\circ}\text{C}$ (*das Mittel der Sprinklertemperaturen zu diesem Zeitpunkt liegt allerdings nur bei etwa 170°C*) — 17 sec nach dem Überschreiten der Strömungskanal-Temperatur, Wärmefreisetzung bis dahin 250 MJ.

Bei einem weiteren Versuch (II-8), bei dem jedoch zwischen RWA und Brenner eine geringe Distanz besteht, öffnet die RWA nach 1:12 min bei $\vartheta_{A,RWA} = 157^{\circ}\text{C}$ (*das Mittel der Sprinklertemperaturen liegt hier allerdings bei etwa 178°C*) — 3 sec nach dem Überschreiten der Strömungskanal-Temperatur. Die Wärmefreisetzung beträgt bis dahin 221 MJ.

Vergleicht man die beiden zuletzt beschriebenen Versuche (weil Temperatur-Kurven am RWA-Auslöseelement nur für die Versuchsreihe II vorliegen), so fällt auf, daß die Auslösetemperatur der RWA bei II-3 deutlich höher ist als bei II-8, was sowohl durch die größere Wärmefreisetzung bis zum Auslösezeitpunkt verursacht sein kann als auch durch den geringeren Abstand RWA/Brenner bei II-3. Dagegen beträgt bei II-8 die Auslöseverzögerung $\Delta t = t_{A,RWA} - t_{134^{\circ}\text{C}}$ nur 18 % des Wertes von II-3 und nur 3 % desjenigen im Strömungskanal. *Die gemittelten Sprinklertemperaturen bei $t = t_{A,RWA}$ korrelieren nicht mit den zum selben Zeitpunkt gemessenen RWA-Temperaturen: Im Versuch II-3 liegen sie unter, in Versuch II-8 über $\vartheta_{A,RWA}$ — im letzteren Fall sogar noch über den Werten von Versuch II-3.*

Auch der Vergleich der oben besprochenen Versuche I-13, I-16, I-20 und II-3, bei denen sich die RWA jeweils direkt über dem Brenner befindet,

Versuch		I-13	I-16	I-20	II-3
$Q_{A,RWA}$	[MJ]	152	176	200	250
$\vartheta_{A,RWA}$	[°C]	157	136	104	310; 170
$t_{A,RWA}$	[min:sec]	1:04	1:46	1:20	1:15
$t_{134^{\circ}\text{C}}$	[min:sec]	1:01	1:45	0:54	0:58
$\Delta t = t_{A,RWA} - t_{134^{\circ}\text{C}}$	[sec]	3	1	26	17

zeigt keinen einleuchtenden Zusammenhang zwischen der Wärmefreisetzung bis zum Auslösezeitpunkt der RWA, ihrer Auslösetemperatur und der Auslöseverzögerung im Vergleich zum Strömungskanal: Bei dem Versuch mit der höchsten Wärmefreisetzung herrscht zwar am RWA-Auslöseelement die höchste Temperatur, die zweithöchste jedoch bei dem Versuch mit der niedrigsten Wärmefreisetzung¹¹⁾. Der Versuch, bei dem die 134°C-Marke am schnellsten erreicht wird, weist die größte Zeitspanne zwischen diesem Zeitpunkt und jenem auf, an dem die RWA öffnet.

2.10.2 Die Aktivierung der RWA in Abhängigkeit von der Raumhöhe und von der Dicke der Rauchgasschicht unter der Decke

Weder die eine noch die andere dieser beiden möglichen Beeinflussungen der RWA-Aktivierung wird in dem NIST-Forschungsbericht geprüft. Zwar werden Versuchsreihen bei verschiedenen Raumhöhen gefahren, doch werden dabei auch andere wichtige Parameter verändert. Bis auf die im folgenden Kapitel zusammengestellten, enthält der NIST-Bericht hierzu keine weiteren Angaben.

¹¹⁾ wobei in dieser Zusammenstellung zu berücksichtigen ist, daß schon für die Versuche I-13 und I-20 nicht der gleiche Q_A/t_A -Zusammenhang gilt ($\dot{Q}_{\text{const.},I-13} = 6 \text{ MW}$ nach $t_{\text{const.},I-13} = 58 \text{ sec}$; $\dot{Q}_{\text{const.},I-20} = 4,2 \text{ MW}$ nach $t_{\text{const.},I-20} = 49 \text{ sec}$), bei den Versuchen der Versuchsreihe II erreicht $\dot{Q}_{\text{const.},II}$ nach 75 sec 10 MW und zum Versuch I-16 gehört die langsamer steigende $\dot{Q}(t)$ -Funktion

2.10.3 Die Aktivierung der RWA in Abhängigkeit von der Größe und Anordnung der Rauchschrürzen oder anderer Bauteile

Die Versuche werden mit oder ohne Rauchschrürzen durchgeführt. Ihre Abmessungen werden nicht variiert. Verglichen mit den Unterschieden bei der Variation anderer Parameter kann der Größenunterschied der mit Rauchschrürzen eingefassten Areale der Installationsdecke zwischen den verschiedenen Versuchsreihen vernachlässigt werden.

Die Versuchsreihe I umfaßt 16 Versuche, bei denen die Installationsdecke von Rauchschrürzen umschlossen wird, und 6 Versuche, bei denen dies nicht der Fall ist. Bei den Versuchen mit Rauchschrürzen ist die RWA jeweils mit einem 74°C-Auslöseelement ausgerüstet, bei den Versuchen ohne Rauchschrürzen kommen viermal 100°C-Auslöseelemente zum Einsatz, so daß für die Bewertung des Einflusses von Rauchschrürzen auf das Ansprechen der RWA nur noch der Vergleich des Versuchs I-20 mit den Versuchen I-12...16 bleibt, bei denen sich der Brenner unter der RWA befindet, und der Vergleich des Versuchs I-21 mit den Versuchen I-1...8, bei denen der Brenner in der Nähe der RWA steht:

- Bei den Versuchen I-1...6 werden die RWA manuell gesteuert. Bei den Versuchen I-7 und I-8 mit Rauchschrürzen spricht das RWA-Auslöseelement nicht beziehungsweise erst nach 9:26 min an, beim Versuch I-21 ohne Rauchschrürzen dagegen nach 7:00 min an. *Das Gegenteil wäre zu erwarten, da sich diese Versuche den sonstigen Parametern nach, insbesondere nach der freigesetzten Wärme, nicht wesentlich unterscheiden.*
- Bei den Versuchen I-12, I-14 und I-15 werden die RWA manuell gesteuert. Mit Rauchschrürzen reagiert das RWA-Auslöseelement beim Versuch I-16 (mit der geringeren Steigerung der Wärmefreisetzungsrate) nach 1:46 min, beim Versuch I-13 nach 1:04 min, beim Versuch I-20 ohne Rauchschrürzen reagiert es nach 1:20 min. *Diese 16 sec, um die das RWA-Auslöseelement später reagiert als im Versuch I-13, könnten auf die fehlenden Rauchschrürzen zurückzuführen sein — genausogut aber auch auf die nur halb so große Wärmefreisetzung bis zum Auslösen des 1. Sprinklers und auf die um 30 % geringere konstante Wärmefreisetzungsrate.*

In der Versuchsreihe II ist keine Untersuchung des Einflusses von Rauchschürzen möglich, weil alle Versuche mit Rauchschürzen durchgeführt werden.

In der Versuchsreihe III werden die ersten beiden Versuche ohne, die restlichen drei mit Rauchschürzen durchgeführt. Lediglich die Versuche III-1 und III-4 gleichen sich dem Aufbau und der freigesetzten Wärme nach. Weder bei dem einen noch bei dem anderen reagiert das RWA-Auslöseelement.

2.10.4 Die Aktivierung der RWA in Abhängigkeit von der Entfernung zum Brandherd

Wenn sich der Brenner beziehungsweise das Brandzentrum *direkt unter* der RWA befindet, wird in 4 von 6 Versuchen, in denen die RWA nicht manuell gesteuert wird, die RWA-Auslösefunktion gleichzeitig mit den Sprinklern im 1. Ring aktiviert (Versuche I-13, I-16, I-20 und II-3), im Versuch I-19 – wegen des 100°C-Auslöseelementes an der RWA – erst nach 10 Minuten und im Versuch III-2 gar nicht.

Befindet sich der Brenner beziehungsweise das Brandzentrum *in der Nähe* der RWA, so wird in den 12 Versuchen, in denen die RWA nicht manuell gesteuert wird, die RWA-Auslösefunktion

- einmal gleichzeitig mit den Sprinklern im 1. Ring (Versuch II-8),
- bei den beiden Versuchen II-4 und III-2¹²⁾ jeweils mit den Sprinklern im 2. Ring oder kurz danach,
- bei 4 Versuchen (I-8, I-21, II-10 und III-2) erst nach dem Doppelten der Zeit, die die Sprinkler im 2. Ring bis zum Ansprechen benötigen, und
- in 5 Versuchen (I-7, I-17, I-18, II-9 und II-11) gar nicht

aktiviert.

¹²⁾ Beim Versuch III-2 – bei dem die RWA, die sich direkt über dem Brandherd befindet, nicht anspricht – ist zu beachten, daß die statt dessen aktivierte RWA sich in einer Entfernung von 6,1 m vom Brandzentrum befindet, was zwischen den bislang hier benutzten Begriffen “nahe” für 3,05–5,49 m und “fern” für 8,62 m rangiert.

Besteht zwischen dem Brenner und der RWA eine *große Entfernung*, dann wird nur im Versuch I-11, in dem die Sprinklerfunktion unterdrückt wird, die RWA aktiviert. In den weiteren 6 Versuchen (I-9, I-22, II-1, II-5, III-1 und III-4) ohne manuelle RWA-Steuerung bleibt die RWA geschlossen (mit der Ausnahme laut Fußnote 12).

2.10.5 Die Aktivierung der RWA in Abhängigkeit von der Anordnung und Funktion der installierten Sprinkler

Aus den im NIST-Bericht dokumentierten Versuchsergebnissen läßt sich eine Beeinflussung der RWA-Funktion durch die Sprinkler in der Umgebung nicht ablesen, *auch wenn im NIST-Bericht das Gegenteil vertreten wird (sh. letzter Absatz dieses Kapitels, Seite 45), denn dafür wäre es erforderlich, in mehreren Versuchen die Sprinklerfunktion manuell zu steuern und dabei die sonstigen Versuchsparameter (Wärmefreisetzung, Entfernung RWA-Brenner,...) konstant zu halten.*

Mit einer Ausnahme (mangelhafte Funktion des RWA-Auslöseelementes im Versuch III-2) gehen die RWA mit den Sprinklern im 1. Ring auf, wenn sie sich *direkt über* dem Brenner befinden. Beim Versuch I-19 erst nachdem alle aktivierten Sprinkler angesprungen sind, weil die RWA ein 100°C-Auslöseelement enthält.

Auch bei einer *geringen Distanz* zwischen RWA und Brenner

- reagieren die 100°C-Auslöseelemente der RWA nicht (Versuche I-17 und I-18);
- aber auch die RWA im Versuch I-7, die ein 74°C-Auslöseelement enthält bleibt geschlossen, obwohl – vom Brenner aus betrachtet – Sprinkler jenseits der RWA noch anspringen;
- das gleiche trifft auf die Versuche II-9 und II-11 zu, obwohl die wiedergegebenen $\vartheta(t)$ -Kurven zeigen, daß die nominelle Auslösetemperatur ausreichend lange überschritten wird (> 6 min bei 140°C bzw. 180°C);
- dagegen spricht im Versuch III-2 das Auslöseelement der RWA außerhalb des Regallager-Aufbaus an (knapp 3 min nach den benachbarten Sprinklern, bei nur 110°C), obwohl die RWA direkt über dem Brandherd nicht reagiert;

- auch im Versuch II-10 reagiert das Auslöseelement dieser RWA nicht und statt dessen wieder das der benachbarten RWA¹³⁾, deren Position zwischen dem 2. und 3. Sprinklerring liegt und die nach allen aktivierten Sprinklern anspringt, etwa 1¼ min nach den benachbarten Sprinklern;
- eine geringere Verzögerung zeigt die Reaktion der RWA im Versuch II-4, die im 2. Sprinklerring liegt und etwa 22 sec nach den benachbarten Sprinklern aufgeht;
- im Unterschied hierzu reagiert die RWA im Versuch II-8, wo sie sich ebenfalls im 2. Sprinklerring befindet, schon 13 sec vor den benachbarten Sprinklern;
- in den Versuchen I-8 und I-21 geht die RWA erst nach allen aktivierten Sprinklern auf, auch noch nach zwei jenseits der RWA schon angesprungenen;
- im Versuch III-3 reagiert sie zwar erst 2 min nach den benachbarten Sprinklern, aber doch vor den jenseits der RWA sich befindenden.

Bei großer Entfernung zwischen RWA und Brandherd reagiert die RWA in keinem Versuch, so daß über ihre Beeinflussung durch benachbarte Sprinkler nichts ausgesagt werden kann. Dennoch wird im NIST-Bericht der Versuch I-10 mit dem Versuch I-11, in dem die Sprinklerfunktion unterdrückt wird, verglichen: Das Auslöseelement der RWA von Versuch I-10 reagiere deshalb nicht, weil nach dem Anspringen der Sprinkler über dem Brenner wegen der Abkühlung der Deckenströmung durch diese Sprinkler an der RWA nur noch 90°C herrschen – verglichen mit 170°C im ungesprinkelten Fall. Zum einen fehlt ein Nachweis dieser Temperatur, denn die Thermoelemente sind zu diesem Zeitpunkt alle naß und nicht mehr in der Lage, die Rauchgastemperatur zu messen (die CFD-berechnete Isotherme deutet auf etwa 70°C) und zum anderen bleibt unberücksichtigt, daß die RWA in diesem Versuch schon seit über 4 min – manuell gesteuert – offen steht.

¹³⁾ im Gegensatz zur falschen Darstellung in Bild 17 des NIST-Berichtes — angedeutet jedoch in der Unterschrift zu Bild 21, obwohl die Bezeichnung "outside the draft curtains" nicht sinnvoll ist, wenn der Brenner direkt unter der Rauchschrürze positioniert wird

2.10.6 Die Aktivierung der RWA in Abhängigkeit von der Fertigungs- genauigkeit ihrer Auslöseelemente

Der NIST-Bericht macht hierzu keine Aussagen, doch lassen sich vermutlich einige auffällige Unterschiede im Auslöseverhalten der RWA nur mit erheblichen Toleranzen bei der Fertigung der Auslöseelemente erklären, wie beispielsweise bei den Versuchen I-13, I-16, I-20 und II-3 die Variation der Zeitdifferenzen vom Überschreiten der Strömungskanaltemperatur am Auslöseelement bis zum Auslösen der RWA zwischen 1 % und 26 % des entsprechenden Wertes im Strömungskanal.

Die RWA in allen hier vorgestellten Versuchen sind – wie die Sprinkler – mit Schmelzlot-Auslöseelementen bestückt, die in beiden Fällen bei einer nominellen Temperatur von 74°C reagieren sollen (innerhalb der Versuchsreihe I auch 4 Versuche mit 100°C-RWA-Auslöseelementen). Der Trägheitsbeiwert des RWA-Auslöseelementes $I_{RT,RWA} = 174 (m \cdot sec)^{1/2}$ ist größer als jener der Sprinkler-Auslöseelemente $I_{RT,Spr.} = 148 (m \cdot sec)^{1/2}$, doch lassen sich diese beiden Werte nicht miteinander vergleichen, da ihnen im NIST-Bericht unterschiedliche Definitionen zu Grunde gelegt werden. Beim Trägheitsbeiwert des Sprinkler-Auslöseelementes wird nämlich der Wärmeaustausch mit der tragenden Konstruktion berücksichtigt, während dies beim Auslöseelement der RWA nicht der Fall ist. *Da jedoch der NIST-Bericht weder eine Begründung noch Details hierzu enthält, kann der Größenunterschied nicht beurteilt werden.*

In der Versuchsreihe II wird die Temperatur in der Nähe des RWA-Auslöseelementes zusätzlich zum üblichen mit drei weiteren Thermoelementen gemessen, deren Reaktionsgeschwindigkeit von unterschiedlich dicken Messing-Buchsen gedämpft wird, um das Ansprechverhalten des Auslöseelementes zu simulieren. Die I_{RT} -Werte dieser Messing-Buchsen – in Analogie zu dem des RWA-Auslöseelementes ebenfalls ohne Berücksichtigung der Wärmeleitung zwischen Auslöseelement und Tragkonstruktion bestimmt – betragen $32 (m \cdot sec)^{1/2}$ an der “schnell”, $164 (m \cdot sec)^{1/2}$ an der “mittelschnell” und $287 (m \cdot sec)^{1/2}$ an der “langsam” reagierenden Buchse.

Tabelle 4 enthält eine vergleichende Zusammenstellung der mit diesen 4 Thermoelementen aufgenommenen Temperaturkurven für die Versuche der Versuchsreihe II und für Versuch III-2. Die Versuche in dieser Tabelle sind so geordnet, daß vergleichbare bei-

einander stehen. Als erstes Sortierkriterium dient deshalb die Entfernung zwischen Brenner und RWA

- unter;
- nahe
 - Position B = 3,05 m nördlich der RWA,
 - Position C = 4,31 m südöstlich der RWA,
 - Position E = 5,49 m südwestlich der RWA, genau unter der Rauchschrze,
 - Position F = 5,49 m nordwestlich der RWA, genau unter dem Schnittpunkt der beiden Rauchschrzen);
- fern

und als zweites die Ansprechzeit des Auslöseelementes der RWA. Neben kurzen Anmerkungen zum Temperaturverlauf verzeichnet die Tabelle die Zeitspannen, während derer die nominelle Auslösetemperatur überschritten wird. Sofern die Kurven einen erkennbaren Maximalwert aufweisen, wird er genannt, zusammen mit dem Zeitpunkt, an dem er erreicht wird. Ebenso wie die Kurven der Deckentemperaturen in der Nähe der Sprinkler zeigen diese Kurven, daß die Versuche in der Versuchsreihe II nicht, wie angegeben, 10 Minuten, sondern 6, 7 oder 7½ Minuten dauern.

Bei den Versuchen II-3 und II-7 (Brenner direkt unter der RWA) überschreitet nur der Temperaturverlauf der langsamen Buchse die Auslöseschwelle nicht (*obwohl der NIST-Bericht für II-3 das Gegenteil behauptet*). Zum Zeitpunkt $t = t_{A,RWA}$ erreicht die Temperatur an der schnellen Buchse ihren Maximalwert, an der mittleren Buchse den nominellen Auslösewert. Im Unterschied zum Versuch II-3 werden beim Versuch II-7 in der schnellen und in der mittleren Buchse Temperatursteigerungen gemessen, die sich im Kurvenverlauf am Original-Thermoelement nicht finden. *Den Temperaturkurven nach müßte das Auslöseelement auch im Versuch II-7 ansprechen. Die RWA wird jedoch geschlossen gehalten und so reduziert sich der Umfang dieser Versuchsreihe auf "1" und erlaubt keine Schlußfolgerungen.*

Im einzigen Lagerbrand-Versuch (III-2 – Zündquelle direkt unter der RWA), dessen RWA-Temperaturen im NIST-Bericht wiedergegeben werden, besteht keine erkennbare Ähnlichkeit zwischen dem Temperaturverlauf in der schnellen Buchse und am Original-

Thermoelement. Nicht nur die nominelle Auslösetemperatur wird von allen vier $\vartheta(t)$ -Kurven weit überschritten, sondern auch die Strömungskanaltemperatur von 134°C – selbst von dem Thermoelement in der langsamen Buchse noch 4 Minuten lang. Zwar habe das Schmelzlot im Auslöseelement zu schmelzen begonnen – *was immer das bedeuten soll* – aber ausgelöst hat es nicht!

Bei den Versuchen II-8 und II-4 (Brenner in Position B – nahe) folgen die in den Messing-Buchsen gemessenen Temperaturkurven derjenigen am Original-Thermoelement – mit geringer Dämpfung die schnelle Buchse, mit deutlicher Dämpfung die beiden langsameren – *unverständlichlicherweise die langsame Buchse mit höheren Werten als die mittlere*. Am Original-Thermoelement und an der schnellen Buchse erreicht die Temperatur ihren Maximalwert und an der mittleren Buchse den nominellen Auslösewert mal nach $t = t_{A,RWA}$ (II-8) und mal kurz davor (II-4). *Versuch II-8 stellt, bezogen auf II-4, eine echte Wiederholung dar und erlaubt deshalb den Schluß, daß eine schmelzlotgesteuerte RWA in unmittelbarer Nähe zum Brandherd zusammen mit den ersten Sprinklern aufgeht (korrekte Funktion des Auslöseelementes vorausgesetzt), ohne die benachbarten Sprinkler in ihrer Funktion zu beeinträchtigen. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen dieser beiden Versuche – insgesamt ähnlich viele aktivierte Sprinkler mit vergleichbaren Auslösetemperaturen und -zeitpunkten – besteht lediglich beim Öffnungszeitpunkt der ersten Sprinkler: Im Versuch II-8 reagieren sie 10sec später als im Versuch II-4, die ungestörte Wärmefreisetzung bis zu diesem Zeitpunkt ist deshalb 60MJ höher, wodurch vermutlich das etwas frühere Auslösen der RWA im Versuch II-8 veranlaßt wird.*

In den Versuchen II-12, II-11 und II-9 zeigt sich wieder eine relativ gute Übereinstimmung zwischen dem Kurvenverlauf am Original-Thermoelement und jenem an der schnellen Buchse. Die Kurven an der mittleren und an der langsamen Buchse folgen verzögert, in der zu erwartenden Reihenfolge. Im Versuch II-9 liegen die Temperaturkurven deutlich niedriger als in den beiden anderen Versuchen, was wohl auf die Position des Brenners genau unter der Rauchschräge zurückzuführen ist, weil von dieser die aufsteigenden Rauchgase in eine östliche und eine westliche Strömung geteilt werden. *Dennoch überschreiten sowohl im Versuch II-11 als auch in II-9 (in II-12 steht die RWA von Versuchsbeginn an offen) alle Temperaturkurven die Auslöseschwelle mehr als 5 min beziehungsweise 4min lang, aber das Auslöseelement der RWA reagiert nicht. Versuch II-12 stellt eine Wiederholung von Versuch II-11 dar – mit sehr ähnlichen Ergebnissen,*

was die Aktivierung der Sprinkler betrifft (die ersten in Versuch II-12 sogar 6 sec früher als in II-11). Die $\vartheta(t)$ -Kurven spiegeln die Übereinstimmung zwischen diesen beiden Versuchen wider, liegen im Versuch II-12 wegen der offenen RWA etwas niedriger und müßten eigentlich das Auslösen der RWA sicherstellen, wovon aber nach den Erfahrungen mit den Versuchen II-11 und II-9 nicht ausgegangen werden kann.

