

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Feinverteiltes Wasser
als Volumen- und Oberflächenlöschmittel
Teil 2

113

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Feinverteiltes Wasser
als Volumen- und Oberflächenlöschmittel
Teil 2**

Forschungsbericht Nr. 113

Im Auftrag
der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Ausschuß „Feuerwehrangelegenheiten“

Bearbeiter: Dr. rer. nat. Horst Starke (Projektleiter)
Dipl.-Phys. Friedrich-Wilhelm Wienecke
Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski
Dipl.-Math. Regina Schmeißer

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Heyrothsberge
August 1998

ISSN 0179-0060

FA: Nr. 21 (1/97) H

BERICHTS-KENNBLATT

Inhalt

	Verzeichnis der Bilder	ii
	Verzeichnis der Tabellen	vi
	Symbolik	vii
1	Einführung	1
2	Zielstellung und Arbeitsinhalte	3
2.1	Zielstellung	3
2.2	Begriffsbildung	4
2.3	Das Versuchsprogramm	5
3	Grundlagen und Übersicht zur Versuchsauswertung	9
3.1	Versuchsstände	9
3.1.1	Versuchsstand: automatic fire fighter - AFF	9
3.1.2	Versuchsstand zur Sprühstrahlvermessung am IdF LSA	15
3.2	Sprühstrahlen und deren Charakterisierung	18
3.3	Bei der Versuchsauswertung verwendete Datenstruktur	21
4	Auswertungen zu den Versuchsständen	26
4.1	Vorbemerkungen	26
4.2	AFF-Brandversuche	27
4.2.1	Temperaturverläufe beim Holzkrippenbrand	27
4.2.2	Visuelle Bewertung der Löschversuche bei Holzkrippenbränden	35
4.2.3	Visuelle Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden	43
4.3	Sprühversuche auf dem AFF-Versuchsstand	47
4.4	PDA-Messungen im Naßlabor	50
4.5	Massenstromdichtemessungen im Naßlabor	63
5	Komplexe Auswertungen	68
5.1	Vorbemerkungen	68
5.2	Löschergebnisse in Abhängigkeit von der auftreffenden Wassermenge	68
5.3	Löschzeiten in Abhängigkeit von den Sprühstrahlgeschwindigkeiten	77
5.4	Vergleich der Messungen der Sprühversuche und den Messungen der Massenstromdichten	86
6	Zusammenfassung	90
	Literaturverzeichnis	92

Verzeichnis der Bilder

2.1	Bezeichnung des Sprühstrahls in Abhängigkeit vom Durchmesser	4
2.2	Holzkruppe, Brandobjekt 8A nach [DIN EN 3 Teil 1]	8
3.1	Der Versuchsstand AFF	10
3.2	Der Bock mit eingespanntem Strahlrohr und Steuereinheit	10
3.3	Die Vorderansicht des Brandkanals bei geöffnetem Tor	11
3.4	Die Drauf- und Seitenansicht des Brandkanals des IdF LSA	12
3.5	Die Lage des AFF im Brandkanal des IdF LSA in der Drauf-, Seiten- und Vorderansicht	13
3.6	Skizze des AFF in der Drauf- und Seitenansicht mit einem Holzkruppenbrandobjekt	14
3.7	Der Bedienstand des PDA in der Übersicht	15
3.8	Sprühstrahlvermessung im Naßlabor	15
3.9	Aufbau eines Phasen-Doppler-Anemometers	15
3.10	Positioniersystem für das PDA	17
3.11	Seitenansicht der Verfahreinrichtung	17
3.12	Verbindungen zwischen den Datenbankdateien	25
4.1	Eine brennende Holzkruppe auf dem Drehteller	26
4.2	Löschversuch mit einem feinen Sprühstrahl	27
4.3	Die Anordnung der Thermoelemente beim Brandobjekt 8A in der Drauf- und Seitenansicht sowie die Richtung des Sprühstrahls zum Brandobjekt	28
4.4	Temperaturverläufe beim Versuch BV59	30
4.5	Die Holzkruppe nach dem Brandversuch BV59	31
4.6	Temperaturverläufe beim Versuch BV60	32
4.7	Temperaturverläufe beim Versuch BV63	34
4.8	Bewertung des Löschergebnisses mit „1“	36
4.9	Bewertung des Löschergebnisses mit „2“	36
4.10	Bewertung des Löschergebnisses mit „3“	37
4.11	Bewertung des Löschergebnisses mit „4“	37
4.12	Bewertung des Löschergebnisses mit „5“	37
4.13	Bewertung des Löschergebnisses mit „6“	38
4.14	Bewertung der Löschergebnisse bei Holzkruppenbränden beim Sprühstrahl ppan06	39
4.15	Bewertung der Löschergebnisse bei Holzkruppenbränden beim Sprühstrahl ppmh39	40

4.16	Bewertung der Löschversuche bei Holzkrippenbränden beim Sprühstrahl ppnh20	41
4.17	Bewertung der Löschversuche bei Holzkrippenbränden beim Sprühstrahl ppnh35	42
4.18	Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl ppan06	44
4.19	Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl ppmh39	45
4.20	Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl ppnh20	45
4.21	Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl ppnh35	46
4.22	Sprühversuch bei einer Holzkrippe	47
4.23	Ergebnisse der Sprühversuche für die Holzkrippe 8A	48
4.24	Ergebnisse der Sprühversuche für die Polypropylenbrandwanne	49
4.25	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppan06	50
4.26	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppan06	51
4.27	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppan06 für verschiedene Entfernungen	52
4.28	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppan06 für verschiedene Entfernungen	52
4.29	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39	53
4.30	Geschwindigkeitskomponenten im Sprühstrahl	54
4.31	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39	54
4.32	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39 für verschiedene Entfernungen	55
4.33	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39 für verschiedene Entfernungen	55
4.34	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh20	56
4.35	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh20	57

4.36	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh20 für verschiedene Entfernungen	58
4.37	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh20 für verschiedene Entfernungen	58
4.38	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh35	59
4.39	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh35	60
4.40	Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh35 für verschiedene Entfernungen	61
4.41	Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh35 für verschiedene Entfernungen	61
4.42	Massenstromdichte im Sprühstrahl ppmh39	63
4.43	Massenstromdichte im Sprühstrahl ppnh20	64
4.44	Vergleich des gesamten Löschwasserdurchflusses mit den aus den Messungen der Massenstromdichte berechneten Werten für den Sprühstrahl ppmh39	66
4.45	Vergleich des gesamten Löschwasserdurchflusses mit den aus den Messungen der Massenstromdichte berechneten Werten für den Sprühstrahl ppnh35	67
5.1	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppan06	69
5.2	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppmh39	70
5.3	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppnh20	70
5.4	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppnh35	71
5.5	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppan06	72
5.6	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppmh39	72
5.7	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppnh20	73
5.8	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppnh35	73
5.9	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für alle Versuche	74

5.10	Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für alle Versuche für die charakteristischen Löschzeiten „2“ und „3“	75
5.11	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppan06	78
5.12	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppmh39	79
5.13	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppnh20	79
5.14	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppnh35	80
5.15	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppan06	80
5.16	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppmh39	81
5.17	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppnh20	81
5.18	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppnh20	82
5.19	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für alle Versuche (oben) und außer ppmh39 (unten)	83
5.20	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für alle Versuche für die charakteristischen Löschzeiten „2“ und „3“	84
5.21	Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für alle Versuche außer ppmh39 für die charakteristischen Löschzeiten „2“ und „3“	85
5.22	Realer und berechneter Volumenstrom bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppmh39	87
5.23	Realer und berechneter Volumenstrom bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppmh39	
5.24	Realer und berechneter Volumenstrom bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppnh35	87
5.25	Realer und berechneter Volumenstrom bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppnh35	

Verzeichnis der Tabellen

2.1	Die im Versuchsprogramm verwendeten Sprühstrahlen und deren Parameter	5
2.2	Übersicht über die Zahl der durchgeführten Brandversuche	6
2.3	Übersicht über die Zahl der durchgeführten Sprühversuche	7
3.1	Schätzungen für den Tropfendurchmesser und Anwendungsgebiete	20
3.2	Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der Brandversuche	22
3.3	Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der Sprühversuche	23
3.4	Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der PDA-Messungen	24
3.5	Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der Massenstromdichte	24
3.6	Inhalte der Datenbankdatei mit den Ergebnissen der Messungen der Vielstellenmesstechnik	25
4.1	Beschreibung der fünf charakteristischen Löschzeiten bei Holzkrippenbränden	35
4.2	Beschreibung der drei charakteristischen Löschzeiten bei Polypropylenbränden	43

Symbolik

A	- Fläche bzw. Oberfläche
d	- Tropfendurchmesser in m
D_{ab}	- Punktschätzfunktion für den Tropfendurchmesser der Ordnung $a+b$
h	- Höhe in m
I	- Strom
I_m	- Massenstrom
I_V	- Volumenstrom
j_m	- Massenstromdichte
j_V	- Volumenstromdichte
m_k	- gewöhnliches Moment k-ter Ordnung
\hat{m}_k	- Schätzwert für das gewöhnliche Moment k-ter Ordnung
n	- ganzzahliger Index, Stichprobenumfang
s	- Punktschätzfunktion für die Standardabweichung
s^2	- Punktschätzfunktion für die Varianz
t	- Zeit in s
T	- Temperatur in K oder $^{\circ}C$
Tr	- Index für Tropfen
$v, v(t)$	- Geschwindigkeit in m/s
v_x, v_y, v_z	- Geschwindigkeitskomponenten, hier für die x, y, z -Richtung
$\vec{v}(t)$	- Geschwindigkeitsvektor
V	- Volumen in m^3
x	- reellwertiger Parameter
λ	- Wellenlänge in m
ν	- Frequenz in Hz
ρ	- Dichte in kg/m^3

Mathematische Operationen und Bezeichnungen

$\int_a^b \dots dx$	- bestimmtes Integral von a bis b über eine Funktion in Abhängigkeit von x
$\int_A \dots dA$	- Flächenintegral über die Fläche A

$$\iint_{(x,y) \in G} \dots dx dy$$

$$\sum_{i=1}^n x_i$$

$$(x_1, x_2)$$

$$(x, y)$$

$$(x, y, z)$$

$$\vec{x}$$

$$x_1, x_n, x_T, \dots$$

- Doppelintegral über das Gebiet G der (x,y) -Ebene
- Summe über die Werte x_i von $i=1$ bis n
- offenes Intervall von x_1 bis x_2 der Variablen x
- Koordinate eines Punktes in der (x,y) -Ebene
- Koordinate eines Punktes im Raum
- der Pfeil bezeichnet einen Vektor
- durch Indizes (Ziffern, kleine oder große Buchstaben) werden verschiedene Werte der Größe x unterschieden

1 Einführung

Das Interesse am Löschmittel Wasser ist nach wie vor ungebrochen. Häufig genannte Gründe hierfür sind:

- ◆ Wasser ist umweltverträglich,
- ◆ Wasser ist als Löschmittel nahezu universell einsetzbar,
- ◆ Wasser ist vergleichsweise kostengünstig,
- ◆ Wasser ist an vielen Orten verfügbar,
- ◆ Wasser ist nicht gesundheitsschädigend.

Die grundlegenden Verfahren zur Ausbringung des Löschmittels Wasser sind langjährig erprobt, haben sich bewährt (Pumpen, Düsen, Schläuche mit erforderlichen Armaturen usw.) und sind ständig weiterentwickelt worden. Zur effektiveren Anwendung des Löschmittels Wasser werden international an vielen Einrichtungen Forschungsarbeiten durchgeführt. [Mawhinney et al. 96] geben in ihrer Übersicht 48 Einrichtungen an, die damit im Zusammenhang stehende Fragestellungen bearbeiten.

Gründe für dieses Interesse am Löschmittel Wasser sind unter anderem [Grabski et al. 95]:

- ◆ Die Löschwasserschäden sind zu reduzieren, was mit geringeren Löschwassermengen erreichbar ist.
- ◆ Mit der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung von 1991 fällt ein in vielen Bereichen erfolgreiches Löschmittel für die Nutzung weg. Die entstandene Lücke ist umweltverträglich zu schließen. Naheliegender ist es, hierfür ersatzweise Wasser zu benutzen [Covelli 93, Halon 97].
- ◆ Eine ausreichende Löschmittelverfügbarkeit, auch für Wasser, ist in einer wachsenden Anzahl von Einsatzfällen nicht mehr gegeben. In diesem Zusammenhang sei an das klassische Problem der Waldbrände gedacht, aber auch neuartige, zu schützende technische Anlagen, wie Verkehrstunnel, Kabelkanäle und Hochregallager, stellen hier extreme Anforderungen.
- ◆ Die Entwicklung im Elektroniksektor macht eine sichere Brandfrüherkennung zunehmend preisgünstiger und somit auch realisierbar. Dies führt zu dem interessanten Konzept, den Brand bereits in der Entstehungsphase zu bekämpfen und sicher zu löschen. Dafür sind jedoch entsprechend angepasste Lösungsverfahren erforderlich, wofür insbesondere Wasserdampf eine Reihe von Vorteilen aufzuweisen scheinen.
- ◆ Nicht zuletzt bewirken die ökonomischen Zwänge vor allem im baulichen Brandschutz, die tatsächlich erforderliche Sicherheit mit möglichst wenig Kosten

zu realisieren. Dies führt dazu, dass auch die üblichen Löschverfahren mit Wasser (z.B. Sprinklerung) auf ihre Effizienz geprüft werden, um eventuelle Leistungsreserven zu erschließen.

Für viele der vorstehend genannten Probleme erscheint der Einsatz von feinverteiltem Wasser, insbesondere in Form von Nebeln, als vielversprechend. Auf mehreren internationalen Tagungen wurde wiederholt der Einsatz von Wassernebeln betrachtet [SP REPORT 1994:03, Halon 97].

Bei stationären Löschanlagen sind die Entwicklungen sehr vielfältig und umfassen Druckbereiche von wenigen *bar* bis zu mehreren hundert *bar* in den Anlagen [Großböhmig et al. 96, Järwinen 92, Minimax 95, Rimen 88, Schremmer 94, Strieder]. Auch im Bereich der mobilen Brandbekämpfung haben Wassernebel Bedeutung [Grimwood 92, Grimwood 93].

Die Verbesserung der Löschwirkung des Löschmittels Wasser erfordert es, seine physikalische Beschaffenheit dem Brandgeschehen anzupassen. Die ablaufenden Prozesse beim Brand und Löschvorgang werden durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. All diese Parameter gleichzeitig zu variieren und in einem komplexen Modell zu vereinen, hat kaum Aussicht auf Erfolg.

Aus diesem Grund wurde in einer vorhergehenden Forschungsaufgabe der Schwerpunkt auf die Charakterisierung von Sprühstrahlen/Wassernebel gelegt und ein Messplatz aufgebaut, der die lasergestützte Vermessung von Sprühstrahlen gestattet. An diese Vermessung schließt sich eine auf statistischen Modellen beruhende computergestützte Auswertung an [Starke et al. 96].

Schwerpunkt dieser Forschungsaufgabe war die Untersuchung der Löscheigenschaften von Sprühstrahlen, die im Bereich der mobilen Brandbekämpfung eingesetzt werden.

Im folgenden Kapitel werden einige allgemeine Bemerkungen zur Zielstellung der Untersuchungen gemacht. Es werden einige Begriffe zusammengestellt und das Versuchsprogramm in der Übersicht dargestellt. Das dritte Kapitel befasst sich mit der Beschreibung der Versuchsaufbauten, den statistischen Modellannahmen sowie der für die Auswertung zugrunde gelegten Datenstruktur. In den anschließenden Kapiteln werden Auswertungen vorgenommen und eine Zusammenfassung gegeben.

Die Inhalte der Abschnitte 2.2, 3.1.2 und 3.2 sind ausführlich im ersten Teil dieses Forschungsberichtes [Starke et al. 96] dargestellt. Um das eigenständige Lesen des vorliegenden Berichtes zu erleichtern, wurden diese Abschnitte stark gekürzt und in einigen Punkten aktualisiert auch in diesen Bericht aufgenommen.

Die Autoren möchten sich bei **Frau Sakowski** bedanken, die die Fotoaufnahmen und Videoaufzeichnungen ausführte, sowie bei den **Herren Hartmann und Kulawik**, die an der Versuchsvorbereitung und Durchführung aktiv beteiligt waren.

2 Zielstellung und Arbeitsinhalte

2.1 Zielstellung

Das Ziel jeder wissenschaftlichen Untersuchung besteht darin, exakt nachprüfbar Ergebnisse mit geeigneten Methoden zu gewinnen, die einen Erkenntnisfortschritt ermöglichen [Grabski 98]. Dieses grundsätzliche Vorgehen ist bei typischen Brand- und Löschversuchen im Rahmen der Forschung nur sehr schwer umzusetzen. Ein besonderes Problem stellt hierbei die Gewährleistung der genauen Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen dar. Häufig treten aber gerade durch nicht exakt einhaltbare Rand- und Anfangsbedingungen Schwankungen in den Ergebnissen auf, die in der Größenordnung der zu untersuchenden Effekte liegen. Eine wissenschaftlich vernünftige Aussage ist dann zumindest problematisch.

Genau diese Situation findet man bei der Untersuchung der Löschwirksamkeit von feinverteiltem Wasser im Vergleich zum herkömmlichen Wassereinsatz vor. Viele vorliegende Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass mit einfachen Mitteln keine sichere Beurteilung möglich ist. Einen Ausweg aus dieser Situation findet man nur, wenn das zu analysierende System bezüglich seiner Wirkelemente in Teilprozesse zerlegt wird, die getrennt reproduzierbar untersucht werden können. Dies entspricht dem in der Wissenschaft und Technik weit verbreiteten Modularitätsprinzip.

Für Löschsysteme mit Wassernebeln bedeutet dies, einzelne Seiten zu betrachten und die Ergebnisse komplex zu interpretieren. Dies betrifft folgende Schwerpunkte:

- ◆ Prozess der Ausbildung der Sprühstrahlen als Zweiphasensystem und seine statistische Charakterisierung (Tropfengröße, Geschwindigkeit, Verteilung),
- ◆ Löschwirkung im reproduzierbaren Brandversuch bei definierten Brandobjekten,
- ◆ modellmäßige Beschreibung der Löschwirkung auf der Grundlage der Brand- und Sprühstrahlparameter,
- ◆ Komplexanalyse.

Für den ersten Teil wird am IdF ein Nasslabor betrieben, dessen Kernstück ein **Phasen-Doppler-Anemometer (PDA)** darstellt. Hier erfolgen die Messungen, auf deren Basis die statistische Beschreibung der Sprühstrahlen erfolgt [Starke et al. 96].

Um Löschversuche reproduzierbar zu gestalten, wurde eine automatische Löschorrichtung aufgebaut, die wesentliche Handlungen eines Strahlrohrführers simuliert (**AFF-automatic fire fighter**).

Das Fernziel besteht darin, diese Ergebnisse in einem mathematisch-physikalischen Löschmodell zusammenzufassen, auf dessen Grundlage sich eine zu erwartende Wirkung vorausberechnen läßt.

2.2 Begriffsbildung

Eine ausführlichere Darstellung dieses Abschnittes ist im Bericht zum ersten Teil des Forschungsthemas enthalten [Starke et al. 96]. Aus diesem Grund werden die Begriffe nur kurz eingeführt.

Disperses System, Zweiphasenströmung

Ein aus zwei Bestandteilen bestehendes Stoffsystem wird als **disperses System** bezeichnet, wenn ein Bestandteil (Dispersum) in mindestens einer Ausdehnung sehr klein ist. Dabei ist der disperse Bestandteil im Dispersionsmittel (Dispergens) fein verteilt. In Abhängigkeit vom Aggregatzustand der Bestandteile, die auch als **Phasen** bezeichnet werden, unterscheidet man Nebel, Aerosole, Schäume, Emulsionen u. a. Gegenstand dieser Arbeit sind disperse Systeme, bei denen Wasser (Dispersum) in Luft (Dispergens) in Form kleiner Tropfen verteilt ist. Werden strömende disperse Systeme betrachtet, was hier gegeben ist, so spricht man auch von **Zweiphasenströmungen** [Brauer 71].

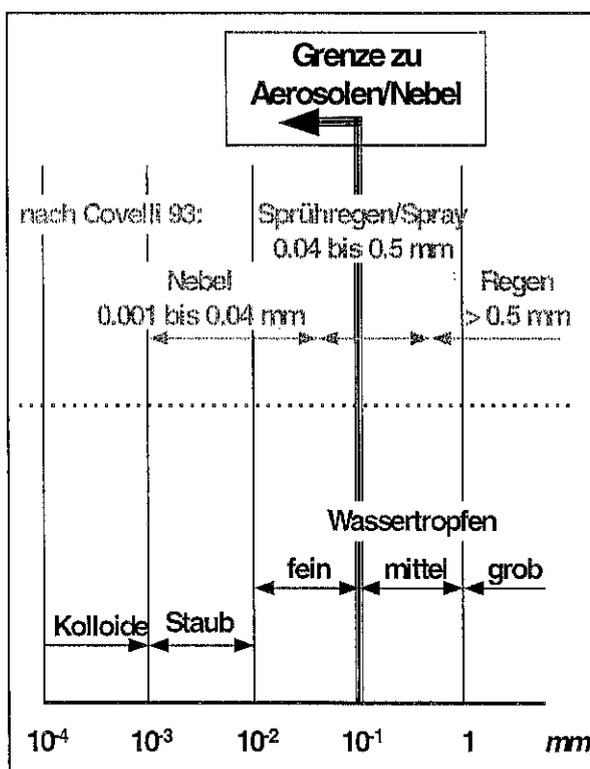


Bild 2.1: Bezeichnung des Sprühstrahls in Abhängigkeit vom Durchmesser [Grabski et al. 95]

Monodisperse und polydisperse Sprühstrahlen

In jedem Sprühstrahl sind die Tropfen stets unterschiedlich groß. Es ist nur eine Frage der Messgenauigkeit, um dies festzustellen. Weichen jedoch die Tropfendurchmesser von ihrem Mittelwert nur sehr wenig ab, so bezeichnet man den Sprühstrahl als **monodispers**. Haben die Tropfendurchmesser eine sehr große Streuung, so nennt man das disperse System **polydispers**.

Feinverteiltes Wasser (Aerosole, Nebel), Sprühstrahlen

Die Bezeichnungsweise dieser Wasser-Luft-Gemische in Abhängigkeit von der Tropfengröße ist nicht einheitlich. Bild 2.1 vermittelt einen Überblick. Markant ist der Tropfendurchmesser von $0,1$ mm, der die Grenze zu den Aerosolen/Nebel darstellt. Das ist auch der Bereich, von dem ab von feinverteiltem Wasser gesprochen werden sollte. Die Messungen am IdF LSA mit dem PDA in Sprühstrahlen von Strahlrohren, die bei der mobilen

Brandbekämpfung von den Feuerwehren eingesetzt werden, haben gezeigt, dass es sich um polydisperse Sprühstrahlen handelt [Starke et al. 96]. Es sind oft

Tropfendurchmesser aus dem Bereich der Wassernebel sowie auch mittlere und große Wassertropfen vertreten. Aus diesem Grund wird im folgenden von Sprühstrahlen gesprochen.

2.3 Das Versuchsprogramm

Auswahl der Sprühstrahlen

Bei der Auswahl der Sprühstrahlen wurden im einzelnen folgende Überlegungen berücksichtigt:

- ◆ Bei der Bearbeitung des ersten Teils der Forschungsthematik (vgl. [Starke et al. 96]) wurden Sprühstrahlrohre/-pistolen betrachtet, die bei der mobilen Brandbekämpfung eingesetzt werden. Diese erzeugen im Normaldruckbereich in der Regel keine Tropfengrößen, die im Mittel unterhalb von 100 μm liegen.
- ◆ Es sollte aber im Versuchsprogramm auch eine Löschmittelauswurfvorrichtung aus diesem Arbeitsbereich berücksichtigt werden.
- ◆ Bei steigendem Druck werden die Sprühstrahlen jedoch zunehmend monodisperser. Bei hohen Drücken nahe bei 40 *bar* und relativ geringen Volumenströmen werden die Tropfen im Mittel auch deutlich kleiner.
- ◆ Da die Sprühstrahlrohre mehrere Einstellungen zulassen, wurde im Ergebnis einiger Vorversuche für jedes betrachtete Strahlrohr eine Einstellung gewählt. Dies erfolgte in der Weise, dass zum einen im Sprühstrahl die Wassertropfen optisch einigermaßen homogen verteilt sind und zum anderen ein relativ kleiner Volumenstrom gefördert wird. In dieser Stellung wurde der jeweilige Verstellmechanismus arretiert und über das gesamte Versuchsprogramm konstant gehalten.
- ◆ Die gewählten Volumenströme lagen bei den Versuchen zwischen 11.5 und 85.0 *l/min*.

Tabelle 2.1 enthält die im Bericht für die Sprühstrahlen verwendeten Symbole sowie die Betriebsparameter der Strahlrohre. Der angegebene Druck wurde unmittelbar vor dem Strahlrohr gemessen.

Tabelle 2.1: Die im Versuchsprogramm verwendeten Sprühstrahlen und deren Parameter

Nr.	Bezeichnung	Druck in <i>bar</i>	Volumenstrom in <i>l/min</i>
1	ppan06	6	65.0
2	ppnh20	20	66.0
3	ppnh35	35	85.0
4	ppmh39	39	11.5

Auswahl der Brandobjekte

Bei der Auswahl der Brandobjekte wurden folgende Sachverhalte berücksichtigt:

- ◆ In der Praxis gibt es leider nicht den „typischen“ Brand. Die möglichen Brandszenarien sind sehr vielfältig und zum Zeitpunkt der Alarmierung bzw. bei der Ankunft am Ereignisort durch die Einsatzkräfte nicht sofort exakt einschätzbar.
- ◆ Die mobilen Löschmittelauswurfvorrichtungen zur Erzeugung feinverteilter Sprühstrahlen haben eine vergleichsweise geringe Wurfweite. Im Vorteil sind da Strahlrohre, die größere Löschmittelvolumenströme einsetzen und das Wasser in Form von Vollstrahlen ausbringen. In diesen Fällen hat man es aber nicht mehr mit feinverteilterm Wasser zu tun.
- ◆ Auf die Anwendung einer sehr geringen Wasserrate wird dann orientiert, wenn der Brand überschaubar und verhältnismäßig klein ist.
- ◆ Diesem Sachverhalt wurde bei der Wahl der Brandobjekte Rechnung getragen. Es wurden, auch unter dem Gesichtspunkt der Vergleichbarkeit zu anderen Brandversuchen, als Brandobjekt der Holzkrippenbrand 8A [DIN EN 3 Teil 1] (s. Bild 2.2) sowie ein Polypropylenbrand mit einer Fläche von 1 m² ausgewählt.
- ◆ Holz ist ein glutbildender Brandstoff. Die Holzkrippe ist als ein vergleichsweise schwierig zu löschender Brand anzusehen.
- ◆ Polypropylengranulat ist ein ein fester Stoff, der bei Erwärmung schmilzt und heftig verbrennt.

Brandversuche auf dem AFF

Die Brandversuche wurden auf dem AFF durchgeführt, der im nächsten Kapitel beschrieben wird. Nach Abschluss der Vorversuche wurde folgendes Versuchsprogramm fixiert.

Für jeden Sprühstrahl wurden Brandversuche mit 3 unterschiedlichen Entfernungen der Strahlrohrmündung zur Vorderkante des Brandobjektes durchgeführt. Die Entfernungen wurden so gewählt, dass bei der kürzesten eine gute Löschwirkung und bei der weitesten eine schlechte oder sogar gar keine Löschwirkung vorhanden sein sollte. Jeder Brandversuch wurde bei gleichen Versuchsbedingungen wiederholt. Somit ergab sich für die Brandversuche folgende Bilanz:

Tabelle 2.2: Übersicht über die Zahl der durchgeführten Brandversuche

Sprühstrahlen		Brandobjekte		Entfernung		Wiederholung		Versuchszahl
4	*	2	*	3	*	2	=	48

Insgesamt wurden 63 Brandversuche durchgeführt. Neben den Vorversuchen wurden zum Abschluss des Versuchsprogramms noch einige Versuche durchgeführt,

bei denen u. a. mehrere Temperaturmessungen durchgeführt wurden. Auf diese wird bei der Auswertung eingegangen.