Im Versuch II-10 steht der Brenner genau unter dem Schnittpunkt der von Norden nach Süden verlaufenden Rauchschräge mit der west-östlich ausgerichteten Rauchschräge. Wie im Versuch II-9 wird die Rauchgasströmung geteilt, diesmal in Viertel. Entsprechend niedrig sind die Temperaturen in der mit Meßinstrumenten ausgestatteten RWA, die zum Auslösen nicht ausreichen. Erstaunlicherweise reagiert dagegen die in gleicher Entfernung vom Brenner montierte Nachbar-RWA westlich der Rauchschräge, *weil die Verteilung der Rauchgase auf die vier Quadranten zwischen den Rauchschrägen nicht rotationssymmetrisch erfolgt, sondern – wie die Temperaturmessungen zeigen – mit einem nach Westen verschobenen Schwerpunkt, was dort zu Temperaturen unter der Decke führt, die ausreichen, um das RWA-Auslöseelement zu aktivieren. Dieser Effekt wird im NIST-Bericht nicht diskutiert, sondern der Versuch II-10 wird im Gegenteil so geschildert, als würde die nicht aktivierte RWA geöffnet.*

Bei den Versuchen II-5, II-1, II-6 und II-2 (Brenner in Position D – fern) liefert die schnelle Buchse etwa den vom Thermoelement direkt gemessenen Temperaturverlauf. Obwohl die nominelle Auslösetemperatur von diesen beiden Temperaturkurven bis zu 6 min lang überschritten wird, bleibt die RWA in allen 4 Versuchen geschlossen. Die mit den beiden trägeren Buchsen aufgenommenen Temperaturkurven bleiben unter der 74°C-Auslöseschwelle. Bei den Versuchen mit von Versuchsbeginn an offener RWA (II-6 und II-2) liegt – im Gegensatz zum Vergleich der Versuche II-12 und II-11 – der Maximalwert der vom Original-Thermoelement gemessenen Temperatur über dem der Versuche mit geschlossener RWA (II-5 und II-1). *Die Versuche II-5 und II-6 stellen exakte Wiederholungen der Versuche II-1 und II-2 dar und produzieren nahezu identische Ergebnisse, was unter dem Gesichtspunkt der Reproduzierbarkeit als experimenteller Erfolg zu werten ist. Im Hinblick auf die Problematik der RWA-Aktivierung in unmittelbarer Nähe zum oder direkt über dem Brandherd wären jedoch Versuchswiederholungen in dieser Konstellation wichtiger als solche, bei denen zwischen dem Brand und der RWA ein größerer Abstand besteht.*

Die in der RWA zusätzlich zum Thermoelement (ϑ_0) installierten gedämpften Temperaturfühler (schnell: ϑ_1 , mittel: ϑ_2 , langsam: ϑ_3) tragen zum Verständnis der Funktion des RWA-Auslöseelementes nichts bei, da keine dieser drei $\vartheta(i)$ -Kurven anzuzeigen vermag, wann das Auslöseelement anspricht, wie folgende Zusammenstellung aus Tabelle 4 zeigt (die Versuche II-2, II-6, II-7 und II-12 bleiben unberücksichtigt, weil dort die RWA manuell gesteuert wird):

das RWA-Auslöseelement in den unten genannten Versuchen spricht an,		wenn folgende Temperaturkurven $\geq \vartheta_{A,n}$
in keinem Versuch funktioniert das Auslöseelement, wenn nur $\vartheta_0 \geq \vartheta_{A,n}$		$\vartheta_0 \geq \vartheta_{A,n}$
II-8	II-10	$\vartheta_0; \vartheta_1 \geq \vartheta_{A,n}$
II-3	II-1 und II-5	$\vartheta_0; \vartheta_1; \vartheta_2 \geq \vartheta_{A,n}$
II-4	II-9, II-11 und III-2	$\vartheta_0; \vartheta_1; \vartheta_2; \vartheta_3 \geq \vartheta_{A,n}$

Eine Korrelation der Temperaturfunktion des RWA-Auslöseelementes mit den von den messingummantelten Thermoelementen gemessenen Temperaturen scheidet nicht daran, daß die Auslösefunktion das Schmelzen des Lots voraussetzt – eine entsprechende Menge desselben Materials könnte auch in die Messing-Buchsen gefüllt werden –, sondern daran, daß die Zahl vergleichbarer Versuche mit solcher RWA/Brand-Distanz, in der die RWA temperatur-gesteuert aktiviert wird, zu gering ist. Aus demselben Grund kann auch keine begründete Beurteilung der RWA-Funktionszuverlässigkeit abgegeben werden. — Die im NIST-Bericht geäußerten Vermutungen, die eklatante Fehlfunktion des RWA-Auslöseelementes im Versuch III-2 könne durch mit nach oben gerissene Wassertropfen erklärt werden, oder dadurch daß die Rauchgase vom Sprinklerstrahl schon zu weit abgekühlt seien, sind völlig abwegig, denn wie die Temperaturkurve am Auslöseelement zeigt, wurde eben nicht gekühlt, sondern das Element war 10 Minuten lang über 200°C warm.

2.11 Die thermodynamischen Angaben über das Rauchgas

Zwar werden in einer Kette von 9 Meßpunkten die Temperaturen in der Rauchsäule über dem Brenner gemessen – ebenso wie die Rauchgastemperaturen unter der Decke – doch enthält der NIST-Bericht keine Angaben über die Ergebnisse dieser Messungen, geschweige denn eine Interpretation.

2.12 Die sonstigen Messungen

Außer den Temperaturen in der Nähe der Sprinkler werden Temperaturen in der RWA und an den Bauelementen aufgenommen und die Menge des von den Sprinklern ausgeworfenen Wassers und der Druck in den Versorgungsleitungen werden gemessen, ebenso wie die Konzentration der Gaskomponenten, die Druckdifferenz in der RWA und die Strömungsgeschwindigkeit dort und unter der Decke. *Keine dieser Messungen wird im NIST-Bericht wiedergegeben.* Von den für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit verwendeten 2-Wege-Sonden wird berichtet, daß sie so mangelhafte Ergebnisse liefern, daß der Massenstrom durch die RWA nicht berechnet werden kann, obwohl gerade dieser Wert zur Beurteilung der Sprinklerbeeinflussung durch die RWA von Bedeutung wäre.

Bei den Lagerbrand-Versuchen wird der Brandschaden nach dem Augenschein begutachtet und sowohl photographisch als auch in Form einer Skizze festgehalten. *Versucht man die Brandlast in den einzelnen Versuchen an Hand der in diesen Skizzen wiedergegebenen Oberflächenschäden abzuschätzen, so erhält man durchweg Werte, die etwa um den Faktor 1,4 über den im NIST-Bericht genannten liegen.* Nur im Versuch III-4 ergibt das Mittel aus den Schäden in der nördlichen und in der südlichen Oberfläche, multipliziert mit der Regaltiefe, exakt die Anzahl von 103 verbrannten Kartons.

Der Umfang des Brandes wird darüber hinaus mit Hilfe dreier Sensoren bewertet, die – auf halbem Wege zwischen den beiden westlichen RWA – 1 m über und 1,83 m unter der Installationsdecke und 1,52 m über der Grundfläche montiert sind, um die optische Rauchdichte zu messen. Da die Rauchdichte nur an dieser Stelle und – unabhängig von der Position der Lagerregale – immer an derselben gemessen wird, sind sie nicht ge-

eignet, der visuellen Einschätzung der Rauchentwicklung und -ausbreitung durch den Versuchsbeobachter konkreteres hinzuzufügen. In Versuchen, in denen mehr Lagergut verbrennt, wird *tatsächlich* eine stärkere Verqualmung gemessen als in solchen mit geringerem Brandschaden — aber, ob die RWA aufgeht oder geschlossen bleibt, kann laut NIST-Bericht mit dieser Messung nicht festgestellt werden.

In der Versuchsreihe I, in der die Temperaturen in der Rauchgasschicht unter der Installationsdecke in drei Vierteln des Versuchsareals in einem Abstand von 5 cm von der Decke gemessen werden, im letzten Viertel jedoch im Abstand von 10 cm, zeigt sich bei jenen Versuchen (I-9, I-10, I-11 und I-22), bei denen eine über dem Brenner zu erwartende rotationssymmetrische Temperaturverteilung beide Teilareale berührt, daß die der — zu Versuchsbeginn noch nicht erwärmten — Decke näher liegenden Thermoelemente geringere Temperaturen anzeigen als jene mit etwas größerem Abstand. *Im NIST-Bericht findet dies keine Erwähnung.*

2.13 Das Berechnungsmodell und seine Ergebnisse

Ein computer-gestütztes Rechenmodell zur Beschreibung eines dreidimensionalen Strömungsfeldes (CFD) unterscheidet sich von einem 2- oder 3-Zonen-Modell dadurch, daß der Gesamtraum in möglichst viele kleine Kontrollelemente unterteilt wird, innerhalb derer mit Hilfe der Erhaltungssätze für die Masse, die Energie und den Impuls jeweils die Strömungsgeschwindigkeit, die Dichte, die Temperatur, der Druck und die Konzentration der Gaskomponenten ermittelt werden, wobei für jedes Raumelement ein Satz partieller Differentialgleichungen zu lösen ist, die beispielsweise die Wärmefreisetzung des Brandes oder den Sprühstrahl der Sprinkler als Quellterme enthalten. Ihre Lösung beschreibt den Rauchgas- und Wärmetransport in Abhängigkeit von der Abbrandrate, der Brandausbreitung, den Wärmeübergangs-Kennzahlen und von der Sprühcharakteristik der Sprinkler.

Bei Großversuchen mit Regallager-Bränden fallen besonders deren hohe Kosten ins Gewicht. Rechenmodelle sollen deshalb, sobald sie den ersten Versuchsablauf zutreffend zu beschreiben vermögen, die Durchführung von Versuchsreihen ersetzen, weil Parametervariationen dann rechnerisch simuliert werden können. *Dies setzt voraus, daß*

Parametervariationen im Rechenmodell wirklichkeits- und maßstabsgetreu wiedergegeben werden, und wäre sicherheitshalber durch zwei Experiment/Rechner-Vergleiche mit minimal und maximal eingestelltem Parameter zu belegen, so daß die rechnerische Simulation von Zwischenwerten einer Interpolation gleichkäme.

Die Ergebnisse eines bei NIST entwickelten Rechenmodells (LES, IFS) werden mit den experimentell gewonnenen verglichen und dienen als Grundlage für rechnerische Parametervariationen. Das Rechenverfahren soll in der Lage sein vorherzusagen, ob wenige oder viele Sprinkler anspringen werden. Gute quantitative Übereinstimmungen ergeben sich laut NIST-Bericht für die Sprinkler-Auslösezeitpunkte ($\pm 15\%$ bei den dem Brandherd nächstgelegenen Sprinklern im 1. Ring, $\pm 25\%$ bei denjenigen im 2. Ring), für den Anstieg der Deckentemperatur ($\pm 15\%$) und für die Zunahme der Wärmefreisetzungsrate ($\pm 20\%$) bis zum Auslösen der Sprinkler.

Beim Temperaturverlauf nach dem Zeitpunkt der Sprinkleraktivierung soll die Simulation weiterhin die Temperatur der Deckenströmung wiedergeben, während die Temperaturkurve am Thermoelement in Wirklichkeit wegen der Benetzung steil abfällt. *Die von der Computersimulation ausgeworfenen $\vartheta(t)$ -Kurven unter der Installationsdecke geben den von der unterschiedlichen Montagehöhe der Thermoelemente verursachten Temperaturunterschied (sh. Kapitel 2.12, letzter Absatz) nicht wieder.*

In der Versuchsreihe I scheint eine gute Übereinstimmung zwischen den rechnerischen und den experimentellen Ergebnissen zu bestehen. Der Vergleich ergibt für die Maximaltemperaturen in der Nähe der 16 Sprinkler im 1. und 2. Ring eine Standardabweichung von 3%. Diese geringe Abweichung der vorausberechneten, absoluten (!) Temperaturen von den experimentell gewonnenen – gemittelt¹⁴⁾ über alle 16 Sprinkler – kaschiert, daß zum einen schon im 1. Ring einzelne, deutliche Abweichungen vorkommen, die dann zu Differenzen bei der Auslösezeit von 30 sec bis 2 min führen (im Versuch I-16 löst der 4. Sprinkler im 1. Ring gar nicht aus), und daß zum anderen bei 16 von 22 Versuchen im 2. Ring Abweichungen von etwa 30°C auftreten, die im

¹⁴⁾ Die durchschnittlichen Ansprechzeiten für die Versuche I-6 und I-10 in der Tabelle 6 des NIST-Berichtes sind falsch, weil – analog zur Anmerkung am Ende von Kapitel 2.9.6 – die Ansprechzeiten der Sprinkler 56 bzw. 86 in den Diagrammen 90 bzw. 94 nicht korrekt in die Bilder 6 bzw. 7 übertragen wurden. Genauso fehlen im Bild 7 die Ansprechzeiten des 10. und 12. Sprinklers von Versuch I-9, dafür enthält Bild 4 für die Versuche I-12 und I-16 Ansprechzeiten von Sprinklern, die nach den Diagrammen 96 und 100 nicht oder erst nach > 5 min anspringen.

allgemeinen Auslöseverzögerungen gegenüber den berechneten Werten von 1...9 min bewirken. Darüber hinaus lösen in 45 Fällen Sprinkler entgegen der Computersimulation nicht aus und umgekehrt lösen 15 Sprinkler aus, die laut Simulation geschlossen bleiben sollten.

Vergleiche von rechnerischen mit experimentellen Ergebnisse für die Versuchsreihe II werden nicht angestellt.

In der Versuchsreihe III werden die beiden Versuche III-1 und III-4 zu einem Vergleich herangezogen, weil sie sich bis auf den Unterschied der vorhandenen / nicht vorhandenen Rauchschürzen weitgehend ähneln:

	III-1	III-4
Rauchschürzen	nein	ja
Distanz Zünquelle-RWA	fern	fern
RWA-Öffnungszeitpunkt	∞	∞
Gesamtwärmefreisetzung ¹⁵⁾	9.950 bzw. 28.900 MJ	8.750 bzw. 25.450 MJ
Wärmefreisetzung bis zum Öffnungszeitpunkt des 1. Sprinklers	260 MJ	477 MJ
t_A und ϑ_A des 1. Sprinklers	nach 1:16 bei 116°C	nach 1:33 bei 164°C
$t_{A\emptyset}$ und $\vartheta_{A\emptyset}$ im 1. Sprinklerring	2 nach 1:45 bei 107°C	2 nach 1:34 bei 159°C
$t_{A\emptyset}$ und $\vartheta_{A\emptyset}$ im 2. Sprinklerring	10 nach 9:00 bei 98°C	3 nach 3:00 bei 105°C
Σ aktivierte Sprinkler	20 nach 9:57 bei 99°C	5 nach 2:25 bei 127°C

Die im Versuch III-1 um 1 min verzögerte Aktivierung des 2. Sprinklers im 1. Sprinklerring wird als Grund dafür angesehen, daß der Brand sich so weit ausbreitet, bis letztlich 20 Sprinkler ausgelöst werden. Im Versuch III-4 lösen dagegen die Sprinkler im 1. Ring praktisch gleichzeitig aus und dämmen den Brand so weit ein (*die Gesamtwärmefreisetzung von 8.750 MJ verglichen mit 9.950 MJ signalisiert keine besonders effiziente Eindämmung*), daß insgesamt nur 5 Sprinkler ansprechen. Dementsprechend berechnet auch die Computersimulation für Versuch III-1 gleichzeitiges Auslösen der Sprinkler im 1. Ring - bei Temperaturen um 200°C - und dann eine Gesamtzahl von 4 aktivierten

¹⁵⁾ Heizwert der verbrannten Kartons siehe Seite 17

Sprinklern. Wird jedoch in der Simulation – dem Versuchsverlauf entsprechend – die Aktivierung des 2. Sprinklers um 1 min verzögert, so ergibt die Rechnung eine Gesamtzahl von 17 aktivierten Sprinklern, *deren Auslösezeitpunkte allerdings bei einem Bruchteil der experimentell ermittelten Werte liegen (die Standardabweichung der berechneten von den gemessenen Werten von 45 % im 1. Sprinklerring und 80 % im 2. Sprinklerring – nicht berücksichtigt die 6 Sprinkler, die nur im Experiment oder nur in der Simulation anspringen – macht deutlich, daß nicht nur zwischen den ersten beiden Sprinklern ein ungewöhnlich großer zeitlicher Abstand besteht, sondern – worauf der NIST-Bericht nicht eingeht – ebenso zwischen dem 3., 4. und 5. Sprinkler) und die 2½ min nach ihrer Aktivierung unter der Decke immer noch eine berechnete Temperatur belassen, die die im Versuch maximal gemessene um 360°C übersteigt – mit nahezu rotationssymmetrischen Isothermen trotz der unsymmetrischen Sprinkleraktivierung.*

Die zwei rechnerischen Simulationen von Versuch III-2 – einmal, im Gegensatz zum Versuchsverlauf, mit funktionierender RWA und zum anderen, versuchsgemäß, mit nicht funktionierender RWA – ergeben, daß die durch die RWA entweichende Wärme die Zahl der aktivierten Sprinkler verringert. *Allerdings erweckt der NIST-Bericht den Eindruck, die Reduzierung der Zahl der insgesamt ausgelösten Sprinkler von 23 im Experiment auf 14 in der Simulation sei ausschließlich auf den Einfluß der RWA zurückzuführen, und unterschlägt, daß schon in der Simulation ohne RWA nur noch 19 Sprinkler ansprechen (mit einer Standardabweichung bei der Ansprechzeit von 23 % gegenüber dem Experiment) – daß die Differenz zwischen Experiment und Simulation also nahezu gleich groß ist wie jene zwischen funktionierender und nicht funktionierender RWA in den beiden Modellrechnungen.*

Zwar liegt hier die Abweichung (23 %) zwischen den Versuchs- und den rechnerischen Ergebnissen von Versuch III-2 in der Größenordnung wie für Vergleiche zwischen Versuchswiederholungen (Versuche II-4 und II-8: Standardabweichung bei der Auslösezeit = 19 %), doch zeigen andere Vergleiche zwischen Rechnung und Experiment (Versuch III-1 mit Verzögerung zwischen den ersten beiden Sprinklern: Standardabweichung bei der Auslösezeit insgesamt 72 %), daß das Rechenmodell dem Anspruch, den praktischen Versuch zu ersetzen, noch nicht genügt. Beispielsweise führt auch die rechnerische Simulation von Versuch III-2 mit blockierter RWA nicht zu dem Ergebnis, daß dann die

Nachbar-RWA reagiert. Wie die CFD-Isothermendiagramme zeigen, scheint diese RWA im Programm gar nicht enthalten zu sein.

Beim Vergleich der Testergebnisse von Versuch III-2 mit der Simulation von Versuch III-1 (mit gleichzeitig auslösenden Sprinklern im 1. Ring) wird als Erklärung für die hohe Zahl aktivierter Sprinkler im Versuch III-2 der Hohlraum (vergl. Kapitel 2.2, Seite 11) unter der RWA genannt, die eine Verzögerung von 14 sec verursache. Als Beleg hierfür wird auf berechnete $\dot{Q}(t)$ -Kurven für die 3 Simulationen der Versuche III-1 und III-2 (mit offener und geschlossener RWA) verwiesen, die angeblich demonstrieren, daß eine um 14 sec verzögerte Sprinkleraktivierung in typischer Weise die Zahl der ausgelösten Sprinkler verändere.

Zum einen besteht eine Verzögerung von 14 sec bei den Auslösezeitpunkten der ersten Sprinkler

- *weder, wenn man den Test III-2 mit der Simulation III-1 vergleicht: (1:40 - 1:11) min = 29 sec;*
- *noch beim Vergleich der beiden Simulationen III-2 und III-1 untereinander: (1:23 - 1:11) min = 12 sec;*
- *noch beim Vergleich zwischen dem 1. und dem 2. Sprinkler in Test III-2: (1:48 - 1:40) min = 8 sec und auch nicht in der Simulation III-2: (1:25 - 1:23) min = 2 sec.*

Hier scheint wohl die "Verzögerung" aus Versuch III-1 nachzuwirken; jene 58 Sekunden, die dort eine plausible Begründung für die Brandausbreitung abgaben. Die oben genannten Zeitdifferenzen bewegen sich jedoch alle innerhalb der üblichen Reaktionsbandbreite.

Zum anderen "belegen" die $\dot{Q}(t)$ -Kurven, daß die ersten Sprinkler in der Simulation III-2 12 sec später auslösen als in der Simulation III-1 und daß - wie an anderer Stelle eingeräumt - das Programm nicht in der Lage ist, die Beeinflussung der Wärmefreisetzung durch aktive Sprinkler abzuschätzen, denn für III-2 berechnet es eine Wärmefreisetzung, die etwa doppelt so hoch ist wie die in III-1, obwohl noch nicht einmal 10 % mehr Kartons verbrennen. Über die Zahl der ausgelösten Sprinkler enthält eine $\dot{Q}(t)$ -Kurve naturgemäß keine Information.

Daß die Rauchgase, bevor sie sich sprinkler-auslösend unter der Decke ausbreiten, zuerst den RWA-Hohlraum von knapp 1 m³ füllen und daß dies 12 sec dauert, wird nicht belegt

— daß diese Zeitdifferenz zwischen den beiden Simulationen der Versuche III-2 und III-1 auch noch kleiner ist als die zwischen dem Test III-2 und seiner Simulation, bleibt unerwähnt.

Daß von allen Versuchen der Versuchsreihe III die Wärmefreisetzung bis zum Auslösen des 1. Sprinklers bei Versuch III-2 mit 593 MJ am höchsten ist, wird auch nicht interpretiert, weil grundsätzlich der NIST-Bericht insgesamt die Wärmefreisetzung in der Phase der durch Sprinkler nicht gestörten Brandausbreitung nicht berücksichtigt und statt dessen bei den Versuchen mit Heptanbrennern auf die Höhe der konstanten Wärmefreisetzungsrates (im Anschluß an die Versuchsphase, in der die Wärmefreisetzungsrates quadratisch gesteigert wird) abstellt – beziehungsweise in den Lagerbrand-Versuchen ganz darauf verzichtet.

Im Versuch III-3 wird die größte Gesamtwärmemenge freigesetzt (184 Kartons verbrennen). Weil die Zündquelle sich nahe beim Schnittpunkt der Rauchschrzen befindet, entwickelt sich keine rotationssymmetrische Temperaturverteilung unter der Decke, sondern die heißen Rauchgase werden vorzugsweise längs der Rauchschrzen abgeleitet. Eine Erklärung dafür, weshalb das Rechenmodell das Auslösen von 4 Sprinklern simuliert, die sich weit außerhalb der entlang der Rauchschrzen konzentrierten heißen Rauchgasströmung befinden und die im Test tatsächlich geschlossen bleiben, fehlt.

Zu Versuch III-4 wird angemerkt, daß ebenso wie in Versuch III-3 die Lüftung in den ersten 4 Minuten keinen Einfluß auf die Versuchsergebnisse habe: In Versuch III-4 bleibt die RWA während der gesamten Versuchsdauer geschlossen, in Versuch III-3 geht sie zwar nach 4:11 min auf, doch findet sich kein Beleg für einen RWA-Einfluß nach diesem Zeitpunkt. — Über die rechnerische Auswertung von Versuch III-5 enthält der NIST-Bericht kein Wort.

Da wegen mangelhafter Geschwindigkeitsmessung der Volumenstrom durch die RWA nicht ermittelt werden kann, soll er mit CFD-Hilfe berechnet und mit einem theoretischen Höchstwert für auftriebs-behaftetes Rauchgas verglichen werden, der unter anderem von der Umgebungs- und von der Rauchgastemperatur abhängt:

$$\dot{V}_{RWA} \sim [(T_{RG} - T_{\infty}) \cdot T_{\infty}]^{1/2} / T_{RG} \quad (5)$$

Mit der wichtigen Annahme, T_{RG} sei doppelt so hoch wie T_{∞} , erhält man für \dot{V}_{RWA} einen Wert "sehr nahe beim theoretischen Maximum". Diese Formulierung verkennt den mathematischen Inhalt dieser $\dot{V}_{RWA}(T_{RG})$ -Funktion [17], denn wie Bild 7 für $T_{\infty} = 300^{\circ}K$ zeigt, ist $\dot{V}_{RWA}(2 \cdot T_{\infty})$ nicht "sehr nahe beim Maximum", sondern dort ist das Maximum, weil für $T_{RG} = 2 \cdot T_{\infty}$ die 1. Ableitung dieser Funktion verschwindet.

2.14 Die Ergebnisinterpretationen und Schlußfolgerungen

Aus den Versuchs- und aus den Rechenergebnissen wird im NIST-Bericht der Schluß gezogen, daß die RWA ¹⁶⁾ weder den Auslösezeitpunkt der ersten Sprinkler noch die Gesamtzahl der aktivierten Sprinkler, weder die Menge des verbrannten Versuchsmaterials noch die Deckentemperatur wesentlich beeinflussen, sofern der Brandherd sich nicht direkt unter der RWA befindet (1). Ist dieses jedoch der Fall, so wird – Originalität – die RWA normalerweise etwa gleichzeitig mit dem 1. Sprinkler aktiviert und der durchschnittliche Auslösezeitpunkt im 1. Sprinklerring verzögert. Das Ausmaß dieser Verzögerung hängt von der Differenz zwischen den Auslösezeitpunkten des 1. Sprinklers und der RWA ab (2). Ebenfalls für diesen Fall folgt aus Test und Rechnung, daß, verglichen mit geschlossenen RWA, die Zahl der insgesamt aktivierten Sprinkler um bis zu 50 % vermindert wird, wenn die RWA vor oder mit dem 1. Sprinkler ausgelöst wird (3).