Sprühversuche auf dem AFF

Ein großer Teil des Wasser, das durch die Strahlrohre versprüht wird, erreicht das Brandobjekt nicht bzw. fliegt an diesem vorbei. Der gemessene Löschmittelvolumenstrom sagt wenig über die Wassermenge aus, die das Brandobjekt tatsächlich erreicht. Aus diesem Grund wurde zu jedem Brandversuch ein korrespondierender Sprühversuch durchgeführt, bei dem das auf das Brandobjekt auftreffende Wasser aufgefangen wurde. Auf die Versuchswiederholung wurde hier jedoch verzichtet. Somit ergibt sich die in Tabelle 2.3 angegebene Versuchsanzahl.

Tabelle 2.3: Übersicht über die Zahl der durchgeführten Sprühversuche

Sprühstrahlen		Brandobjekte		Entfernung		Versuchsanzahl
4	*	2	*	3	=	24

Sprühstrahlvermessung mit dem PDA

Im Nasslabor des IdF LSA wurden die Sprühstrahlen mit dem Phasen-Doppler-Anemometer vermessen. Das erfolgte in den Messebenen, die den Entfernungen bei den Brandversuchen entsprechen. Gemessen wurden die Tropfengeschwindigkeiten und -durchmesser.

Neben den PDA-Messungen wurden bei zwei Sprühstrahlen noch Massenvolumenströme ermittelt, d. h. die Wassermenge all der Tropfen, die pro Zeiteinheit durch eine Fläche strömen.

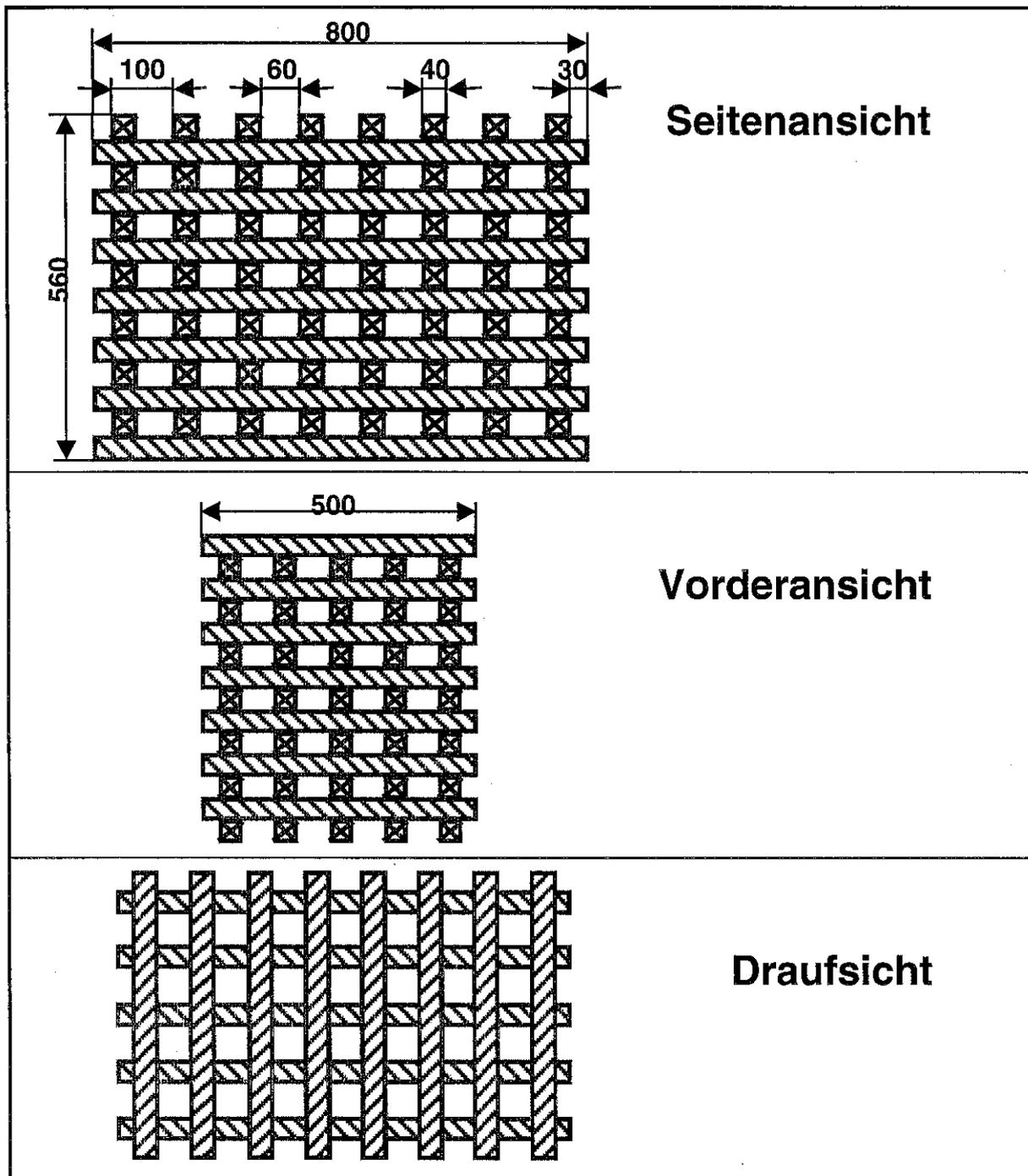


Bild 2.2: Holzkrippe, Brandobjekt 8A nach [DIN EN 3 Teil 1]

3 Grundlagen und Übersicht zur Versuchsauswertung

3.1 Versuchsstände

3.1.1 Versuchsstand: automatic fire fighter - AFF

Zielstellung

Brandversuche werden von sehr vielen Faktoren beeinflusst und sind, wie im 2. Kapitel bereits erwähnt, oft nur mit hohem Aufwand reproduzierbar zu gestalten. Werden bei den Versuchen auch noch Löschgeräte verwendet, die während der Brandbekämpfung vor Ort durch Einsatzkräfte getragen und nach deren Einschätzung situationsabhängig geregelt werden, so ist die Reproduzierbarkeit in besonderem Maße in Frage gestellt. Die Dauer der Brandkämpfung ist ganz wesentlich von dem Verständnis und der Einsatzerfahrung des Strahlrohrführers abhängig. Für wissenschaftliche Untersuchungen ist aber eine möglichst genaue Reproduzierbarkeit der Versuche unumgänglich.

Aus diesem Grund wurde zur Durchführung von Löschversuchen ein Versuchsstand konzipiert und aufgebaut, der die Strahlrohrführung übernimmt und diese reproduzierbar gestaltet. Dabei müssen wesentliche Komponenten der Löschmittelbeaufschlagung berücksichtigt werden:

- ◆ Die Löschmittelbeaufschlagung auf das Brandobjekt muss von verschiedenen Seiten möglich sein.
- ◆ Die Entfernung des Strahlrohres vom Brandobjekt muss nach Bedarf festgelegt werden können.
- ◆ Eine Auf- und Abwärtsbewegung des Strahlrohres muss wahlweise gewährleistet sein.

Es ist offensichtlich, dass mit der Zielsetzung „Reproduzierbarkeit“ nicht zwingend die optimale Löschwirkung erzielt werden kann.

Um den Versuchsstand, der im Freien und in Räumen eingesetzt werden kann, mobil und handhabbar zu gestalten, wurde er in drei Bestandteile zerlegt. Das sind der „Drehteller“, der „Bock“ und ein „Verfahrweg“.

Drehteller

Die Bewegung des Feuerwehrmannes um den Brandherd herum wird durch die Bewegung des Brandherdes selbst simuliert. Dazu wird eine Scheibe (Teller) gedreht, auf der das Brandobjekt gelagert ist. Der Drehteller ist auf der linken Seite im Bild 3.1 zu sehen. Die Brandobjekte können sehr unterschiedlich sein. Bei dem Brandstoff kann es sich um feste glutbildende, feste schmelzende und flüssige Brennstoffe handeln, das heißt Brandstoffe der Brandklassen A und B. Das Drehen

wird von einem Bedienpult aus automatisch gesteuert. Es werden grundsätzlich zwei Drehbewegungen unterschieden:

- ◆ Der Drehteller kann sich kontinuierlich in einer Richtung bewegen. Er führt dann vollständige Umdrehungen durch, wobei die Drehzahl vorgegeben werden kann.
- ◆ In vielen Fällen kann das Brandobjekt nur aus einem bestimmten Bereich angegriffen werden, da der Zugang um den Brandherd herum versperrt ist. Für derartige Situationen kann der Drehteller innerhalb eines vorzugebenden Winkelbereiches „hin und her“ gedreht werden. Auch hier ist die Frequenz der Hin- und Herbewegung einstellbar.

Die Gesamtmasse des Brandobjektes, incl. eventuell erforderlicher Brandwannen, kann bis zu 500 kg betragen.

Die Idee, dass das Brandobjekt gedreht wird, ist schon in einer schwedischen Norm zur Prüfung von Feuerlöschern verwendet worden [SS 1192:1985]. Dort wird der Feuerlöscher fest eingespannt und das Brandobjekt in einiger Entfernung gedreht.

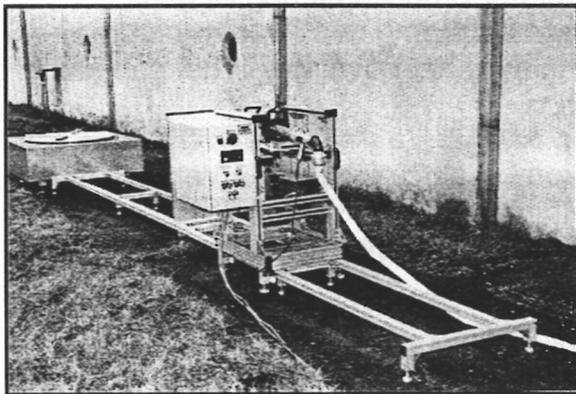


Bild 3.1: Versuchsstand AFF

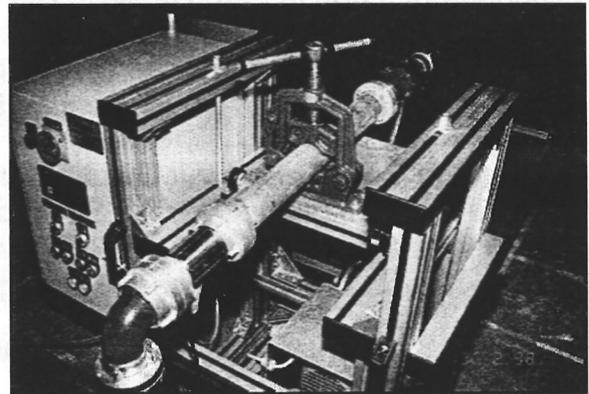


Bild 3.2: Bock mit eingespanntem Strahlrohr und Steuereinheit

Bock

Der Bock hat eine Einspannvorrichtung, die das Strahlrohr hält. In dieser Ausgangsstellung kann ein Anstellwinkel nach Bedarf gewählt werden. Zusätzlich ist der Bock in der Lage, diese Einspannvorrichtung und somit das Strahlrohr in verschiedenen Winkelbereichen „auf und abwärts“ zu bewegen. Die Frequenz dieser Auf- und Abwärtsbewegung ist ebenfalls einstellbar. Bild 3.2 zeigt den Bock mit der Steuereinheit des AFF.

Verfahrweg

Der Bock kann auf zwei parallelen Schienen verfahren werden. Dadurch ist die Entfernung zum Brandobjekt nach Bedarf variierbar.

Aufbau des AFF im Brandkanal

Der Versuchstand wurde im Brandkanal des IdF LSA aufgebaut. Die wesentlichen inneren Maße des Brandkanals sind den Bildern 3.3 und 3.4 zu entnehmen.

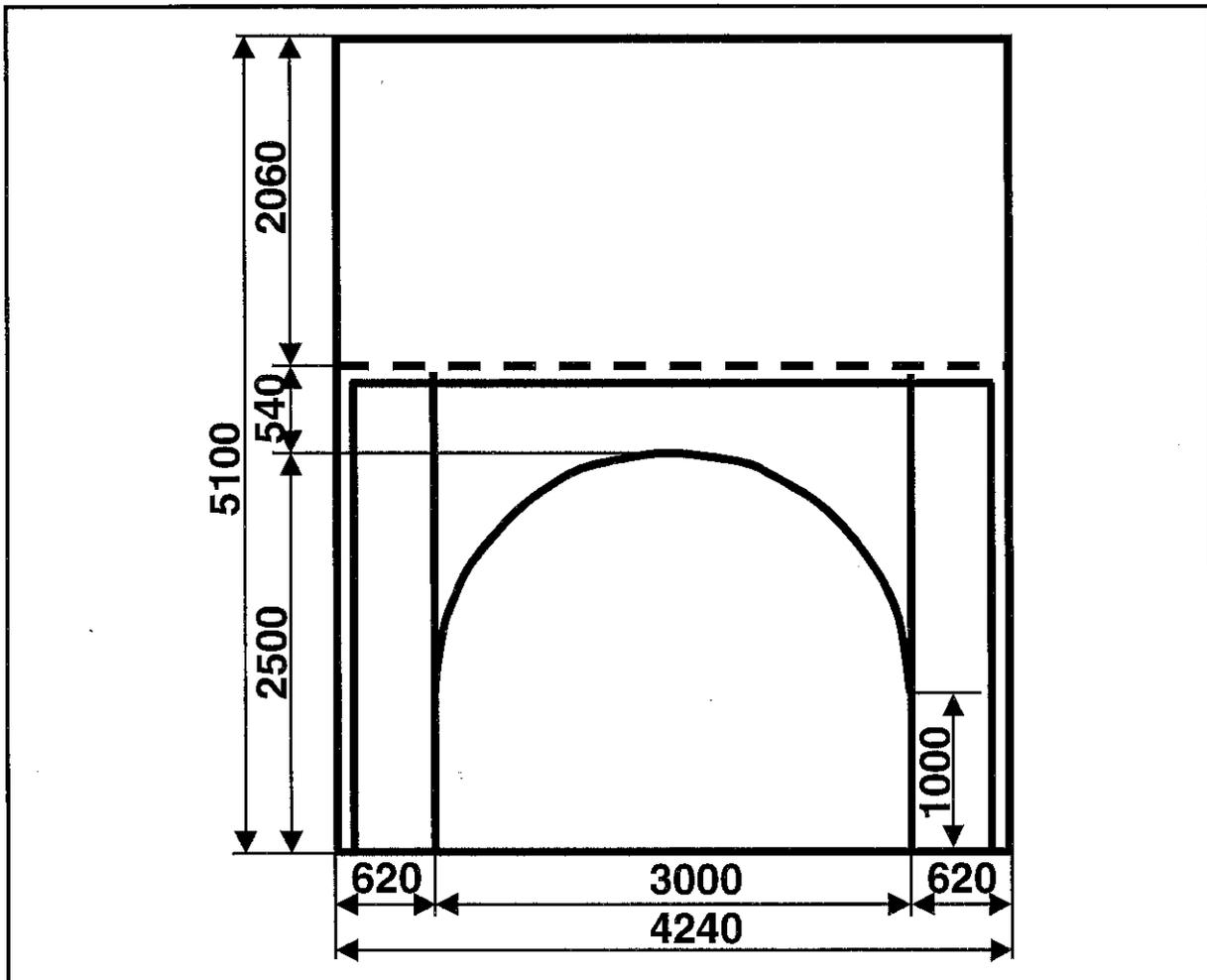


Bild 3.3: Vorderansicht des Brandkanals bei geöffnetem Tor

Der AFF wurde im vorderen Bereich des Brandkanals aufgestellt. Das Bild 3.5 gibt die Lage des AFF im Brandkanal in drei Ansichten wieder. Bild 3.6 enthält einige spezielle Abmaße des AFF. Als Beispiel wurde bei dem skizzierten Versuchsaufbau eine Holzkrippe verwendet.

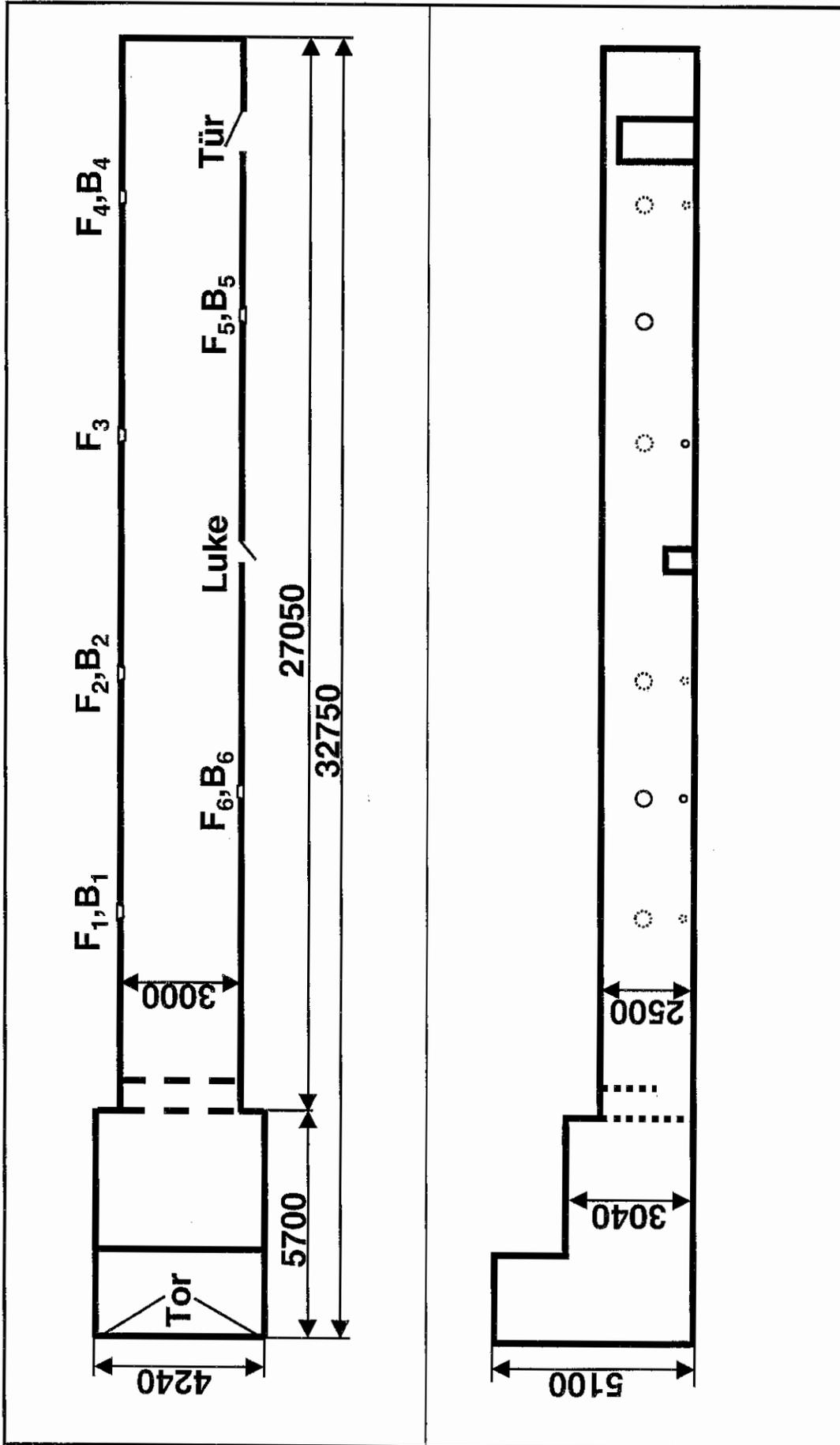


Bild 3.4: Drauf- und Seitenansicht des Brandkanals des IdF LSA

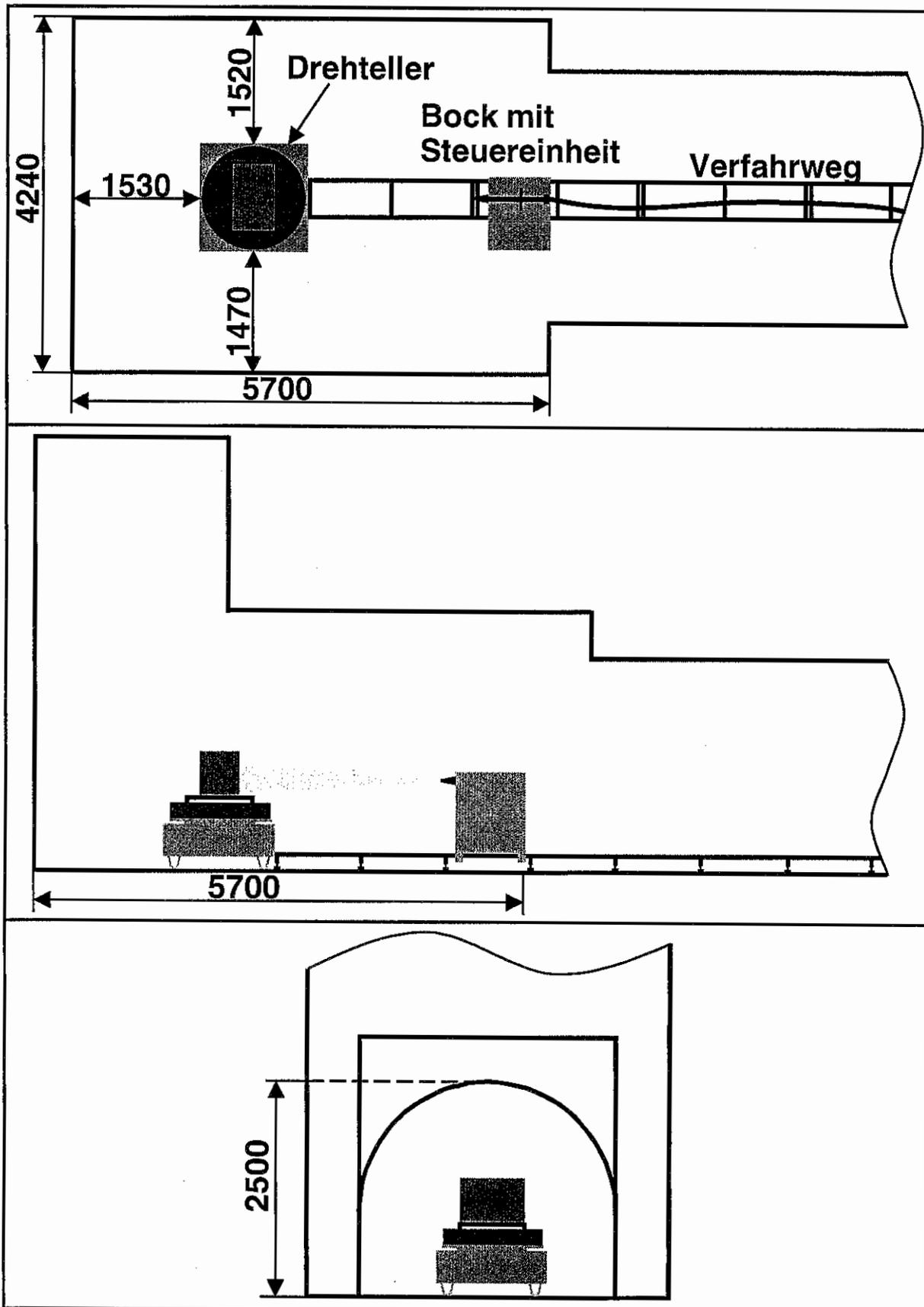


Bild 3.5: Lage des AFF im Brandkanal des IdF LSA in der Drauf-, Seiten- und Vorderansicht

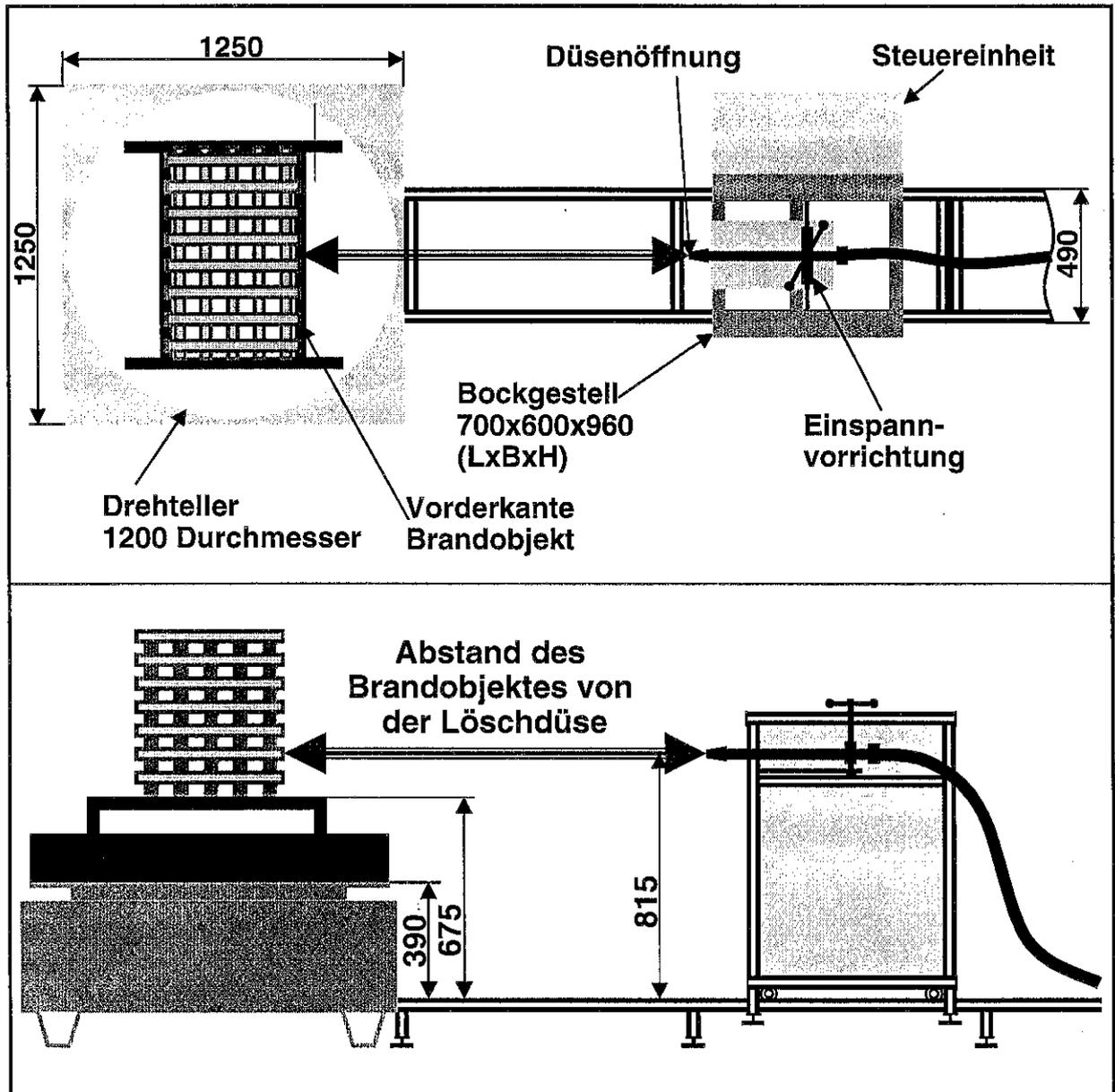


Bild 3.6: Skizze des AFF in der Drauf- und Seitenansicht mit einem Holzrippenbrandobjekt

3.1.2 Versuchsstand zur Sprühstrahlvermessung am IdF LSA

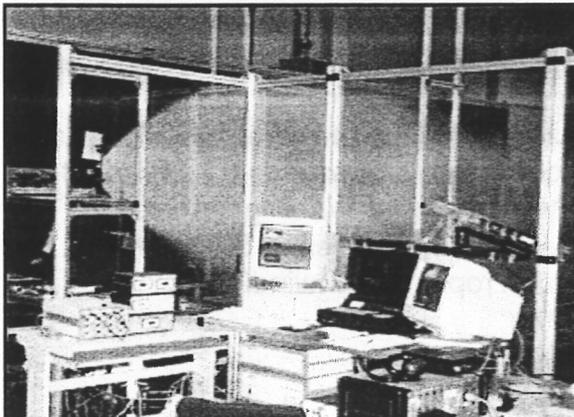


Bild 3.7: Bedienstand des PDA

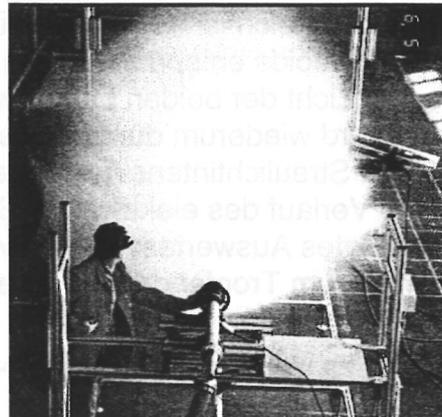


Bild 3.8: Sprühstrahlvermessung im Nasslabor

Im Nasslabor des IdF LSA wurde ein Versuchsstand aufgebaut, dessen Kernstück ein Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) ist (s. Bild 3.7 und 3.8). Eine Übersicht über den Stand der Entwicklung dieses Lasermessverfahrens sowie einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gibt [Tropea 95].

Im Folgenden werden zunächst einige kurze Ausführungen zur Arbeitsweise und zu den für einen Einsatz notwendigen Voraussetzungen eines PDA gemacht.

Arbeitsweise der Phasen-Doppler-Anemometrie

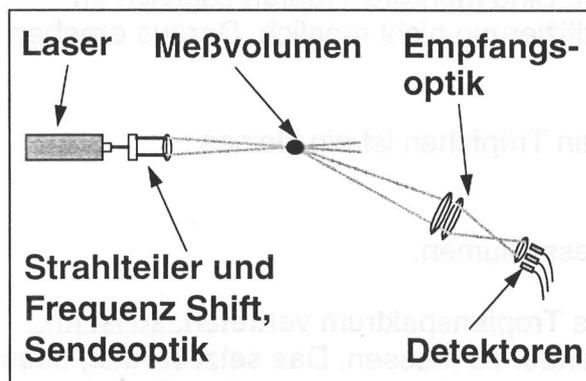


Bild 3.9: Aufbau eines Phasen-Doppler-Anemometers [Polytec 95]

Lasermessverfahren sind optische Messverfahren, die die Phänomene der Lichtausbreitung ausnutzen. Das sind die Beugung, die Reflexion und die Brechung. Bei dem PDA wird insbesondere der Effekt der Brechung verwendet. Tritt Licht durch die Grenzfläche zwischen zwei Stoffen, in denen es sich unterschiedlich schnell ausbreitet, so wird es gebrochen. Das ist natürlich auch der Fall, wenn sich ein Wassertropfen durch einen Laserstrahl bewegt. Will man derartige Effekte messen und auswerten, muss ein hinreichend starkes Signal erzeugt

werden. Daraus resultieren die erforderliche Intensität für den Laserstrahl und eine entsprechende Empfindlichkeit für die Empfangsoptik.

Bild 3.9 zeigt eine typische Messanordnung für ein PDA. Bei dem dargestellten Zweistrahanemometer wird der Laserstrahl mit der Frequenz ν und der Wellenlänge λ in zwei Strahlen gleicher Intensität geteilt. Diese werden mit einer Linse fokussiert. Der Kreuzungsbereich ist das Messvolumen, das näherungsweise der Form eines räumlichen Ellipsoids entspricht. Durch das Messvolumen bewegen sich Partikel, durch die das Licht der beiden Laserstrahlen gestreut wird. Ein Teil dieses Streulichtes wird wiederum durch Linsen auf die Photodetektoren fokussiert, die die empfangenen Streulichtintensitäten in elektrische Signale umwandeln (vgl. Bild 3.9). Der zeitliche Verlauf des elektrischen Signals wird „Doppler-Burst“ genannt. Ein rechnergestütztes Auswertesystem gewinnt aus den empfangenen Signalen Informationen zum Tropfendurchmesser und zur Tropfengeschwindigkeit.

Charakteristika der Phasen-Doppler-Anemometrie

Die Phasen-Doppler-Anemometrie gestattet ein berührungsloses Messen. Die anschließende Aufzählung beinhaltet sowohl einzuhaltende Bedingungen als auch Grenzen des Verfahrens:

- ◆ Der optische Zugang zum Messort muss gewährleistet sein.
- ◆ Die Tropfen müssen sphärisch sein, d. h. die Tropfenbildung muss beim Versprühungsvorgang abgeschlossen sein. Messungen unmittelbar hinter der Rohrmündung sind nicht möglich. Stark von der Kugelform abweichende Tropfen können nicht identifiziert werden.
- ◆ Der optische Brechungsindex der Flüssigkeitstropfen muss bekannt sein. Das Teilchenmedium muss homogen bzgl. seiner optischen Eigenschaften sein.
- ◆ Der Messbereich des Verfahrens reicht von ca. $1\mu m$ bis zu einigen mm .
- ◆ Im Messvolumen darf nur ein Tropfen sein. Sind mehrere Tropfen zugleich im Messvolumen, so ist eine fehlerfreie Identifizierung nicht möglich. Daraus ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:
 - Bei einem sehr dichten Spray mit kleinen Tröpfchen ist ein kleines Messvolumen zu wählen.
 - Große Tropfen erfordern ein großes Messvolumen.
 - Ist in einem Sprühstrahl ein sehr breites Tropfenspektrum vertreten, so ist mit verschiedenen Messvolumina nacheinander zu messen. Das setzt voraus, dass die Versuchsbedingungen über einen längeren Zeitraum reproduzierbar sind.

Eine ausführliche Beschreibung sowie eine Übersicht über weitere Messverfahren ist in [Starke et al. 96] enthalten. Die im Bild 3.9 schematisch dargestellten Sende- und Empfangsoptiken sind auf einer optischen Bank installiert. Vom Laser wird der Laserstrahl über ein Glasfaserkabel zur optischen Bank geleitet. Die optische Bank ist somit ortsveränderlich. Mit Hilfe einer Schrittmotorsteuerung wird über einen PC vom Bedienstand aus die Position der optischen Bank und somit die Lage des Messvolumens bzw. des Messortes eingestellt. Die Koordinatenangaben werden für den Messpunkt eingegeben. Die Sprühstrahlachse hat die (x,y) -Koordinate $(0,0)$. Die

Abmessungen des Messbereiches in der vertikalen (x,y)-Ebene und des Messrasters sind im Bild 3.10 schematisch dargestellt.

Die zu wählende Schrittweite hängt von der jeweiligen Messaufgabe ab. Der Messpunkt, d. h. die Lage des Messvolumens im Sprühstrahl, kann auf 1 mm genau eingestellt werden.

Im Nasslabor sind zwei parallele Verfahrschienen von ca. 20 m Länge aufgebaut. An dem einen Ende befindet sich die Einspannvorrichtung für die zu vermessende Düse. Die Mündung des Sprühstrahlrohres hat die z-Koordinate 0 . Die horizontale Linie, die durch die Mitte der Strahlrohröffnung parallel zum Verfahrweg verläuft, ist die Strahlmitte. Das Sprühstrahlrohr ist parallel zum Verfahrweg einzuspannen. Auf diesem Verfahrweg kann der Wagen mit der Positioniereinrichtung für das PDA rechnergesteuert positioniert werden (vgl. Bild 3.10).

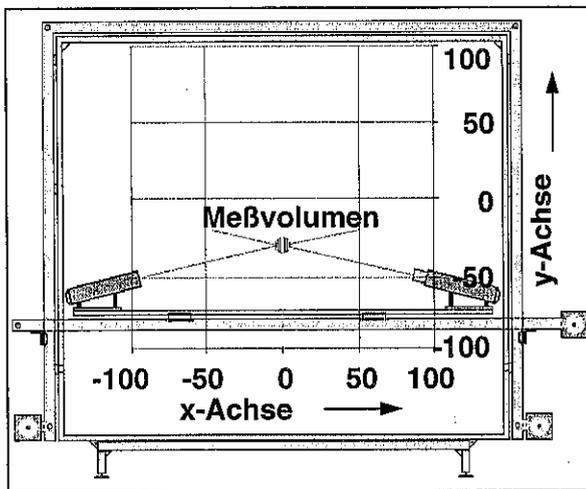


Bild 3.10: Positioniersystem für das PDA

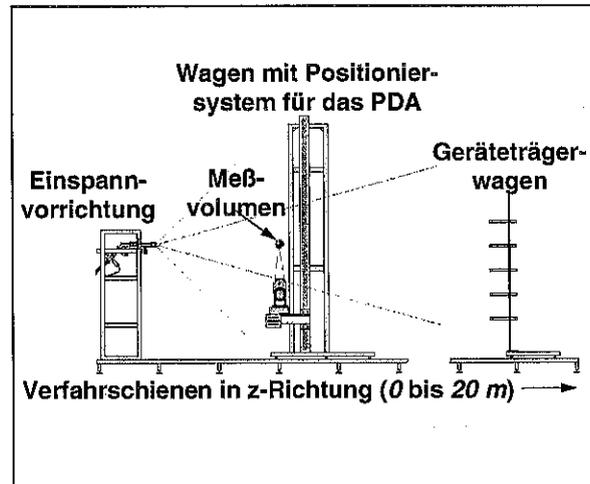


Bild 3.11: Seitenansicht der Verfahreinrichtung

Das Grundgerüst ermöglicht ein Verschieben der optischen Bank in Richtung der Strahlachse über die gesamte Länge. Gemessen werden auf dem Versuchsstand mit der PDA **der Tropfendurchmesser und die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung** (vgl. Bild 3.11).

3.2 Sprühstrahlen und deren Charakterisierung

Sprühstrahlen bei der Feuerwehr

Im Bereich der Feuerwehr werden Sprühstrahlen in vielfältiger Weise eingesetzt. Eine Zusammenstellung mit einigen Erläuterungen und Abbildungen ist in [Grabski et al. 96, Starke et al. 98] zu finden. Die folgende Aufzählung enthält darüber hinaus einige weitere Literaturstellen.

- ◆ Sprühstrahlrohre [Ebert 88]
- ◆ Sprühstrahlpistolen [Ebert 88]
- ◆ Hydroschilde
- ◆ Impulslöschverfahren
- ◆ Sprenglöschverfahren
- ◆ Abgas-Aerosol-Löschverfahren [Pleß et al. 93, Haselhorst 98].

Einige theoretische Grundlagen zum Sprenglöschverfahren sind bei [Grabski 95, Sedov 93] nachzulesen.

Tropfenerzeugung und -ausbildung

Zur Erzeugung obiger Sprühstrahlen werden die unterschiedlichsten Zerstäuber/Düsen verwendet. Insbesondere wird der Einfluss der Betriebsparameter der Düsen auf die Tropfenbildung untersucht. Es sei hier nur auf [Krüger et al. 56, Euteneuer 57, Lefebvre 89, Brauer 71] verwiesen.

Von den Zweistoffdüsen abgesehen, beginnt der eigentliche Prozess der Zerstäubung erst außerhalb der Düse, wenn sich die Flüssigkeit in der Luft zerteilt. Dabei tritt nicht sofort eine völlige Zerteilung in Tropfen auf. Auf diesen komplizierten Prozess soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Dieser Vorgang wird bei [Brauer 71, Lefebvre 89] betrachtet. Einige Ausführungen dazu sowie eine Reihe von Literaturhinweisen sind auch bei [Starke et al. 96] zu finden.

Problemstellung

Die durch die Feuerwehr verwendeten Sprühstrahlen und die neu angebotenen Löschmethoden sind sehr vielfältig und schon vor längerer Zeit untersucht worden [Möbius 55]. In vielen Fällen sind aber bisher unzureichend die Grenzen und Möglichkeiten der einzelnen Verfahren abgeprüft. Dies hat aber mit Bezug auf die Sicherheit der Feuerwehreinsatzkräfte unbedingt zu erfolgen.

Eine derartige Betrachtung erfordert es jedoch, Sprühstrahlen zu beschreiben, um sie auch vergleichen zu können. Hier bieten sich statistische Methoden an [Domnick 95, Starke 96, Starke et al. 96a].

Eine Reihe von Autoren befasste sich schon sehr früh mit der Untersuchung der statistischen Verteilung der Tropfendurchmesser in Sprühstrahlen bzw. von

Partikelkollektiven [Mugele et al. 51, Rosin et al. 33]. Aufbauend auf diesen grundlegenden Arbeiten haben sich u. a. [Brauer 71, Lefebvre 89, Wang 94] mit der statistischen Beschreibung der Tropfendurchmesser befasst. Mit der Verfügbarkeit der Laser-Messtechnik zur Partikelmessung ergeben sich weitere neue Möglichkeiten. Das betrifft die ortsabhängigen Angaben

- ◆ zum Tropfendurchmesser,
- ◆ zur Tropfengeschwindigkeit und
- ◆ zur Massenstromdichte bzw. zum Volumenstrom.

Auf die ersten beiden Fragestellungen wird im Folgenden eingegangen. Die letzte Problematik wird in der Arbeit von [Xu 96] behandelt.

Zur statistischen Auswertung der Messergebnisse

Im Ergebnis einer Messung in einem Punkt erhält man häufig mehrere tausend Zahlenwerte für die einzelnen Tropfen. Diese einzeln auszugeben, macht keinen Sinn. Sie müssen in geeigneter Weise auf einige wenige Kennziffern bzw. Kennwerte reduziert werden. Aus den Messwerten erhält man diese Kennwerte mit Hilfe sogenannter Schätzfunktionen.

Um die verschiedenen Schätzungen für den Tropfendurchmesser und die Tropfengeschwindigkeit formulieren zu können, sind einige Begriffe und Symbole einzuführen. Das erfolgt am Beispiel des Tropfendurchmessers.

Die mit der PDA in dem jeweiligen Messpunkt gemessenen Werte werden **konkrete Stichprobe** genannt. Sie wird mit $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ bezeichnet. Ausgangspunkt für die Schätzung verschiedener Kennwerte sind die **Stichprobenmomente k-ter Ordnung**. Sie werden mit der Funktion

$$\hat{m}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k$$

berechnet. Am bekanntesten ist das Moment erster Ordnung. Das ist der Mittelwert aller Messwerte, der auch arithmetisches Mittel oder kurz Durchschnitt genannt wird. Hierbei werden also alle gemessenen Tropfendurchmesser addiert und die Summe durch die Zahl der Tropfen dividiert.

Dieser mittlere Tropfendurchmesser ist aber nicht immer geeignet, um einen Sprühstrahl bzw. ein Spray zu beschreiben. Die zu wählenden Kenngrößen hängen sehr von der Physik des betrachteten Problems ab. So ist es nicht verwunderlich, dass es eine Vielzahl von Schätzungen für den Tropfendurchmesser gibt. Einige sind in der Tabelle 3.1 zusammengestellt (vgl. auch [Lefebvre 89]).

Tabelle 3.1: Schätzungen für den Tropfendurchmesser und Anwendungsgebiete [Lefebvre 89]

a	b	a+b Ordnung	Symbol	Name des Durchmesser- messermittels	Formel	Anwendungs- gebiet
1	0	1	D_{10}	Längen- Durchmesser	\hat{m}_1	Vergleich
2	0	2	D_{20}	Oberflächen- Durchmesser	$\sqrt[2]{\hat{m}_2}$	Oberflächen- steuerung
3	0	3	D_{30}	Volumen- Durchmesser	$\sqrt[3]{\hat{m}_3}$	Volumen- steuerung, z. B. Hydrologie
2	1	3	D_{21}	Oberflächen- Längen- Durchmesser	$\frac{\hat{m}_2}{\hat{m}_1}$	Absorption
3	1	4	D_{31}	Volumen- Längen- Durchmesser	$\sqrt[2]{\frac{\hat{m}_3}{\hat{m}_1}}$	Verdampfung, molekulare Diffusion
3	2	5	D_{32}	Sauter- Durchmesser (SMD)	$\frac{\hat{m}_3}{\hat{m}_2}$	Massentransfer, Reaktion
4	3	7	D_{43}	De Brouckere- oder Herdan- Durchmesser	$\frac{\hat{m}_4}{\hat{m}_3}$	Verbrennungs- gleichgewicht

Grundlage ist die folgende allgemeine Stichprobenfunktion

$$D_{ab} = \frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i^a \right]^{1/a-b}}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^b \right]} = \left[\frac{\hat{m}_a}{\hat{m}_b} \right]^{1/a-b}$$

Neben diesen Durchmesser-schätzungen sind noch zwei weitere Kenngrößen einzuführen, nämlich die **Streuung** s^2 und die **Standardabweichung** s . Die Streuung wird nach der Formel

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{m}_1)^2$$

berechnet. Die Wurzel aus der Streuung ist die Standardabweichung (abgekürzt auch durch **STD**, abgeleitet von **standard deviation**). Sie ist ein Maß dafür, wie weit die einzelnen Messwerte um den Mittelwert streuen. Liegen alle Tropfendurchmesser dicht beieinander, d. h. das Spray ist nahezu monodispers, so ergibt sich eine kleine Streuung. Gibt es ein sehr breites Tropfenspektrum, so erhält man eine entsprechend große Streuung.

3.3 Datenstruktur zur Versuchsauswertung

Bei der Versuchsdurchführung sind eine Vielzahl von Daten erzeugt worden, die sich nur mit Rechnerunterstützung umfassend auswerten lassen. Erschwert wird die Auswertung noch dadurch, dass die Daten in unterschiedlicher Form erzeugt werden. Teilweise sind sie in Formularen manuell erfasst worden oder sie wurden in verschiedenen Messwernerfassungssystemen auf Datenträgern in unterschiedlichen Formaten gespeichert. Soll eine zusammenfassende Auswertung erfolgen, die eine Verknüpfung der verschiedenen Versuchsdaten beinhaltet, so müssen diese aber in einem einheitlichen Format für ein Auswertesystem zur Verfügung stehen.

Zur Auswertung der Messergebnisse wurde das SAS-Statistikpaket [SAS 95] verwendet. Es verfügt über verschiedene leistungsfähige Komponenten, die auch die Datenübernahme in SAS-Datenbankdateien unterstützen. Dem SAS-Datenmodell liegt eine relationale Datenbank zugrunde. Das bedeutet, dass die Daten, ähnlich wie bei Microsoft Excel oder dBASE, in Form von Tabellen abgelegt werden. Für jedes Merkmal ist ein Datenfeld einzuführen. Dieses erhält einen Namen und einige Attribute. Darin wird festgelegt, ob es sich um ein Datumsfeld, eine Zeitangabe, eine Zahl oder um beschreibenden Text handelt. Ein Experiment wird nun mit einer frei wählbaren Zahl von Datenfeldern beschrieben. Diese definieren den „Tabellenkopf“. Die aus einem Experiment gewonnenen Messwerte sowie die dazugehörigen Informationen bilden einen Datensatz, der einer Tabellenzeile entspricht. Die Tabellen können später über die Spaltennamen oder über die Datenfeldinhalte verknüpft werden.

SAS verfügt über Dialogkomponenten, die das Anlegen der benötigten Tabellen bzw. Datenbanken gestatten. Ebenso können im Dialog Daten erfasst werden oder importiert werden. Meist erfolgt der Import in der Gestalt, dass zunächst die Daten vom PDA-Messplatz oder von der Vielstellenmesstechnik des MOBLAB in ein sequenzielles File exportiert werden. Dieses sequentielle File wird von SAS dann importiert.

Im Folgenden werden die Inhalte der im Rahmen dieses Projektes zur Datenbereitstellung verwendeten fünf wichtigsten Datenbankdateien dargestellt.

Tabelle 3.2: Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der Brandversuche

Dateninhalte	Erläuterung
Versuchsnummer	Die Versuchsnummer (<code>fireno</code>) dient der eindeutigen Identifikation des jeweiligen Brandversuches.
Sprühversuch	Es wird die Nummer des korrespondierenden Sprühversuches (<code>corrseno</code>) eingetragen.
Zeit	Es werden das Datum und die Zeit des Versuchsbeginns notiert.
Klimadaten	Es werden die mit der Wetterstation des MOBLAB gemessenen Daten der Umgebungslufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit sowie der Windgeschwindigkeit und -richtung erfasst.
Brandobjekt	Das Brandobjekt (<code>fireobj</code>) wird beschrieben. Dazu gehören neben der Masse auch Hinweise zur Geometrie.
Zündung	Das verwendete Zündmittel und die eingesetzte Menge sowie die Zündwanne und die resultierende Vorbrennzeit werden abgespeichert.
Betriebsparameter des AFF-Versuchsstandes	Das sind insbesondere die Parameter zur Beschreibung der „Hin- und Herbewegung“ des Drehtellers sowie der „Auf- und Abwärtsbewegung“ des Bockes.
Sprühstrahl	<p>Es wird der verwendete Sprühstrahl durch Angabe einer Bezeichnung für die Sprühdüse (<code>pipename</code>), des Wasserdruckes vor der Düse (<code>pressure</code>), des gesamten Volumenstrom des Wassers (<code>waflow</code>) sowie der Abstand der Sprühdüsenöffnung (<code>distance</code>) von der Vorderkante des Brandobjektes beschrieben.</p> <p><code>spray</code> dient im Folgenden als Kurzbezeichnung für die drei Datenfelder <code>pipename</code>, <code>pressure</code> und <code>waflow</code>.</p>
Pumpe	Der am Pumpenausgang anliegende Wasserdruck wird notiert.
Löschvorgang	Hier werden vor allem markante Zeitpunkte erfasst, die die einzelnen Löschphasen charakterisieren.
Kommentar	Zur kurzen Beschreibung von Besonderheiten des betreffenden Versuches stehen einige Kommentarzeilen zur Verfügung.

AFFF.SD2

In dieser Datei sind die Parameter und die Messergebnisse der Brandversuche abgelegt. Zur Beschreibung eines Brandversuches wurden insgesamt 53 Datenfelder eingeführt. Diese sollen an hier nicht alle erläutert werden. Es werden nur die erfassten Problembereiche genannt und die für die Verknüpfung mit anderen Dateien benötigten Schlüsselfelder hervorgehoben (vgl. Tabelle 3.2).

AFFS.SD2

In dieser Datei sind die zu den Brandversuchen korrespondierenden Sprühbildversuche beschrieben. Zur Beschreibung eines Sprühversuches wurden insgesamt 36 Datenfelder eingeführt.

Tabelle 3.3: Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der Sprühversuche

Datenfeldgruppen	Erläuterung
Versuchsnummer	Die Versuchsnummer (sprayno) dient der Identifikation des Sprühversuches. Diese Nummer wird im Datenfeld corrseo der Brandversuchsdatei zur Zuordnung der korrespondierenden Versuche eingetragen.
Zeit	Es werden das Datum und die Zeit des Versuchsbeginns notiert.
Brandobjekt	Das Brandobjekt (fireobj) wird beschrieben.
Betriebsparameter des AFF-Versuchsstandes	Hier werden analoge Inhalte wie bei den Brandversuchen erfasst.
Sprühstrahl	Es wird der verwendete Sprühstrahl (spray) beschrieben.
Pumpe	Der am Pumpenausgang anliegende Wasserdruck wird notiert.
Kommentar	Zur kurzen Beschreibung von Besonderheiten des betreffenden Versuches stehen einige Kommentarzeilen zur Verfügung.

PDA.SD2

In dieser Datei sind die Ergebnisse der Messungen mit dem PDA abgelegt. Zu jedem gemessenen Tropfen wird ein Datensatz gespeichert.

Tabelle 3.4: Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der PDA-Messungen

Datenfeldgruppen	Erläuterung
Sprühstrahl	Es werden die auch bei den Brandversuchen erfassten Daten zum Sprühstrahl (spray) gespeichert.
Messpunkt	Die drei Ortskoordinaten des Messpunktes werden übernommen. Die y-Koordinate entspricht dem Datenfeld distance der Brandversuchsdatei.
Tropfenparameter	Zu jedem registrierten Tropfen werden seine Geschwindigkeit und der Durchmesser abgelegt.

WFD.SD2

In dieser Datei sind die Ergebnisse der Messungen der Massenstromdichte (water flow density) enthalten.

Tabelle 3.5: Inhalte der Datenbankdatei zur Beschreibung der Massenstromdichte

Datenfeldgruppen	Erläuterung
Sprühstrahl	Es werden globale Daten des Sprühstrahls (spray) gespeichert.
Messpunkt	Die drei Ortskoordinaten des Messpunktes werden übernommen. Die y-Koordinate entspricht auch hier dem Datenfeld distance der Brandversuchsdatei.
Massenstromdichte	In diesem Datenfeld wird der ermittelte Wert für die Massenstromdichte abgelegt.

MT.SD2

In dieser Datei sind die Ergebnisse der Messungen enthalten, die mit der Vielstellenmesstechnik des Mobilten Brandtechnischen Labors (MOBLAB) des IdF LSA vorgenommen wurden. Mit dieser Messtechnik können parallel die Werte von bis zu 150 Messsonden im Sekundentakt aufgenommen werden. Das betrifft insbesondere die Messung von physikalischen Größen. Im vorliegenden Projekt wurden Drücke und Wasserdurchflussströme sowie bei den Holzkrippenbränden auch Temperaturen gemessen.

Tabelle 3.6: Inhalte der Datenbankdatei mit den Ergebnissen der Messungen der Vielstellenmesstechnik

Datenfeldgruppen	Erläuterung
Brandversuch	Es wird die Nummer des korrespondierenden Brandversuches corrveno eingetragen.
Zeit	Die zu den Messwerten gehörende Zeitpunkt. Die Aufzeichnung mit der Vielstellenmesstechnik beginnt zum Zeitpunkt Null.
Messwerte	Für jede aufgezeichnete Messgröße wird ein Datenfeld definiert. Aufgezeichnet wurden Temperaturen, Drücke und Wasserdurchflussströme.

Bild 3.12 zeigt eine Darstellung der 5 erläuterten Datenbanken und deren prinzipielle Verknüpfungsmöglichkeiten. Ist z. B. im Datenfeld **corrveno** von **AFFF.SD2** die Nummer des korrespondierenden Sprühversuches enthalten, so kann durch Lesen eines Datensatzes in **AFFF.SD2** und Entnehmen der Nummer des Sprühversuches aus dem Feld **corrveno** anschließend direkt auf den korrespondierenden Sprühversuch mit der soeben ermittelten Sprühversuchsnummer in **AFFS.SD2** zugegriffen werden.