Zur Beurteilung der Sprinklerbeeinflussung durch gleichzeitig mit den Sprinklern im 1. Ring oder früher geöffnete, nahe dem Brand gelegene RWA können von den insgesamt durchgeführten 39 Versuchen die folgenden 9 herangezogen werden (eingeklammert diejenigen, bei denen die RWA mehr als 10 % nach dem 1. Sprinkler geöffnet wird):

	Position des Brandherdes	
	in der Nähe der RWA	direkt unter der RWA
Versuchsreihe I	I-2 und I-5	I-13, I-14, I-16 und (I-20)
Versuchsreihe II	II-8 und II-12	(II-3)
Versuchsreihe III	keiner	keiner

¹⁶⁾ wobei sich der Hinweis "either prior or after the first sprinkler activation" erübrigen sollte

(1) Auch in den Versuchen I-5 und II-8, bei denen sich der Brenner nicht direkt unter der RWA befindet, wird die Zahl der insgesamt ausgelösten Sprinkler reduziert: Im Versuch I-5 von durchschnittlich 12, die in der Versuchsreihe I bei spät oder nicht reagierender RWA anspringen, auf 9 ($\Delta = 25\%$ — im Versuch I-2 bleibt es dagegen bei 12 aktivierten Sprinklern); im Versuch II-8 von durchschnittlich 22 auf 13 ($\Delta = 40\%$ — im Versuch II-12 jedoch wieder 23 wie bei geschlossener RWA).

(2) Diese Aussage ist erstens widersprüchlich und zweitens falsch, da die Bandbreite der Sprinkler-Ansprechzeiten im 1. Ring bei den oben zusammengestellten Versuchen nahe beim Durchschnitt aller Versuche liegt, während die größten Abweichungen innerhalb des 1. Ringes bei dem Versuch auftreten (I-20), bei dem die RWA erst nach dem andert-halb-fachen der Auslösezeit des 1. Sprinklers reagiert.

(3) Im Versuch I-13 wird die Zahl der insgesamt aktivierten Sprinkler von 12 auf 5 ($\Delta = 58\%$), im Versuch I-14 auf 7 ($\Delta = 42\%$) und im Versuch I-16 auf 3 ($\Delta = 75\%$) verringert. Der Versuch II-3 kann nur bedingt zum Vergleich herangezogen werden, denn dort öffnet die RWA erst 7sec nach dem 1. Sprinkler. Dennoch wird die Zahl der insgesamt anspringenden Sprinkler von 22 auf 12 ($\Delta = 45\%$) gemindert. Was die Interpretation der Ergebnisse von Simulationsrechnungen betrifft, sei auf die Anmerkungen zur Simulation von Versuch III-2 auf Seite 55 verwiesen.

Test und Rechenmodell zeigen, daß mit Rauchschürzen etwa doppelt so viele Sprinkler ausgelöst werden wie ohne. Abgesehen davon, daß hierbei die Funktion der RWA vernachlässigt wird, steht diese Interpretation im Widerspruch zu den tatsächlichen Versuchsergebnissen – siehe Kapitel 2.9.4.

Bei einem Regallager-Brandversuch (III-3), für den das Hauptregal unter der Rauchschürze aufgebaut wird, Zündquelle nahe beim Schnittpunkt der Rauchschürzen, verzögert die Rauchschürze das Ansprechen jener Sprinkler, die sie gegen das Rauchgas abgeschirmt, und unterbricht den Sprühstrahl der in ihrer Nähe aktivierten Sprinkler. Das hat zur Folge, daß mehr Versuchsgut verbrennt als in Tests mit größerer Entfernung zwischen Zündquelle und Rauchschürze, was auch durch das Rechenmodell bestätigt wird (wegen der Leistungsmängel des Rechenmodells in diesem Versuch vergl. Seite 57).

Zum einen wird der Sprühstrahl aktivierter Sprinkler bei den in diesen Versuchsserien gewählten Proportionen (Abstand der Sprinkler von der Rauchschrürze / Tiefe der Rauchschrürze) in allen Versuchen mit Rauchschrürzen von diesen gestört, was sich jedoch auf die Brandausbreitung nur im Versuch III-3 mit dem falsch plazierten Regal auswirkt. Zum anderen sind die Effekte einer solchen Anordnung Rauchschrürze / Brandlast bekannt, so daß dieser Versuch sich eigentlich erübrigt.

Die Abkühlung der Deckenströmung durch den Sprinklerstrahl verhindert häufig das Ansprechen der RWA. Diese Aussage beruht sowohl auf Temperaturmessungen in der RWA als auch darauf, daß sich Lot-Tropfen auf den wieder erstarrten Schmelzlot-Auslösern der nicht aktivierten RWA finden, und darauf, daß bei einigen Versuchen RWA in erheblicher Entfernung vom Brandherd und vom Sprühstrahl aktivierter Sprinkler ansprechen (1). In einem Fall ging die RWA nicht auf, obwohl der Regallager-Brand direkt unter ihr gezündet wird. Das Rechenmodell spiegelt dieses Ergebnis nicht wider — und der NIST-Bericht findet keine Erklärung. (1) Diese Aussage widerspricht den Versuchsergebnissen, denn außer der RWA in Versuch I-11, in dem die Sprinklerfunktion unterdrückt wird, spricht das RWA-Auslöseelement nur an, wenn es sich direkt über dem Brand oder in seiner Nähe befindet.

Das Rechenmodell zeigt, daß — verglichen mit dem nicht gesprinklerten Fall — wegen der Kühlung durch den Sprinklerstrahl die Gesamtfördermenge der RWA verringert wird. — Der Sinn der im NIST-Bericht vorgestellten Untersuchungen besteht unter anderem darin, das vorhandene Rechenmodell an Hand praktischer Tests zu evaluieren. Da bei den — zur Bestimmung des RWA-Volumenstromes durchgeführten — Messungen der Strömungsgeschwindigkeit keine brauchbaren Meßwerte aufgenommen werden, "zeigt" das Rechenmodell lediglich, worauf es vorher programmiert wurde.

Und zuletzt zeigt das Rechenmodell den wesentlichen Einfluß der Ansprechzeiten der zuerst aktivierten Sprinkler auf die Gesamtzahl der Sprinkler, die bei Regallager-Brandversuchen ausgelöst werden können. So führt in einem Fall eine 1-minütige Verzögerung des zweiten Sprinklers gegenüber dem ersten dazu, daß insgesamt viermal so viele Sprinkler ansprechen wie ohne Verzögerung. Es wird angenommen, daß diese unterschiedlichen Ergebnisse auf die Rauchschrürzen in jenen Versuchen zurückzuführen sind, in denen die Verzögerungen auftreten. Aber die Rechnung zeigt, daß die Rauchschrürzen keinen Einfluß haben, weil sie sich 9 m entfernt von der Zündquelle befinden. — Diese

Aussage bezieht sich auf den Versuch III-1, den einzigen in der Versuchsreihe III, bei dem eine nennenswerte Zeitdifferenz zwischen dem Ansprechen des ersten und des zweiten Sprinklers auftritt. Der Abstand zwischen der Zündquelle und den Rauchschrzen beträgt nicht 9m, sondern ∞ – er wird nämlich ohne Rauchschrzen durchgeführt. Die Qualität dieses Rechenergebnisses wird auf Seite 55 gewürdigt.

Bei der Bewertung einzelner Versuche ist eine gewisse Widersprüchlichkeit in der Argumentation des NIST-Berichtes zu konstatieren. So wird bei Versuch III-4 positiv hervorgehoben, daß der Brand von nur 5 Sprinklern unter Kontrolle gebracht wird, während in anderen Versuchen eine geringe Zahl insgesamt ausgelöster Sprinkler als negative Folgeöffneter RWA oder fehlender Rauchschrzen apostrophiert wird.

3. ENTWURF EINES VERSUCHSSTANDES FÜR DEN GLEICHZEITIGEN BETRIEB VON RAUCH/WÄRME-ABFUHR- UND SPRINKLER-ANLAGEN

Wie die Auswertung der jüngsten Großversuche zur Sprinkler-RWA-Problematik zeigt — Spannbreite der Sprinkler-Auslösezeiten bei gleicher Wärmefreisetzung von 0:52 min bis 3:13 min und der RWA-Auslösezeiten von 1:04 min bis ∞ —, besteht die Hauptschwierigkeit beim gleichzeitigen Betrieb dieser beiden Systeme darin, die zuverlässige Funktion der Auslöseelemente sicherzustellen. Um unter anderem zu untersuchen, mit welchem zeitlichen Spielraum die Auslöseelemente handelsüblicher Sprinkler reagieren, wurde ein Versuchsstand entwickelt, der es ermöglichen soll, eine definierte Wärmefreisetzungsrates einzustellen – sowohl als konstanten Wert als auch in vorgegebener Funktion von der Zeit.

Bild 8 zeigt einen trichterförmigen Wannenbrenner, in dem über die Steuerung der Förderleistung der Brennstoff-Speisepumpe das Niveau des Flüssigkeitsspiegels und damit die Größe der wärmefreisetzenden Fläche variiert werden kann. Um diese Größe möglichst schnell verändern zu können, wurde für den Trichter ein relativ großer Öffnungswinkel gewählt ($2\alpha \approx 154^\circ$). Der Trichter ruht auf einem Stützring, der von zwei Kastenprofilen – im Abstand zum Gabelstapler passend – mit höhenverstellbaren

Füßen getragen wird. Die unterhalb des Trichtergrundes angeschlossene Brennstoff-Zuleitung besteht, da sie auch zum Entleeren des Brenners von unverbrannten Brennstoff-Restmengen dient, aus einem doppelwandigen Rohr, mit dessen Hilfe der in den Vorratsbehälter zurückfließende Brennstoff gekühlt und somit sein Dampfdruck gemindert werden kann.

Um diesen Brenner als Prüfstand für Sprinkler- und RWA-Auslöseelemente einsetzen zu können, muß die Korrelation seiner Wärmefreisetzungsrate mit einer Regelgröße — hier der Größe der Brennstoff-Oberfläche beziehungsweise der Höhe des Brennstoffspiegels im Brenner — bestimmt werden. Hierzu wird mit der Sauerstoffverbrauchsmethode die Wärmefreisetzungsrate berechnet und zum jeweils eingestellten Brennstoffpegel in Beziehung gesetzt, dessen Höhe mit Hilfe des am Trichtergrund gemessenen statischen Drucks ermittelt wird.

3.1 Wärmefreisetzung in Abhängigkeit vom Sauerstoffverbrauch

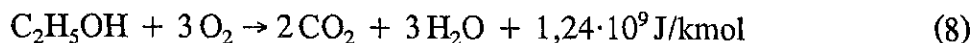
Die Wärme, die in einem Brand je Zeiteinheit freigesetzt wird, ist dem Brennstoff-Massenstrom proportional. Der Proportionalitätsfaktor "Heizwert" beträgt für Brennspritus bei vollständiger Verbrennung $27 \cdot 10^6 \text{ J/kg} = 1,24 \cdot 10^9 \text{ J/kmol}$ [18].

$$\dot{Q}_{\text{max.}} = \dot{m} \cdot H_u \quad (6)$$

Bei nicht vollständiger Verbrennung berücksichtigt ein Faktor $\xi \leq 1$ die im Ruß oder im Kohlenmonoxid verbleibenden, nicht genutzten Anteile des Heizwertes¹⁷⁾:

$$\dot{Q}_{\text{eff.}} = \dot{m} \cdot \xi \cdot H_u \quad (7)$$

Bei vollständiger Verbrennung verknüpft die Stöchiometrie der Reaktionsgleichung die Masse des oxidierten Brennstoffes [kmol] mit der des verbrauchten Sauerstoffs:



¹⁷⁾ Die Konzentrationsmessungen im Abgas zeigen, daß die Verbrennung während des Versuchs praktisch stöchiometrisch erfolgt, so daß auf eine CO-Korrektur der O₂-Verbrauchsrechnung verzichtet, und $\xi = 1$ gesetzt werden kann.

Bei Brennspritus entspricht demnach der Brennstoff-Massenstrom [kmol/sec] einem Drittel des Sauerstoff-Massenstroms:

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}(t) = \frac{1}{3} \cdot \dot{m}_{\text{O}_2}(t) \quad (9)$$

Der Sauerstoff-Verbrauch während der Verbrennung wird im Abgas als Differenz zum Normalwert von 20,93 Vol.-% gemessen - in Abhängigkeit von der fortschreitenden Versuchsdauer t . Das Meßgerät liefert jedoch nicht die Konzentration des im Abgas noch vorhandenen Sauerstoffs im Verhältnis zu *allen* Komponenten des Gases, sondern einen auf das Volumen des *trockenen* Abgases bezogenen Wert — also ohne die in der Verbrennungsluft enthaltene Feuchtigkeit und ohne das Verbrennungsprodukt "Wasserdampf". Für die Bestimmung des Brennstoff-Massenstromes muß dieser Wert entsprechend korrigiert werden.

Während der Versuche zur Kalibrierung des trichterförmigen Wannenbrenners herrschte in der Versuchshalle eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 % und eine Raumtemperatur von 20°C. Das entspricht in trockener Luft einem Wassergehalt von 6 g/kg Luft beziehungsweise von 5,96 g bezogen auf die Masseneinheit der feuchten Luft. Betrachtet man die Gewichtsanteile der anderen Bestandteile von Luft dieser Feuchtigkeit [15],

Komponente	Gewichts-%	Mol-%
N ₂	75,06	77,32
O ₂	22,87	20,72
Ar	1,28	0,92
H ₂ O	0,596	1
CO ₂	0,0397	0,03
Ne	0,0012	0,0018
Kr	0,000.3	0,000.1
He	0,000.07	0,000.5
Xe	0,000.04	0,000.01
H ₂	0,000.004	0,000.05

so wird deutlich, daß sowohl der Dampf- als auch der CO₂-Anteil zusammen mit den Edelgasen und dem Wasserstoff vernachlässigt werden kann. Bei der weiteren Betrachtung werden diese als inerte Anteile alle dem Stickstoff zugeschlagen.

Für die hier durchzuführende Abschätzung der Zusammensetzung des Abgases werden die Komponenten als ideale Gase angesehen, das heißt, die Zusammensetzung nach Volumenanteilen entspricht derjenigen nach Molanteilen. Die Zuluft $\dot{V}_{\text{Luft,zu}}$ besteht also zu 0,21 Teilen aus O_2 und zu 0,79 Teilen aus N_2 , die Abluft dagegen aus ebendiesen N_2 -Anteilen der Zuluft, ihren O_2 -Anteilen – vermindert um den bei der Verbrennung verbrauchten Teil x – und entsprechend der Reaktionsgleichung (8) aus $\frac{2}{3}x$ Teilen CO_2 und $\frac{3}{3}x$ Teilen H_2O :

$$\dot{V}_{\text{ab}} = \{0,79 \cdot \dot{V}_{\text{Luft,zu}} + 0,21 \cdot \dot{V}_{\text{Luft,zu}} - x + \frac{2}{3}x + x\} \cdot T_{\text{ab}} / T_{\text{Luft,zu}} \quad (10)$$

$$= \{\dot{V}_{\text{Luft,zu}} + \frac{2}{3}x\} \cdot T_{\text{ab}} / T_{\text{Luft,zu}} \quad (11)$$

Im Gegensatz zum vernachlässigbaren Dampfgehalt der Verbrennungsluft kann der bei der Verbrennung gebildete Wasserdampf in dieser Bilanz – das letzte x in Gleichung (10) – nicht unterschlagen werden, denn sonst ergäbe Gleichung (11), daß – auf gleichem Temperaturniveau – \dot{V}_{ab} kleiner wäre als $\dot{V}_{\text{Luft,zu}}$.

Der vom Sauerstoff-Konzentrationsmeßgerät ermittelte Wert stellt das Verhältnis y des verbleibenden Sauerstoff-Anteils zur Summe der Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlendioxid-Anteile im *trockenen* Abgas dar:

$$y = (0,21 \cdot \dot{V}_{\text{Luft,zu}} - x) / (0,21 \cdot \dot{V}_{\text{Luft,zu}} - x + 0,79 \cdot \dot{V}_{\text{Luft,zu}} + \frac{2}{3}x) \quad (12)$$

$$y \cdot (\dot{V}_{\text{Luft,zu}} - x/3) = 0,21 \cdot \dot{V}_{\text{Luft,zu}} - x \quad (13)$$

mit (11) $\Leftrightarrow \dot{V}_{\text{Luft,zu}} = x \cdot (1 - y/3) / (0,21 - y) = (\dot{V}_{\text{ab}} \cdot T_{\text{Luft,zu}} / T_{\text{ab}}) - \frac{2}{3}x \quad (14)$

$$x \cdot (1 - y/3) = \dot{V}_{\text{ab}} \cdot (0,21 - y) \cdot T_{\text{Luft,zu}} / T_{\text{ab}} - \frac{2}{3}x \cdot (0,21 - y) \quad (15)$$

$$x \cdot (1 - y/3 + 0,14 - \frac{2}{3}y) = \dot{V}_{\text{ab}} \cdot (0,21 - y) \cdot T_{\text{Luft,zu}} / T_{\text{ab}} \quad (16)$$

$$x = \dot{V}_{\text{ab}} \cdot (0,21 - y) \cdot T_{\text{Luft,zu}} / [T_{\text{ab}} \cdot (1,14 - y)] \quad (17)$$

$$\dot{m}_{\text{O}_2}(t) \text{ [kmol/sec]} = \dot{V}_{\text{ab}}(t) \cdot [21 - y(t)] \cdot T_{\text{Luft,zu}} / \{24,1 \cdot T_{\text{ab}}(t) \cdot [114 - y(t)]\} \quad (18)$$

Würde in Gleichung (12) die Funktion des Meßgerätes – O_2 -Gehalt bezogen auf *trockenes* Abgas – nicht berücksichtigt, so stünde im Nenner noch das letzte x aus Gleichung (10) und für $\dot{m}_{\text{O}_2}(t)$ ergäbe sich ein Wert, der etwa 20 % unter dem mit Gleichung (18) berechneten läge.

Der Volumenstrom im Abgasrohr hängt ab von der Strömungsgeschwindigkeit und vom Rohrquerschnitt:

$$\dot{V}_{ab}(t) = A_{ab} \cdot v(t) \quad (19)$$

Der Strömungsquerschnitt im Abgasrohr beträgt

$$A_{ab} = \pi \cdot d_{ab}^2 / 4 \quad (20)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit wird nach BERNOULLI aus dem dynamischen Druck am PRANDTLschen Staurohr berechnet:

$$v(t) = [2 \cdot p_{dyn.}(t) / \rho_{ab}(t)]^{1/2} \quad (21)$$

Als Näherungswert wird – temperaturkorrigiert – für die Dichte des Abgases diejenige von Luft eingesetzt, weil die Berücksichtigung der veränderten molaren Zusammensetzung des Abgases im Vergleich zur Zuluft bei der Bestimmung der Dichte nur einen geringen Unterschied ausmacht, der sich bei der Berechnung von $\dot{Q}(t)$ in Gleichung (24) mit weniger als 1 % auswirkt:

$$\rho_{ab}(t) \text{ [kg/m}^3\text{]} = \rho_{Luft,0^\circ} \cdot T_{0^\circ} / T_{ab}(t) = 1,293 \cdot 273 / T_{ab}(t) \quad (22)$$

Die Wärmefreisetzungsrate läßt sich dann aus den zeitabhängigen Meßwerten im Abgas

- O₂-Konzentration,
- dynamischer Druck und
- Temperatur

und aus den konstanten Werten

- Temperatur in der Versuchshalle,
- Luftdichte bei 0°C,
- Durchmesser des Abgasrohres,
- Heizwert des Brennstoffes und
- Molvolumen bei 20°C

berechnen:

$$\dot{Q}(t) = \frac{1}{3} \cdot H_u \cdot \frac{[21 - y(t)] \cdot T_{Luft, zu}}{[114 - y(t)] \cdot V_M} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ab}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn}(t)}{\rho_{Luft,0^\circ} \cdot T_{0^\circ} \cdot T_{ab}(t)}} \quad (23)$$

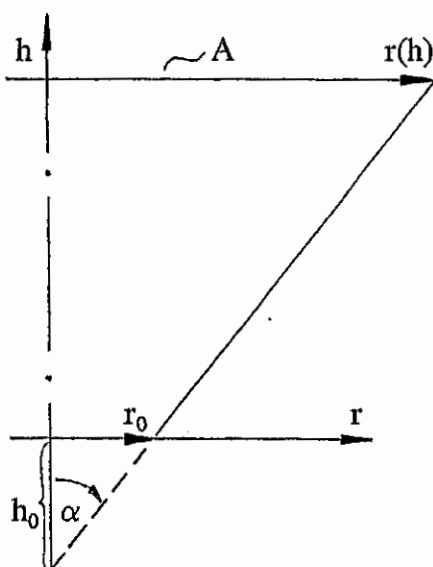
Die Zahlenwerte für die Konstanten ($T_{Luft, zu} = 293 \text{ K}$, $\rho_{Luft,0^\circ} = 1,293 \text{ kg/m}^3$, $d_{ab} = 0,4 \text{ m}$, $H_u = 1,24 \cdot 10^9 \text{ J/kmol}$, $V_M = 24,1 \text{ m}^3/\text{kmol}$) eingesetzt ergibt dies, wenn $y(t)$ in [%], $p_{dyn.}(t)$ in $[\text{N/m}^2]$ und $T_{ab}(t)$ in $[\text{K}]$ gemessen werden:

$$\dot{Q}(t) [MW] = 47,5 \cdot \frac{21 - y(t)}{114 - y(t)} \cdot \sqrt{\frac{p_{dyn}(t)}{T_{ab}(t)}} \quad (24)$$

Die Bilder 9...11 zeigen die in einem ersten Versuch mit schrittweiser Vergrößerung des wärmefreisetzenden Brennstoffspiegels aufgenommenen Zeitfunktionen der O₂-Konzentration, des dynamischen Drucks und der Temperatur im Abgasrohr der Absaughaube über dem Versuchsstand. In Bild 12 ist die hieraus berechnete Wärmefreisetzungsrate dargestellt — berechnet nach Gleichung (24) aus den zeitabhängigen Werten der Diagramme 9...11 und unter Berücksichtigung der bei der Messung des O₂-Gehaltes auftretenden Totzeit von etwa 1 min. Zur Verdeutlichung ist in Bild 13 derselbe Zusammenhang als Balkendiagramm wiedergegeben, wobei die Höhe der Balken aus Werten berechnet wird, die um die in der Abszisse genannten Versuchszeitpunkte etwa konstant bleiben.

Bei der Steigerung der Brennstoff-Oberfläche über 1,2 m² hinaus wird der Wannebrenner und mit ihm der Brennstoff so warm, daß mehr Spiritus verbrennt, als der eingestellten Flächengröße entspricht. Die zwischen der 9. und der 15. Versuchsminute aufgenommenen Meßwerte werden deshalb bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

3.2 Die Größe der Brennstoff-Oberfläche im Wannebrenner



Die Brennstoff-Oberfläche A kann näherungsweise als kreisförmig angesehen werden:

$$A = \pi \cdot r^2(h) \quad (25)$$

Am Kegelstumpf hängen die Radien- und die Höhenverhältnisse vom Öffnungswinkel α ab:

$$r(h) / (h + h_0) = r_0 / h_0 = \tan \alpha \quad (26)$$

$$r(h) = r_0 + h \cdot \tan \alpha \quad (27)$$

A wird also bestimmt von r_0 , h und α :

$$A = \pi \cdot (r_0 + h \cdot \tan \alpha)^2 \quad (28)$$

Im Gegensatz zum Radius r_0 am Trichtergrund kann wegen der unvermeidlichen Toleranzen bei der Fertigung eines Einzelstücks dieser Dimensionen der Winkel α von der Konstruktion nicht abgenommen werden, weshalb $r(h)$ über die Formel zur Berechnung des Kegelstumpf-Volumens

$$V = \{r_0^2 + r_0r(h) + r^2(h)\} \cdot \pi h / 3 \quad (29)$$

$$\Leftrightarrow r_{1,2} = -r_0/2 \pm (3V/\pi h - 0,75r_0^2)^{1/2} \quad (30)$$

bestimmt wird. Der Zusammenhang des Volumens mit der Füllhöhe h muß experimentell ermittelt werden. Die Meßwerte ergeben eine Ausgleichsparabel (Bild 14), deren Exponent etwas geringer gewählt wird als die geometrisch korrekte 3, um die Kurve besser an die Meßwerte anzupassen. Für

$$V(h) = 14,45 \cdot h^{2,72} \quad (31)$$

erreicht die Summe der Quadrate der Abweichungen der errechneten von den gemessenen Volumina ein Minimum ($\Sigma \Delta^2 = 7 \cdot 10^{-6}$).