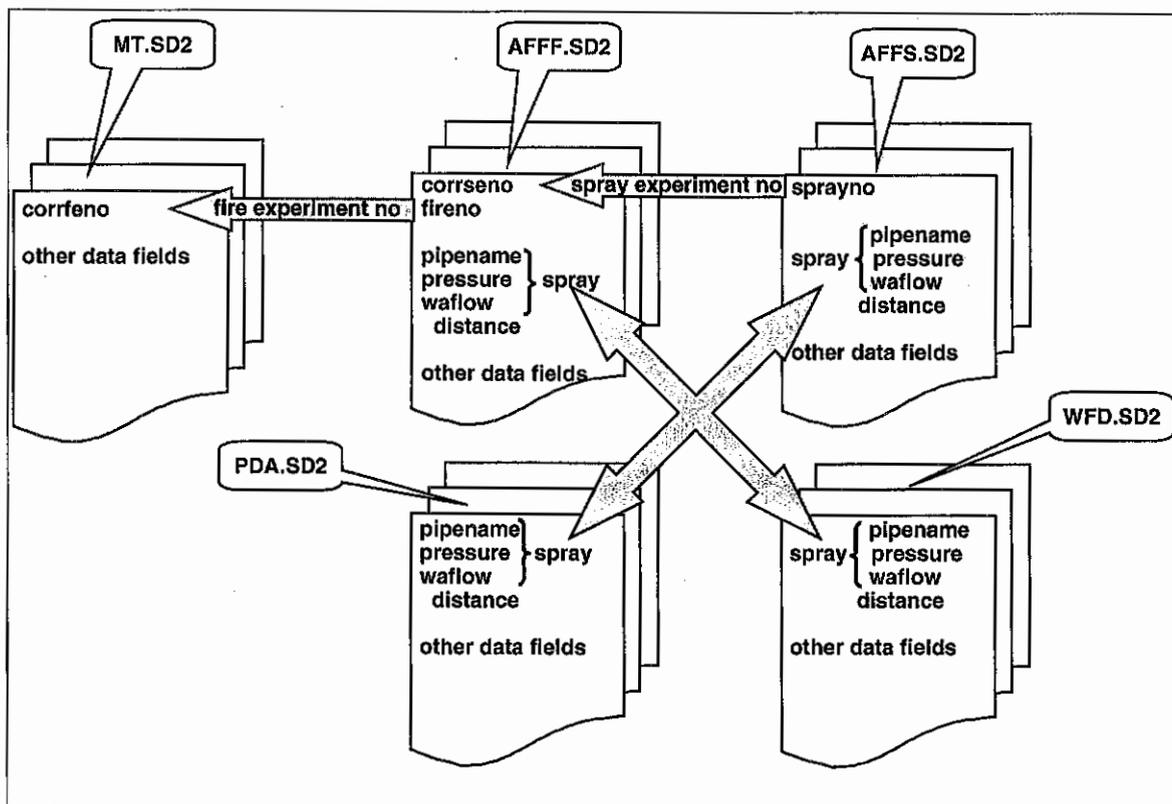


Bild 3.12: Verbindungen zwischen den Datenbankdateien

4 Auswertungen zu den einzelnen Versuchsserien

4.1 Vorbemerkungen

In diesem Kapitel werden Auswertungen vorgenommen, die auf die fünf Datenbankdateien aufbauen, die im Abschnitt 3.3 eingeführt wurden. Da die Datenbasis sehr umfangreich ist, ist ein Ausdruck der Zahlenwerte weder möglich noch sinnvoll.

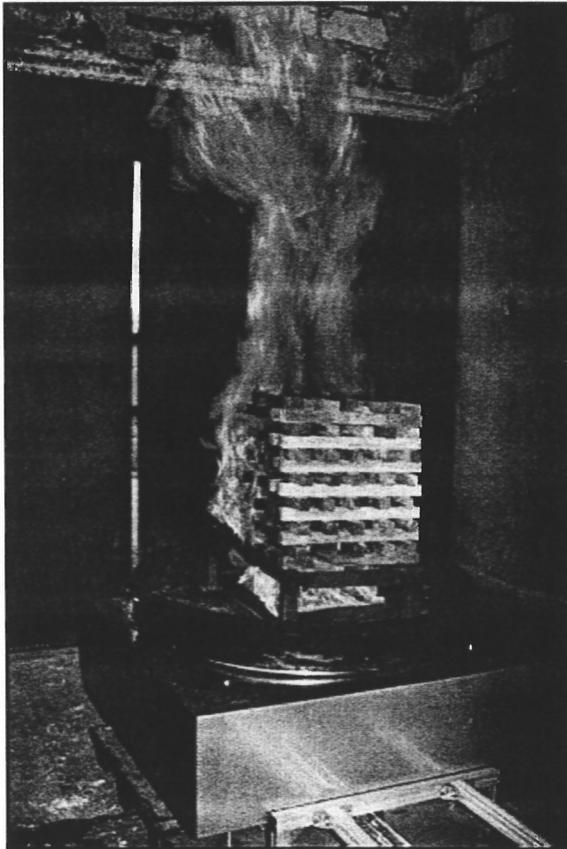


Bild 4.1: Eine brennende Holzkrippe auf dem Drehteller

„Polypropylen“.

Die Auswertung erfolgt in der Regel in der Form von Grafiken. Die gemessenen Rohdaten wurden dabei mit statistischen Verfahren verdichtet und in der grafischen Darstellung durch Spline-Interpolation geringfügig geglättet, um die wesentlichen Tendenzen besser erkennen zu können. Auf die mathematische Erläuterung der verwendeten Verfahren sei an dieser Stelle verzichtet.

Da für die Vervielfältigung des vorliegenden Berichtes keine Farbdarstellung möglich ist, wurde versucht, durch geeignete Auswahl der Linienarten die Grafiken dennoch lesbar zu gestalten. Bei den Temperaturkurven im Abschnitt 4.2.1 wurden aus diesem Grund zwei Grafiken für die Darstellung der sechs Temperaturverläufe gewählt.

Für die Brand- und Sprühversuche, die auf dem AFF-Versuchsstand durchgeführt wurden, erfolgt generell eine getrennte Auswertung für die Brandobjekte „Holzkrippe 8A“ und

4.2 AFF-Brandversuche

4.2.1 Temperaturverläufe beim Holzkrippenbrand

Der AFF-Versuchsstand ist im Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Der ganze Versuchsaufbau ist im Bild 3.5 dargestellt. Bild 2.2 enthält das Brandobjekt einer Holzkrippe 8A nach [DIN EN 3 Teil 1] in drei Ansichten.

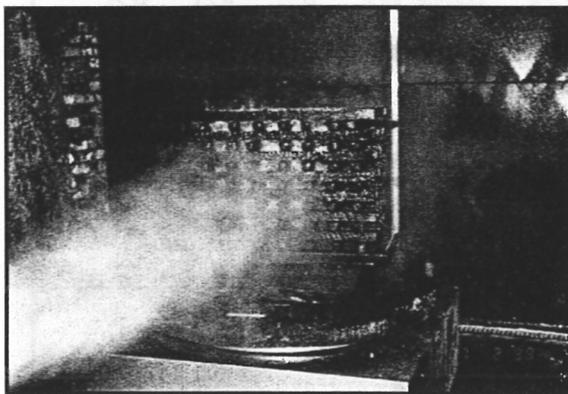


Bild 4.2: Löschversuch mit einem feinen Sprühstrahl

Das Bild 4.1 zeigt einen Holzkrippenbrand kurz nach Zündung des Zündmittels. Im Bild 4.2 wird ein Löschversuch mit einem feinen Sprühstrahl durchgeführt.

Um die Löschwirkung für verschiedene Sprühstrahlen besser bewerten zu können, wurden bei einigen Brandversuchen Temperaturmessungen vorgenommen. Dabei kam die Vielstellenmeßtechnik des MOBLAB des IdF LSA zum Einsatz. Die Lage der Temperaturmessstellen in der

Holzkrippe ist Bild 4.3 zu entnehmen. Die auf dem Drehteller aufgebauten Holzkrippen wurden bei diesen Versuchen nicht bewegt. Bei den hier betrachteten drei Versuchen wurden die Holzkrippen zweimal längs und einmal quer aufgestellt. Im ersten Fall trifft der Sprühstrahl auf die schmale Vorderseite und beim zweiten auf die breitere Seite.

Es wurden zur Temperaturmessung Mantelthermoelemente vom Typ K - NiCr/Ni verwendet. Die durch das Messsystem in einem internen Datenformat abgespeicherten Daten wurden in eine SAS-Datenbankdatei **MT.SD2** (vgl. Abschnitt 3.3, Tabelle 3.6 sowie Bild 3.12) übernommen. Nach entsprechender Datenaufbereitung wurden für jeden der drei hier betrachteten Versuche zwei Grafiken erzeugt, die in den Bildern 4.4, 4.6 und 4.7 abgelegt sind.

Bei der Betrachtung der Bilder ist zu berücksichtigen, dass der Zeitpunkt Null dem Start der Vielstellenmeßtechnik entspricht. Nachdem sichergestellt war, dass diese zuverlässig arbeitet, erfolgte mit einer kleinen Zeitverschiebung die Zündung. Die in den Bildern 4.4, 4.6 und 4.6 ablesbaren Zeiten sind somit die Zeiten nach dem Start der Aufzeichnung und nicht die mit Bezug auf den Zeitpunkt der Zündung. In Anlehnung an die Norm erfolgte der Löschbeginn generell 480 s nach der Zündung.

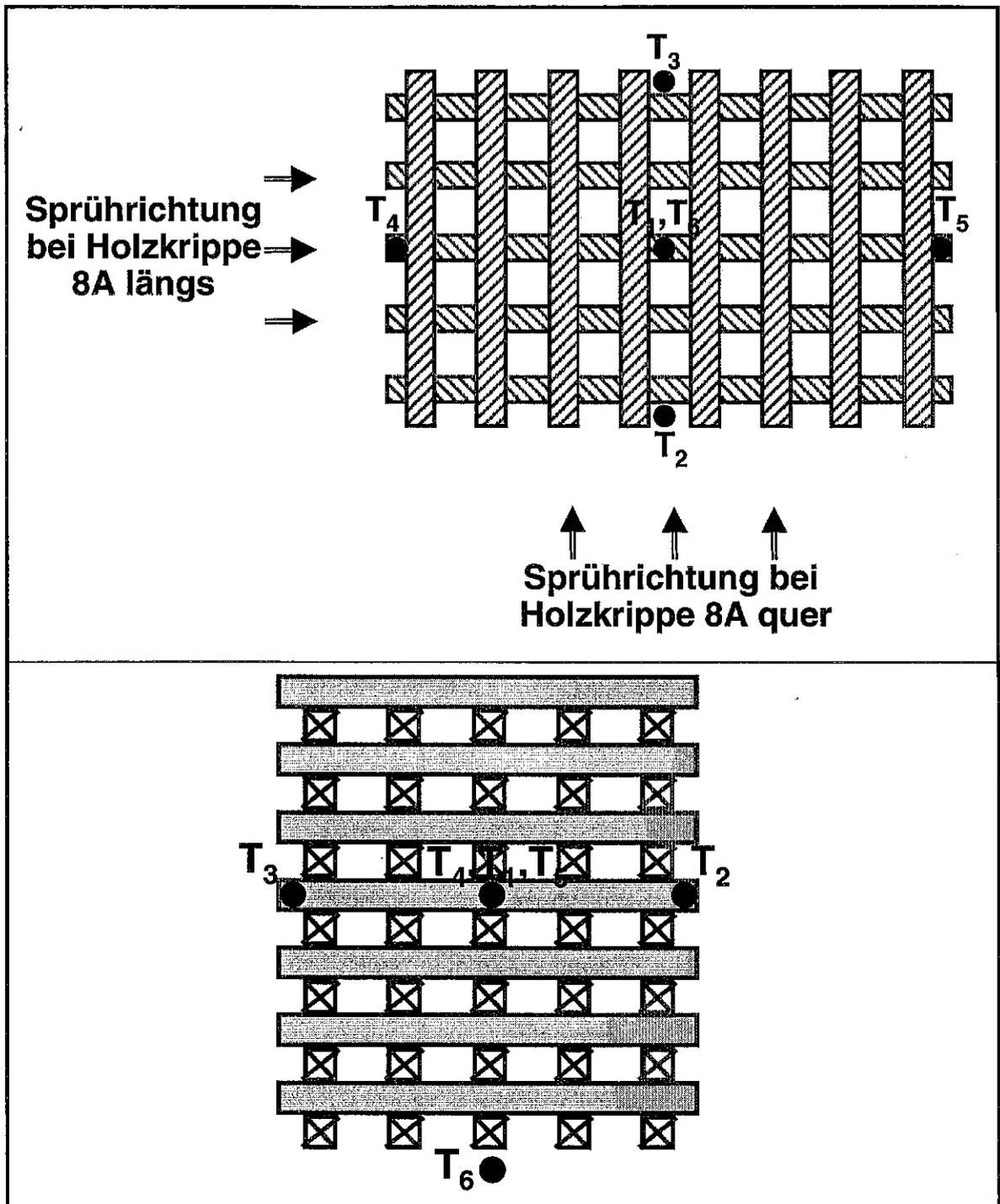


Bild 4.3: Anordnung der Thermoelemente beim Brandobjekt 8A in der Drauf- und Seitenansicht sowie die Richtung des Sprühstrahls zum Brandobjekt

Brandversuch BV59

Der Versuch BV59 hatte folgende Parameter:

- ◆ **Brandobjekt:** Holzkrippe 8A quer
- ◆ **Sprühstrahl:** pph20 (vgl. Tabelle 2.1),
- ◆ **Entfernung:** 600 cm,
- ◆ **Drehteller:** wurde nicht bewegt,
- ◆ **Bock:** „Auf- und Abwärtsbewegung“ im Winkel von 10°.

Die erste Grafik im Bild 4.5 zu den Temperaturkurven des Versuches BV59 wird etwas ausführlicher erläutert. Vor dem Auslösen der Löschanlage hat sich aufgrund des Verbrennungsprozesses eine stabile Aufwärtsströmung ausgebildet, durch die die heißen Verbrennungsgase nach oben abgeführt werden. Die für die Verbrennung erforderliche Luft strömt von den Seiten und vor allem von unten zur Holzkrippe. Das ist deutlich an der Temperaturmessstelle T_6 erkennbar. Nach Verbrennung des Zündmittels bei ca. 150 s sinkt die Temperatur an der Messstelle T_6 , die unterhalb der Holzkrippe angeordnet ist, auf deutlich unter 200 °C. In der Mitte der Holzkrippe ist an der Stelle T_1 die Temperatur am höchsten. Die Seiten sind etwas kühler.

Im Bild 4.4 ist der Zeitpunkt des Löschanfangs sehr deutlich daran zu erkennen, dass die Temperatur an der Messstelle T_2 bei ca. 500 s abrupt abfällt. Der Sprühstrahl trifft an der dem Strahlrohr zugewandten Seite direkt auf das Mantelthermoelement, was eine sofortige Abkühlung bewirkt. Interessant ist, dass an allen anderen Messstellen die Temperaturen zunächst ansteigen. Die Ursache dafür ist auch visuell während der Versuchsdurchführung gut zu erkennen. Durch die auf die Holzkrippe auftreffende Zweiphasenströmung, die neben den Wassertropfen vor allem aus der Umgebungsluft besteht, wird im Innern der Holzkrippe eine starke Turbulenz erzeugt, die kurzfristig die Verbrennung fördert. Ferner entweicht die einströmende Luft durch die Seiten der Holzkrippe, aber auch nach unten. Die Thermolemente werden einer stärkeren direkten Beflammung ausgesetzt. Am deutlichsten ist der Temperaturanstieg an der Meßstelle T_6 . Die Wassertropfen kühlen nur langsam die anderen Bereiche ab.

Bei ca. 800 s bricht der hintere Teil der Holzkrippe völlig zusammen. Der Sprühstrahl hatte in diesem Bereich keine Löschwirkung. Da sich die Thermolemente zum Teil in direkter Nähe der Glut befinden, zeigen sie noch hohe Werte an, obwohl kaum noch Flammen zu beobachten sind. Kurz nach dem Zusammenbruch der Holzkrippe versinkt T_6 im Löschwasser.

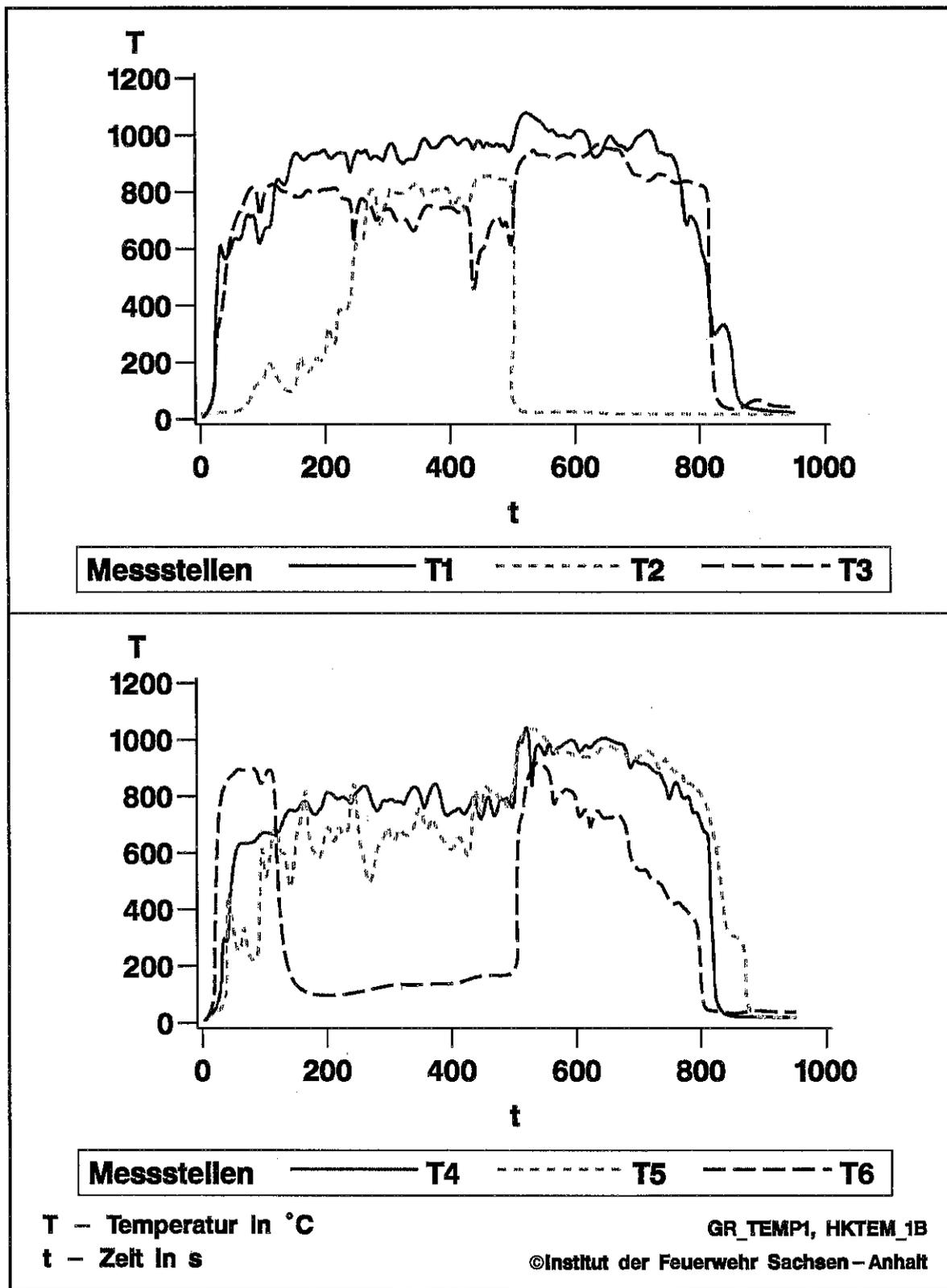


Bild 4.4: Temperaturverläufe beim Versuch BV59



Bild 4.5: Holzkrippe nach dem Brandversuch BV59

Brandversuch BV60

Der Versuch BV60 hatte folgende Parameter:

- ◆ **Brandobjekt:** Holzkrippe 8A längs
- ◆ **Sprühstrahl:** ppnh20, (vgl. Tabelle 2.1)
- ◆ **Entfernung:** 600 cm,
- ◆ **Drehteller:** wurde nicht bewegt,
- ◆ **Bock:** „Auf- und Abwärtsbewegung“ im Winkel von 10°.

Bei diesem Versuch ist die Temperaturmessstelle T_4 dem Sprühstrahl zugewandt (vgl. Bild 4.3). T_4 verhält sich hier analog der Messstelle T_2 beim Brandversuch BV59. Mit Beginn der Löschmaßnahme kühlt sie das Thermoelement schlagartig ab. Die Temperatur bei T_6 sinkt nach der Verbrennung des Zündmittels und steigt nach Löschbeginn deutlich an.

Nach ca. 780 s fällt die Holzkrippe im hinteren Bereich zusammen. Die Messstelle T_1 wird in die inzwischen mit Löschwasser gefüllte Zündwanne gedrückt, was den Temperaturabfall bei ca. 800 s bewirkt. Das Thermoelement der Messstelle T_5 befand sich in einem Glutnest. Obwohl keine Flammenbildung erkennbar war und die Holzkrippe in diesem Bereich bereits zusammengebrochen war, blieben die Temperaturwerte an dieser Stelle hoch.

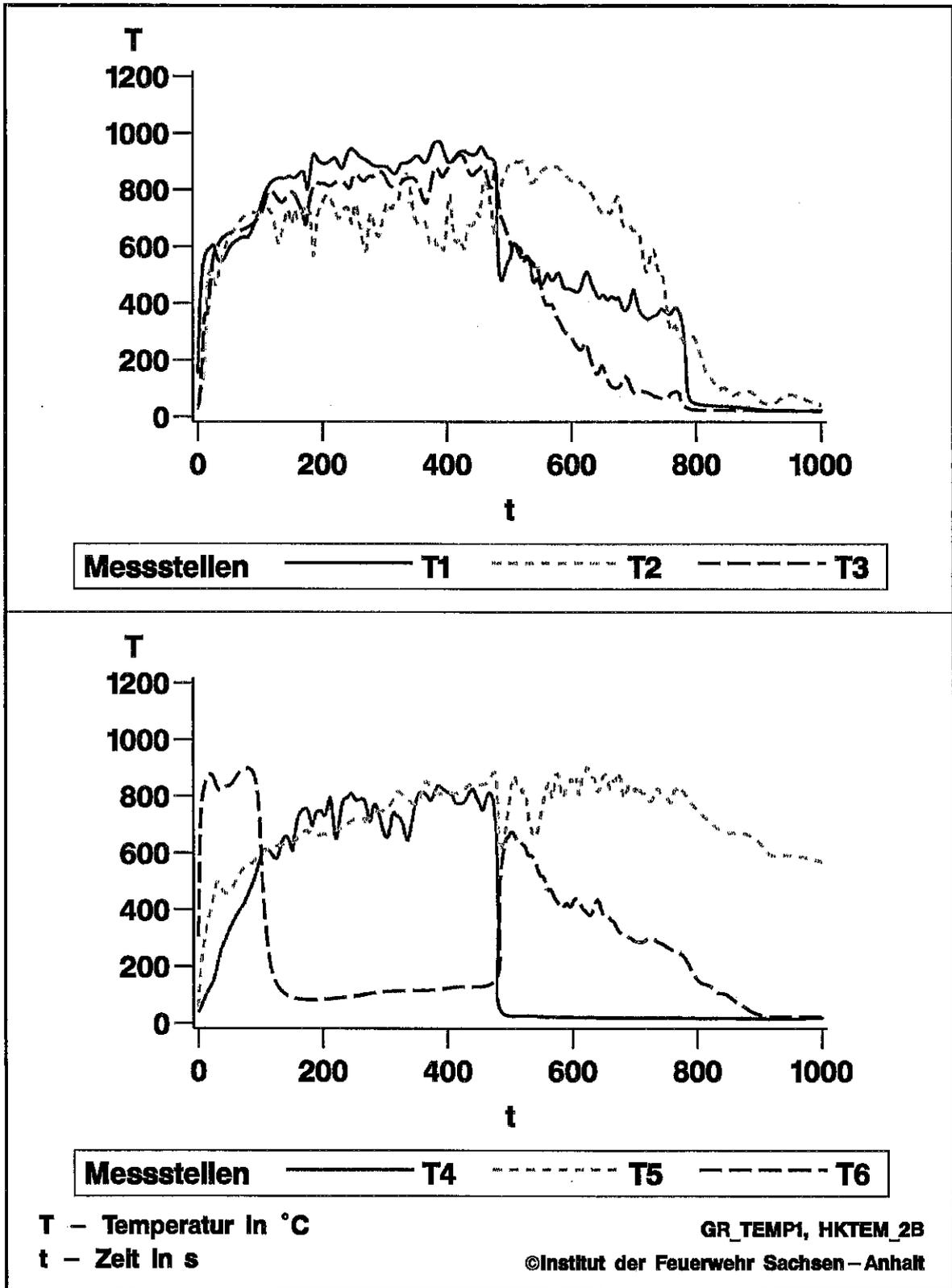


Bild 4.6: Temperaturverläufe beim Versuch BV60

Brandversuch BV63

Der Versuch BV63 hatte folgende Parameter:

- ◆ **Brandobjekt:** Holzkrippe 8A quer
- ◆ **Sprühstrahl:** ppmh39 (vgl. Tabelle 2.1),
- ◆ **Entfernung:** 150 cm,
- ◆ **Drehteller:** wurde nicht bewegt,
- ◆ **Bock:** „Auf- und Abwärtsbewegung“ im Winkel von 10°.

Der Versuch wurde an einem anderen Tag durchgeführt, an dem sich die Witterungsbedingungen verändert hatten. Die Luftfeuchte war um 59% gestiegen. Die Windrichtung hatte sich gedreht. Bei den Versuchen 59 und 60 entwickelte der Wind eine leichte Kaminwirkung im vorderen Bereich des Brandkanals. Beim Versuch BV63 wurde diese Kaminwirkung fast völlig unterbunden und der Rauch teilweise in den Brandkanal gedrückt. Dadurch erreichten die Temperaturstellen am Außenrand der Holzkrippe in der Vorbrennphase nicht die Temperaturen, wie bei den Versuchen BV59 und BV60. Die Temperaturmeßstellen T_1 im Innern und T_6 unterhalb der Holzkrippe lieferten vergleichbare Werte. Nach Beginn der Löschmaßnahme sind bei T_2 und T_6 zunächst die zu erwartenden Verläufe zu beobachten. Der Sprühstrahl ppmh39 ist jedoch in seiner Dimension ein völlig anderer als ppmh20. Hierzu vergleiche man die PDA-Messungen sowie die Sprühbildversuche, die im Folgenden behandelt werden.

Bemerkungen

- ◆ Die Holzkrippen werden nur im vorderen Bereich gelöscht, obwohl der Sprühstrahl bei den Brandversuchen BV50 und BV60 in seiner Ausdehnung die Holzkrippen voll umschließt. Die Sprühstrahlströmung bestimmt bei den verwendeten Löschdüsen die Strömungsverhältnisse, was am Anstieg der untenliegenden Messstelle T_6 nach Öffnen der Düse belegt wird. Die durch den Verbrennungsvorgang in der Vorbrennphase erzeugte Thermik bleibt nach dem Öffnen der Löschdüsen ohne nachweisbare Wirkung, d. h. sie sorgt somit auch nicht mehr für einen zusätzlichen Transport von Tropfen in das Innere der Holzkrippe.
- ◆ Die Brandversuche BV59 und BV60 wurden mit dem gleichen Sprühstrahl ppmh20 durchgeführt. Sie unterscheiden sich lediglich in der Aufstellung der Holzkrippe. Betrachtet man die Temperaturmessstelle T_1 , die im Inneren der Holzkrippe angebracht ist, so liegen zwischen Strahlrohr und Messstelle bei der Längsaufstellung 4 quer gestapelte Hölzer und bei der Queraufstellung nur zwei Hölzer. Die Temperatur T_1 sinkt bei Queraufstellung deutlich schneller als bei der Längsaufstellung. Der Sprühstrahl hat nur eine begrenzte Eindringtiefe. Bei beiden Versuchen blieben etwa drei quer gelegte Hölzer stehen (vgl. Bild 4.5).