Die Fläche des Brennstoffspiegels in Abhängigkeit von der Füllhöhe lautet dann:

$$A = \pi \cdot \{(43,35 \cdot h^{1,72} / \pi - 0,75r_0^2)^{1/2} - 0,5r_0\}^2 \quad (32)$$

Die Füllhöhe wird aus der Differenz zwischen dem statischen Druck der Flüssigkeitssäule über dem Trichtergrund und dem atmosphärischen Druck unter Berücksichtigung des spezifischen Gewichts des Brennstoffes berechnet:

$$h = \Delta p / \gamma_{C_2H_5OH} = (p_{stat.} - p_0) / (\rho_{C_2H_5OH} \cdot g) \quad (33)$$

Bei der Kalibrierung wird die Abhängigkeit des statischen Drucks von der Höhe einer Wassersäule bestimmt. In Bild 15 wird die Ausgleichsgerade durch die vom Meßinstrument angezeigten Drücke

$$p_{stat.} = 95,83 \cdot h + p_0 \quad (34)$$

mit jenen Werten verglichen, die sich nach Gleichung (33) aus Pegelstand und Dichte berechnen lassen.

In Bild 16 ist der aus den Gleichungen (32) und (34) ermittelte Zusammenhang $A(p_{stat.})$ zwischen der Oberfläche und dem statischen Druck im Wannenbrenner für den Brennstoff Spiritus dargestellt, wobei die durch dessen spezifisches Gewicht bedingte geringere Steigung der $p_{stat.}(h)$ -Geraden – verglichen mit jener in Gleichung (34) – schon berücksichtigt ist. Bild 17 zeigt die im Verlaufe des Versuchs registrierte Veränderung des statischen Drucks am Grund des Wannenbrenners und Bild 18 den daraus errechneten

Verlauf der Brennstoff-Oberfläche. Auch in diesen beiden Diagrammen zeigt sich der Effekt des überhitzten Brenners: Ein konstanter statischer Druck läßt sich dann nicht mehr einstellen.

Bild 19 zeigt als kontinuierliche Zeitfunktion die Korrelation des vorigen Diagramms mit der $\dot{Q}(t)$ -Kurve (Bild 12), wobei die Meßwerte für $9 \text{ min} \leq t \leq 15 \text{ min}$ eliminiert sind. Beim Sortieren der \dot{Q}/A -Wertepaare nach aufsteigenden Flächenwerten werden die Werte der Wärmefreisetzungsrates vom Ende des Versuchs – Brennstoffrest brennt auf der Trichtergrundfläche ($= 0,007 \text{ m}^2$) – an den Anfang des Diagramms gerückt. Die Berechnung der Ausgleichsgeraden wird durch diese Werte nicht beeinflusst, denn bei $A = 0$ muß die Gerade durch den Koordinatenursprung gehen. Das Diagramm zeigt, daß die Meßergebnisse zwar noch deutlich vom Ideal abweichen können – insbesondere dort wo die Flanken der $\dot{Q}(t)$ - und der $A(t)$ -Kurve zwischen den Versuchsphasen mit konstanten Werten unterschiedlich steil ausfallen. Insgesamt kann aber schon aus diesem ersten Versuch auf eine lineare Funktion $\dot{Q}(A)$ geschlossen werden, hier mit einem Proportionalitätsfaktor von etwa 565 kW/m^2 :

$$\dot{Q} \approx 565 \cdot A \quad (35)$$

Bezogen auf das Stellglied dieses Versuchsaufbaus ergibt dies eine Abhängigkeit der Wärmefreisetzungsrates von der Füllhöhe des Wannensbrenners beziehungsweise vom statischen Druck am Trichtergrund,

$$\dot{Q}(p_{\text{stat.}}) \approx 565 \cdot \{ [43,35 \cdot (10,435 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta p_{\text{stat.}})^{1,72} - 0,75 \cdot \pi \cdot r_0^2]^{1/2} - 0,5 \cdot r_0 \cdot \pi^{1/2} \}^2 \quad (36)$$

die es erlaubt, für \dot{Q} einen festen Wert einzustellen oder – über eine programmierte Steuerung der Brennstoff-Speisepumpe – $\dot{Q}(t)$ zu steigern – entsprechend einem vereinbarten Brandentwicklungsmodell – beispielsweise linear, quadratisch oder exponentiell.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Nach wie vor ist das Zusammenwirken beziehungsweise die gegenseitige Beeinflussung/Beeinträchtigung von Sprinklern und gleichzeitig geöffneten Rauch- und Wärme-Abzugsanlagen (RWA) – eventuell kombiniert mit Rauchschürzen – umstritten. So lange keine Einigkeit darüber hergestellt werden kann, welche Bedeutung – neben der Brandeindämmung durch die Sprinkler – der Rauchfreihaltung für die Personenrettung und eine effektive Brandbekämpfung zukommt, führen auch Experimente im großen Maßstab keine Klärung des Problems herbei.

Auch die 39 Großversuche bei UNDERWRITERS LABORATORIES (UL) in Northbrook/Illinois sollten die Beeinflussung des Auslöseverhaltens der Sprinkler durch RWA und Rauchschürzen und umgekehrt die der RWA-Funktion durch Sprinkler und Rauchschürzen untersuchen. Darüber hinaus sollte ein Computer-Modell zur Vorausberechnung der Sprinklerreaktionen und der Wärmefreisetzung sowohl vor als auch nach der Aktivierung der Sprinkler entwickelt werden.

In deutlicher Vergrößerung wird bei der Interpretation der Versuchsergebnisse festgestellt, daß nur RWA direkt über dem Brandherd temperatur-gesteuert aufgehen und daß nur in diesem Fall der Sprinkler-Auslösezeitpunkt verzögert und die Gesamtzahl der ausgelösten Sprinkler verringert wird. Daß schon in geringer und erst recht in größerer Entfernung vom Brand die RWA-Auslöseelemente nicht mehr ansprechen, wird auf die Kühlwirkung der Sprinkler zurückgeführt, nicht auf eine mangelhafte RWA-Konzeption.

Für eine wirksame Entrauchung zur Erleichterung der Personenrettung und der Brandbekämpfung hätten außerhalb des gesprinklerten Bereichs die RWA ansprechen müssen, sozusagen vor der Front der sich unter der Decke ausbreitenden Rauchgase. Dies aber kann mit einzeln – im allgemeinen erst nach den Sprinklern, wie die Versuche gezeigt haben – reagierenden RWA-Auslöseelementen nicht bewerkstelligt werden.

Die Effektivität einer von aktiven Sprinklern umringten RWA bleibt weiterhin ungeklärt, denn in den UL-Experimenten versagte die Geschwindigkeitsmessung, so daß der Volumenstrom durch die RWA nicht ermittelt werden konnte.

Die Auswirkung von Rauchschürzen kann nach den UL-Versuchen praktisch nicht beurteilt werden, denn ohne Rauchschürzen wurden nur sehr wenige Versuche durchgeführt. Ihre Interpretation steht zum Teil in direktem Widerspruch zu den Ergebnissen der Versuche. Kleine Rauchschürzen, die nur die RWA erfassen und unter der Decke eine Rauchgas-Schichtdicke belassen, die ausreicht, um die Sprinkler auszulösen, wurden nicht untersucht, sondern nur solche, die knapp 2 m tief das gesamte Versuchsareal von mehr als 400 m² umschließen.

Die Ergebnisse des bei NIST entwickelten CFD-Programms decken sich, wenn Raum und Zeit eng gefaßt werden (Auslöseverhalten beschränkt auf die Sprinkler im 1. Ring um den Brandherd, Wärmefreisetzung nur bis zum Auslösen dieser Sprinkler) mit den Versuchsergebnissen. Jenseits dieser Grenzen ist beim Vergleich der Simulation mit dem Experiment mit Standardabweichungen von bis zu 80 % zu rechnen. Das Programm ist also keinesfalls, wie vorgesehen, in der Lage, mangelhafte Versuche zu korrigieren geschweige denn, an ihre Stelle zu treten.

Die in den UL-Experimenten sowohl bei den Sprinklern als auch bei den RWA verwendeten Schmelzlot-Auslöseelemente erweisen sich als relativ unzuverlässig. Die Streubreite bei den Auslösetemperaturen und -zeitpunkten wird bei den Sprinklern durch deren große Zahl kompensiert — nicht aber beim Rauchabzug, denn, wenn überhaupt, reagiert hier jeweils nur eine Klappe. Die Temperaturmessung unter der Decke ist unbefriedigend, weil die dort installierten Thermolemente gleichzeitig der Funktionsüberwachung der Sprinkler dienen. Sobald sie aber benetzt sind, zeigen sie nicht mehr die Rauchgastemperatur an.

Ziel weiterer Untersuchungen muß es deshalb sein,

- mit einer dosierbaren Wärmequelle ein Temperaturfeld unter der Decke zu produzieren und es zu vermessen, beispielsweise seine Rotationssymmetrie zu überprüfen — hierfür wurde ein trichterförmiger Wannenbrenner konstruiert, dessen Wärmefreisetzung sich über den Brennstoffpegel im Brenner einstellen und konstant halten oder nach einer Zeitfunktion steigern läßt;
- die Genauigkeit des Auslöseverhaltens von Sprinklern zu überprüfen, zuerst in definierter Atmosphäre (plunge-test), dann an Ort und Stelle unter der Decke;

- das Temperaturfeld unter der Decke auch nach dem Auslösen der Sprinkler zu vermessen und mit der Reaktion der Sprinkler zu vergleichen;
- ein Auslöseelement für die RWA zu entwerfen, das zwar nach dem Auslösen der ersten Sprinkler anspricht aber noch bevor der Sprühstrahl weiterer aktivierter Sprinkler den Auftrieb des Rauchgases beeinträchtigt – also entweder in Abhängigkeit von der Funktion der ersten Sprinkler (z.B. Druckwächter) oder unabhängig von den Sprinklern (z.B. Rauchmelder);
- bei unveränderten Versuchsbedingungen wie Wärmefreisetzung und Distanz Brenner-RWA zu prüfen, welchen Einfluß die Sprinkler dann noch auf die Funktion der RWA haben;
- die Geschwindigkeit der Rauchgasströmung unter der Decke und in der RWA sowie die dortige Temperatur zu messen, um den Volumenstrom durch die RWA bestimmen zu können.

Als erstes jedoch ist ein Kriterium zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Effizienz einer Sprinkleranlage beurteilt werden kann und das sich sowohl auf realitätsnahe Lagerbrand-Versuche als auch auf Versuche mit Gas- oder Flüssigkeitsbrennern als Wärmequelle anwenden läßt. Im Hinblick auf eine auch beim Sprinklereinsatz wünschenswerte Minimierung des Wasserschadens kann das Ziel nicht lauten, möglichst viele Sprinkler zu aktivieren, sondern ausreichend viele – an der richtigen Stelle.

Für die akkurate Gestaltung der Diagramme bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. K. Makabe.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Persson, Bror und Haukur Ingason:
Modelling of Interaction between Sprinklers
and Fire Vents - present knowledge,
SP-Report 1996:32,
Sveriges Provnings- och Forsknings-Institut,
Fire Technology,
Borås 1996
- [2] Oberhagemann, Dirk:
Evaluierung des Forschungsbedarfs bei den
Feuerwehren in Deutschland,
Berichts-Nr. O/129/95,
Gesellschaft zur Förderung der Prozeß-,
Sicherheits- und Umwelttechnik (PRO-
SICHT), Hamm 1995
- [3] Hinkley, Peter L.; G. O. Hansell; N. R.
Marshall und R. Harrison:
Experiments at the 'Multifunctioneel Train-
ingcentrum', Ghent, on the Interaction bet-
ween Sprinklers and Smoke Venting,
Report BR 224 - CI/SfB66(68.54)(K23),
Department of Environment, Building Re-
search Establishment (BRE), Fire Research
Station (FRS),
Borehamwood, Hertfordshire 1992
- [4] Ingason, Haukur und Sören Olsson:
Interaction between Sprinklers and Fire
Vents - full scale experiments,
Brandforsk-Projekt 406-902,
SP-Report 1992:11,
Sveriges Provnings- och Forsknings-Institut,
Fire Technology,
Borås, Schweden 1992
- [5] McGrattan, Kevin B.; Anthony Hamins und
David Stroup:
Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft Cur-
tain 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 Labo-
ratory,
Gaithersburg (Maryland) 1998
- [6] 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 Labo-
ratory,
Gaithersburg (Maryland) 1994
- [7] Tuovinen, H.:
Validations of Ceiling Jet Flow in a large
Corridor with Vents using the Computatio-
nal-Fluid-Dynamics-Code JASMINE,
Fire Technology Band 32 (1996), Heft 1,
Seite 25...49
- [8] Thomas, P. H. und Peter L. Hinkley:
The Design of Roof Venting Systems for
Single-Storey Buildings,
Technical Report No.10,
Fire Research Station,
HMSO, London 1964
- [9] Hinkley, Peter L.:
The Effect of Vents on the Opening of the
First Sprinklers,
Fire Safety Journal 11 (1986),
Seite 211...225
- [10] Gustafsson, Nils-Erik:
A Sprinkler Specialist's View,
FRS/Brandforsk-Seminar on Smoke,
Ventilation and Sprinklers,
Fire Research Station (FRS),
Borehamwood, Hertfordshire 1992
- [11] Anonym:
Fire Tests of Palletized and Racked Tire
Storage, Report Serial No. 19037,
Factory Mutual Research Corporation,
Norwood (Massachusetts) 1970

- [12] Waterman, T. E.; C. E. Foxx; K. R. Mniszewski und D. L. Eacret:
Fire Venting of Sprinklered Buildings,
Technical Report IITRI Project J08385,
IIT-Research Institute,
Illinois Institute of Technology,
Chicago, Illinois 1982
- [13] Troup, J. M. A.:
Large-Scale Fire Tests of Rack Stored
Group A Plastics in Retail Operation Scenarios Protected by Extra Large Orifice (ELO) Sprinklers,
FMRC-Technical Report J.I.OX1R0.RR,
Factory Mutual Research Corporation,
Norwood (Massachusetts) 1994
- [14] Troitzsch, Jürgen:
Brandverhalten von Kunststoffen — Grundlagen, Vorschriften, Prüfverfahren,
Hanser-Vlg., München, Wien 1982
- [15] Neumüller, Otto-Albrecht:
RÖMPPs Chemie-Lexikon, 8. Aufl.,
Franckh'sche Vlgdlig., Stuttgart 1979...88
und Falbe, Jürgen und Manfred Regitz:
RÖMPP Chemie-Lexikon, 9. Aufl.,
Thieme-Vlg., Stuttgart 1989...93
- [16] Cote, Arthur E. et al.:
Fire Protection Handbook, 18th Ed.,
National Fire Protection Association
(NFPA), Quincy (Massachusetts) 1997
- [17] Hinkley, Peter L.:
Smoke and Heat Venting, in
Handbook of Fire Protection Engineering,
2nd Ed., Kapitel 3, Seite 163,
Society of Fire Protection Engineers (SFPE)
and National Fire Protection Association
(NFPA), Quincy (Massachusetts) 1995
- [18] Beitz, Wolfgang und Karl-Heinz Küttner:
DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau, 15. Aufl.,
Springer-Vlg., Berlin... 1983

6. VERZEICHNIS DER BILDER UND TABELLEN

- Bild 1: Die Installation der Sprinkler und der RWA für die Versuchsreihe I mit Heptan-Brennern in der Brandversuchshalle von UNDERWRITERS LABORATORIES (Original-Fuß- und Zoll-Vermaßung in cm umgerechnet): ● Sprinkler-Positionen mit den Nummern der benachbarten Thermoelemente, —·— Wasserversorgung mit 2,5"-Hauptleitung und abzweigenden 2"-Rohren, ☒ RWA- und ☐··☐ Brenner-Positionen 76
- Bild 2: Die Installation der Sprinkler und der RWA für die Versuchsreihe II mit Heptan-Brennern in der Brandversuchshalle von UNDERWRITERS LABORATORIES (vermaßt sind nur die Änderungen gegenüber Bild 1): ● Sprinkler-Positionen (nicht dieselben wie in Versuchsreihe I, die benachbarten Thermoelemente sind im NIST-Bericht nicht numeriert), —·— Wasserversorgung mit 2,5"-Hauptleitung und abzweigenden 2"-Rohren, ☒ RWA- und ☐··☐ Brenner-Positionen 77
- Bild 3: Die Installation der Sprinkler und der RWA für die Versuchsreihe III mit in Regallagern gestapelten, karton-verpackten Polystyrol-Artikeln in der Brandversuchshalle von UNDERWRITERS LABORATORIES (die Kartons in den acht äußeren Regalen enthalten kein Polystyrol — vermaßt sind nur die Änderungen gegenüber Bild 1): ● Sprinkler-Positionen (dieselben wie in Versuchsreihe II, die benachbarten Thermoelemente sind im NIST-Bericht nicht numeriert), —·— Wasserversorgung mit 2,5"-Hauptleitung und abzweigenden 2"-Rohren, ☒ RWA-Positionen. Im gezeichneten Beispiel befindet sich die Zündquelle in Position ☐. Für weitere Experimente werden die Regale parallel versetzt und so aufgebaut, daß die Zündquelle nach ☐ oder ☐ rückt. 78
- Bild 4: Der Heptan-Zerstäubungsbrenner von UNDERWRITERS LABORATORIES und die Steigerung seiner Wärmefreisetzungsrate zu Beginn der 34 Experimente der Versuchsreihen I und II 79
- Bild 5: Vergleich der Maximaltemperaturen in der Nähe jener Sprinkler, die während der Versuche II-4 und II-8 aktiviert werden — die Sprinkler-Nummer orientiert sich an der Reihenfolge, in der die Sprinkler im Versuch II-4 anspringen 80
- Bild 6: Vergleich der Auslösezeitpunkte jener Sprinkler, die während der Versuche II-4 und II-8 aktiviert werden — die eingeklammerten Sprinkler sprechen im Versuch II-8 nicht an 80
- Bild 7: Der Volumenstrom eines auftriebs-behafteten Rauchgases durch eine RWA-Klappe und seine 1. Ableitung 81

Bild 8:	Der Versuchsstand zur Untersuchung der Abhängigkeit der Wärmefreisetzungsrate von der Größe des Brennstoffspiegels	82
Bild 9:	Der vom Konzentrationsmeßgerät ermittelte Sauerstoffgehalt im Abgas aufgetragen über der Versuchsdauer	82
Bild 10:	Der mit dem PRANDTL'schen Staurohr gemessene dynamische Druck im Abgasrohr der Absaughaube über dem Versuchsstand aufgetragen über der Versuchsdauer	83
Bild 11:	Die Temperatur im Abgasrohr der Absaughaube über dem Versuchsstand aufgetragen über der Versuchsdauer	83
Bild 12:	Die Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Versuchsdauer – Momentanwerte berechnet nach Gleichung (24) aus den Werten der Bilder 9–11	84
Bild 13:	Die Wärmefreisetzungsrate im Wannenbrenner – berechnet nach Gleichung (24) für Versuchsphasen, während derer die Werte in den Bildern 9–11 etwa konstant bleiben	84
Bild 14:	Ermittlung einer Ausgleichspartabel für die Abhängigkeit des Brennstoffvolumens von der Füllhöhe	85
Bild 15:	Ermittlung einer Ausgleichsgeraden für die Abhängigkeit des am Trichtergrund gemessenen statischen Drucks von der Füllhöhe im Brenner – verglichen mit den aus Pegelstand und Dichte berechneten Werten	85
Bild 16:	Die Abhängigkeit der Größe des Brennstoffspiegels vom statischen Druck am Trichtergrund – berechnet nach Gleichung (32) und (34)	86
Bild 17:	Aufzeichnung des statischen Drucks am Trichtergrund während der einzelnen Versuchsphasen	86
Bild 18:	Die Größe der Brennstoff-Oberfläche im Wannenbrenner während der Versuchsphasen mit $p_{stat.} = const.$	87
Bild 19:	Die Wärmefreisetzungsrate im Wannenbrenner, aufgetragen über der Größe der Brennstoff-Oberfläche – die Ausgleichsgerade entspricht Gleichung (35)	87
Tabelle 1:	Die Sprinkler-Aktivierung in den 39 Großbrand-Versuchen bei UNDERWRITERS LABORATORIES	88
Tabelle 2:	Die Versuche der Tabelle 1, geordnet nach RWA-Öffnungszeitpunkt und -Anordnung und nach Wärmefreisetzung	89
Tabelle 3:	Die Versuche der Tabelle 1, geordnet nach RWA-Anordnung und -Öffnungszeitpunkt	90
Tabelle 4:	Die mit 4 verschiedenen Thermoelementen aufgenommenen Temperaturen beim RWA-Auslöseelement	91

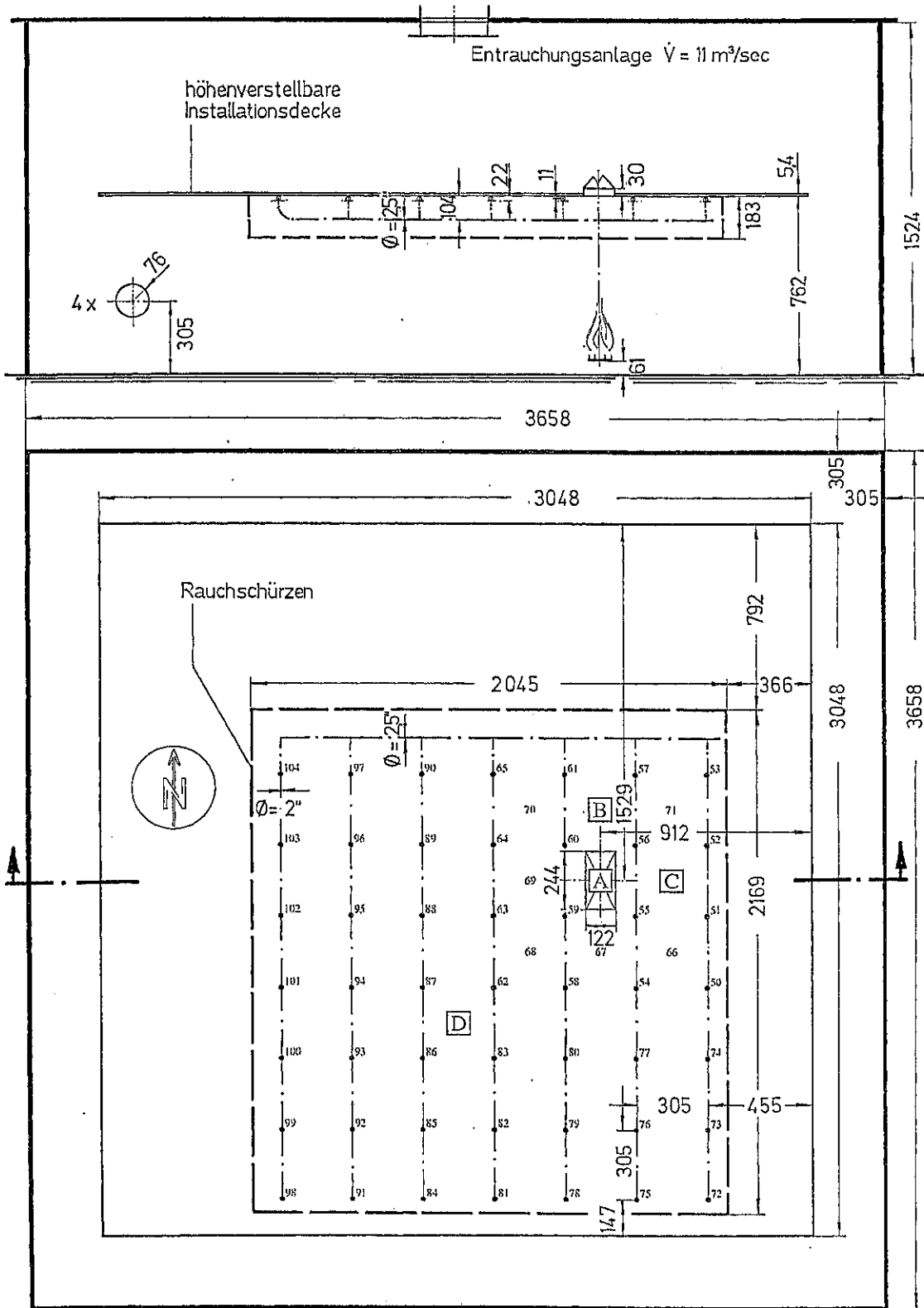


Bild 1: Die Installation der Sprinkler und der RWA für die Versuchsreihe I mit Heptan-Brennern in der Brandversuchshalle von UNDERWRITERS LABORATORIES (Original-Fuß- und Zoll-Vermaßung in cm umgerechnet):

- Sprinkler-Positionen mit den Nummern der benachbarten Thermoelemente,
- · — Wasserversorgung mit 2,5"-Hauptleitung und abzweigenden 2"-Rohren,
- ⊠ RWA- und ⊡ · ⊡ Brenner-Positionen

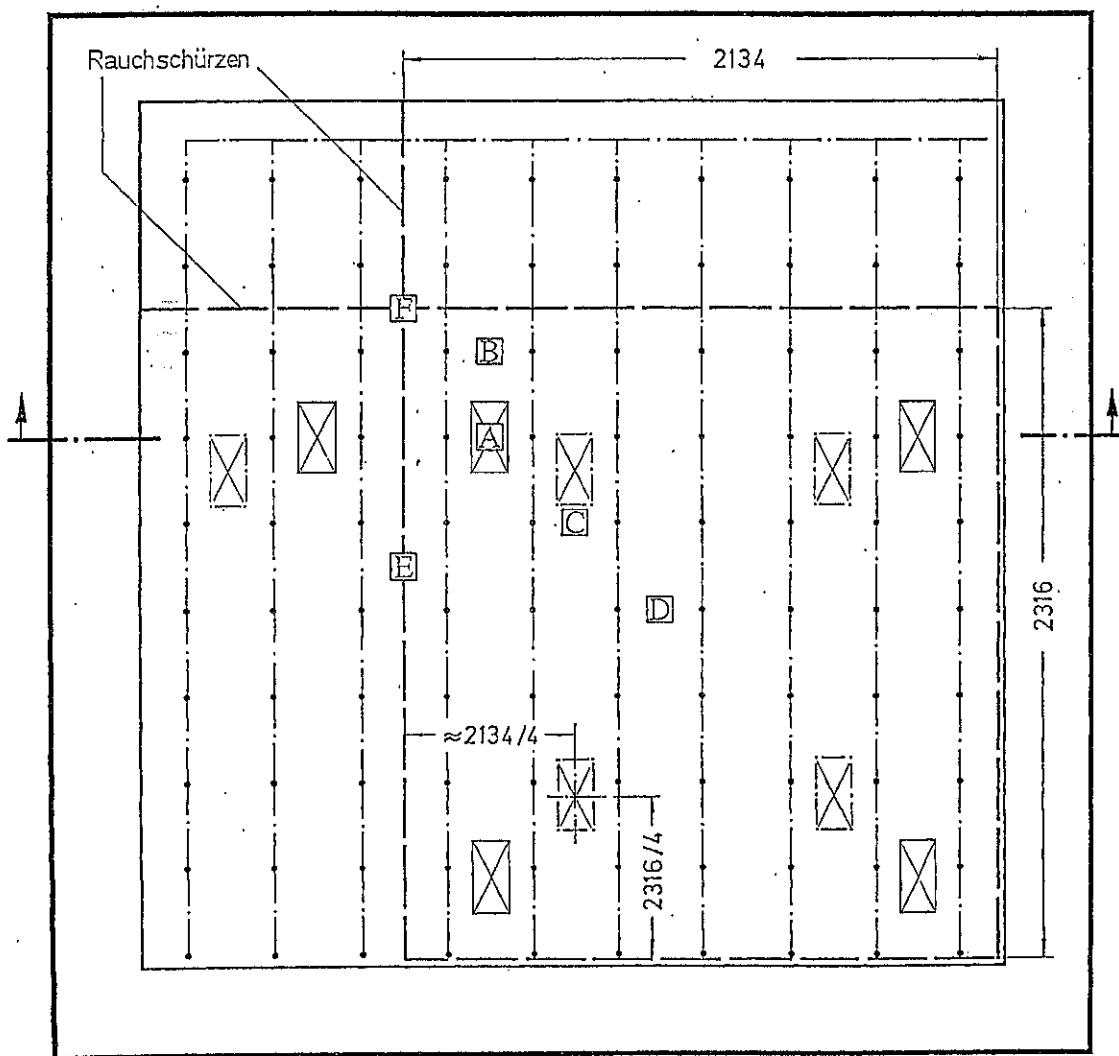
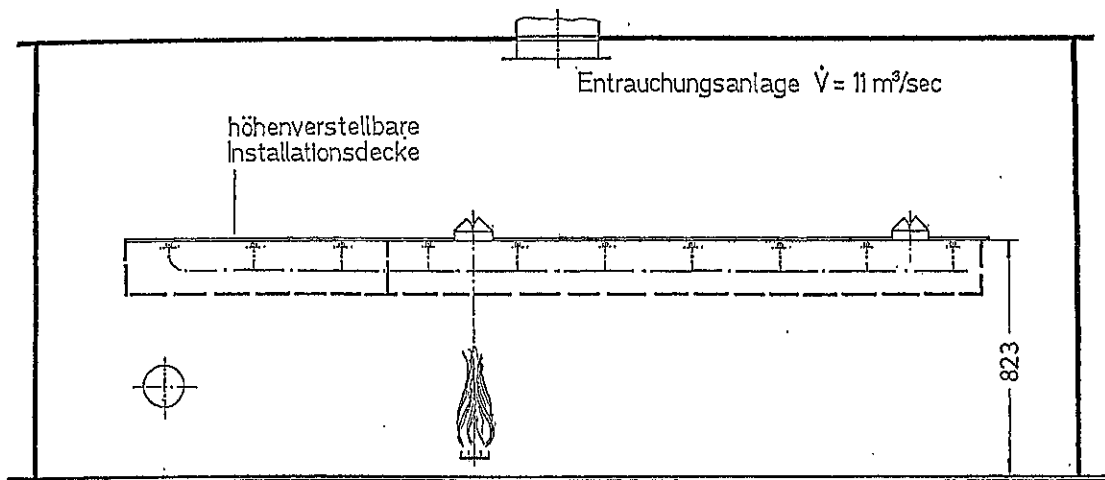


Bild 2: Die Installation der Sprinkler und der RWA für die Versuchsreihe II mit Heptan-Brennern in der Brandversuchshalle von UNDERWRITERS LABORATORIES (vermaßt sind nur die Änderungen gegenüber Bild 1):
● Sprinkler-Positionen (nicht dieselben wie in Versuchsreihe I, die benachbarten Thermoelemente sind im NIST-Bericht nicht nummeriert),
— · — Wasserversorgung mit 2,5"-Hauptleitung und abzweigenden 2"-Rohren,
⊗ RWA- und ⊠...⊠ Brenner-Positionen

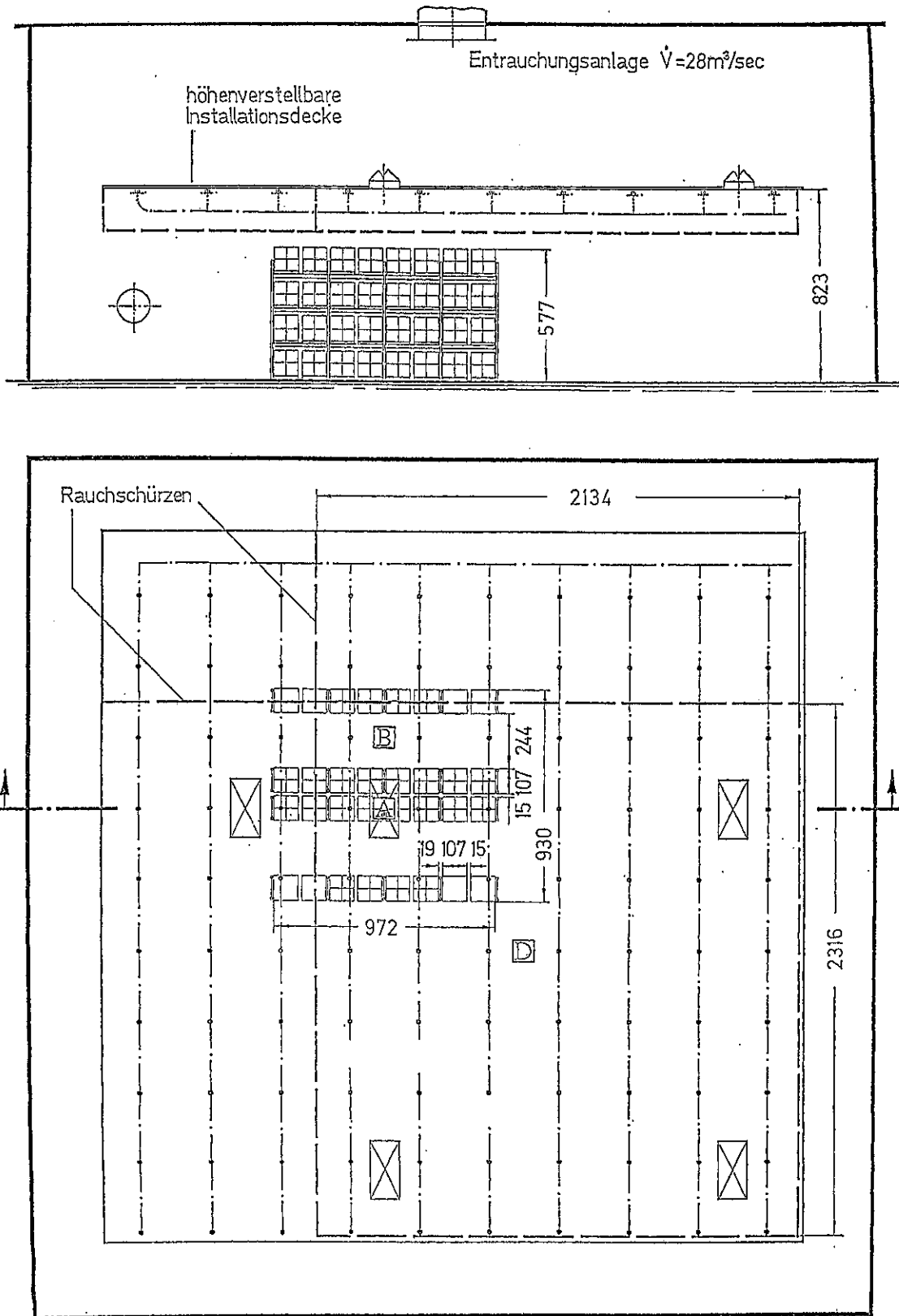


Bild 3: Die Installation der Sprinkler und der RWA für die Versuchsreihe III mit in Regallagern gestapelten, karton-verpackten Polystyrol-Artikeln in der Brandversuchshalle von UNDERWRITERS LABORATORIES (die Kartons in den acht äußeren Regalen enthalten kein Polystyrol — vermaßt sind nur die Änderungen gegenüber Bild 1): ● Sprinkler-Positionen (dieselben wie in Versuchsreihe II, die benachbarten Thermoelemente sind im NIST-Bericht nicht numeriert), — · — Wasserversorgung mit 2,5"-Hauptleitung und abzweigenden 2"-Rohren, ☒ RWA-Positionen. Im gezeichneten Beispiel befindet sich die Zündquelle in Position ☐ A. Für weitere Experimente werden die Regale parallel versetzt und so aufgebaut, daß die Zündquelle nach ☐ B oder ☐ D rückt.

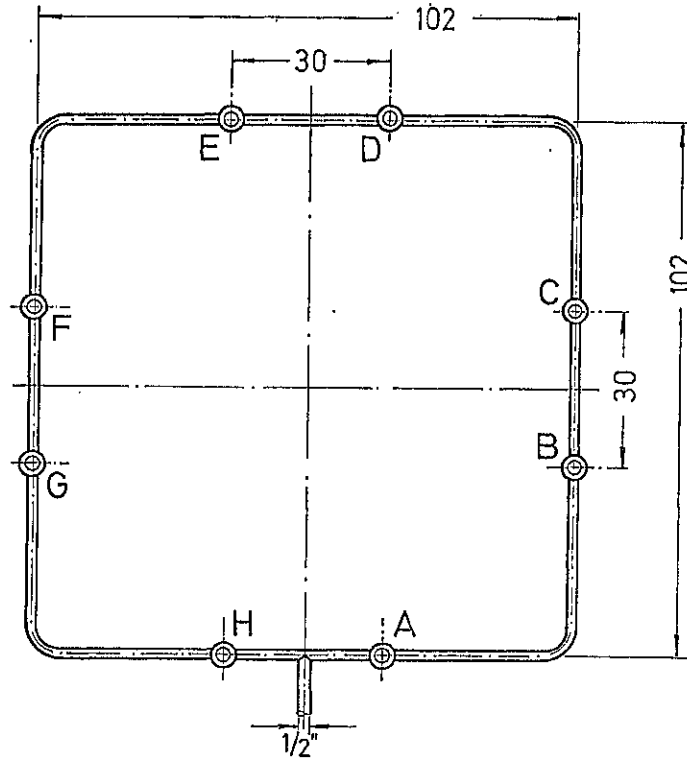
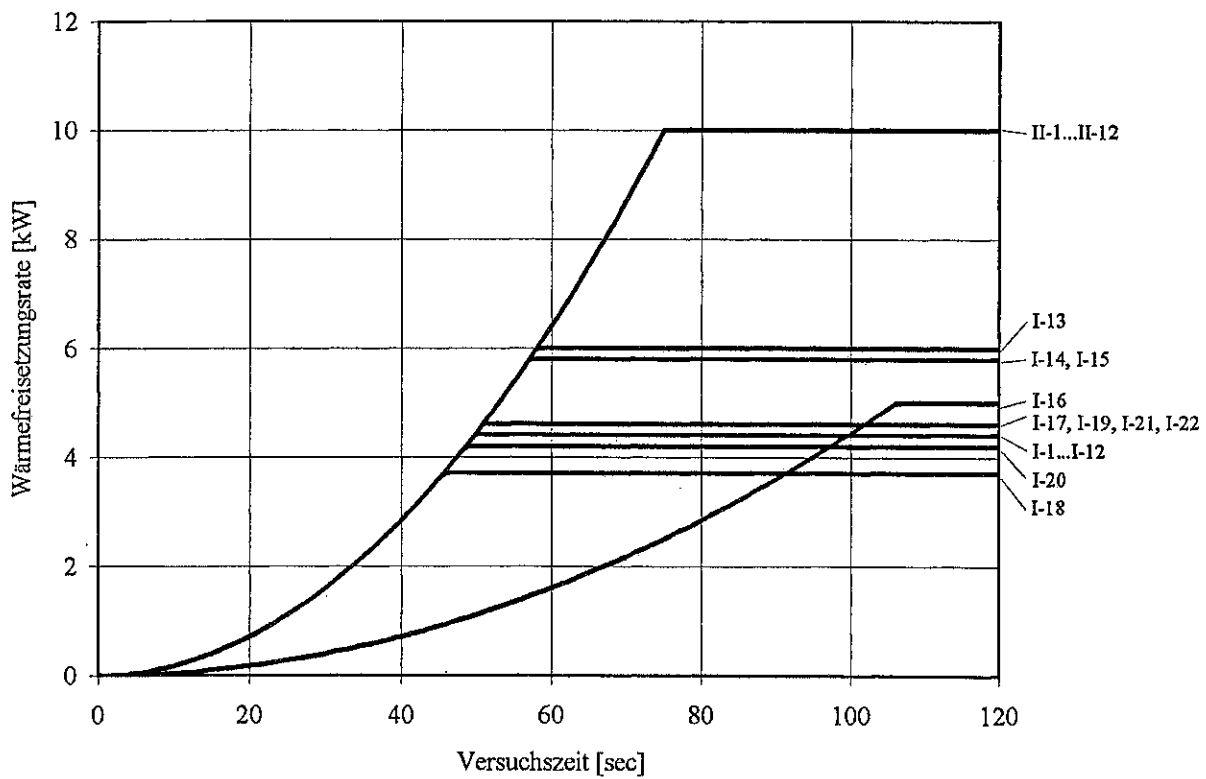


Bild 4: Der Heptan-Zerstäubungsbrenner von UNDERWRITERS LABORATORIES (Maße in [cm]) und die Steigerung seiner Wärmefreisetzungsrate zu Beginn der 34 Experimente der Versuchsreihen I und II



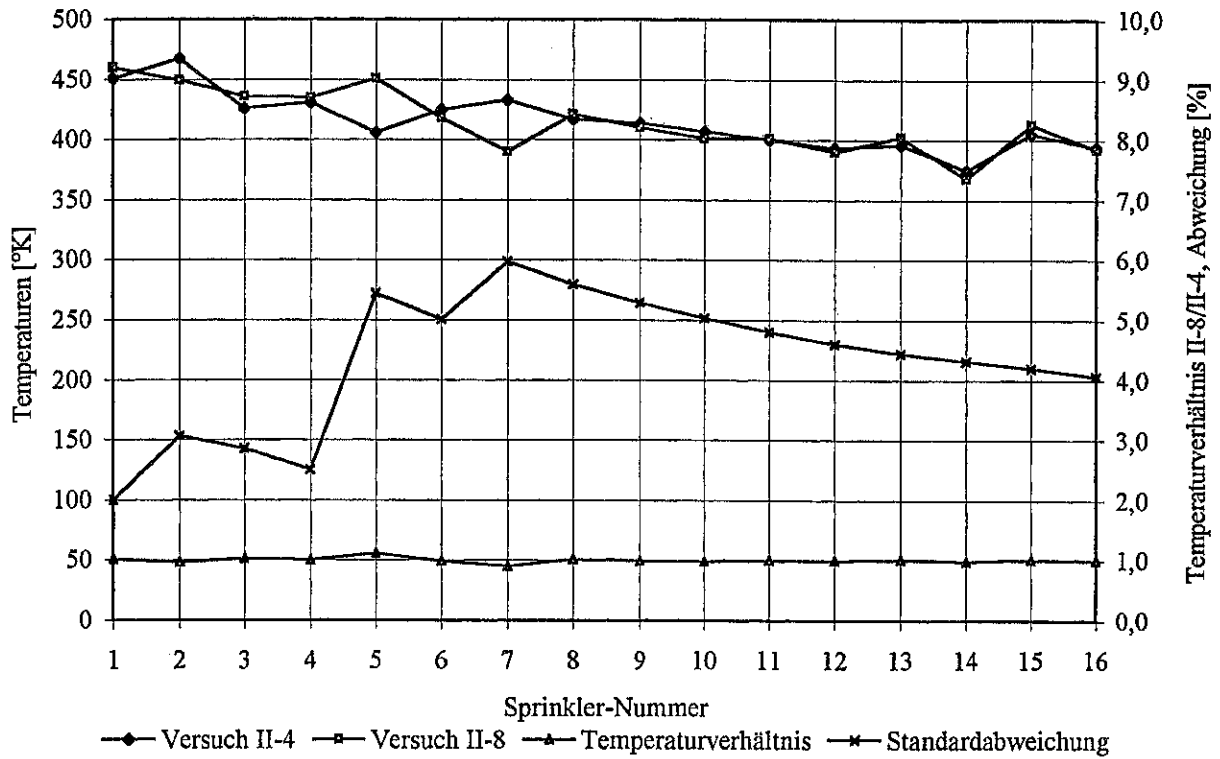


Bild 5: Vergleich der Maximaltemperaturen in der Nähe jener Sprinkler, die während der Versuche II-4 und II-8 aktiviert werden - die Sprinkler-Nummer orientiert sich an der Reihenfolge, in der die Sprinkler im Versuch II-4 anspringen

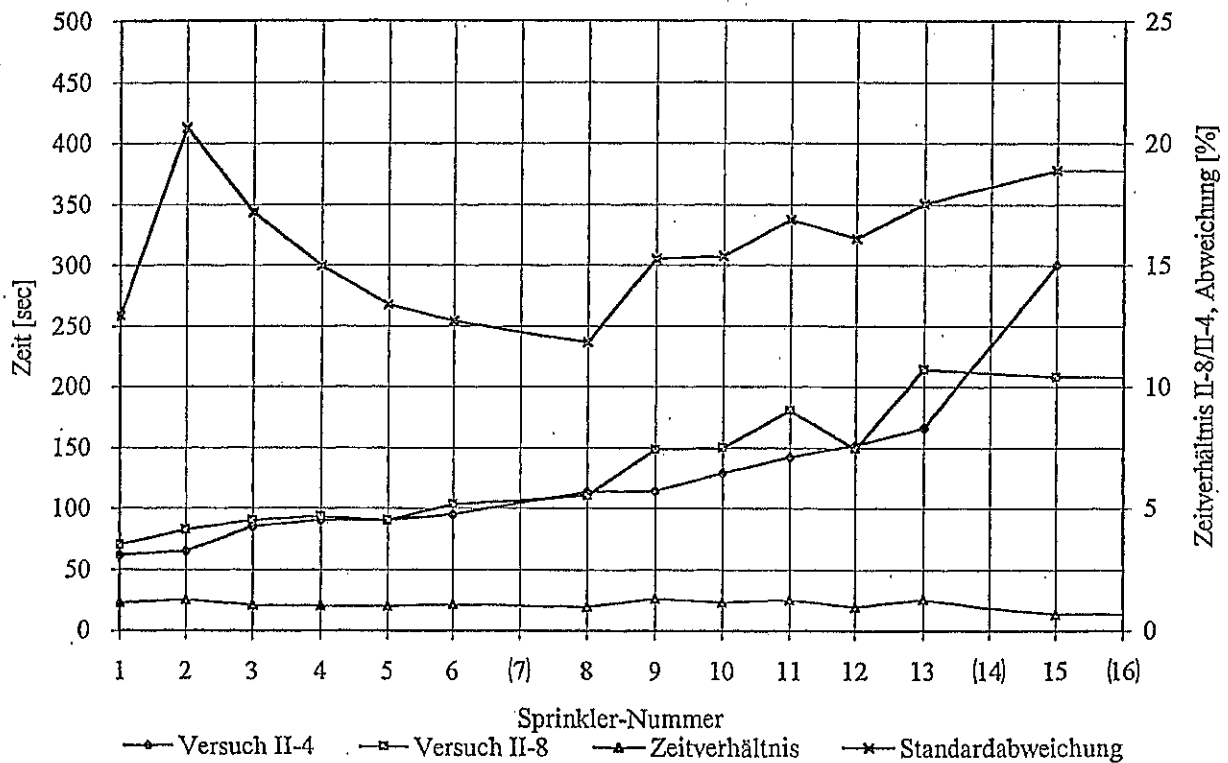


Bild 6: Vergleich der Auslöszeitpunkte jener Sprinkler, die während der Versuche II-4 und II-8 aktiviert werden - die eingeklammerten Sprinkler sprechen im Versuch II-8 nicht an