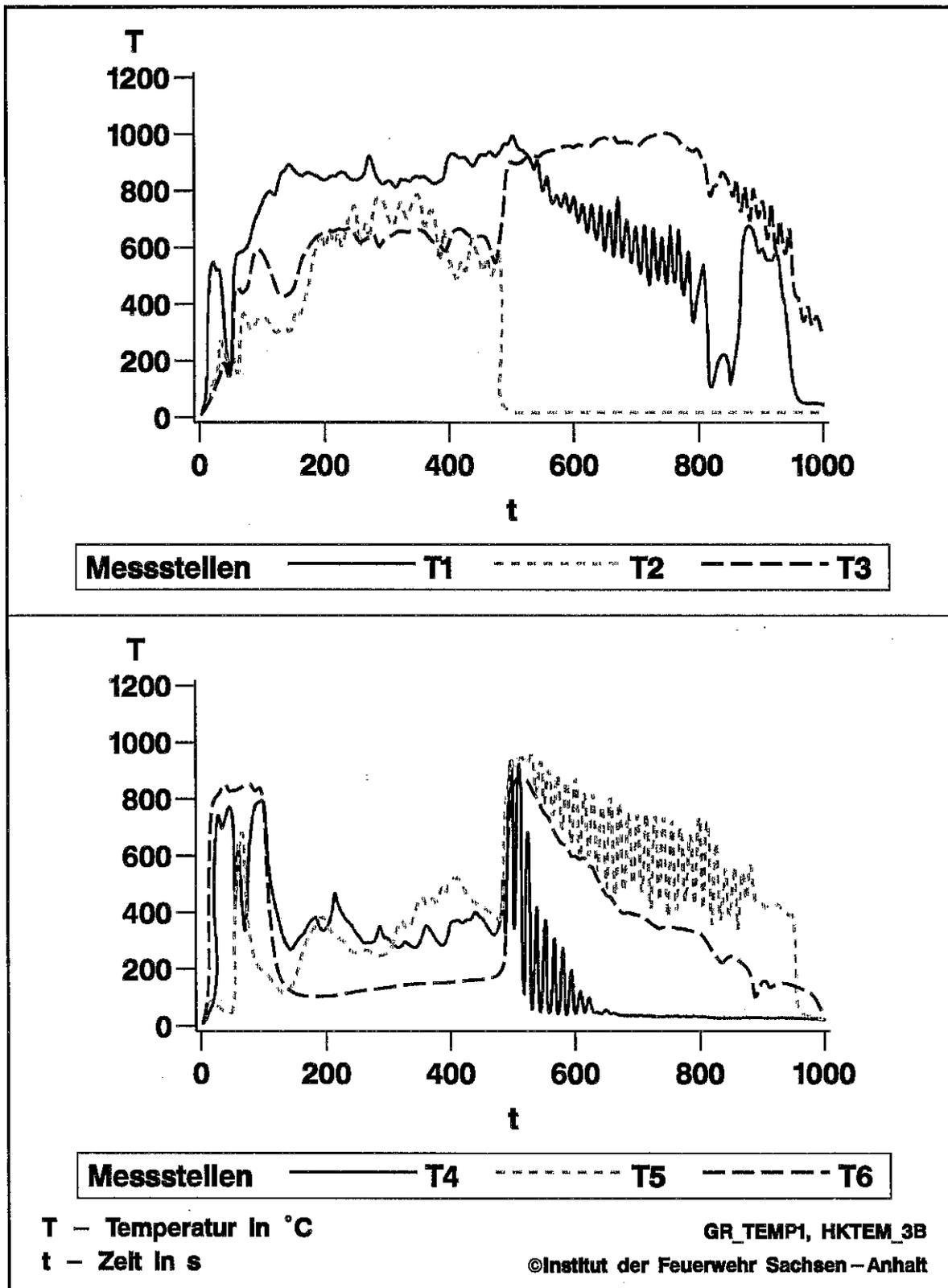


Bild 4.7: Temperaturverläufe beim Versuch BV63

4.2.2 Visuelle Bewertung der Löschversuche bei Holzkrippenbränden

Zunächst erfolgt eine Auswertung der Holzkrippenbrandversuche. Berücksichtigt werden hierbei zwei durch visuelle Beobachtung gewonnene Merkmale.

- ◆ Es werden Zeitpunkte betrachtet, die verschiedenen charakteristischen Phasen (1 bis 5) des Löschprozesses entsprechen. Die fünf unten beschriebenen Zeitpunkte sind in der Datenbankdatei **AFFF.SD2** (vgl. Tabelle 3.2) im Vektor **ctime(i)**, **i=1 ... 5**, abgelegt.
- ◆ Die nach dem Löschversuch noch verbliebene Holzkrippe wurde mit den Ziffern „1“ bis „6“ bewertet, die als „Löschergebnis“ oder „-resultat“ interpretiert werden. Auch dieser Wert ist in dem Datenfeld **res1** von **AFFF.SD2** abgespeichert.

Charakteristische Phasen des Löschprozesses

Tabelle 4.1: Beschreibung der fünf charakteristischen Löschzeiten bei Holzkrippenbränden

Zeitpunkt	Verbale Beschreibung
ctime(1)	Am Ende der Vorbrennzeit befindet sich über der Holzkrippe eine ausgeprägte Flamme. Je nach Wirkung des Sprühstrahls wird diese Flamme unterschiedlich schnell kleiner. Die Phase 1 wird durch den Zeitpunkt ctime(1) begrenzt, von dem ab die Flammenspitzen nur noch 10 bis 20 cm über die Oberkante der Holzkrippe reichen.
ctime(2)	Oberhalb der Holzkrippe sind so gut wie keine Flammen mehr zu beobachten. Im Innern sind aber Flammen noch deutlich erkennbar.
ctime(3)	Die Flammen sind fast völlig verschwunden. Im Inneren ist aber noch deutlich in einem großen Bereich Glut erkennbar.
ctime(4)	Es gibt keinen zusammenhängenden größeren Glutbereich mehr. Es sind aber noch einzelne lokale Glutbereiche erkennbar.
ctime(5)	Es ist keine Glut mehr erkennbar.

Aus der Definition dieser Löschzeiten ist sofort erkennbar, dass die konkreten Zahlenwerte von der subjektiven Bewertung des Betrachters abhängen. Sie werden dann auch um einige Sekunden voneinander abweichen. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass sich in den Grafiken sehr deutliche Unterschiede abzeichnen, die größer sind, als die in dem Bewertungsverfahren begründeten Differenzen.

Visuelle Bewertung des Löschergebnisses

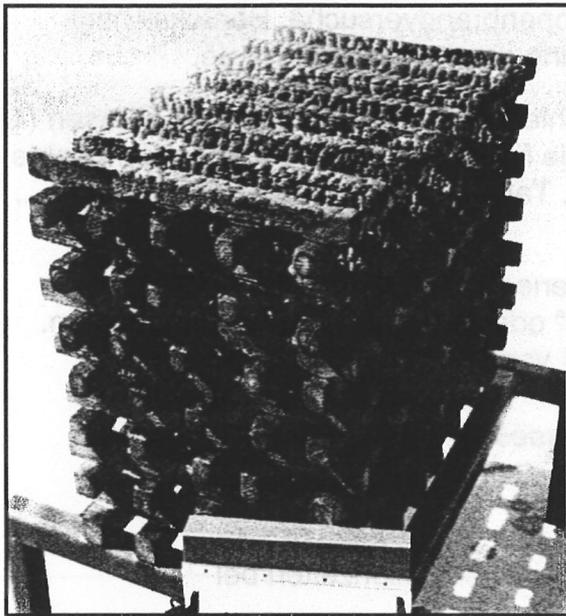


Bild 4.8: Bewertung des Löschergebnisses mit „1“

Löschergebnis: „1“

Wenn im Ergebnis des Löschversuches die Holzkrippe in ihrer Struktur völlig erhalten ist, wird das mit „1“ bewertet. Es ist auch darauf zu achten, dass über der Zündwanne an der Unterseite der Holzkrippe und im Innern die Hölzer noch nicht durchgebrannt sind.

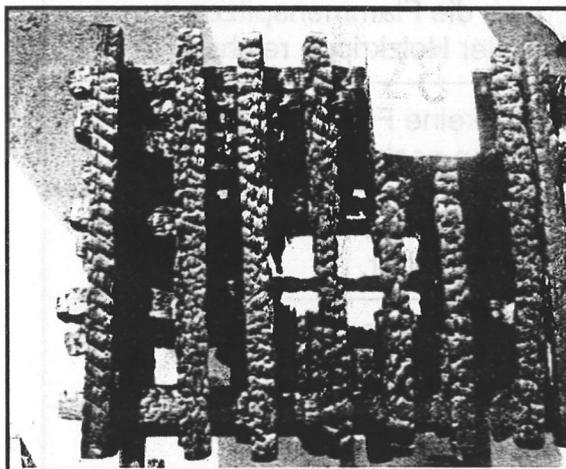


Bild 4.9: Bewertung des Löschergebnisses mit „2“

Löschergebnis: „2“

Die Holzkrippe ist an den Seiten voll erhalten. Auch die Hölzer der obersten Schicht sind noch im Stück vorhanden. Im Innern sind jedoch Hölzer durchgebrannt. In der Draufsicht des Bildes 4.9 ist dies deutlich erkennbar.

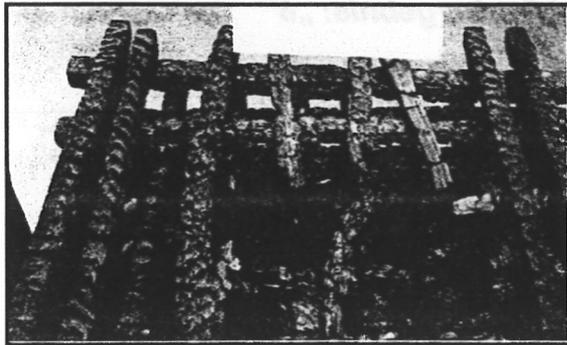


Bild 4.10: Bewertung des Löschergebnisses mit „3“

Löschergebnis: „3“

Die Holzkrippe ist an den Seiten erhalten. In der obersten Lage sind jedoch Hölzer in der Mitte durchgebrannt.

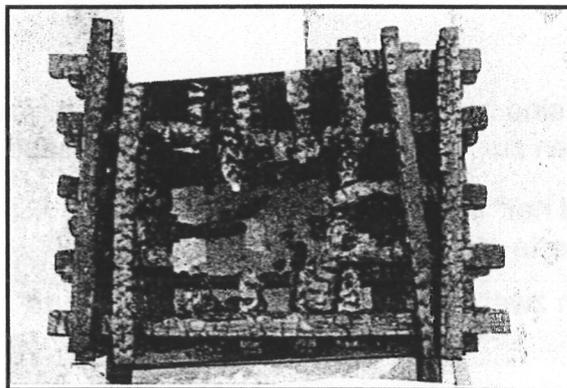


Bild 4.11: Bewertung des Löschergebnisses mit „4“

Löschergebnis: „4“

Der innere Bereich der Holzkrippe ist zusehends weiter ausgebrannt. An den kurzen Seiten sind an jeder Seite jedoch noch fast zwei Hölzer von unten bis oben ganz erhalten. Der freigebrannte innere Hohlraum ist so groß, dass einige durchgebrannte kurze Hölzer der oberen Schicht mit herabgefallen sind.

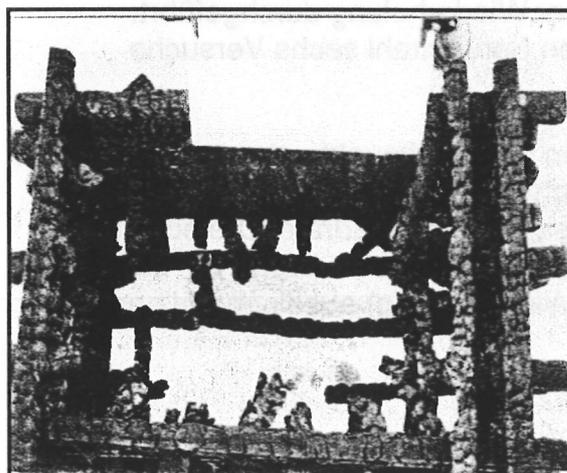


Bild 4.12: Bewertung des Löschergebnisses mit „5“

Löschergebnis: „5“

Die Seiten der Holzkrippe stehen gerade noch. Es ist der gesamte innere Bereich fast ausgebrannt.

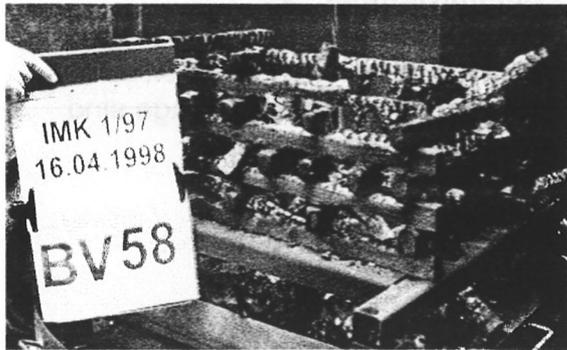


Bild 4.13: Bewertung des Löschergebnisses mit „6“

Löschergebnis: „6“

Die Holzkrippe ist zusammengebrochen.

Versuchsdurchführung

Der Versuchsstand sowie der Versuchsraum sind im Abschnitt 3.1.1 beschrieben. An dieser Stelle seien noch ein paar Bemerkungen zur Versuchsdurchführung gemacht.

- ◆ **Drehteller:** Der Drehteller wurde „hin und her“ in einem Vollkreis von 360 ° gedreht. Eine Bewegung dauerte etwa 40 s.
- ◆ **Bock:** Der Bock führte innerhalb von zwei bis drei s eine „auf und abwärts“ Bewegung durch.

Grafiken

Die Grafiken wurden so gestaltet, dass sowohl die charakteristischen Löschzeiten als auch der Löscherfolg in einem Bild dargestellt sind (s. Bild 4.14). Im Abschnitt 2.3 wurde bereits das Versuchsprogramm erläutert. Für jeden Sprühstrahl wurden Löschergebnisse aus drei Entfernungen mit einer Wiederholung durchgeführt. Dementsprechend sind in den Bildern für jeden Sprühstrahl sechs Versuche berücksichtigt.

Auf der linken Seite sind die charakteristischen Löschzeitpunkte abgetragen und auf der rechten das Löschergebnis. Für beide Sachverhalte wurde jeweils der gleiche Linientyp gewählt. Die Einzelbeobachtungen sind durch Quadrate, Dreiecke und Kreise dargestellt. Es ist ersichtlich, wie weit die beobachteten Werte bei den zwei zusammengehörigen Versuchen (Versuch + Wiederholung) auseinanderliegen.

Sprühstrahl: ppan06

Die Grafik zeigt, dass bei 400 und 600 cm Entfernung ein Löscherfolg mit dem Resultat „1“ eintritt, wobei die charakteristischen Löschezitpunkte mit zunehmender Entfernung deutlich größer werden. Die beiden Geraden für den Löscherfolg auf der rechten Seite fallen aufeinander. Der Sprühstrahl fällt nach 6 m deutlich ab. Dies bewirkt, dass die charakteristischen Löscheziten formal bestimmt werden können, jedoch die Holzkrippe dennoch fast vollständig abbrennt.

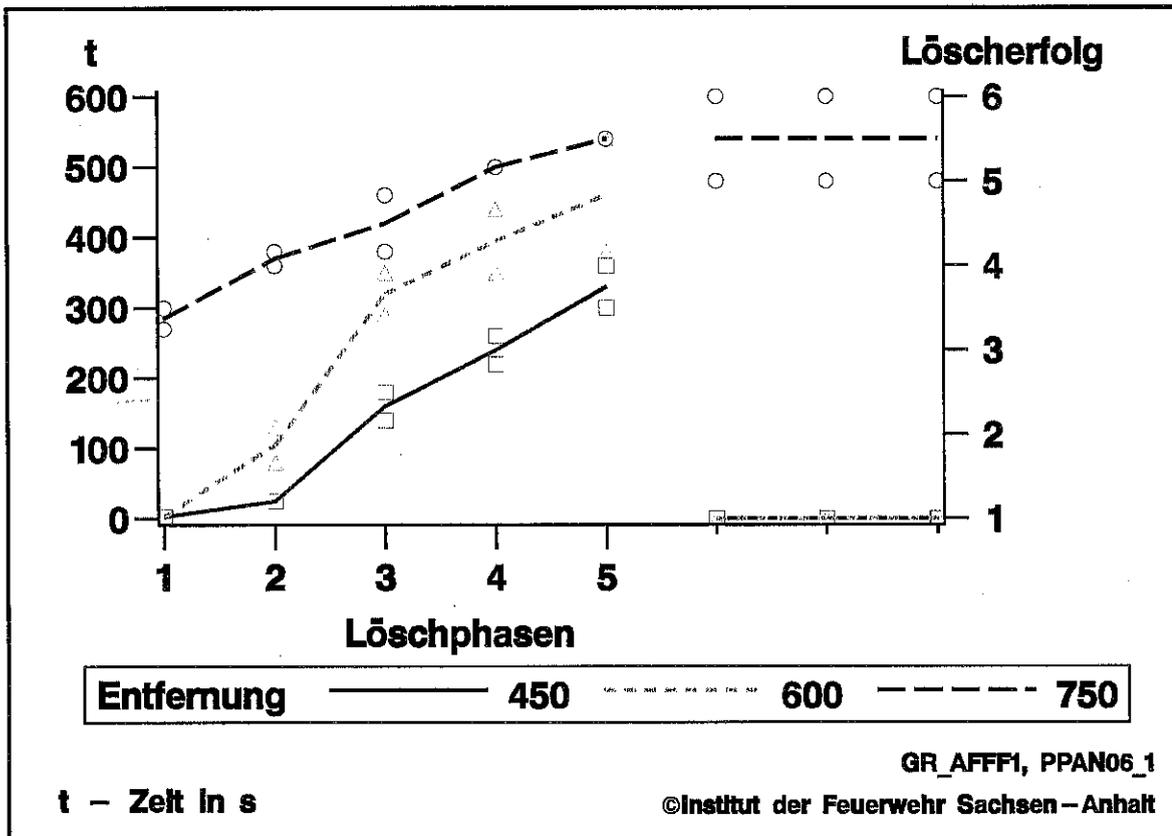


Bild 4.14: Bewertung der Löschversuche bei Holzkruppenbränden beim Sprühstrahl ppan06

Sprühstrahl: ppmh39

Der Sprühstrahl erreicht lediglich an der Oberfläche der Holzkrippe eine Wirkung. Bei der kurzen Entfernung von 150 cm dringt dieser aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeit etwas tiefer in die Holzkrippe ein. Dies bewirkt eine stärkere Eingrenzung des Brandherdes. Er kann jedoch nicht gelöscht werden. Die Krippe brennt in einem Teil des Innenraumes aus.

Der Sprühstrahl ppmh39 ist von kleiner Ausdehnung und führt insgesamt wenig Wasser mit (s. Tabelle 2.1). Betrachtet man den linken Teil des Bildes 4.15, so scheint das Ergebnis Paradox. Je weiter die Holzkrippe entfernt ist, um so kürzer ist die Löschzeit, die der Löschphase „5“ entspricht. Dies ist folgendermaßen zu erklären.

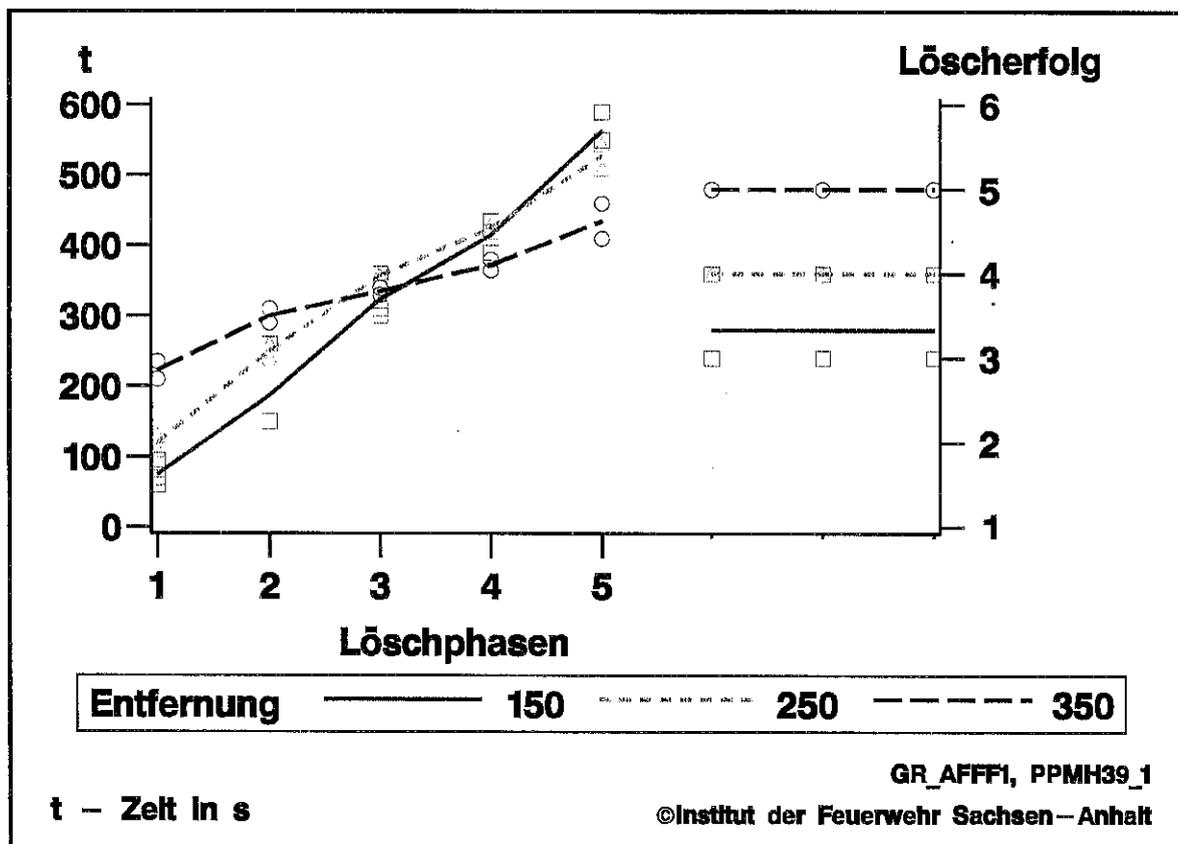


Bild 4.15: Bewertung der Löschversuche bei Holzkrippenbränden beim Sprühstrahl ppmh39

Mit zunehmender Entfernung wird die Eindringtiefe geringer. Das Innere der Holzkrippe wird weniger gekühlt und die Verbrennung läuft zügiger ab. Dadurch bricht das kompaktere Glutnest früher heraus und fällt nach unten in die Zündwanne, in der sich inzwischen auch Löschwasser gesammelt hat. Der äußere Teil bleibt gerade noch stehen. Dies ist die Ursache für die sich mit zunehmender Entfernung scheinbar verbessernden Löschzeiten $ctime(4)$ und $ctime(5)$ (vgl. Bild 4.15).

Dazu passt auch der auf der rechten Seite abgetragene Löscherfolg. Bei der größten Löschentfernung ist die Holzkrippe aufgrund der „ungestörteren“ Verbrennung fast völlig abgebrannt. Bei der kurzen Entfernung führt der Sprühstrahl nicht genug Wasser mit, um das Feuer gut zu löschen. Es ist immerhin soviel Wasser im Sprühstrahl, dass der Brandherd im Inneren stark eingegrenzt wird und „auf kleiner Flamme“ länger brennt, da der Brandstoff Holz länger reicht.

Sprühstrahl: ppnh20

Der Sprühstrahl erreicht bis zu sechs Metern noch eine gute Löschwirkung. Anhand der Videoaufzeichnung konnten hier, wie auch beim folgenden Sprühstrahl, nicht mehr alle Löschphasen deutlich erkannt werden. Dies war vor allem durch den sehr dichten Sprühstrahl bedingt sowie durch eine starke Rauchenwicklung. Diese Zeiten wurden weggelassen.

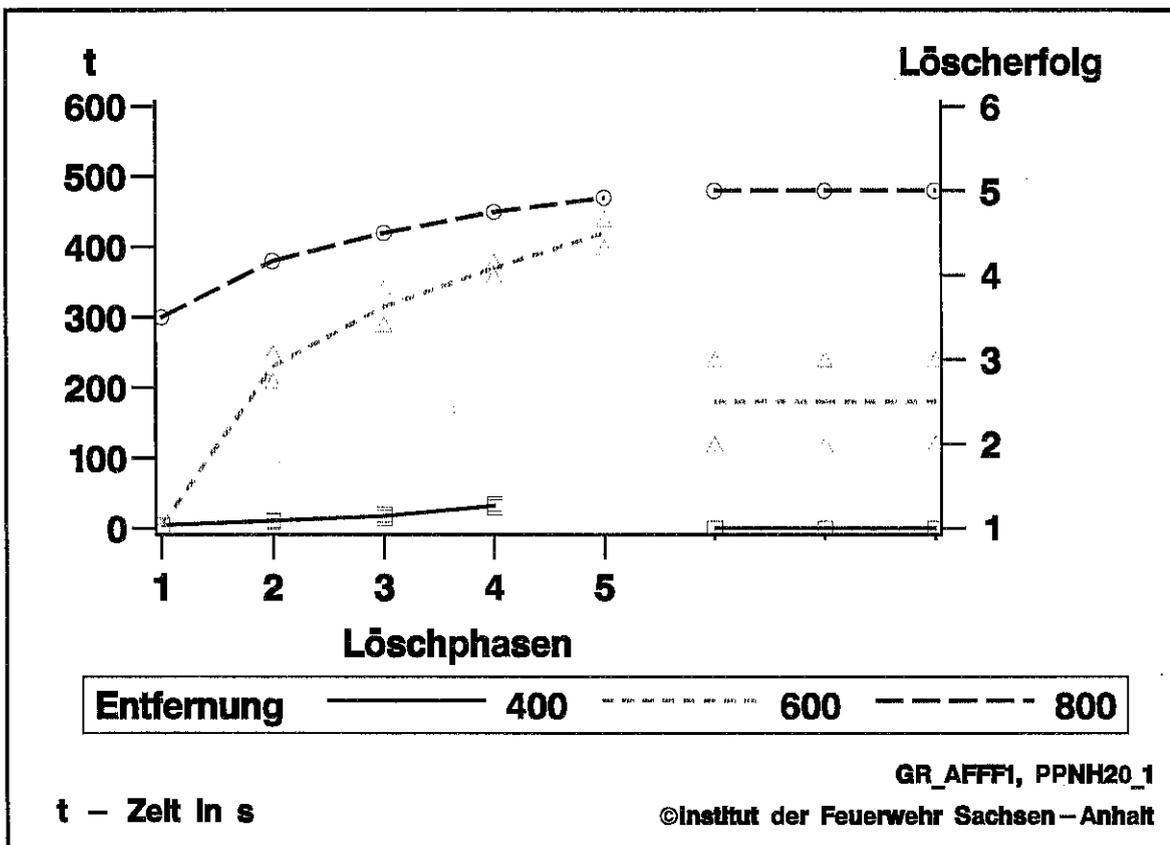


Bild 4.16: Bewertung der Löschversuche bei Holzkrippenbränden beim Sprühstrahl ppnh20

Sprühstrahl: pph35

Dieser Sprühstrahl verfügt auch bei einer Entfernung von mehr als sechs Metern noch über eine vernünftige Löscheigenschaft.