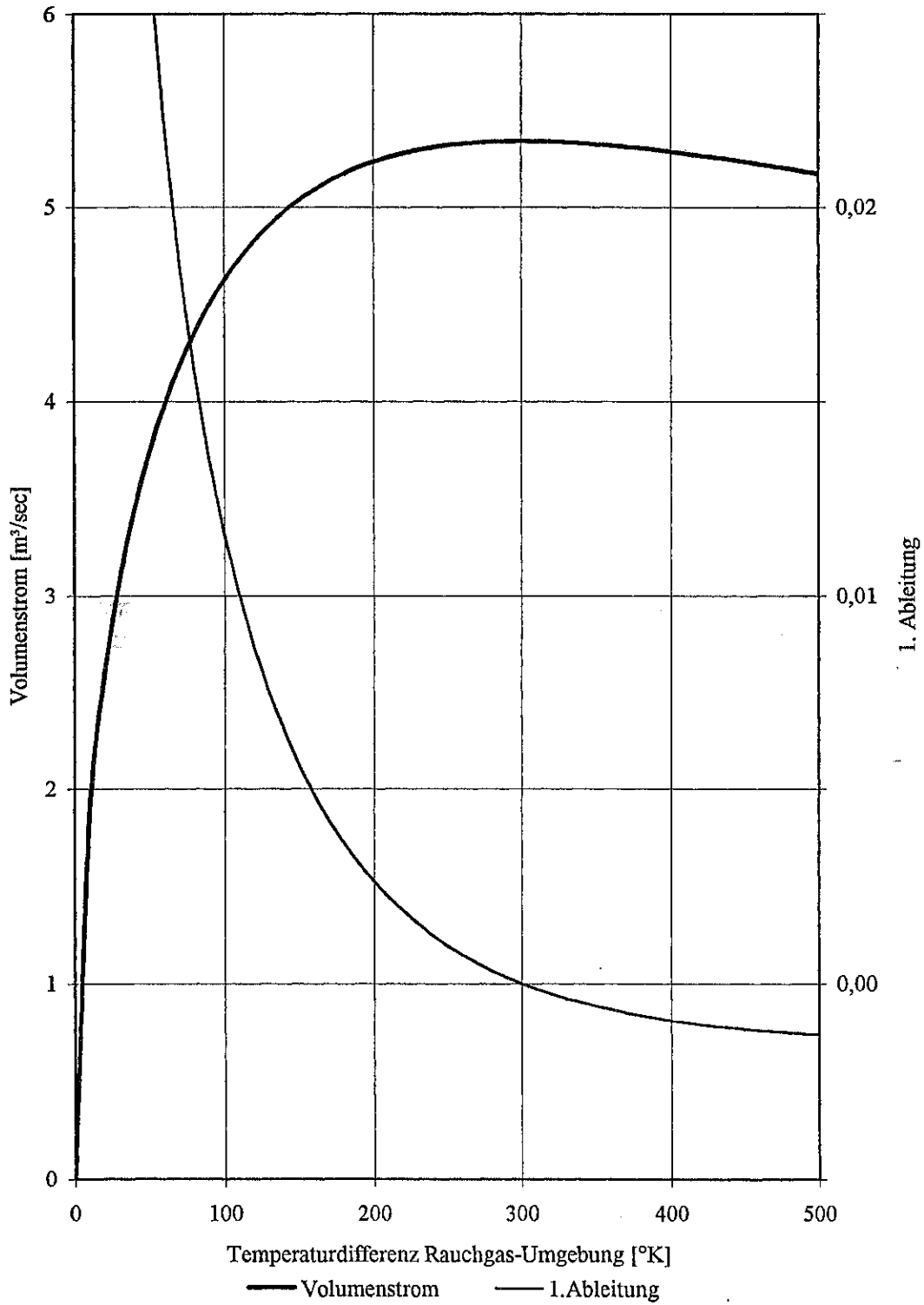


Bild 7: Der Volumenstrom eines auftriebs-behafteten Rauchgases durch eine RWA-Klappe und seine 1.Ableitung

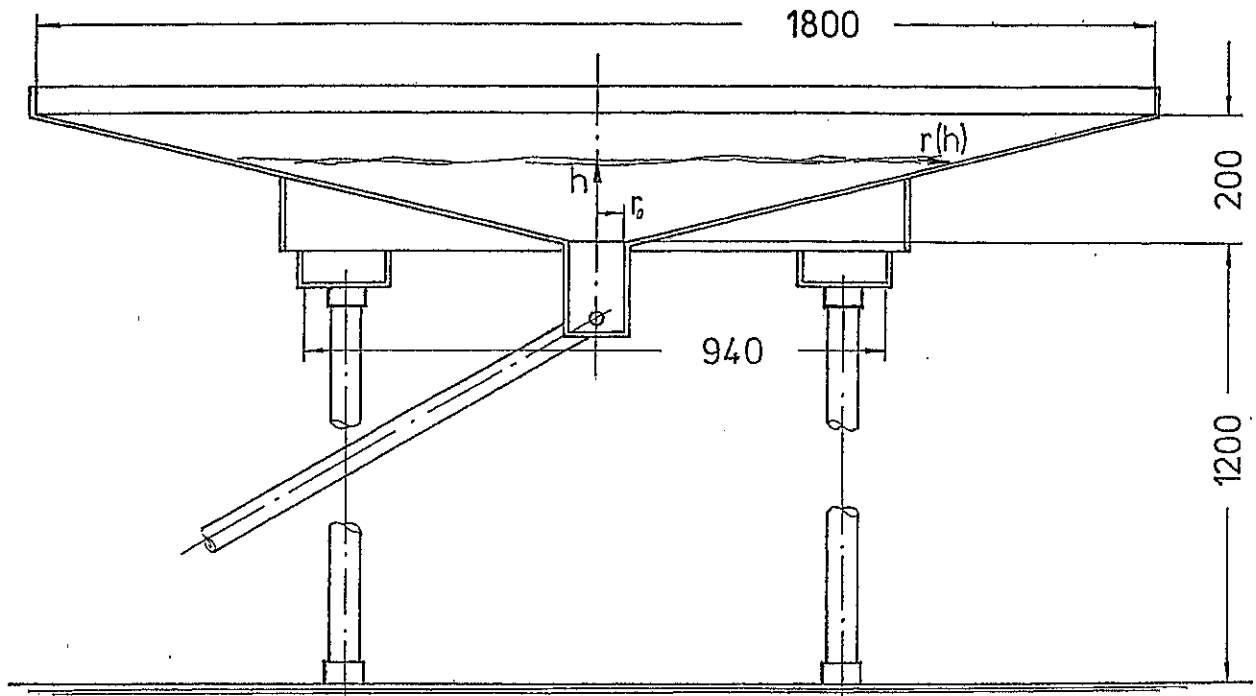


Bild 8: Der Versuchsstand zur Untersuchung der Abhängigkeit der Wärmefreisetzungsrate von der Größe des Brennstoffspiegels

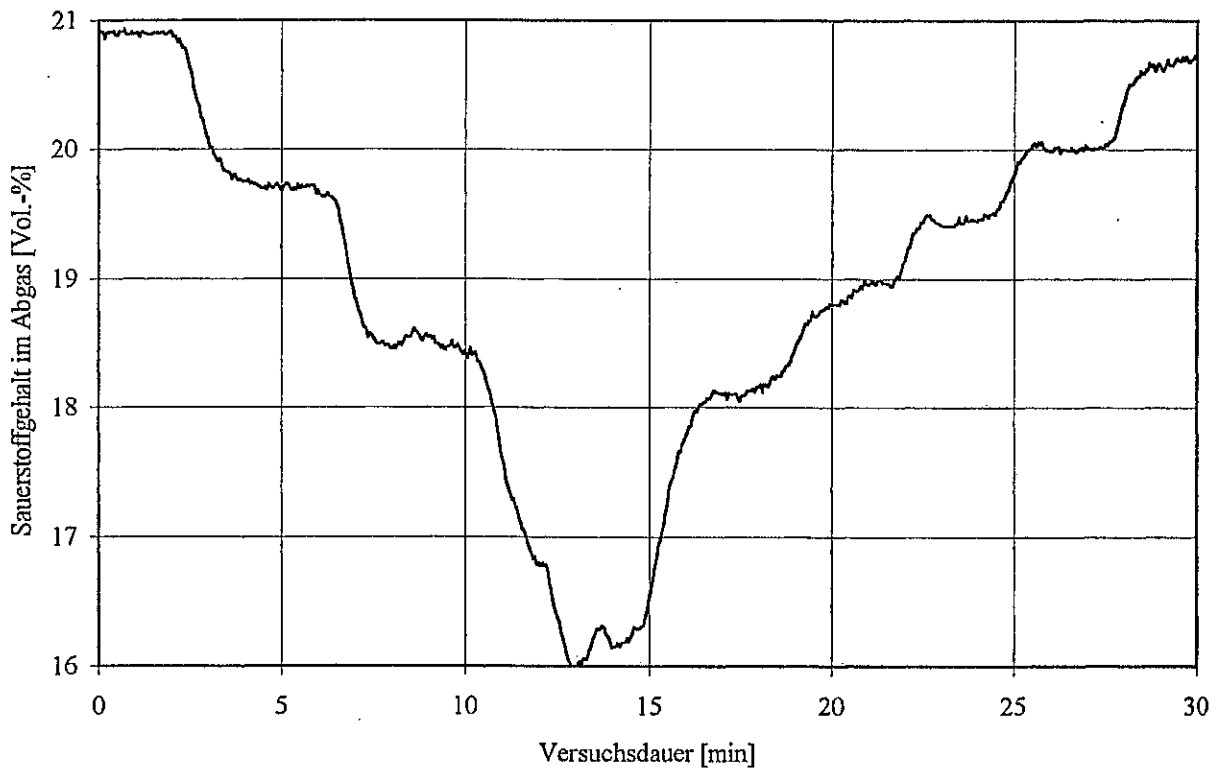


Bild 9: Der vom Konzentrationsmeßgerät ermittelte Sauerstoffgehalt im Abgas aufgetragen über der Versuchsdauer

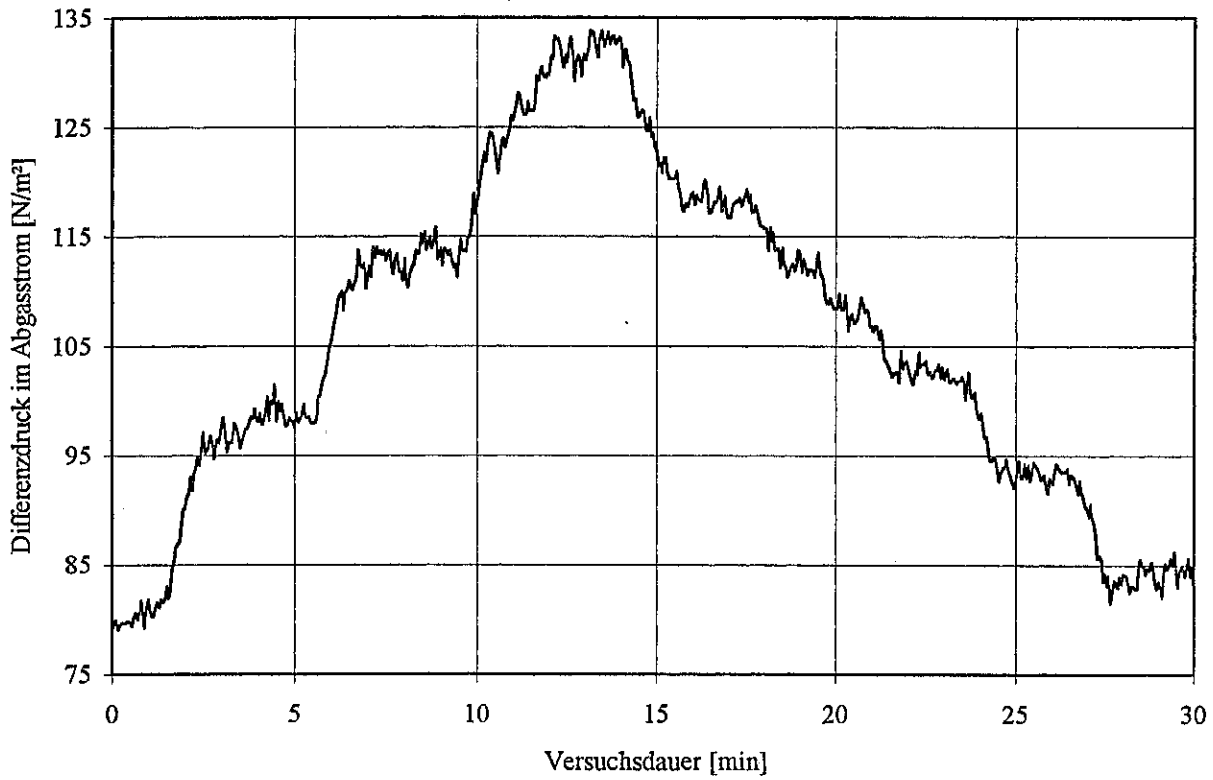


Bild 10: Der mit dem PRANDTL'schen Staurohr gemessene dynamische Druck im Abgasrohr der Absaughaube über dem Versuchsstand aufgetragen über der Versuchsdauer

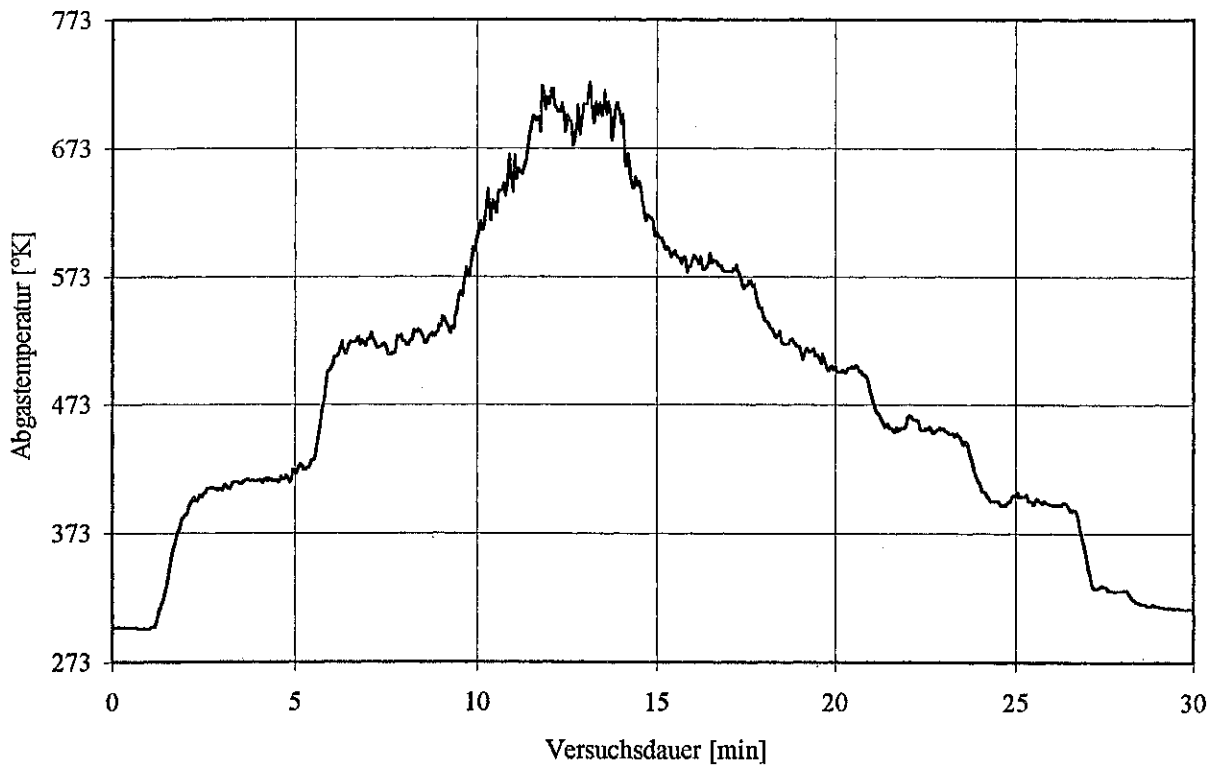


Bild 11: Die Temperatur im Abgasrohr der Absaughaube über dem Versuchsstand aufgetragen über der Versuchsdauer

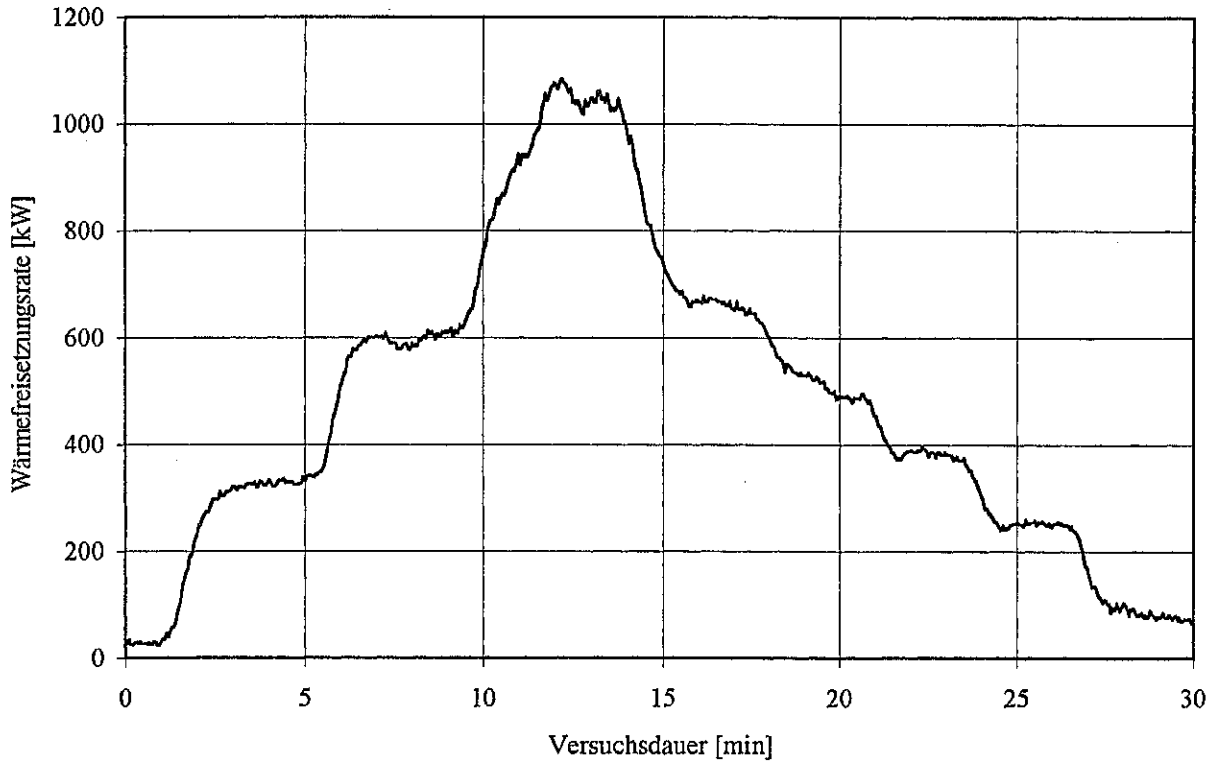


Bild 12: Die Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit von der Versuchsdauer – Momentanwerte berechnet nach Gleichung (24) aus den Werten der Bilder 9...11

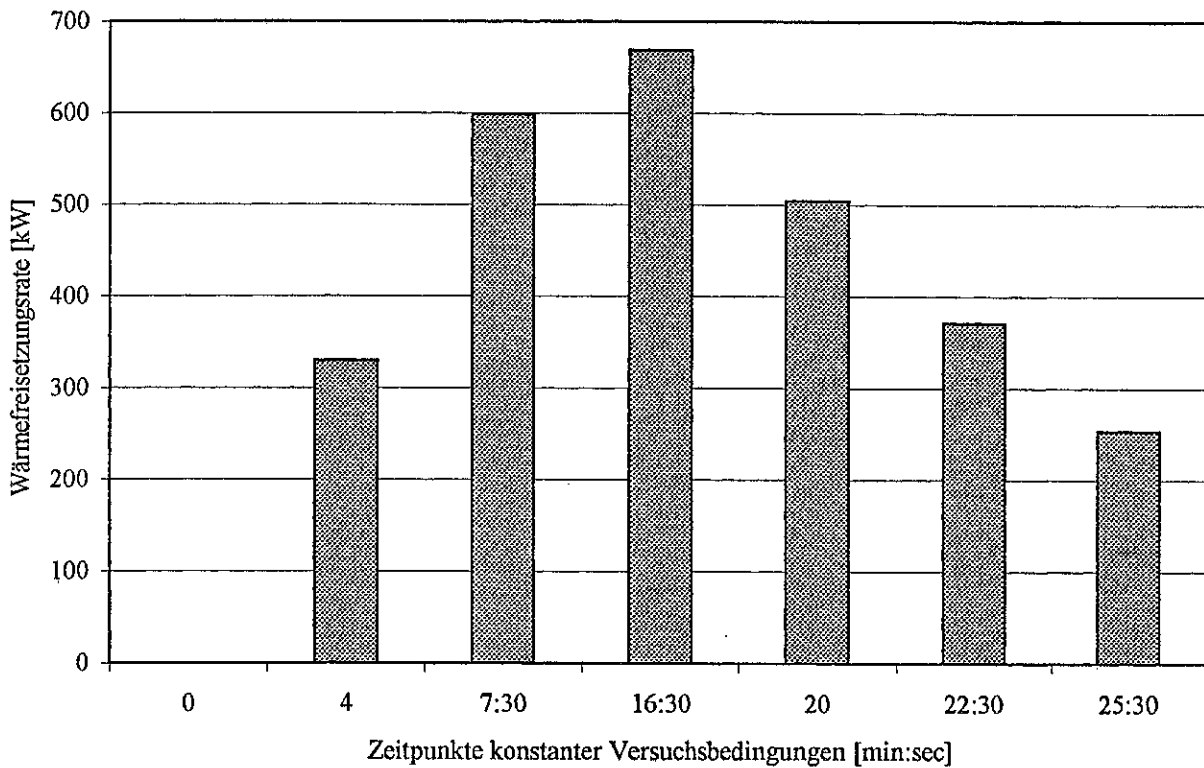


Bild 13: Die Wärmefreisetzungsrate im Wannenbrenner – berechnet nach Gleichung (24) für Versuchsphasen, während derer die Werte in den Bildern 9...11 etwa konstant bleiben

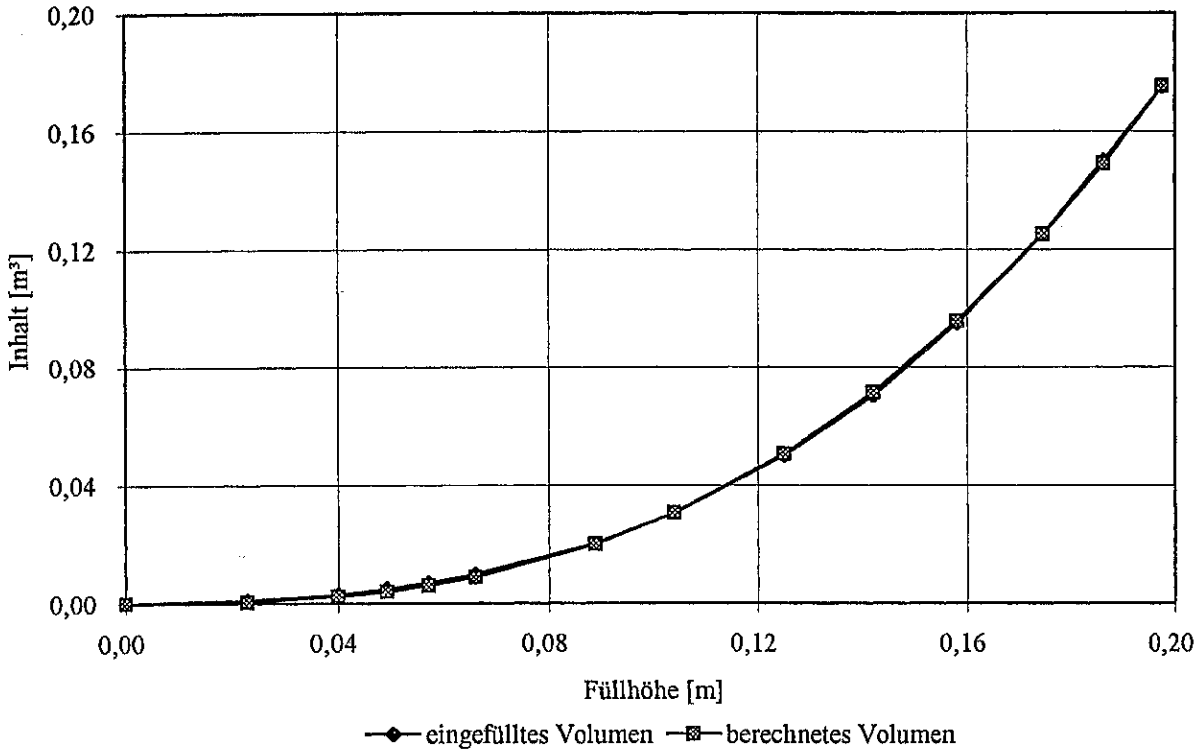


Bild 14: Ermittlung einer Ausgleichspartabel für die Abhängigkeit des Brennstoffvolumens von der Füllhöhe

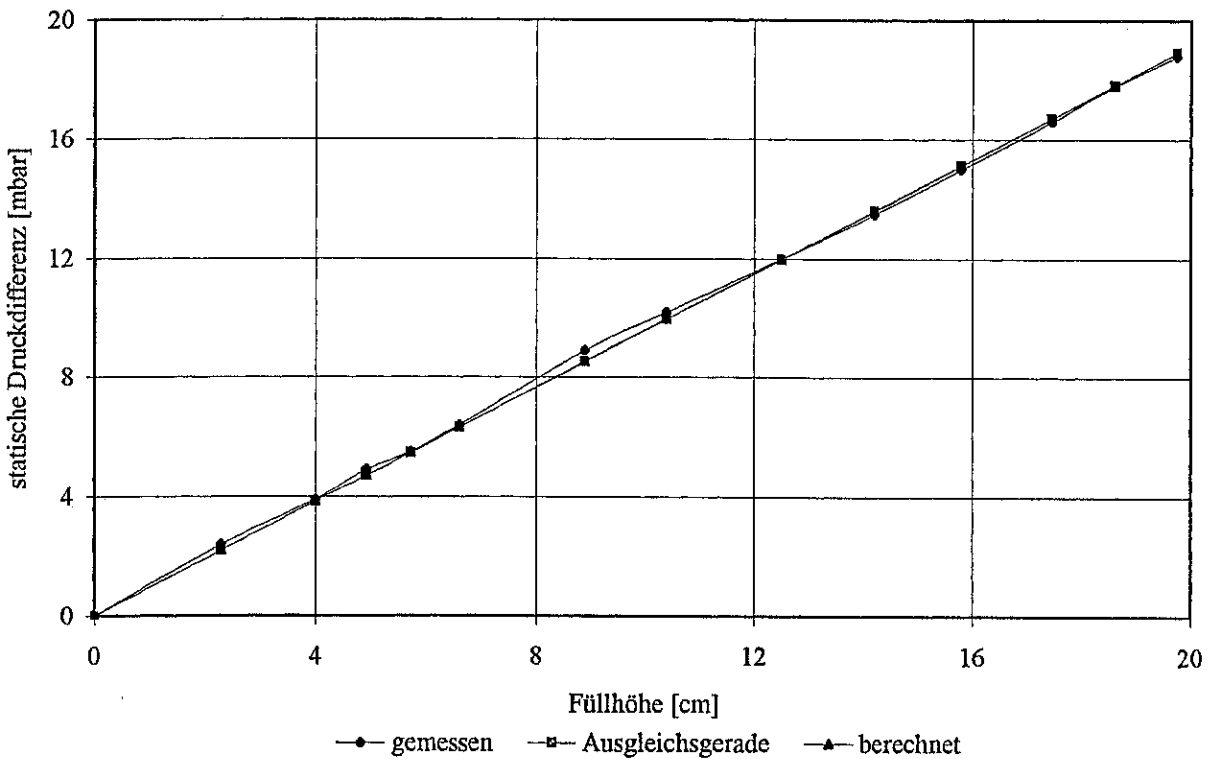


Bild 15: Ermittlung einer Ausgleichsgeraden für die Abhängigkeit des am Trichtergrund gemessenen statischen Drucks von der Füllhöhe im Brenner — verglichen mit den aus Pegelstand und Dichte berechneten Werten

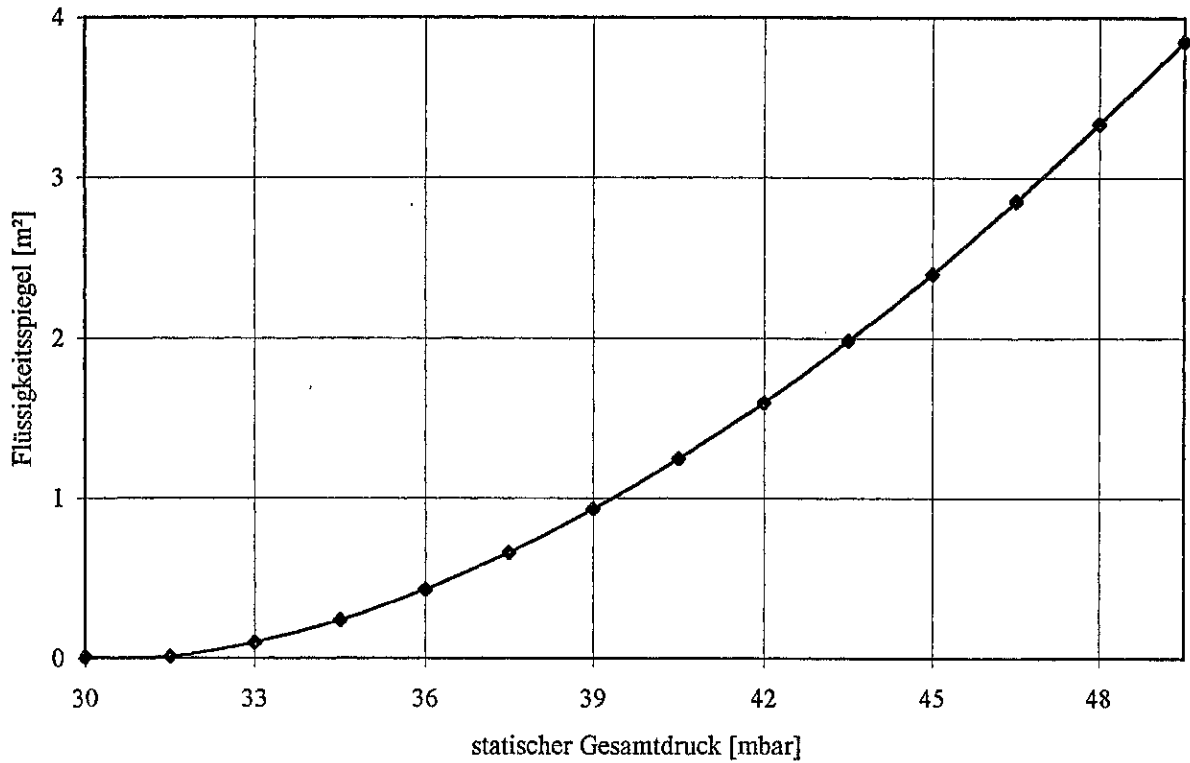


Bild 16: Die Abhängigkeit der Größe des Brennstoffspiegels vom statischen Druck am Trichtergrund – berechnet nach Gleichung (32) und (34)

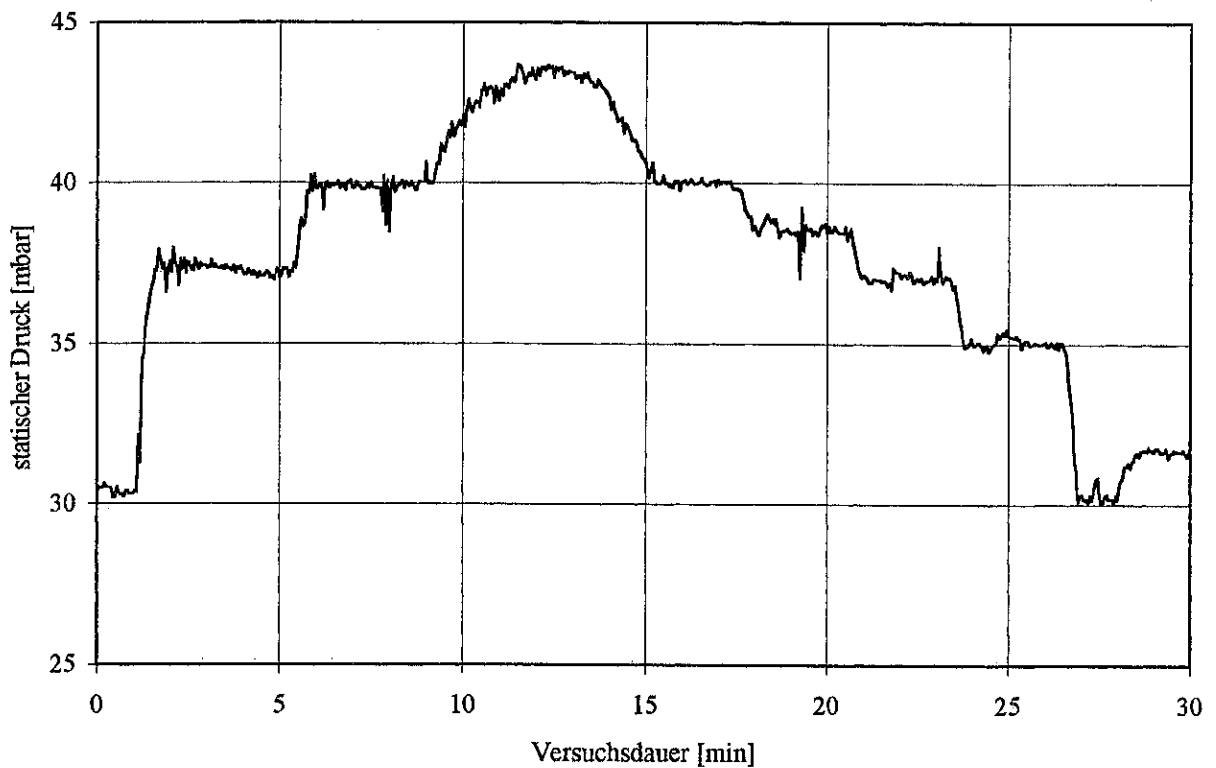


Bild 17: Aufzeichnung des statischen Drucks am Trichtergrund während der einzelnen Versuchsphasen

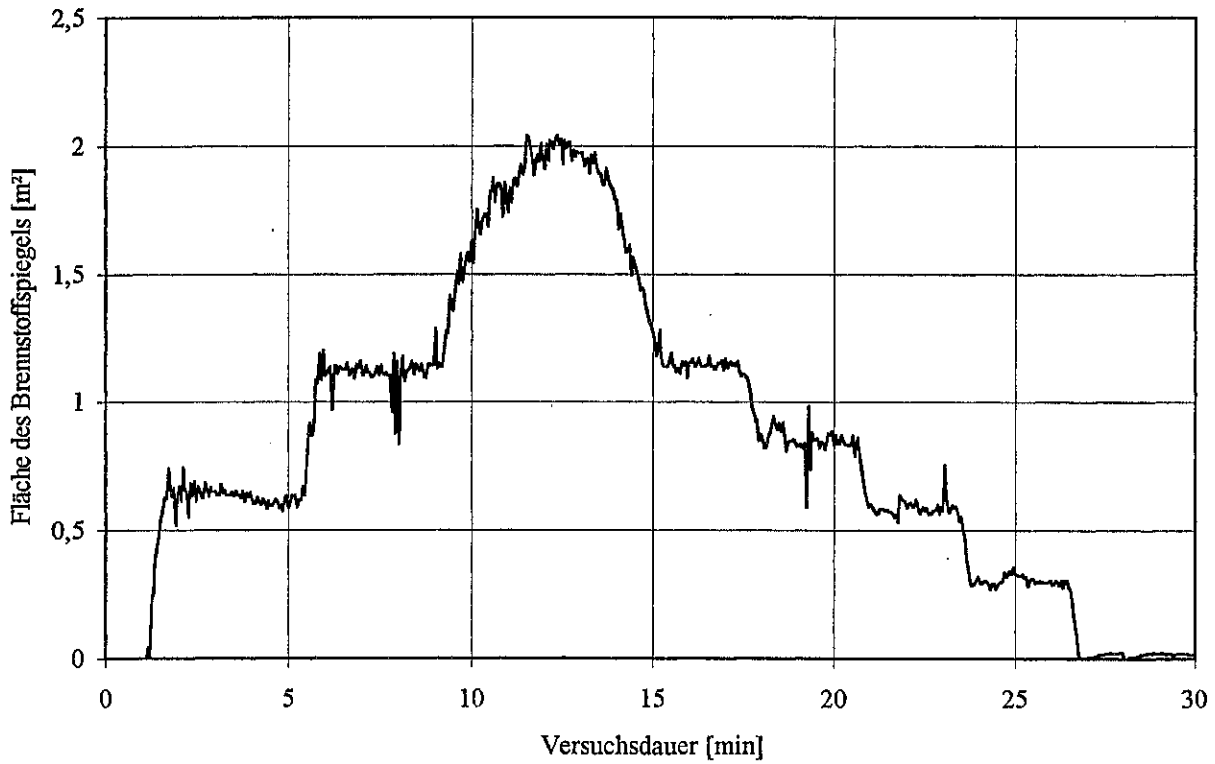


Bild 18: Die Größe der Brennstoff-Oberfläche im Wannenbrenner während der Versuchsphasen mit $p_{\text{stat.}} = \text{const.}$

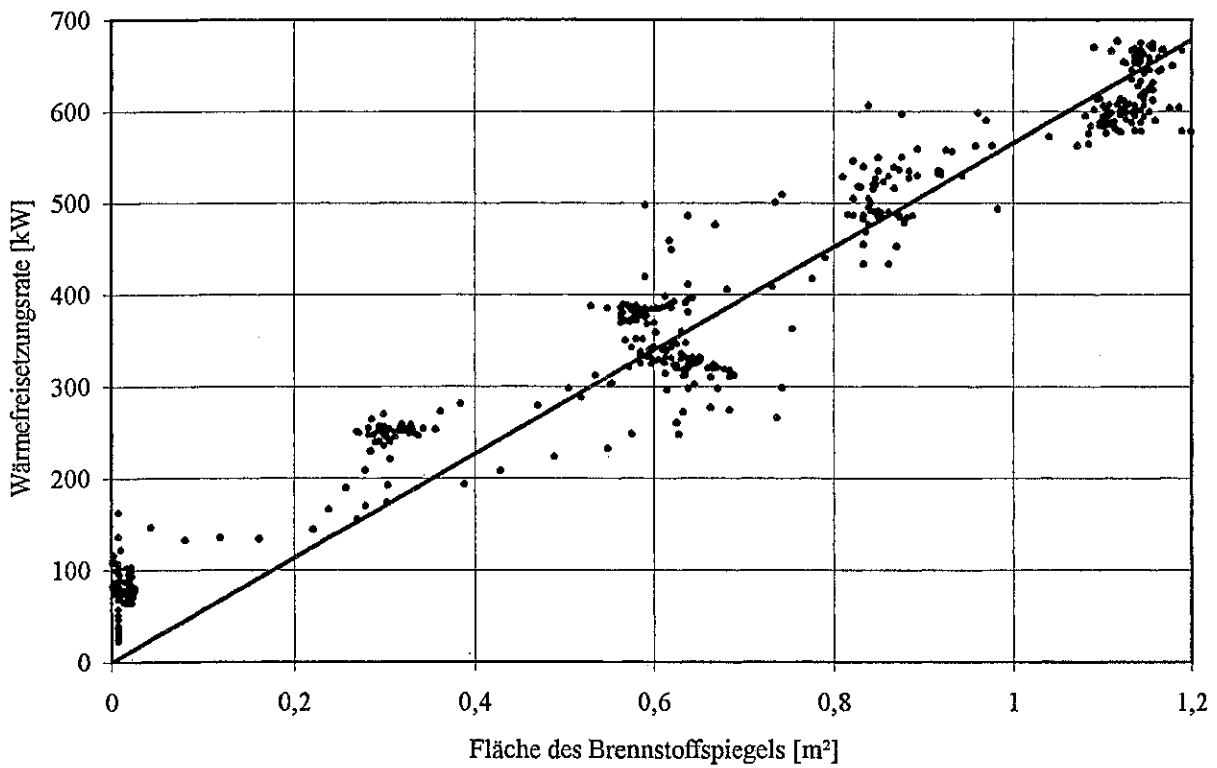


Bild 19: Die Wärmefreisetzungsrate im Wannenbrenner, aufgetragen über der Größe der Brennstoff-Oberfläche – die Ausgleichsgerade entspricht Gleichung (35)

Tabelle 1: Die Sprinkler-Aktivierung in den 39 Großbrand-Versuchen bei UNDERWRITERS LABORATORIES

Versuch Nr.	Brandlast		RWA-Öffnungszeitpunkt [min:sec]	Rauchschürzen	aktivierte Sprinkler																
	Art	freigesetzte Wärme [MJ] bis $t_{A,1.Spr.}$			1. Ring			2. Ring			jenseits RWA			insgesamt							
					Anz.	t_{AG} [min:sec]	Abw. [%]	θ_{AG} [°C]	Abw. [%]	θ_{AG} [°C]	Anz.	t_{AG} [min:sec]	Abw. [%]	θ_{AG} [°C]	Anz.	t_{AG} [min:sec]	θ_{AG} [°C]				
I-1	Heptan	127	nahe		ja	4	1:07	3,9	173	1	7	2:16	23	121	2	(2)	2:18	125	11	1:51	140
I-2	Heptan	131	nahe	(0:40)	ja	4	1:09	5,3	182	0,5	7	2:41	26	119	2,9	2	3:29	109	12	2:18	138
I-3	Heptan	127	nahe	(1:30)	ja	4	1:07	4,5	178	1,6	7	2:56	37	119	2,8	1	3:50	110	12	2:35	137
I-4	Heptan	109	nahe	(∞)	ja	4	1:02	5,5	184	1,7	5	2:18	25	130	2,3	(1)	3:25	112	10	1:56	148
I-5	Heptan	162	nahe	(0:40)	ja	4	1:13	4	171	1,3	4	2:24	7	127	1,9	0	./.	./.	9	2:22	142
I-6	Heptan	118	nahe	(1:30)	ja	4	1:06	5,6	182	1,8	4	2:20	15	120	1,8	0	./.	./.	8	1:43	151
I-7	Heptan	153	nahe		ja	4	1:11	3,7	172	0,7	6	2:40	22	119	2,9	(2)	3:24	109	10	2:05	140
I-8	Heptan	109	nahe	9:26	ja	4	1:06	7,9	166	2,4	7	4:35	27	110	1,9	(3)	5:31	106	11	3:19	130
I-9	Heptan	158	fern	∞	ja	4	1:14	7,9	172	2,5	8	2:57	20	110	2,2	(0)	./.	./.	14	3:14	125
I-10	Heptan	162	fern	(0:40)	ja	4	1:18	7,3	171	2	8	3:27	33	111	2,7	0	./.	./.	13	3:03	128
I-11	Heptan	1.174	fern	4:48	ja	./.	./.	./.	219	1,8	./.	./.	./.	181	1,2	./.	./.	./.	./.	./.	190
I-12	Heptan	149	unter	(∞)	ja	4	1:11	5,2	170	1,4	8	2:21	17	124	1	./.	./.	13	2:23	136	
I-13	Heptan	170	unter	1:04	ja	4	1:27	15,6	144	4,5	1	2:50	./.	110	./.	./.	./.	5	1:43	137	
I-14	Heptan	191	unter	(0:40)	ja	4	1:56	31,3	138	3,6	3	6:04	32	99	2,3	./.	./.	7	3:42	121	
I-15	Heptan	139	unter	(1:30)	ja	4	1:06	4,4	179	1	1	2:06	./.	119	./.	./.	./.	5	1:18	167	
I-16	Heptan	167	unter	1:46	ja	3	2:00	9,8	131	2,7	0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	3	2:00	131	
I-17	Heptan	92	nahe	∞	nein,R	4	1:03	14,9	154	2,2	0	./.	./.	./.	./.	(0)	./.	4	1:03	154	
I-18	Heptan	95	nahe	∞	nein,R	4	1:03	12,1	144	2,7	0	./.	./.	./.	./.	(0)	./.	4	1:03	144	
I-19	Heptan	88	unter	10:00	nein	4	1:03	18,3	154	4,2	5	7:45	19	85	2,3	./.	./.	10	5:16	113	
I-20	Heptan	82	unter	1:20	nein	4	1:48	48,9	136	6,4	0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	4	1:48	136	
I-21	Heptan	102	nahe	7:00	nein,R	4	1:03	10	163	3,4	6	3:34	13	105	1,8	(2)	4:04	110	10	2:33	128
I-22	Heptan	111	fern	∞	nein	4	1:02	5,3	152	1,5	2	4:11	4	93	0,3	(0)	./.	./.	6	2:05	133
II-1	Heptan	221	fern	∞	ja	2	1:14	2,7	170	0,2	10	1:47	12	159	3,1	(0)	./.	./.	27	2:53	143
II-2	Heptan	163	fern	(0:00)	ja	2	1:06	1,5	167	0,2	10	1:38	13	157	2,6	0	./.	./.	28	2:48	143
II-3	Heptan	186	unter	1:15	ja	2	1:17	11	178	2,1	7	2:02	26	136	3,4	./.	./.	12	2:21	137	
II-4	Heptan	141	nahe	1:48	ja	2	1:04	2,4	186	1,7	5	1:34	8	151	2,3	5	3:19	122	16	2:25	142
II-5	Heptan	203	fern	∞	ja	2	1:12	2,1	183	1,8	10	1:42	12	157	3	(0)	./.	./.	28	2:49	144
II-6	Heptan	203	fern	(0:00)	ja	2	1:10	0	181	1,5	10	1:42	12	154	2,5	0	./.	./.	27	2:36	144
II-7	Heptan	195	unter	(∞)	ja	2	1:14	6,8	175	0,9	7	1:34	9,3	164	2,2	./.	./.	18	2:15	147	
II-8	Heptan	203	nahe	1:12	ja	2	1:15	6,7	182	1,2	4	1:32	8	162	2,7	4	3:00	129	13	2:09	149
II-9	Heptan	178	nahe	∞	ja	4	1:15	7,6	187	3	8	1:45	4,6	150	3,1	(2)	2:31	131	23	2:10	144
II-10	Heptan	240	nahe	3:20	ja	4	1:18	4	181	1,9	8	1:45	7,9	159	5	(1)	2:12	149	19	1:57	154
II-11	Heptan	141	nahe	∞	ja	2	1:04	3,1	147	0,4	10	1:30	11	156	2,5	(3)	2:27	146	23	2:03	146
II-12	Heptan	116	nahe	(0:00)	ja	2	0:58	0	148	1,2	10	1:30	14	149	2,2	3	2:45	141	23	2:09	140
III-1	Lager	260	fern	∞	nein	2	1:45	28	107	2,5	10	9:00	31	98	2	(0)	./.	./.	20	9:57	99
III-2	Lager	593	unter	∞	nein	2	1:44	3,8	129	1,2	10	2:41	16	116	3	./.	./.	23	3:36	111	
III-3	Lager	178	nahe	4:11	ja	2	1:10	3,6	151	1,3	9	4:35	45	111	5,6	2	7:23	98	19	6:51	111
III-4	Lager	477	fern	∞	ja	2	1:34	0,5	159	1,2	3	3:00	16	105	1,1	(0)	./.	./.	5	2:25	127
III-5	Lager	240	fern	(1:14)	ja	2	1:15	0,7	159	2	4	2:57	17	107	1,7	0	./.	./.	7	2:46	119

Tabelle 2: Die Versuche der Tabelle 1, geordnet nach RWA-Öffnungszeitpunkt und -Anordnung und nach Wärmefreisetzung