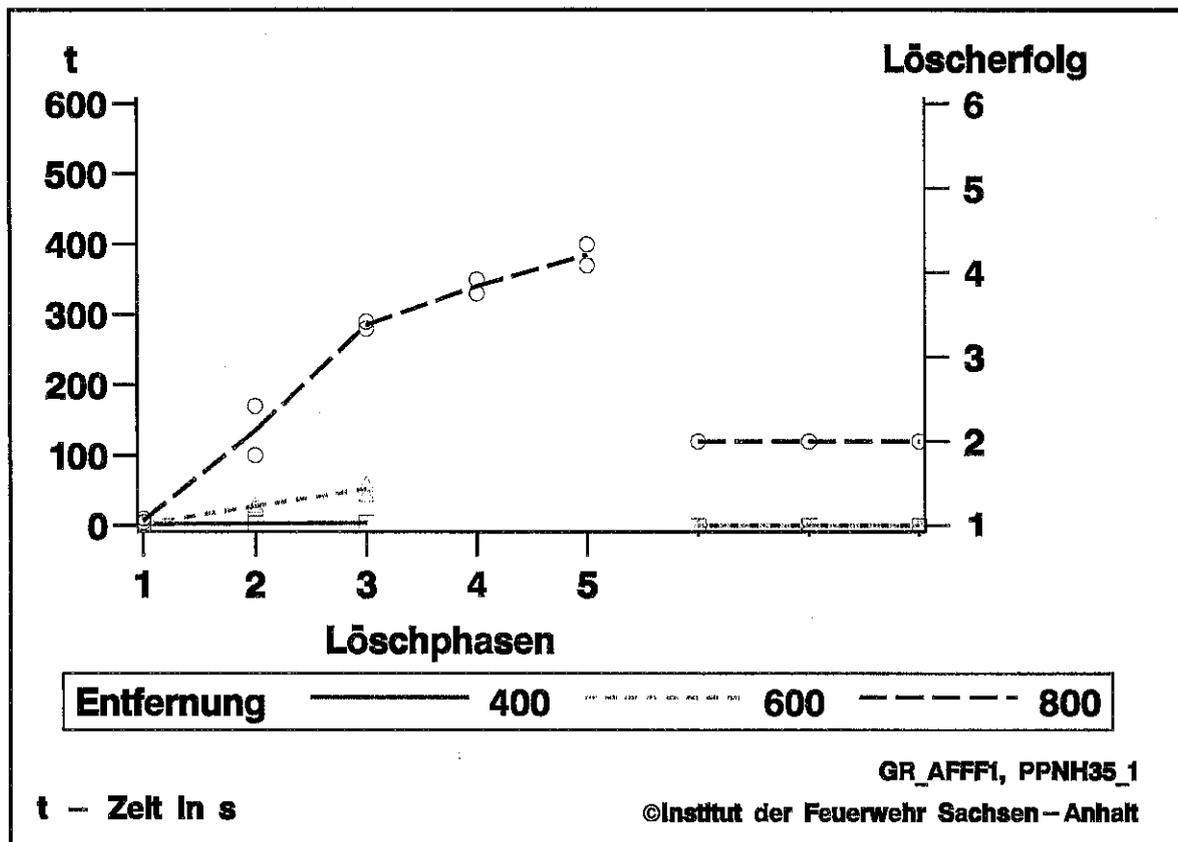


Bild 4.17: Bewertung der Löscheigenschaften bei Holzrippenbränden beim Sprühstrahl pph35

Bemerkungen

- ◆ Wird bei Holzrippenbränden nicht nach ca. 10 bis 20 s die Löschphase „1“ erreicht, so ist in keinem Fall ein Löscherfolg 1 oder 2 erreicht worden.
- ◆ Ein kleiner Sprühstrahl kann den Brand zwar unter Umständen noch begrenzen, ihn aber nicht wirkungsvoll unterdrücken. Die „Gesamtlöschzeit“ kann jedoch überraschenderweise sogar kleiner sein, da der Brandstoff ungehinderter und in einigen Fällen dann auch schneller abbrennt.

4.2.3 Visuelle Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden

Im Folgenden wird auf die durchgeführten Polypropylenbrandversuche eingegangen. Hierbei wurde nur ein durch visuelle Beobachtung gewonnenes Merkmal berücksichtigt. Es entspricht dem der Löschphasen bei den Holzkrippenbränden. Bei den Polypropylenbränden werden jedoch nur drei Phasen betrachtet, die in der Datenbankdatei **AFFS.SD2** (vgl. Tabelle 3.3) im Vektor **ctime(i)**, **i=1 ... 3**, abgelegt sind.

Charakteristische Phasen des Löschprozesses

Tabelle 4.2: Beschreibung der drei charakteristischen Löschzeiten bei Polypropylenbränden

Zeitpunkt	Verbale Beschreibung
ctime(1)	Am Ende der Vorbrennzeit befindet sich in der Brandwanne an der Oberfläche des Polypropylens eine Schmelze, die sehr heftig mit stark ausgeprägter Flamme brennt. Je nach Wirkung des Sprühstrahls wird diese Flamme unterschiedlich schnell kleiner. Die Phase 1 wird durch den Zeitpunkt ctime(1) begrenzt, zu dem bereits die Schmelze an einem Teil der Oberfläche (40 – 60%) erstarrt ist. Die Flammen erstrecken sich nur noch über einen Teil der Brandwanne und sind deutlich niedriger.
ctime(2)	Das Polypropylen brennt nur noch an dem Teil des Randes der Brandwanne, der aufgrund der fast horizontalen Strömung des Sprühstrahls einen Sprühschatten bildet.
ctime(3)	Das Feuer ist vollständig abgelöscht.

In einigen Fällen konnte der Zeitpunkt ctime(2) aufgrund der geringen Zeitdifferenz nicht deutlich abgegrenzt werden. Es wurde dann

$$ctime(2) = ctime(3)$$

gesetzt.

Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurden folgende Parameter gewählt:

- ◆ **Drehteller:** Der Drehteller wurde „hin und her“ in einem Vollkreis von 360° gedreht. Eine Bewegung dauerte etwa 40 s.
- ◆ **Bock:** Der Bock führte innerhalb von 2 bis 3 s eine „Auf- und Abwärtsbewegung“ durch.

Grafiken

Die Grafiken sind hier einfacher gestaltet, da nur ein Merkmal zu berücksichtigen ist.

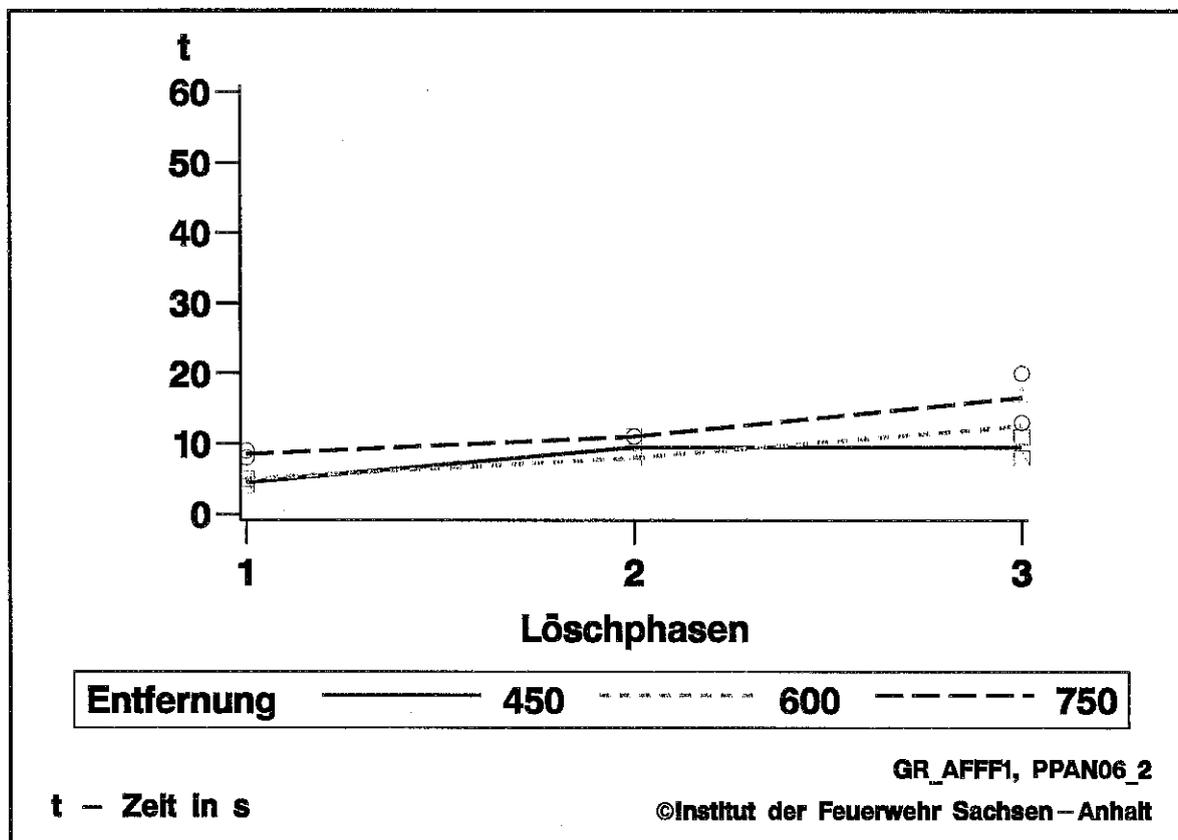


Bild 4.18: Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl ppan06

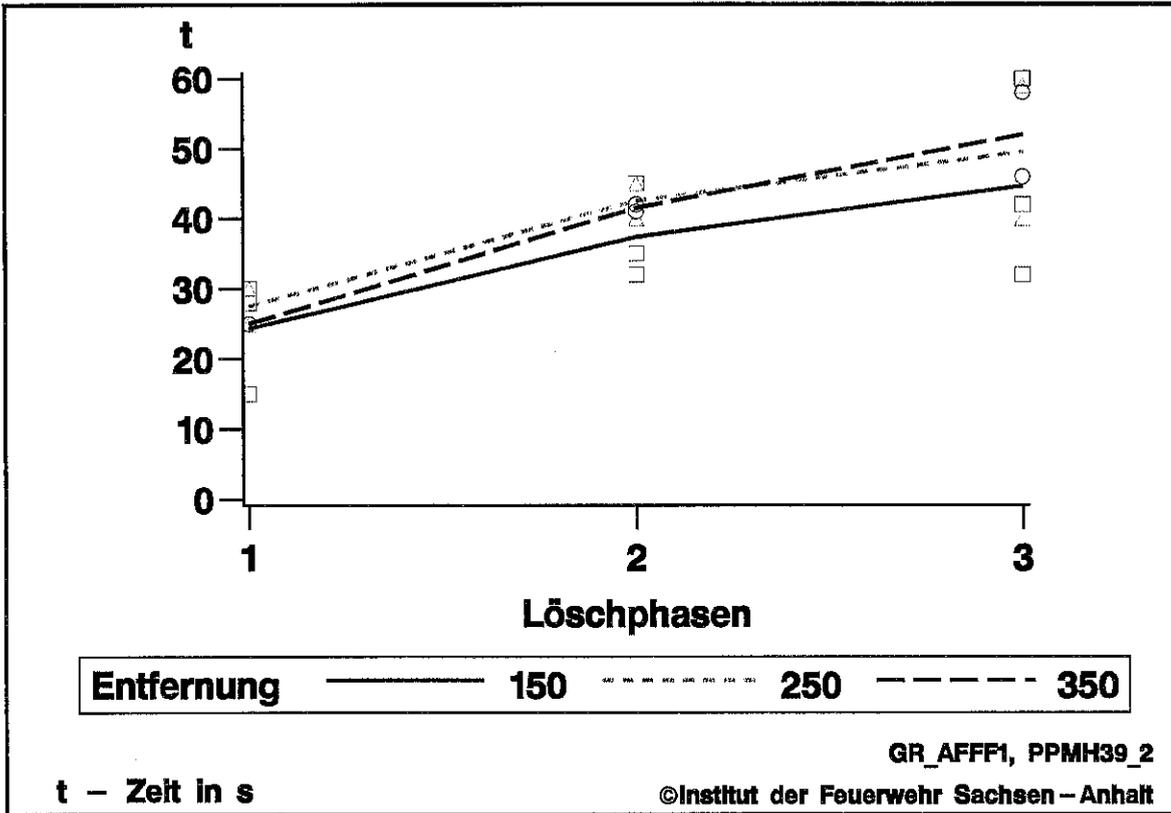


Bild 4.19: Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl ppmh39

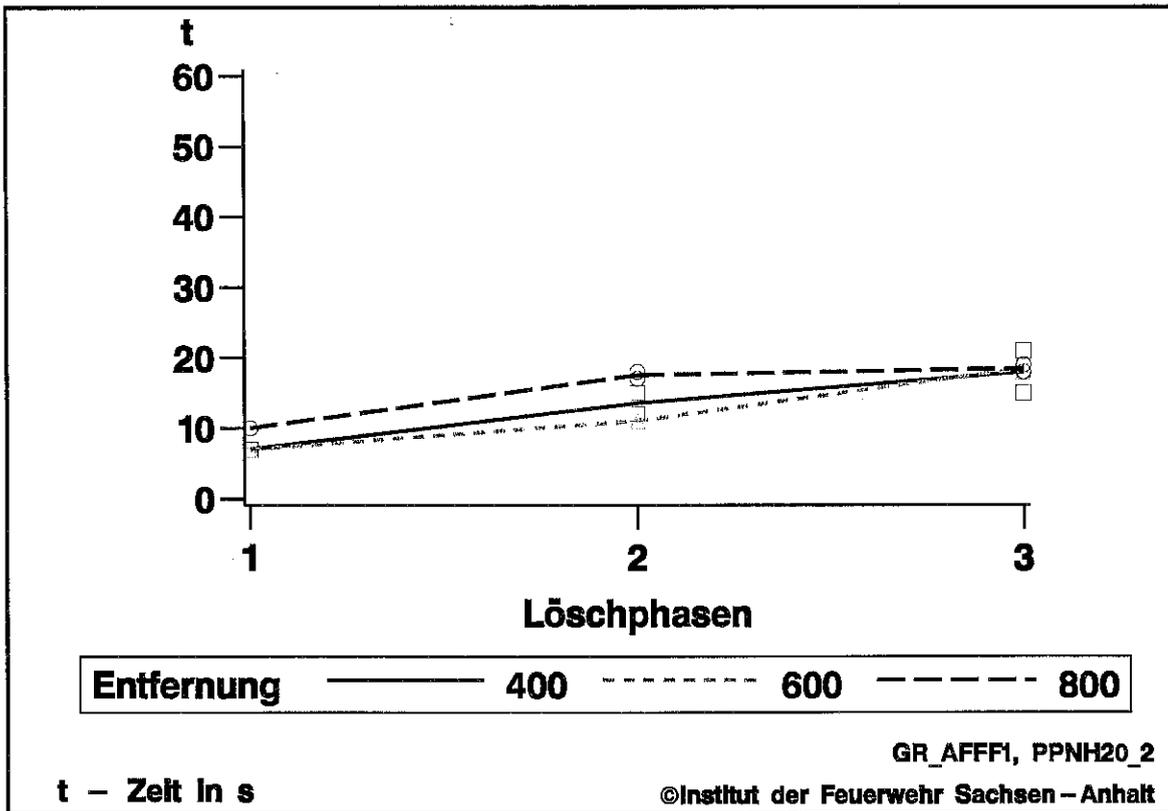


Bild 4.20: Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl pph20

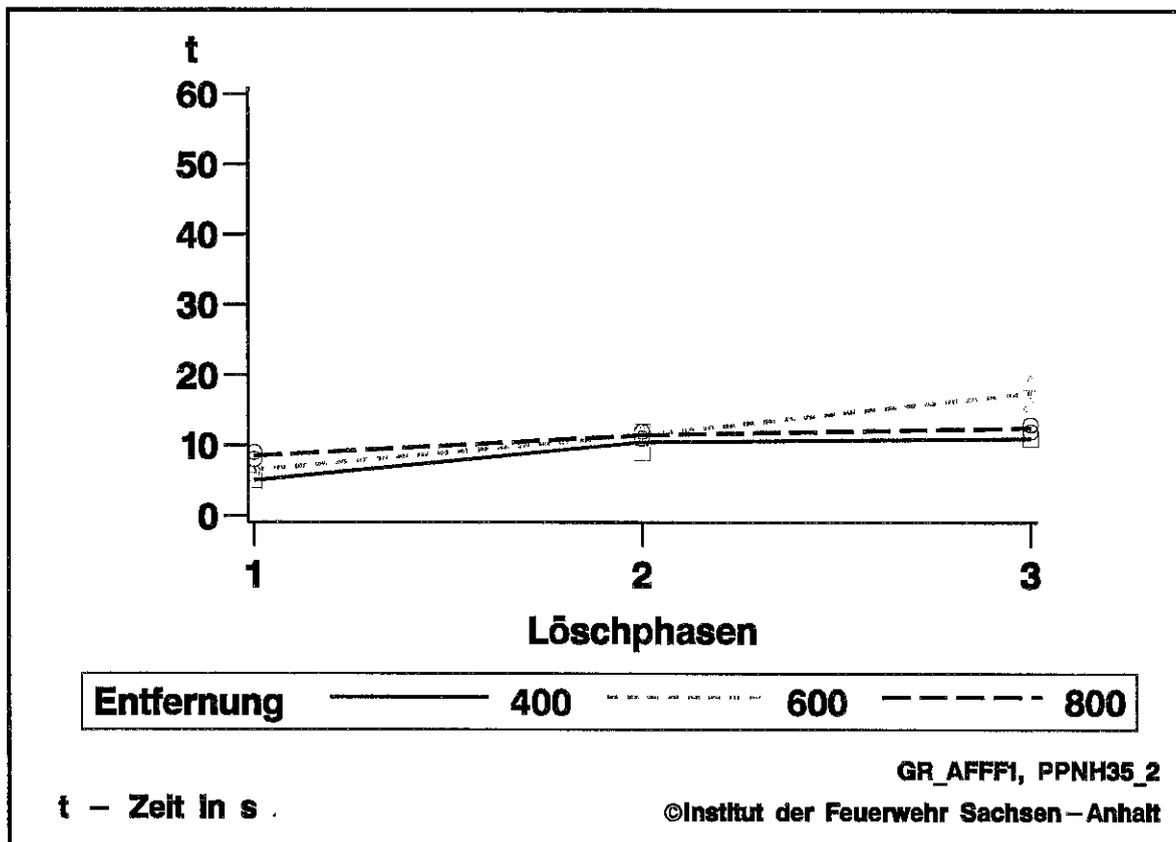


Bild 4.21: Bewertung der Löschversuche bei Polypropylenbränden beim Sprühstrahl ppnh35

Bemerkungen

- ◆ Die Polypropylenbrände konnten von allen Sprühstrahlen gelöscht werden.
- ◆ Die Brandwanne wurde bei den Versuchen durch den Sprühstrahl fast waagrecht angeströmt. Die Oberkante des Polypropylengranulats lag ca. 50 mm unter der Brandwannenoberkante. Dieser Rand wirkte deutlich als Sprüschatten und behinderte das Löschen wesentlich.
- ◆ Einige größere Abweichungen in der Löschphase „3“ bei gleichen Versuchsbedingungen (Sprühstrahl und Entfernung stimmen überein!) sind auf die Wirkung des Sprüschattens zurückzuführen. War z. B. in der Nähe einer Ecke ein kleines Feuer hinter der Kante verblieben und befand sich die Wanne in einer „ungünstigen“ Stellung, so wurde das Feuer erst gelöscht, wenn die Wanne eine halbe Drehung ausgeführt hat und das Feuer wieder direkt durch die Strömung des Sprühstrahls erreicht wurde.

4.3 Sprühversuche auf dem AFF-Versuchsstand

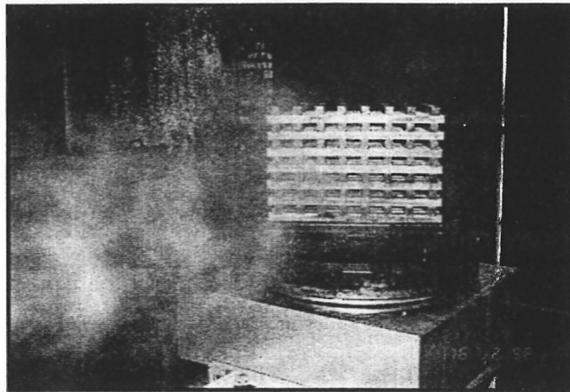


Bild 4.22: Sprühversuch bei einer Holzkippe

Die räumliche Ausdehnung der Sprühstrahlen war sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund wurden, wie im Abschnitt 2.3 bereits erläutert, Sprühversuche durchgeführt. Bild 4.22 zeigt einen derartigen Versuch für eine Holzkippe.

Den Brandversuchen entsprechend wurde sowohl der Drehteller als der Bock aktiviert. Für jeden Sprühstrahl und jede bei den Brandversuchen ausgewählte Entfernung wurde über mehrere Minuten das auf das Brandobjekt auftreffende Wasser

aufgefangen. Dabei wurden natürlich auch Tropfen reflektiert, die nicht in die darunter befindliche Wanne abtropften. Da die Holzkippe auf einem Gestell aufgestapelt wurde, sind wiederum andere Tropfen direkt in die Auffangwanne gefallen, ohne die Krippe getroffen zu haben. Insgesamt sind diese Einflüsse vergleichsweise gering, sodass der erhaltene Wert als aussagekräftig angesehen werden kann. Er dient dazu, weitere Sachverhalte zum Löschvorgang abzuleiten.

An dieser Stelle ist die Einführung von Größen erforderlich, die sich auf strömende Gase oder Flüssigkeiten gleichermaßen beziehen. Dafür wird kurz der in der Strömungsmechanik übliche Begriff eines Fluids verwendet.

Strömt ein Fluid z. B. durch eine Fläche, das kann z. B. der Querschnitt eines Rohres, eine Öffnung in einer Wand oder eine beliebig anders definierte Fläche sein, so kann die Strömung dadurch charakterisiert werden, dass die Masse oder das Volumen angegeben wird, das durch diese Fläche strömt. Zur Charakterisierung dieses Stroms wird dementsprechend auch vom Massenstrom I_m oder vom Volumenstrom I_v gesprochen. Zwischen beiden gilt die Beziehung

$$I_m = \rho * I_v, \quad (4.1)$$

wobei ρ die Dichte des Fluids ist. Die Dichte sei in $g/cm^3 = kg/dm^3$ angegeben. Bei Flüssigkeiten wird gewohnheitsgemäß auch das Liter verwendet, wofür ja bekanntermaßen $1 dm^3 = 1 l$ gilt. Der Massenstrom I_m wird in „Masse/Zeit“ angegeben, d. h. hier in kg/min oder g/s . Für den Volumenstrom I_v ist „Volumen/Zeit“ zu verwenden. Da im Rahmen dieser Arbeit die Flüssigkeit „Löschwasser“ betrachtet wird, werden die Maßeinheiten l/min oder ml/s verwendet. Die Messungen der Ströme des Wassers erfolgten immer bei Temperaturen um die $20\text{ }^\circ\text{C}$. Hier hat Wasser die Dichte sehr nahe bei $1 g/cm^3$, sodass bei entsprechender Wahl der Maßeinheiten der Massenstrom (in kg/min) zahlenmäßig mit dem Volumenstrom (in

l/min) übereinstimmt. In den Bildern zu den Löschwasserströmen wird grundsätzlich der Volumenstrom dargestellt. Da für Wasser die Dichte 1 g/cm^3 ist, kann der Volumenstrom auch ohne weitere Umrechnung durch Wiegen bestimmt werden. Bei den Sprühversuchen wurde der Volumenstrom aus einer Massendifferenz ermittelt.

Es ist wichtig zu wissen, wieviel Wasser im Sprühstrahl, d. h. einer Zweiphasenströmung, an einer bestimmten Koordinate strömt. Messen kann man das, indem man mit einer Sonde, die einen bestimmten Querschnitt hat, die Wassertropfen „auffängt“. Man misst in diesem Fall eine Größe mit der Einheit „Masse/(Zeit*Fläche)“. Diese Größen werden in Anlehnung an (4.1) als Komponente der Massenströmdichte senkrecht zur Sondenoberfläche mit j_m und analog als Volumenstromdichte j_v bezeichnet. Auch hier gilt

$$j_m = \rho * j_v \quad (4.2)$$

Der Zusammenhang zu den Strömen ergibt sich über ein Flächenintegral mit

$$I_m = \int_A j_m dA \quad \text{und} \quad I_v = \int_A j_v dA \quad (4.3)$$

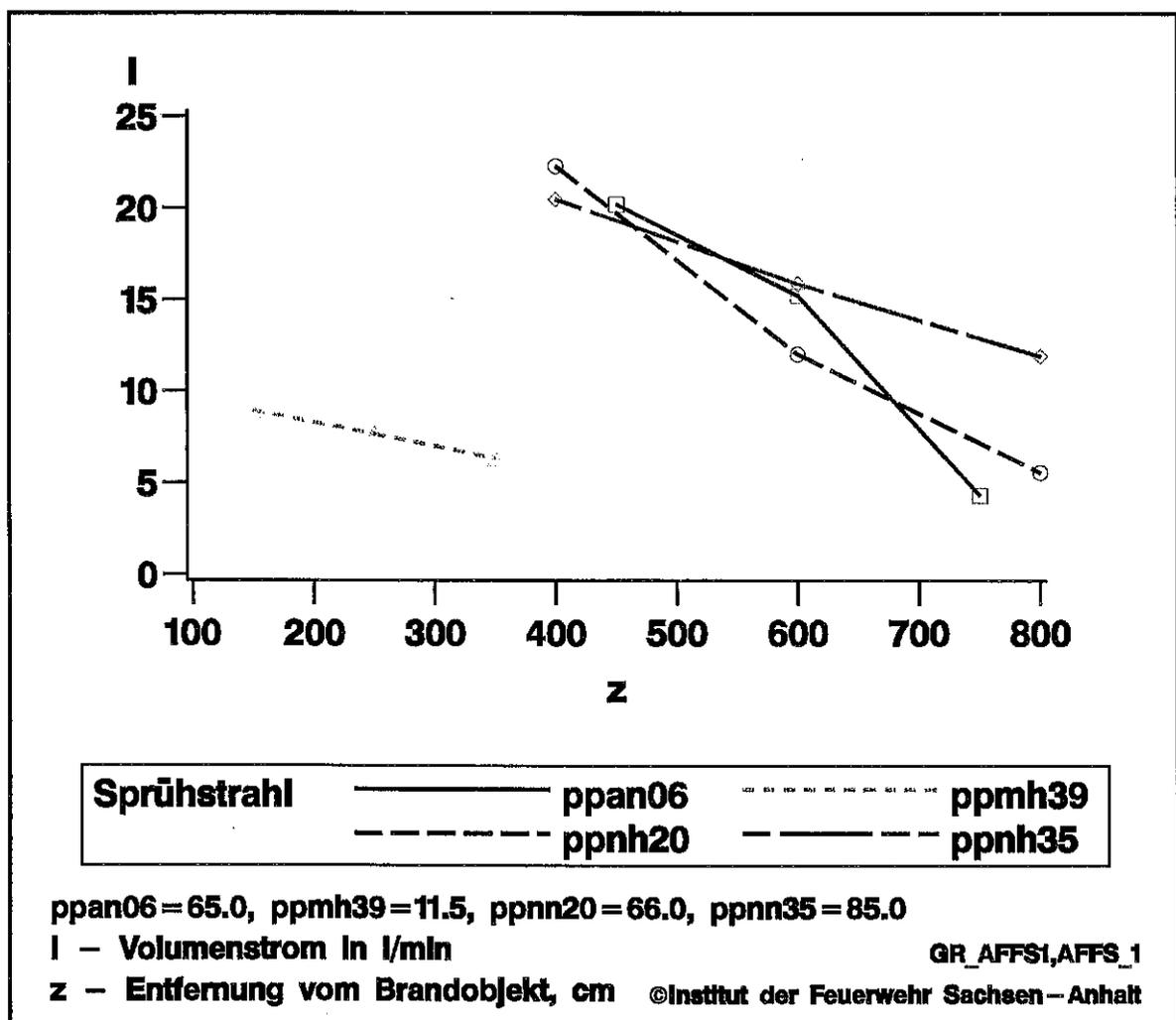


Bild 4.23: Ergebnisse der Sprühversuche für die Holzkruppe 8A

In diesem Bericht sind in den betreffende Grafiken die Volumenstromdichten in $ml/(s \cdot cm^2)$ dargestellt (s. Abschnitt 4.5).

Im Bild 4.23 sind die Volumenströme des Löschwassers für die Holzkrippenbrände angegeben, d. h. das Löschwasservolumen, das auf das Brandobjekt auftrifft. Bild 4.24 enthält die analoge Darstellung für die Polypropylenbrände.

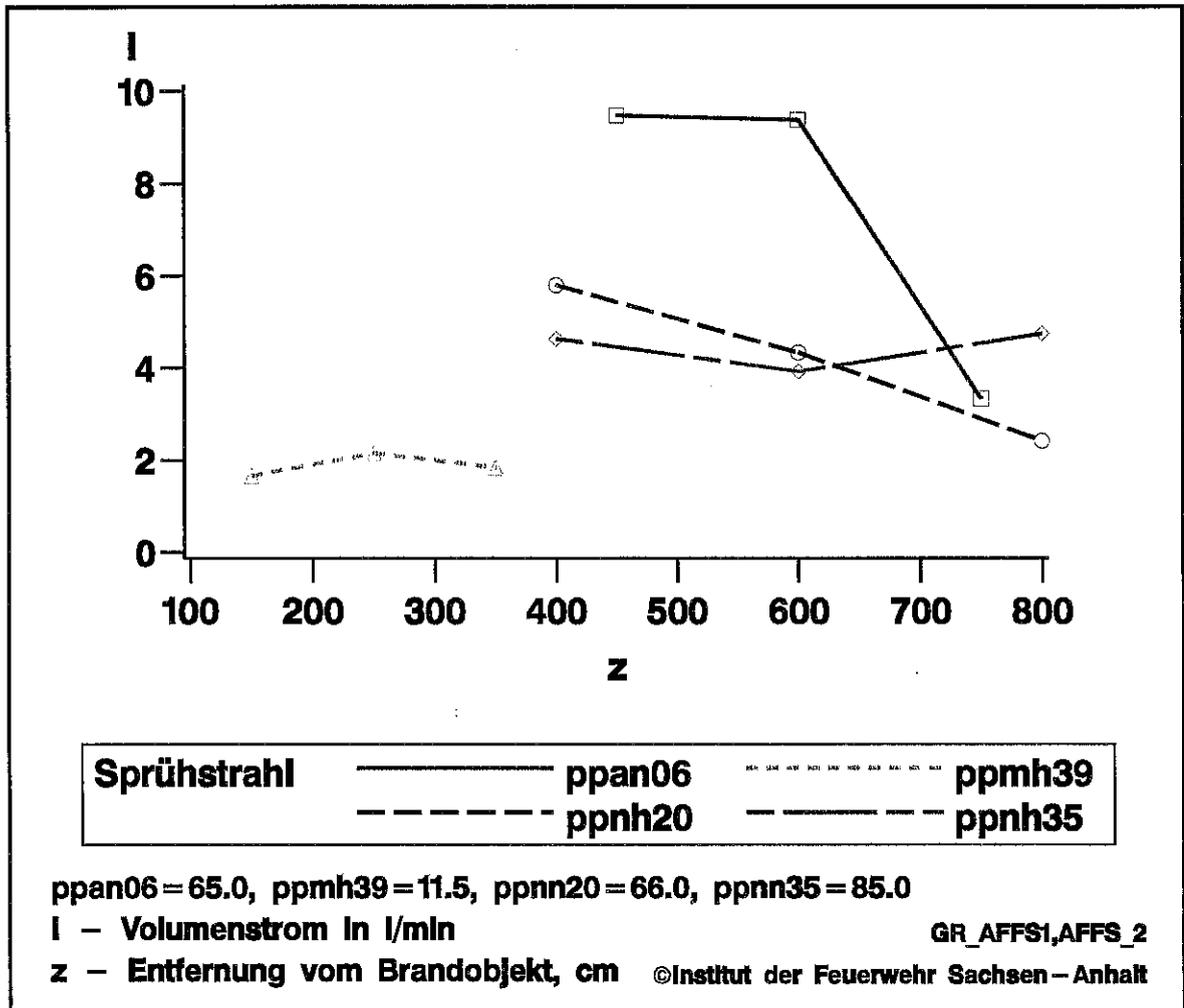


Bild 4.24: Ergebnisse der Sprühversuche für die Polypropylenbrandwanne

Bemerkungen

- ◆ Der Sprühstrahl ppmh39 führt insgesamt deutlich weniger Wasser mit, als die anderen Sprühstrahlen (vgl. Tabelle 2.1). Der gesamte durch die Pumpe geförderte Volumenstrom ist auch in der Legende in den zwei Bildern mit angegeben. Da der Sprühstrahl eine räumlich kleine Ausdehnung hat, trifft aufgrund der geringen Entfernung jedoch vergleichsweise viel Wasser auf die Holzkrippen (s. Bild 4.23).

4.4 PDA-Messungen im Nasslabor

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass eine effektive Auswertung der großen anfallenden Datenbestände bei PDA-Messungen eine leistungsfähige Datenbanksoftware erfordert, in die auch entsprechende Grafik- und Statistikkomponenten integriert sind. Die Schritte der Ergebnisaufbereitung von der Messung bis hin zur Grafik sind bei [Starke et al. 96a] im Einzelnen erläutert. Am IdF LSA wird zu diesem Zweck das SAS[®]-Statistikpaket verwendet (s. auch Abschnitt 3.3).

Grafische Auswertungen für den Sprühstrahl ppan06

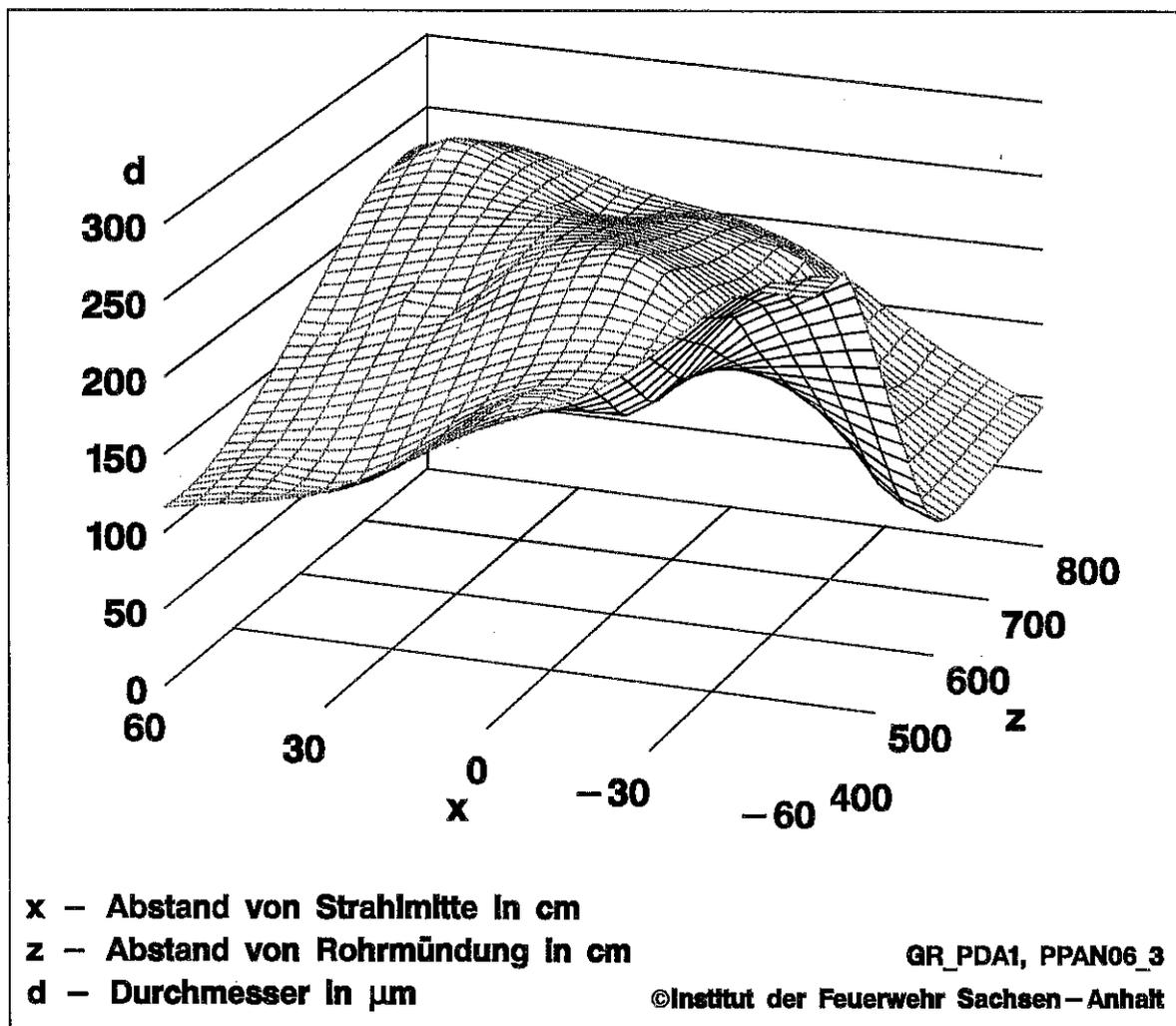


Bild 4.25: Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppan06

Von den vielen möglichen grafischen Darstellungen seien zunächst zwei Darstellungen für die mittleren Tropfendurchmesser und zwei für die mittleren Tropfengeschwindigkeiten angeführt. Die Messpunkte wurden hierbei so gewählt,

dass sie in der horizontalen Ebene liegen, die durch die Strahlrohrmündung verläuft. Die y -Koordinaten aller Messpunkte (vgl. Bild 3.10) sind also stets gleich Null.

Bild 4.25 enthält in der horizontalen (x - z)-Ebene die Messpunkte. x ist hierbei der horizontale Abstand von der Strahlmitte und z der Abstand der Messebene von der Strahlrohrmündung. Auf der vertikalen Koordinate sind die dazugehörigen mittleren Tropfendurchmesser angegeben. Die z -Koordinaten wurden so gewählt, dass die kleinste mit der kürzesten Entfernung bei den Löschversuchen übereinstimmt und die größte dementsprechend mit der längsten Entfernung.

Sind bei der resultierende Oberfläche nur geringe Höhenunterschiede vorhanden, so ist das, wie bei den Bildern 4.29, 4.34 und 4.38, meist ein Hinweis darauf, dass sich der Sprühstrahl einem monodispersen Zweiphasensystem annähert. Bei stark polydispersen Sprühstrahlen ergeben sich ausgeprägte Hügel wie beim Bild 4.25. Diese Darstellung ist insbesondere für den visuellen Vergleich verschiedener Sprühstrahlen geeignet.

Für die mittleren Tropfengeschwindigkeiten wurde eine analoge Darstellung erstellt (Bilder 4.26, 4.31, 4.35 und 4.39).

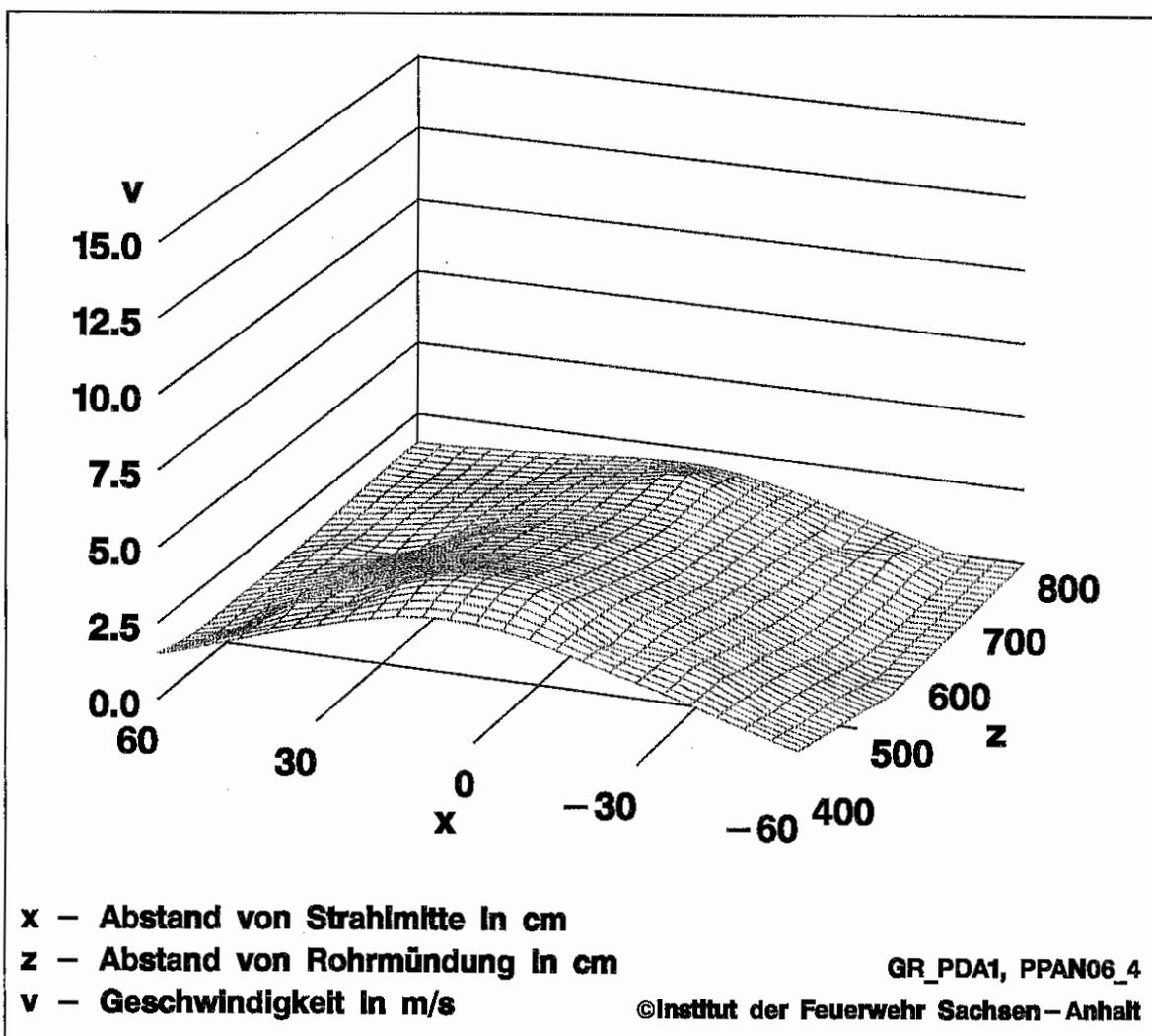


Bild 4.26: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppan06

Die Änderung der mittleren Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten kann deutlich gemacht werden, wenn für verschiedene Abstände von der Strahlrohrmündung, d. h. für verschiedene z-Werte, Schnitte durch die eben betrachteten Oberflächenprofile gelegt werden. Die Bilder 4.27 und 4.28 enthalten für drei z-Werte die resultierenden Kurven. Die z-Werte stimmen mit den Entfernungen bei den Löschversuchen überein. Es ist gut erkennbar, wie die mittleren Geschwindigkeiten in der Strahlmitte bei größer werdenden z-Werten abnehmen. Im Bild 4.27 ist erkennbar, wie komplex die Tropfendynamik in dieser Zweiphasenströmung ist und wie stark die Durchmesser schwanken. Es sei hier darauf hingewiesen, dass am Rand des Sprühstrahls die Tropfenraten für die PDA-Messungen wesentlich kleiner sind. Demzufolge ist die statische Sicherheit geringer als in der Mitte. Die Kurven sollten an den Randbereichen nicht so stark bewertet werden. Das gilt sowohl für die Durchmesser als auch für die Geschwindigkeiten.

Die folgenden Bilder zeigen die analogen Darstellungen für die Sprühstrahlen ppmh39, ppnh20 und ppnh35.

Grafische Auswertungen für den Sprühstrahl ppmh39

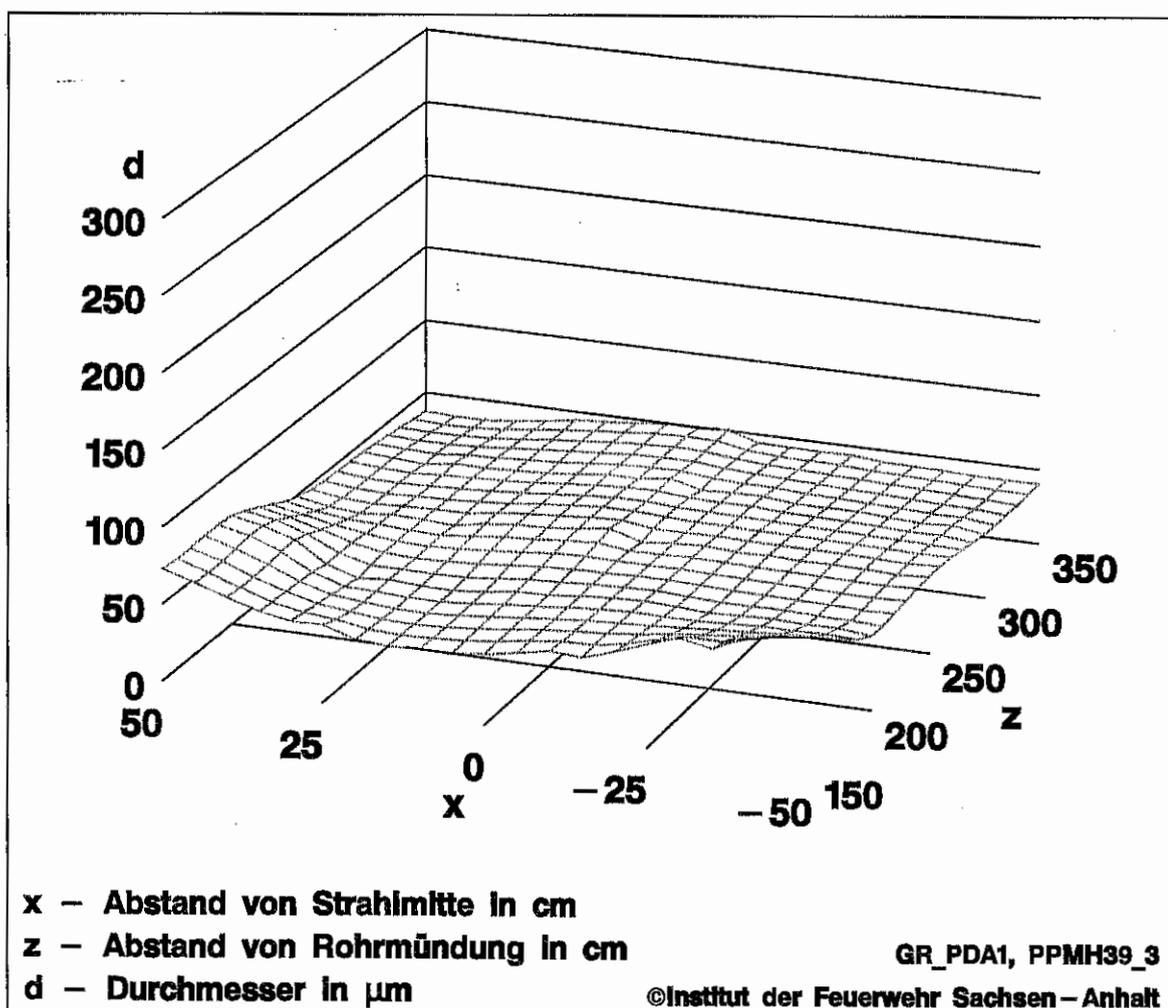


Bild 4.29: Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39

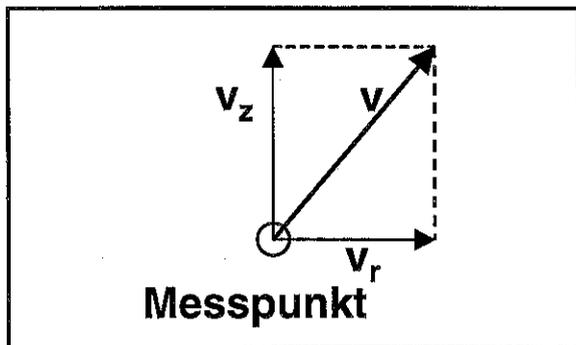


Bild 4.30: Geschwindigkeitskomponenten im Sprühstrahl

Es wurde schon darauf hingewiesen (s. Abschnitt 3.1.2), dass mit dem PDA in der uns verfügbaren Konfiguration nur die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung gemessen werden kann. Tatsächlich dehnt sich ein Sprühstrahl jedoch auch in radialer Richtung aus. Die Tropfen haben also auch noch diese Geschwindigkeitskomponente, die nach außen zeigt (s. Bild 4.30). Wird diese Komponente bei gleichbleibender Geschwindigkeit größer, reduziert sich dadurch die z-Komponente, was bei der Interpretation

der Bilder zu beachten ist. Die Bilder zu den Tropfengeschwindigkeiten enthalten nur die Komponente in z-Richtung. Die tatsächliche Tropfengeschwindigkeit kann diesen Darstellungen nicht entnommen werden. In der Nähe der Strahlmitte ist die radiale Komponente jedoch vernachlässigbar.

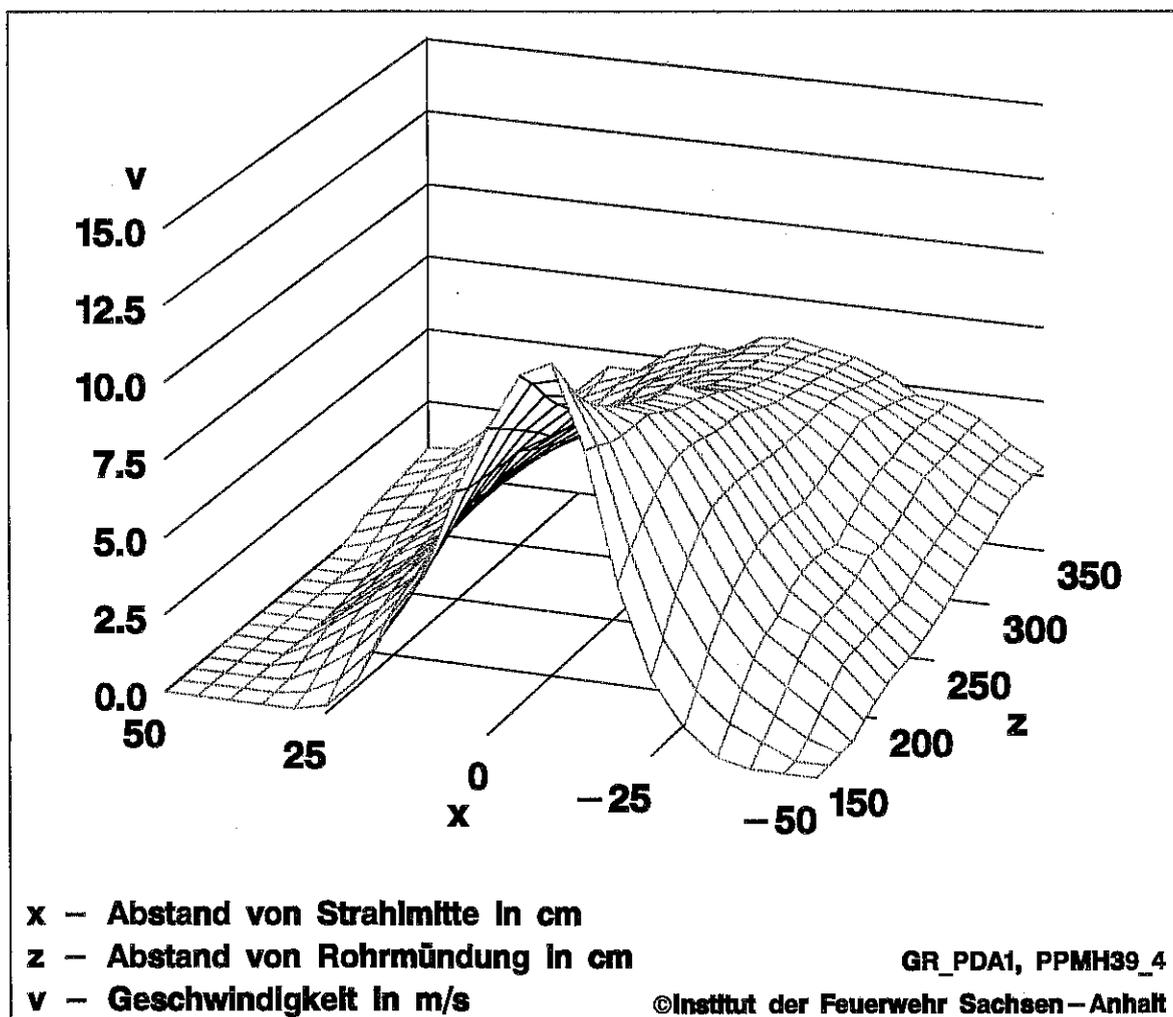


Bild 4.31: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39

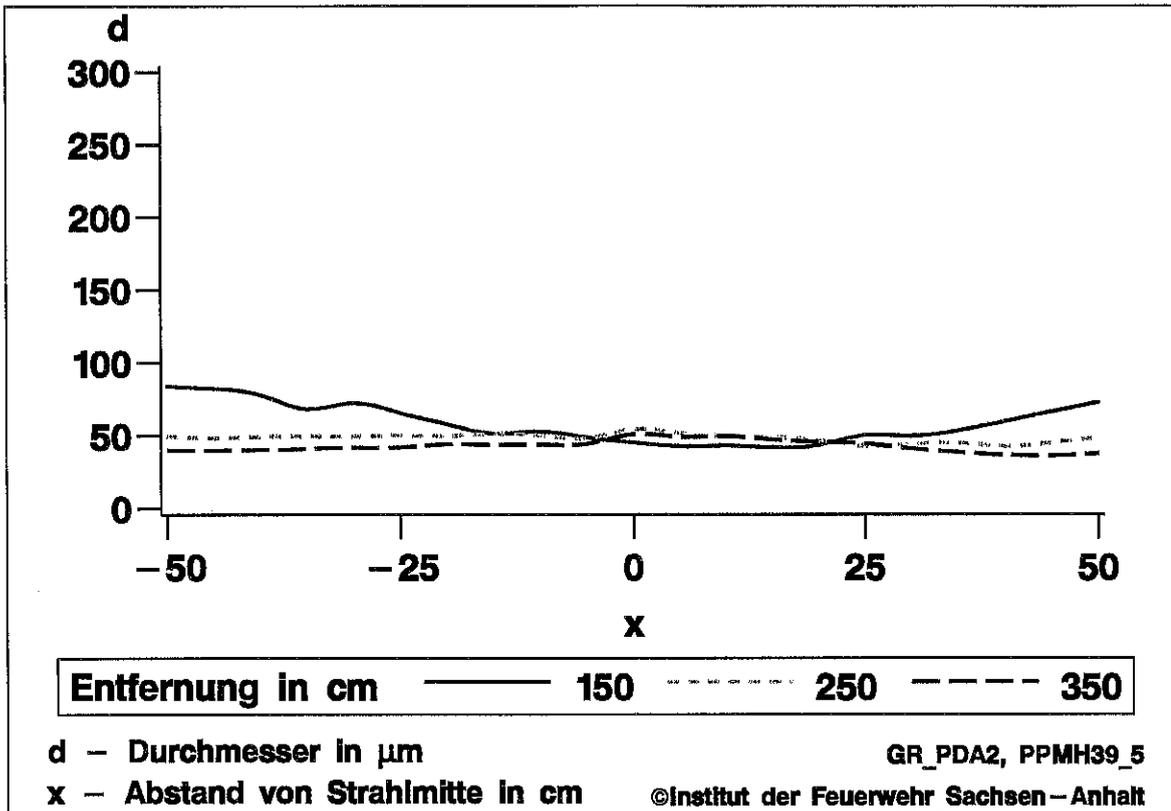


Bild 4.32: Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39 für verschiedene Entfernungen