Versuch Nr.	Brandlast		RWA-Öffnungszeitpunkt (von Hand)		Rauchschürzen ja/nein	aktivierte Sprinkler						insgesamt									
	Art	freigesetzte Wärme [MJ] bis $t_{A,1.Spr.}$	Position zu RWA	Anz.		1. Ring			2. Ring			jenseits RWA		Anz.	t_{AG} [min:sec]	θ_{AG} [°C]					
						$t_{A,RWA} \leq t_{A,1.Spr.}$	$t_{A,RWA} > t_{A,1.Spr.}$	$t_{A,2.Spr.} < t_{A,RWA}$ oder geschl.	Anz.	t_{AG} [min:sec]	Abw. [%]	θ_{AG} [°C]	Abw. [%]				t_{AG} [min:sec]	θ_{AG} [°C]			
I-19	Heptan	88	unter			nein	4	1:03	18,3	154	4,2	5	7:45	19	85	2,3	./.	10	5:16	113	
I-17	Heptan	92	nahe			nein,R	4	1:03	14,9	154	2,2	0	./.	./.	./.	./.	(0)	./.	4	1:03	154
I-18	Heptan	95	nahe			nein,R	4	1:03	12,1	144	2,7	0	./.	./.	./.	./.	(0)	./.	4	1:03	144
I-21	Heptan	102	nahe			nein,R	4	1:03	10	163	3,4	6	3:34	13	105	1,8	(2)	4:04	10	2:33	128
I-22	Heptan	111	fern			nein	4	1:02	5,3	152	1,5	2	4:11	4	93	0,5	(0)	./.	6	2:05	133
III-1	Lager	260	fern			nein	2	1:45	28	107	2,5	10	9:00	31	98	2	(0)	./.	20	9:57	99
III-2	Lager	593	unter			nein	2	1:44	3,8	129	1,2	10	2:41	16	116	3	./.	23	3:36	111	
I-4	Heptan	109	nahe			ja	4	1:02	5,5	184	1,7	5	2:18	25	130	2,3	(1)	3:25	10	1:56	148
I-8	Heptan	109	nahe			ja	4	1:06	7,9	166	2,4	7	4:35	27	110	1,9	(3)	5:31	11	3:19	130
I-1	Heptan	127	nahe			ja	4	1:07	3,9	173	1	7	2:16	23	121	2	(2)	2:18	11	1:51	140
II-4	Heptan	141	nahe			ja	2	1:04	2,4	186	1,7	5	1:34	8	151	2,3	5	3:19	16	2:25	142
II-11	Heptan	141	nahe			ja	2	1:04	3,1	147	0,4	10	1:30	11	156	2,5	(3)	2:27	23	2:03	146
I-12	Heptan	149	unter			ja	4	1:11	5,2	170	1,4	8	2:21	17	124	1	./.	13	2:23	136	
I-7	Heptan	153	nahe			ja	4	1:11	3,7	172	0,7	6	2:40	22	119	2,9	(2)	3:24	10	2:05	140
I-9	Heptan	158	fern			ja	4	1:14	7,9	172	2,5	8	2:57	20	110	2,2	(0)	./.	14	3:14	125
II-9	Heptan	178	nahe			ja	4	1:15	7,6	187	3	8	1:45	4,6	150	3,1	(2)	2:31	23	2:10	144
II-7	Heptan	195	unter			ja	2	1:14	6,8	175	0,9	7	1:34	9,3	164	2,2	./.	./.	18	2:15	147
II-5	Heptan	203	fern			ja	2	1:12	2,1	183	1,8	10	1:42	12	157	3	(0)	./.	28	2:49	144
II-1	Heptan	221	fern			ja	2	1:14	2,7	170	0,2	10	1:47	12	159	3,1	(0)	./.	27	2:53	143
II-10	Heptan	240	nahe			ja	4	1:18	4	181	1,9	8	1:45	7,9	159	5	(1)	2:12	19	1:57	154
III-4	Lager	477	fern			ja	2	1:34	0,5	159	1,2	3	3:00	16	105	1,1	(0)	./.	5	2:25	127
I-11	Heptan	1.174	fern			ja	./.	./.	./.	219	1,8	./.	./.	./.	181	1,2	./.	./.	./.	./.	190
I-20	Heptan	82	unter		1:20	nein	4	1:48	48,9	136	6,4	0	./.	./.	./.	./.	./.	4	1:48	136	
I-6	Heptan	118	nahe		(1:30)	ja	4	1:06	5,6	182	1,8	4	2:20	15	120	1,8	0	./.	8	1:43	151
I-3	Heptan	127	nahe		(1:30)	ja	4	1:07	4,5	178	1,6	7	2:56	37	119	2,8	1	3:50	12	2:35	137
III-3	Lager	178	nahe		4:11	ja	2	1:10	3,6	151	1,3	9	4:35	45	111	5,6	2	7:23	19	6:51	111
II-8	Heptan	203	nahe		1:12	ja	2	1:15	6,7	182	1,2	4	1:32	8	162	2,7	4	3:00	13	2:09	149
I-15	Heptan	139	unter		(1:30)	ja	4	1:06	4,4	179	1	1	2:06	./.	119	./.	./.	5	1:18	167	
I-16	$\Phi_{0,0-0,04}$	167	unter		1:46	ja	3	2:00	9,8	131	2,7	0	./.	./.	./.	./.	./.	3	2:00	131	
II-3	Heptan	186	unter		1:15	ja	2	1:17	11	178	2,1	7	2:02	26	136	3,4	./.	12	2:21	137	
I-10	Heptan	162	fern		(0:40)	ja	4	1:18	7,3	171	2	8	3:27	33	111	2,7	0	./.	13	3:03	128
II-2	Heptan	163	fern		(0:00)	ja	2	1:06	1,5	167	0,2	10	1:38	13	157	2,6	0	./.	28	2:48	143
II-6	Heptan	203	fern		(0:00)	ja	2	1:10	0	181	1,5	10	1:42	12	154	2,5	0	./.	27	2:36	144
III-5	Lager	240	fern		(1:14)	ja	2	1:15	0,7	159	2	4	2:57	17	107	1,7	0	./.	7	2:46	119
II-12	Heptan	116	nahe		(0:00)	ja	2	0:58	0	148	1,2	10	1:30	14	149	2,2	3	2:45	23	2:09	140
I-2	Heptan	131	nahe		(0:40)	ja	4	1:09	5,3	182	0,5	7	2:41	26	119	2,9	2	3:29	12	2:18	138
I-5	Heptan	162	nahe		(0:40)	ja	4	1:13	4	171	1,3	4	2:24	7	127	1,9	0	./.	9	2:22	142
I-13	Heptan	170	unter		1:04	ja	4	1:27	15,6	144	4,5	1	2:50	./.	110	./.	./.	5	1:43	137	
I-14	Heptan	191	unter		(0:40)	ja	4	1:56	31,3	138	3,6	3	6:04	32	99	2,3	./.	7	3:42	121	

Tabelle 3: Die Versuche der Tabelle 1, geordnet nach Versuchsaufbau und RWA-Öffnungszeitpunkt

Versuch Nr.	Brandlast		RWA-Öffnungszeitpunkt (von Hand)		Rauchschürzen	aktivierter Sprinkler														
	Art	freigesetzte Wärme [MJ] bis t _{A,1.Spr.}	t _{A,RWA} ≤ t _{A,1.Spr.}	t _{A,RWA} > t _{A,1.Spr.} oder t _{A,RWA} < t _{A,2.Spr.} geschl.		1. Ring				2. Ring				jenseits RWA				insgesamt		
						Anz.	t _{AG} [min:sec]	Abw. [%]	ΔT _{AG} [°C]	Abw. [%]	t _{AG} [min:sec]	Abw. [%]	ΔT _{AG} [°C]	Anz.	t _{AG} [min:sec]	Abw. [%]	ΔT _{AG} [°C]	Anz.	t _{AG} [min:sec]	ΔT _{AG} [°C]
I-9	Heptan	158	fern		∞	ja	4	1:14	7,9	172	2,5	8	2:57	20	110	2,2	(0)	14	3:14	125
I-22	Heptan	111	fern		∞	nein	4	1:02	5,3	152	1,5	2	4:11	4	93	0,3	(0)	6	2:05	133
I-11	Heptan	1.174	fern		4:48	ja	1	1:07	3,9	173	1	7	2:16	23	121	2	(2)	11	1:51	140
I-10	Heptan	162	fern	(0:40)		ja	4	1:02	5,5	184	1,7	5	2:18	25	130	2,3	(1)	10	1:56	148
I-1	Heptan	127	nahe		∞	ja	4	1:11	3,7	172	0,7	6	2:40	22	119	2,9	(2)	10	2:05	140
I-4	Heptan	109	nahe		∞	ja	4	1:06	5,6	182	1,8	4	2:20	15	120	1,8	0	8	1:43	151
I-7	Heptan	153	nahe		∞	ja	4	1:09	5,3	182	0,5	7	2:41	26	119	2,9	2	12	2:18	138
I-17	Heptan	92	nahe		∞	nein,R	4	1:03	14,9	154	2,2	0	1:03	14,9	154	2,2	0	4	1:03	154
I-18	Heptan	95	nahe		∞	nein,R	4	1:03	12,1	144	2,7	0	1:03	12,1	144	2,7	0	4	1:03	144
I-8	Heptan	109	nahe		9:26	ja	4	1:06	7,9	166	2,4	7	4:35	27	110	1,9	(3)	11	3:19	130
I-21	Heptan	102	nahe		7:00	nein,R	4	1:03	10	163	3,4	6	3:34	13	105	1,8	(2)	10	2:33	128
I-3	Heptan	127	nahe	(1:30)		ja	4	1:07	4,5	178	1,6	7	2:56	37	119	2,8	1	12	2:35	137
I-6	Heptan	118	nahe	(1:30)		ja	4	1:06	5,6	182	1,8	4	2:20	15	120	1,8	0	8	1:43	151
I-2	Heptan	131	nahe	(0:40)		ja	4	1:09	5,3	182	0,5	7	2:41	26	119	2,9	2	12	2:18	138
I-5	Heptan	162	nahe	(0:40)		ja	4	1:13	4	171	1,3	4	2:24	7	127	1,9	0	9	2:22	142
I-12	Heptan	149	unter		(∞)	ja	4	1:11	5,2	170	1,4	8	2:21	17	124	1	1	13	2:23	136
I-19	Heptan	88	unter		10:00	nein	4	1:03	18,3	154	4,2	5	7:45	19	85	2,3	1	10	5:16	113
I-16	Heptan	167	unter	1:46		ja	3	2:00	9,8	131	2,7	0	1:03	18,3	154	4,2	5	10	5:16	113
I-15	Heptan	139	unter	(1:30)		ja	4	1:06	4,4	179	1	1	2:06	1	119	1	1	5	1:18	167
I-20	Heptan	82	unter	1:20		nein	4	1:48	48,9	136	6,4	0	1:48	48,9	136	6,4	0	4	1:48	136
I-13	Heptan	170	unter	1:04		ja	4	1:27	15,6	144	4,5	1	2:50	1	110	1	1	5	1:43	137
I-14	Heptan	191	unter	(0:40)		ja	4	1:56	31,3	138	3,6	3	6:04	32	99	2,3	1	7	3:42	121
II-1	Heptan	221	fern		∞	ja	2	1:14	2,7	170	0,2	10	1:47	12	159	3,1	(0)	27	2:53	143
II-5	Heptan	203	fern		∞	ja	2	1:12	2,1	183	1,8	10	1:42	12	157	3	(0)	28	2:49	144
II-2	Heptan	163	fern	(0:00)		ja	2	1:06	1,5	167	0,2	10	1:38	13	157	2,6	0	28	2:48	143
II-6	Heptan	203	fern	(0:00)		ja	2	1:10	0	181	1,5	10	1:42	12	154	2,5	0	27	2:36	144
II-9	Heptan	178	nahe		∞	ja	4	1:15	7,6	187	3	8	1:45	4,6	150	3,1	(2)	23	2:10	144
II-11	Heptan	141	nahe		∞	ja	2	1:04	3,1	147	0,4	10	1:30	11	156	2,5	(3)	23	2:03	146
II-10	Heptan	240	nahe		3:20	ja	4	1:18	4	181	1,9	8	1:45	7,9	159	5	(1)	19	1:57	154
II-4	Heptan	141	nahe		1:48	ja	2	1:04	2,4	186	1,7	5	1:34	8	151	2,3	5	16	2:25	142
II-8	Heptan	203	nahe	1:12		ja	2	1:15	6,7	182	1,2	4	1:32	8	162	2,7	4	13	2:09	149
II-12	Heptan	116	nahe	(0:00)		ja	2	0:58	0	148	1,2	10	1:30	14	149	2,2	3	23	2:09	140
II-7	Heptan	195	unter		(∞)	ja	2	1:14	6,8	175	0,9	7	1:34	9,3	164	2,2	1	18	2:15	147
II-3	Heptan	186	unter	1:15		ja	2	1:17	11	178	2,1	7	2:02	26	136	3,4	1	12	2:21	137
III-1	Lager	260	fern		∞	nein	2	1:45	28	107	2,5	10	9:00	31	98	2	(0)	20	9:57	99
III-4	Lager	477	fern		∞	ja	2	1:34	0,5	159	1,2	3	3:00	16	105	1,1	(0)	5	2:25	127
III-5	Lager	240	fern	(1:14)		ja	2	1:15	0,7	159	2	4	2:57	17	107	1,7	0	7	2:46	119
III-3	Lager	178	nahe	4:11		ja	2	1:10	3,6	151	1,3	9	4:35	45	111	5,6	2	19	6:51	111
III-2	Lager	593	unter		∞	nein	2	1:44	3,8	129	1,2	10	2:41	16	116	3	1	23	3:36	111

Tabelle 4: Die mit 4 verschiedenen Thermoelementen aufgenommenen Temperaturen beim RWA-Auslöseelement

Versuchs- Nummer	Position zu RWA	Temperaturverlauf				Öffnungs- zeitpunkt der RWA (von Hand) [min:sec]	Aktivierungs- zeitpunkt der benachbarten Sprinkler [min:sec]	Bemerkung
		Thermoelement t [min:sec] ϑ_0 [°C]	Buchse 1 t [min:sec] ϑ_1 [°C]	Buchse 2 t [min:sec] ϑ_2 [°C]	Buchse 3 t [min:sec] ϑ_3 [°C]			
II-3	unter	t = 0:45 ...2:00 t = 1:30 $\vartheta_{0,max} = 330$	t = 0:50 ...1:25 t = 1:15 $\vartheta_{1,max} = 185$	t = 1:10 ...1:30 $\vartheta_2 > \vartheta_{A,n}$	t = 1:30 ...6:00 $\vartheta_3 \approx \vartheta_{A,n}$	1:15	1:08 1:25	$\vartheta_{1,2,3}(t)$ folgen $\vartheta_0(t)$ gedämpft, $\vartheta_{1,max}$ etwa bei $t = t_{A,RWA}$, $\vartheta_{0,max}$ kurz danach, RWA öffnet mit benachbar- ten Sprinklern, nach $\vartheta_{0,max}$, $\vartheta_{1,max}$ und $\vartheta_{2,max}$ bleiben alle 4 $\vartheta(t)$ -Kurven \approx const. $\approx \vartheta_{A,n}$
II-7	unter	t = 0:45 ...2:25 t = 2:10 $\vartheta_{0,max} = 330$	t = 0:50 ...4:42 t = 3:48 $\vartheta_{1,max} = 290$	t = 1:12 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_2 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} = 280$	t = 1:25 ...7:00 $\vartheta_3 \approx \vartheta_{A,n}$	(∞)	1:09 1:19	$\vartheta_{1,2,3}(t)$ folgen $\vartheta_0(t)$ nicht, obwohl RWA geschlossen gehalten, ähnliches $\vartheta_0(t)$ wie im Versuch II-3, Schwankungen von $\vartheta(t)$ stärker als die von $\vartheta_0(t)$, für $t \geq 4$ min steigt $\vartheta_2(t)$ wei- ter, obwohl $\vartheta_{0,1,2}(t) \approx$ const. $\approx \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{0,max}$ und $\vartheta_{1,max}$ so hoch wie im Ver- such II-3, so daß Auslöseelement funktionieren könnte
III-2	unter	t = 1:20 ...18:00 t = 1:48 $\vartheta_{0,max} = 350$	t = 1:20 ...18:00 t = 2:00 $\vartheta_{1,max} = 310$	t = 1:20 ...19:30 t = 7:00 $\vartheta_2 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} = 220$	t = 1:20 ...20:30 t = 11:30 $\vartheta_3 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{3,max} = 150$	∞ [6:04]	1:40 1:48 [3:13]	$\vartheta_{1,2,3}(t)$ folgen $\vartheta_0(t)$ nur teilweise, wie bei Versuch II-7: Schwankungen von $\vartheta(t)$ deutlich stärker als die von $\vartheta_0(t)$, höchster Wert für $\vartheta_{0,max}$, etwa bei $t =$ $t_{A,Spr}$, dennoch öffnet RWA nicht (aber Nachbar-RWA), allmählicher Abfall aller 4 $\vartheta(t)$ -Kurven auf Raum- temperatur
II-8	nahe, Pos. B	t = 1:00 ...6:00 t = 1:25 $\vartheta_{0,max} = 195$	t = 1:00 ...2:00 t = 2:00 ...3:40 t = 1:25 $\vartheta_{1,max} = 170$	t = 1:23 ...6:00 t = 6:00 $\vartheta_2 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} = 125$	t = 2:00 ...6:00 t = 6:00 $\vartheta_3 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{3,max} = 140$	1:12	1:24 1:27	$\vartheta_{1,2,3}(t)$ folgen $\vartheta_0(t)$ gedämpft, bei Versuch II-4 liegt $\vartheta_2(t)$ unter $\vartheta_3(t)$, $\vartheta_{0,max}$ und $\vartheta_{1,max}$ etwa bei $t = t_{A,RWA}$, mal danach, mal davor, RWA öffnen etwa mit benachbarten Sprinklern, mal 16% früher, mal 25% später, nach $\vartheta_{0,max}$ und $\vartheta_{1,max}$ kontinuierlicher Anstieg aller 4 $\vartheta(t)$ -Kurven, $\vartheta_{2,3}(t) > \vartheta_{A,n}$ erst wenn $t > t_{A,RWA}$
II-4	nahe, Pos. B	t = 1:13 ...7:00 t = 1:40 $\vartheta_{0,max} = 190$	t = 1:12 ...7:00 t = 1:36 $\vartheta_{1,max} = 170$	t = 1:48 ...2:00 t = 7:00 $\vartheta_2 \approx \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} = 120$	t = 1:40 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_3 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{3,max} = 155$	1:48	1:23 1:30	./.
III-3	nahe, Pos. B	keine Angaben im NIST-Bericht				4:11	2:03 2:11	./.
II-12	nahe, Pos. C	t = 0:45 ...7:00 t = 2:54 $\vartheta_{0,max} = 215$	t = 1:05 ...7:00 t = 6:30 $\vartheta_{1,max} = 180$	t = 1:38 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_2 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} = 180$	t = 1:38 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_3 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{3,max} = 165$	(0:00)	1:09 3:00	$\vartheta_{1,2,3}(t)$ folgen $\vartheta_0(t)$ gedämpft, kontinuierlicher Anstieg aller 4 $\vartheta(t)$ - Kurven mit starken Schwankungen von ϑ_0 und ϑ_1 , alle ϑ_{max} -Werte deutlich höher als bei Versuchen II-8 und II-4 — auch bei von Beginn an offener RWA(II-12), deren Auslöseelement also funktionieren könnte — oder nicht wie bei RWA(II-11), obwohl dort ab $t = 1:45$ min alle 4 $\vartheta(t)$ -Kurven höher als in Versuchen II-8 und II-4
II-11	nahe, Pos. C	t = 1:00 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_{0,max} = 230$	t = 1:00 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_{1,max} = 220$	t = 1:30 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_2 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} = 190$	t = 1:45 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_3 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{3,max} = 190$	∞	1:17 1:50	etwas niedrigere aber sehr ähnliche $\vartheta(t)$ -Kurven wie in Versuch II-11, RWA öffnet nicht, obwohl die $\vartheta(t)$ - Kurven teilweise höher liegen als in Versuch II-8
II-9	nahe, Pos. E	t = 1:00 ...7:00 t = 4:00 $\vartheta_{0,max} = 150$	t = 1:05 ...7:00 t = 5:30 $\vartheta_{1,max} = 140$	t = 2:00 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_2 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} = 120$	t = 2:50 ...7:00 t = 7:00 $\vartheta_3 > \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{3,max} = 120$	∞	1:46 2:25	$\vartheta_{1,2,3}(t)$ folgen $\vartheta_0(t)$ gedämpft, ϑ_{max} -Werte ähnlich niedrig wie wenn Bremsposition fern von RWA, $\vartheta_{0,1,max}$ etwa bei $t = t_{A,Spr}$, öffnet nicht (aber Nachbar-RWA), allmählicher Abfall aller 4 $\vartheta(t)$ -Kurven auf Raumtemperatur
II-10	nahe, Pos. F	t = 1:10 ...3:15 t = 1:32 $\vartheta_{0,max} = 110$	t = 1:10 ...3:20 t = 1:35 $\vartheta_{1,max} = 100$	t = 3:00 ...7:30 t = 3:00 $\vartheta_2 \approx \vartheta_{A,n}$ $\vartheta_{2,max} \approx 74$	t = 0:00 ...6:00 $\vartheta_3 < \vartheta_{A,n}$	∞ [3:20]	1:33 2:32	obwohl $\vartheta_{0,1,2}(t) \geq \vartheta_{A,n}$ und Nachbar- sprinkler aktiv, öffnen RWA nicht, nach $\vartheta_{0,max}$ und $\vartheta_{1,max}$ streben alle 4 $\vartheta(t)$ -Kurven gegen $\approx \vartheta_{A,n}$
II-5	fern	t = 1:25 ...7:30 t = 2:00 $\vartheta_{0,max} = 110$	t = 1:30 ...7:30 t = 2:10 $\vartheta_{1,max} = 100$	t = 4:10 ...7:30 $\vartheta_2 \approx \vartheta_{A,n}$	t = 0:00 ...7:00 $\vartheta_3 < \vartheta_{A,n}$	∞	3:18	$\vartheta_{1,2,3}(t)$ folgen $\vartheta_0(t)$ gedämpft, obwohl $\vartheta_{0,1,2}(t) \geq \vartheta_{A,n}$ und Nachbar- sprinkler aktiv, öffnen RWA nicht, nach $\vartheta_{0,max}$ und $\vartheta_{1,max}$ streben alle 4 $\vartheta(t)$ -Kurven gegen $\approx \vartheta_{A,n}$
II-1	fern	t = 1:25 ...7:00 t = 2:00 $\vartheta_{0,max} = 110$	t = 1:32 ...7:00 t = 2:00 $\vartheta_{1,max} = 95$	t = 4:40 ...7:00 $\vartheta_2 \approx \vartheta_{A,n}$	t = 0:00 ...7:00 $\vartheta_3 < \vartheta_{A,n}$	∞	5:15	etwas höhere Werte für $\vartheta_{0,max}$, sonst ähnliche $\vartheta(t)$ -Kurven wie in Versuchen II-5 und II-1,
II-6	fern	t = 1:17 ...3:35 t = 1:45 $\vartheta_{0,max} = 118$	t = 1:35 ...2:15 t = 1:50 $\vartheta_{1,max} = 95$	t = 0:00 ...7:00 $\vartheta_2 < \vartheta_{A,n}$	t = 0:00 ...7:00 $\vartheta_3 < \vartheta_{A,n}$	(0:00)	3:21	d.h.: automatisch würden auch diese RWA nicht öffnen
II-2	fern	t = 1:15 ...3:22 t = 1:37 $\vartheta_{0,max} = 115$	t = 1:30 ...2:25 t = 1:55 $\vartheta_{1,max} = 98$	t = 0:00 ...7:00 $\vartheta_2 < \vartheta_{A,n}$	t = 0:00 ...7:00 $\vartheta_3 < \vartheta_{A,n}$	(0:00)	3:13	./.
III-1	fern	keine Angaben im NIST-Bericht				∞	13:30	./.
III-4	fern	keine Angaben im NIST-Bericht				∞	∞	./.
III-5	fern	keine Angaben im NIST-Bericht				(1:14)	∞	./.