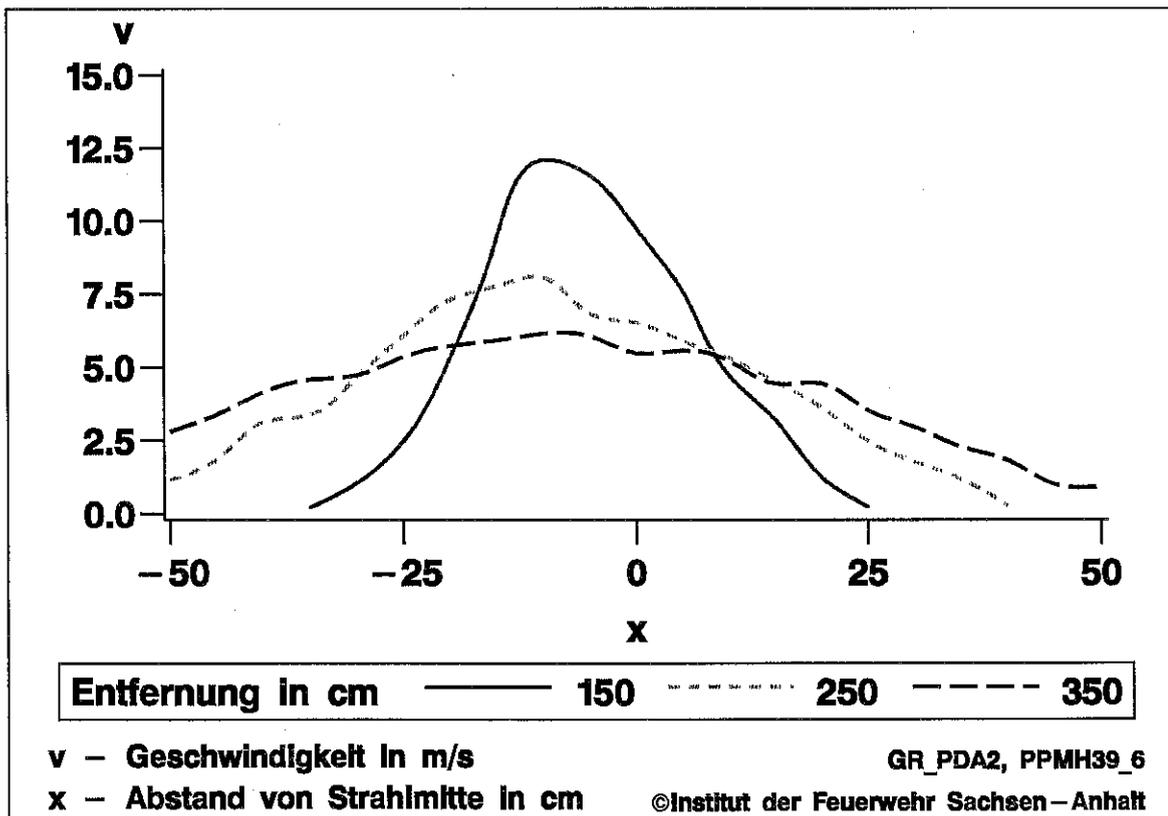


Bild 4.33: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppmh39 für verschiedene Entfernungen

Grafische Auswertungen für den Sprühstrahl ppnh20

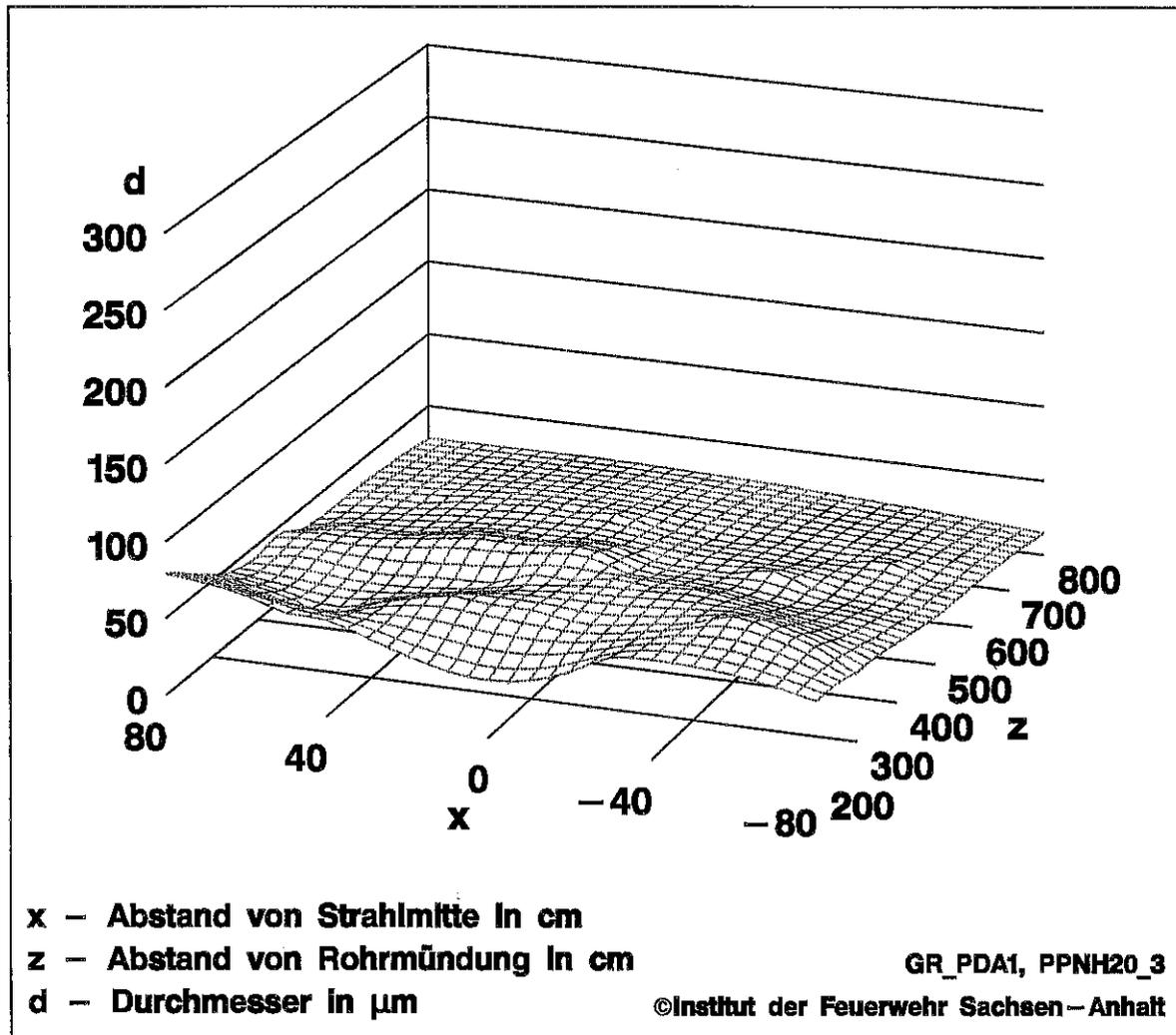


Bild 4.34: Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh20

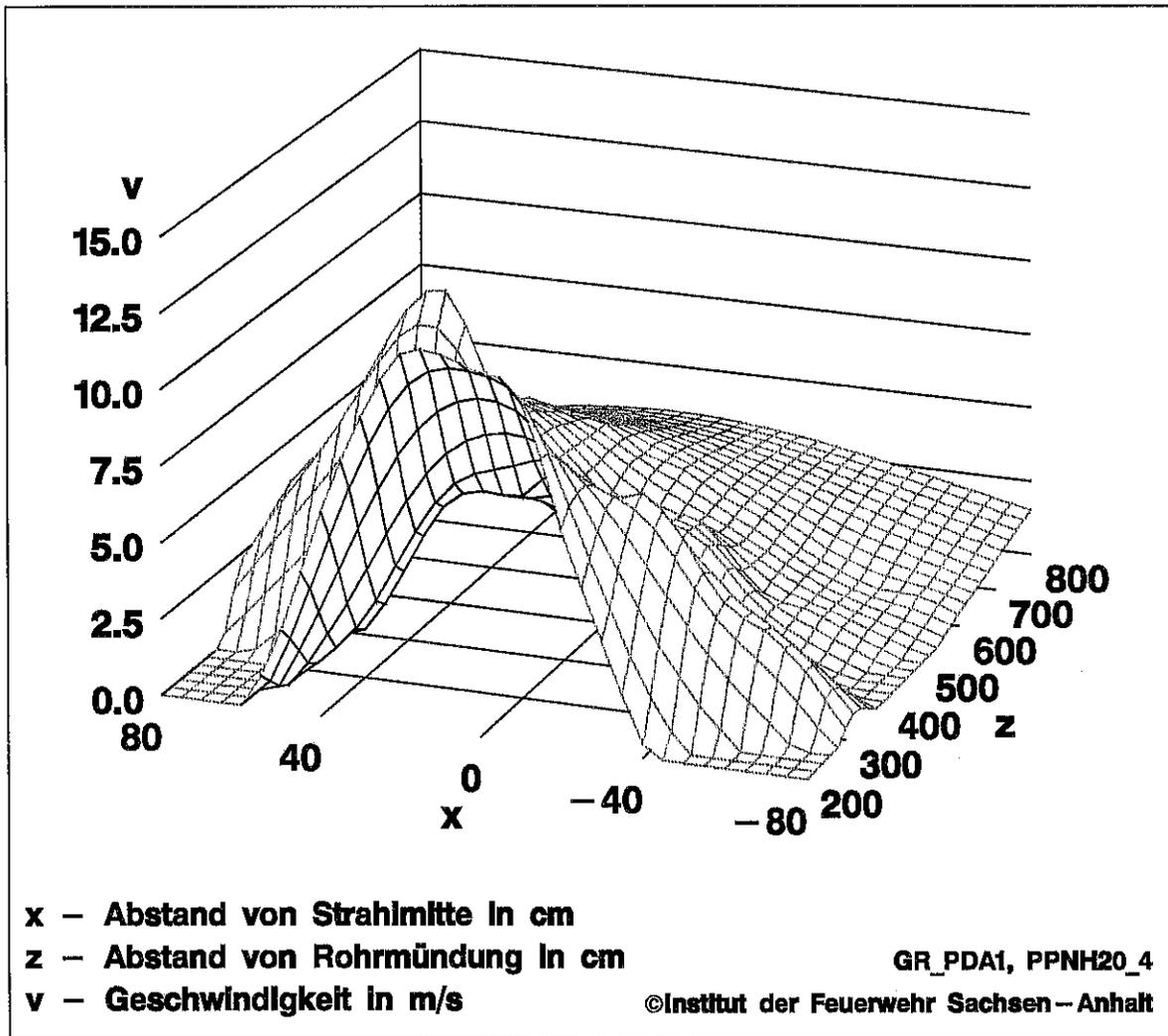


Bild 4.35: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl pph20

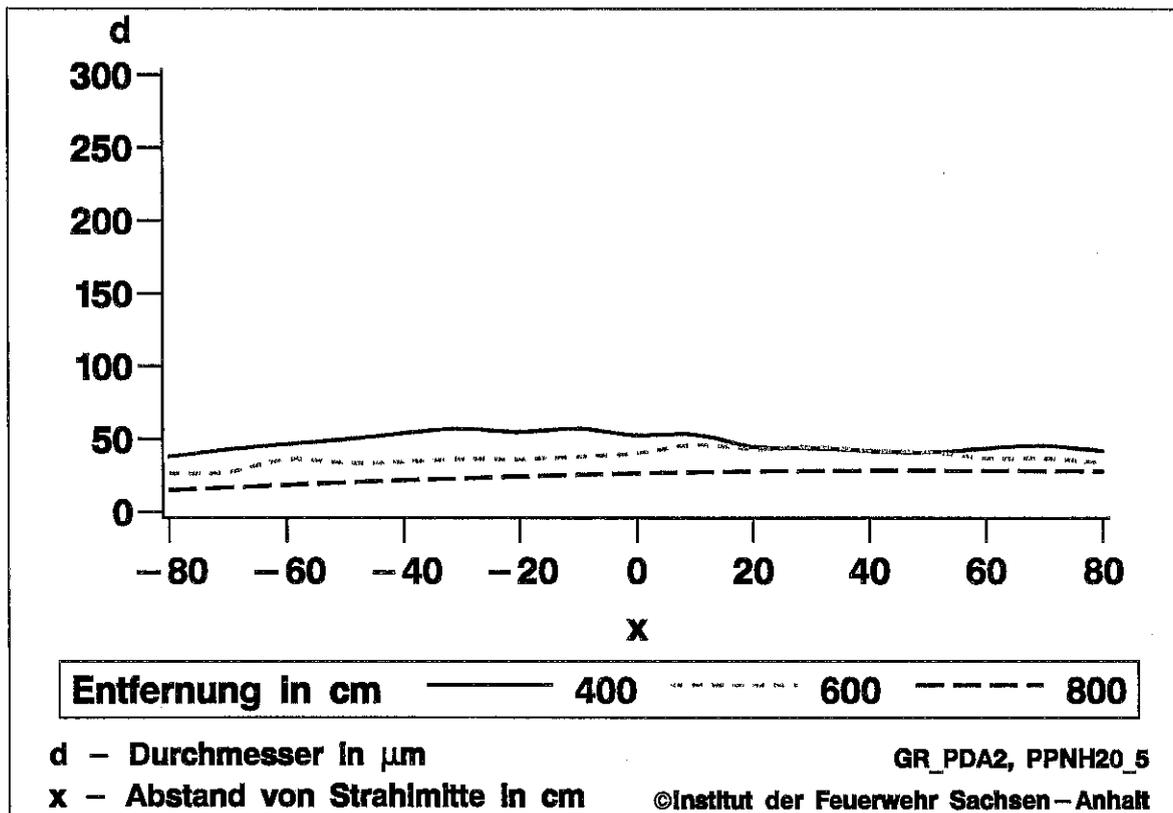


Bild 4.36: Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl pphh20 für verschiedene Entfernungen

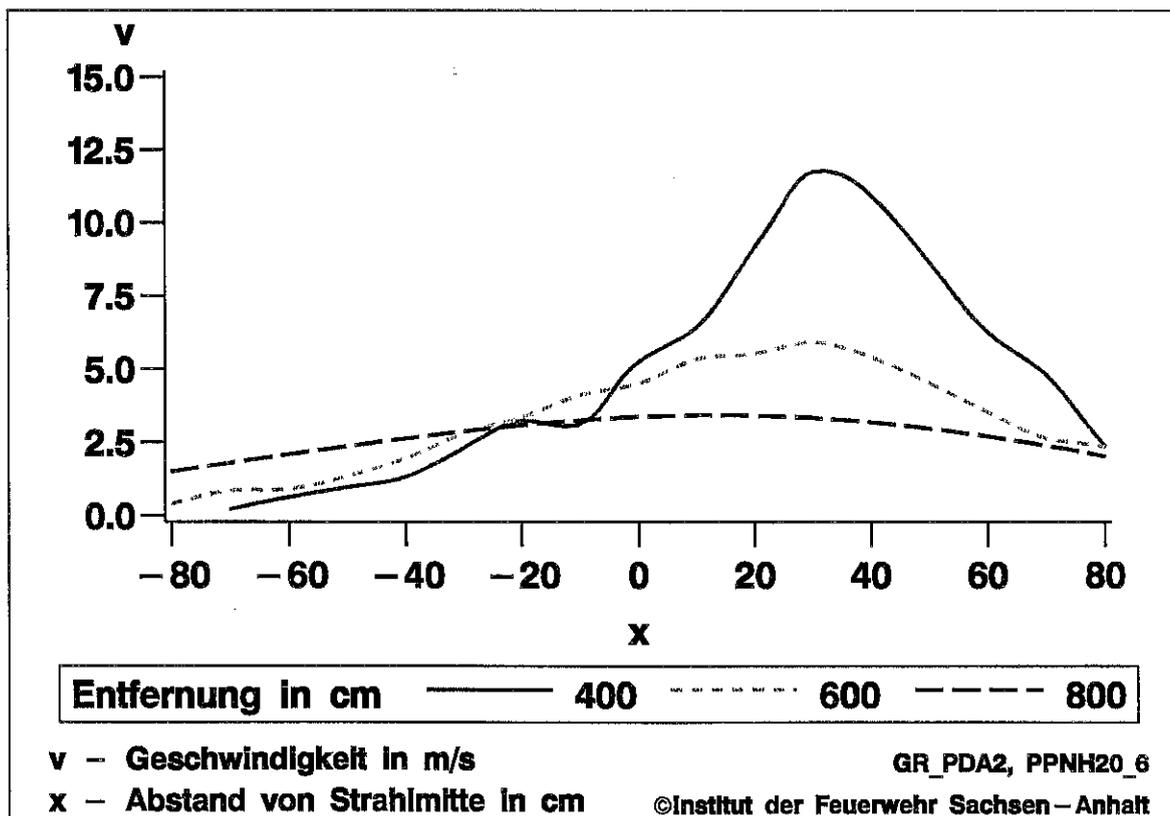


Bild 4.37: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl pphh20 für verschiedene Entfernungen

Grafische Auswertungen für den Sprühstrahl ppnh35

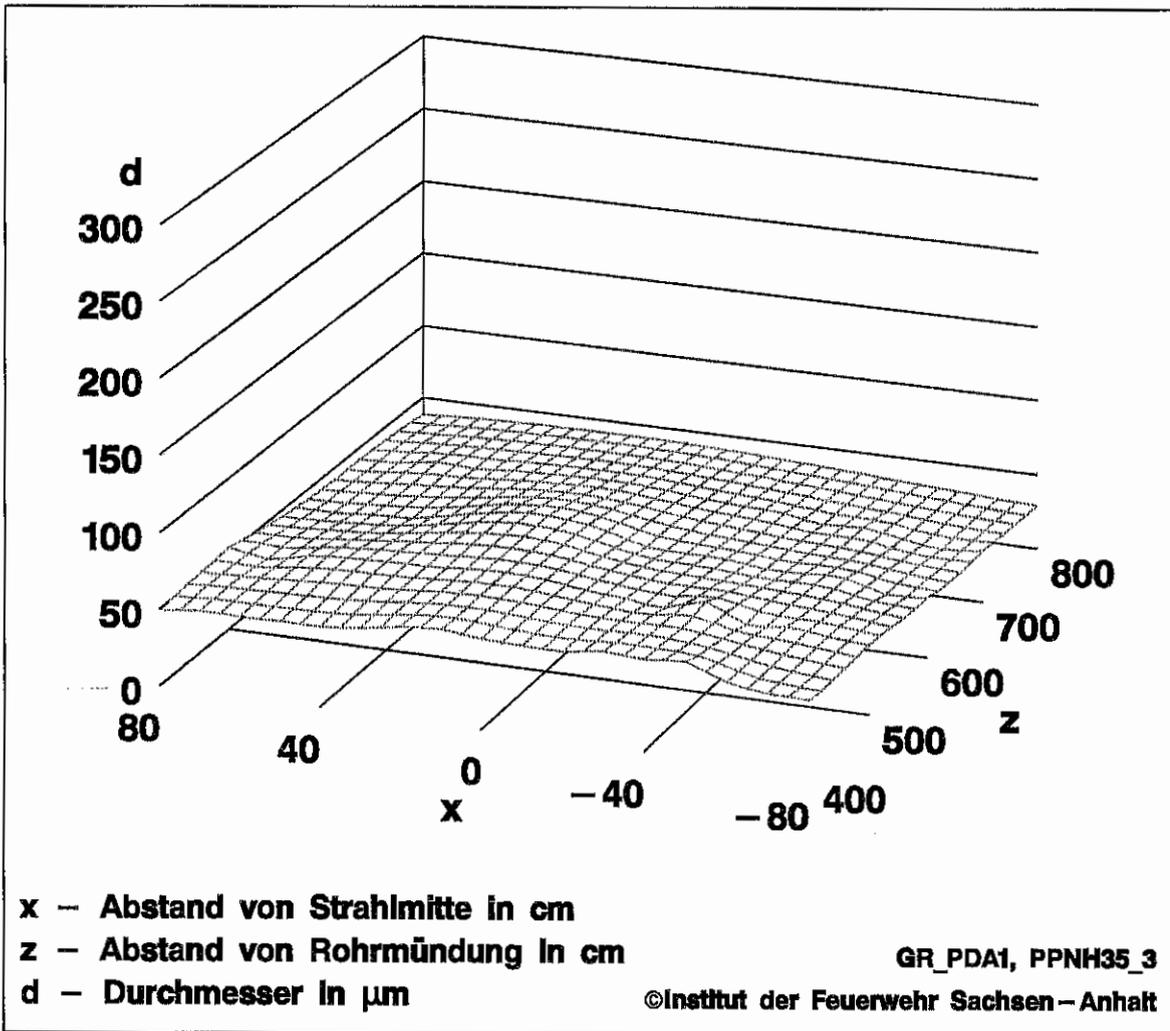


Bild 4.38: Mittlere Tropfendurchmesser in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl ppnh35

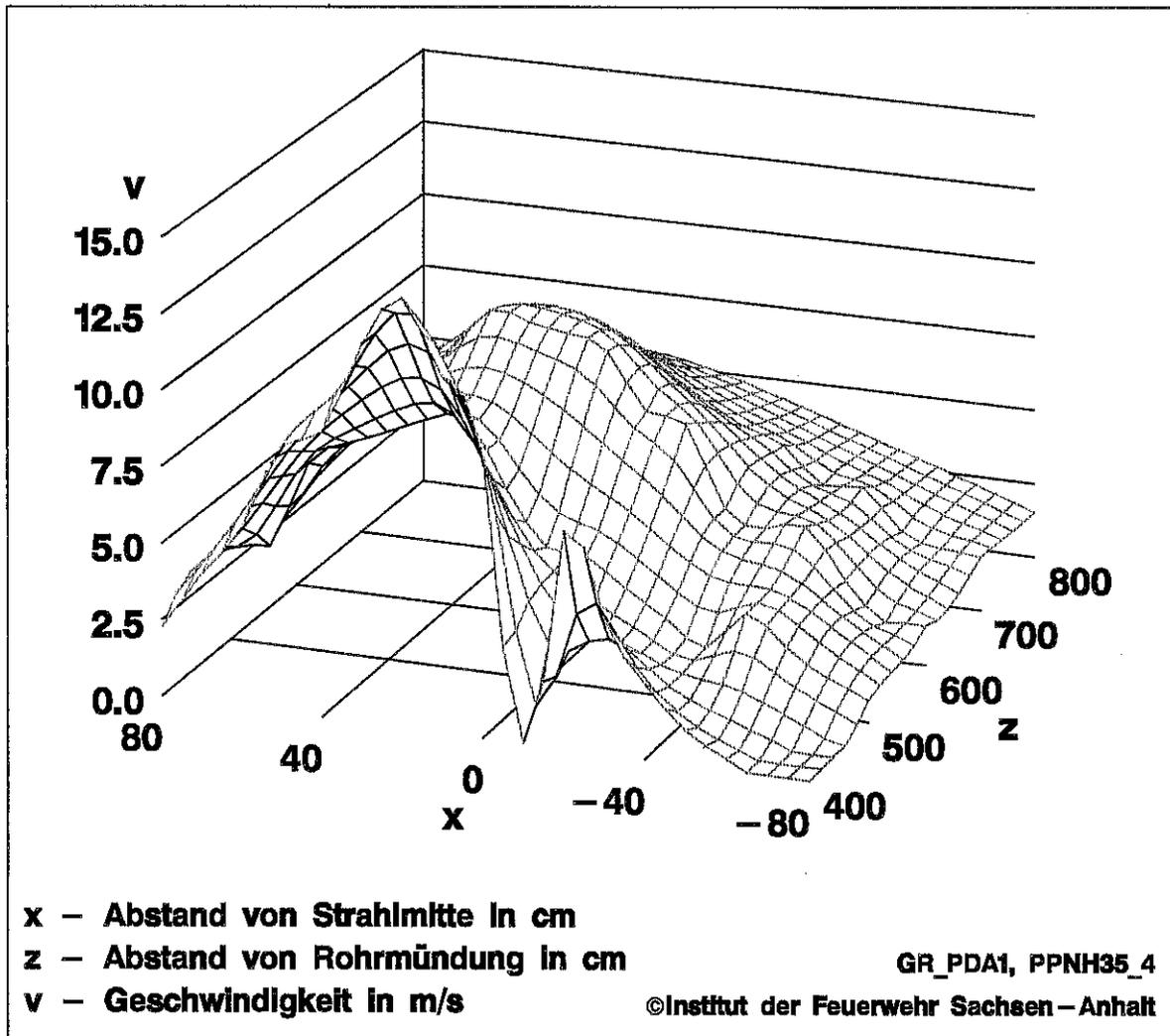


Bild 4.39: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in der Ebene der Strahlrohrmündung für den Sprühstrahl pph35

Bemerkungen

- ◆ Der Bereich der z-Koordinate in den grafischen Darstellungen der Tropfendurchmesser und der –geschwindigkeiten wurde bewusst so gewählt, dass diese Koordinate, die bei den Lösversuchen dem Abstand der Düsenmündung zum Brandobjekt entspricht, mit der kleinsten Löschentfernung beginnt und mit der größten endet. Das ist besonders bei der Betrachtung der Bilder zu den Tropfengeschwindigkeiten zu beachten, da dadurch die hohen Geschwindigkeiten nahe der Düsenöffnung in den Darstellungen abgeschnitten sind. Die anschließenden Zahlenangaben beziehen sich auch nur auf diesen z-Bereich.
- ◆ Bei der Versuchsdurchführung war bereits zu sehen, daß der Sprühstrahl ppan06 unsymmetrisch ist. Es waren optisch Bereiche zu erkennen, in denen mehr Wasser mitgeführt wurde und andere, wo weniger vorhanden ist. Die Erscheinung ist nicht so ausgeprägt gewesen wie bei einer Spiraldüse, jedoch deutlich erkennbar.
- ◆ Der Sprühstrahl ppan06 hat ein breites Tropfenspektrum und ist als polydispers zu bezeichnen. Die mittleren Tropfendurchmesser in den Messpunkten liegen im Wesentlichen zwischen 150 und 250 μm . Die Geschwindigkeiten nehmen mit zunehmender Entfernung ab und zwar in der Strahlmitte von 4.1 m/s bei 450 cm auf 2.6 m/s bei 750 cm .
- ◆ Der Sprühstrahl ppmh39 zeigt eine vergleichsweise eng begrenztes Tropfenspektrum und ist als nahezu monodispers zu bezeichnen. Die mittleren Tropfendurchmesser in den Messpunkten liegen bei ca. 50 μm .
- ◆ Interessant ist die Betrachtung der Bilder zu den Tropfengeschwindigkeiten. Der Sprühstrahl ppmh39 ist in seiner räumlichen Ausdehnung klein. Das ist auch daran ersichtlich, dass bei einer Entfernung von 150 cm die Geschwindigkeiten schon in einem Abstand von 30 cm von der Sprühstrahlmitte sehr klein werden (s. Bild 4.32). Die Geschwindigkeit in der Strahlmitte fällt von 12.1 m/s bei 150 cm auf 5.6 m/s bei 350 cm .
- ◆ Bei den Sprühstrahlen ppnh20 und ppnh35 sind die mittleren Tropfendurchmesser gleichmäßig verteilt. Sie liegen in der Regel unter 50 μm . Deutliche Unterschiede sind nicht erkennbar. Bei der hier verwendeten Strahlrohreinstellung ist auch keine Verkleinerung der Tropfengrößen durch die Druckerhöhung von 20 auf 35 bar erkennbar.
- ◆ Unterschiede durch eine Druckerhöhung von 20 auf 35 bar sind bei den Tropfengeschwindigkeiten zu registrieren. Beim Sprühstrahl ppnh20 fallen sie von 11.7 m/s bei 400 cm auf 3.4 m/s bei 800 cm . Beim Sprühstrahl ppnh35 sind mit dem höheren Druck die entsprechenden Werte 13.9 m/s bzw. 5.5 m/s . Durch die Druckerhöhung ist optisch eine Verengung des Sprühstrahls zu beobachten.

4.5 Massenstromdichtemessungen im Nasslabor

Die PDA-Messungen im Sprühstrahl liefern in Abhängigkeit von der Lage des Messpunktes (d. h. der Raumkoordinate) Aussagen zu den Tropfendurchmessern und den –geschwindigkeiten. Diese sagen aber zunächst nichts darüber aus, welche Menge des Löschwassers auf eine definierte Fläche tatsächlich auftrifft. Die für diese Fragestellung interessanten Größen sind die im Abschnitt 4.3 eingeführten Massen- und Volumenstromdichten des Löschwassers (vgl. Gleichung (4.1)).

Für die Messung der Volumenstromdichte standen keine handelsüblichen Messsonden zur Verfügung. Die selbst entwickelte Sonde lieferte Ergebnisse, die zu einer ersten Abschätzung durchaus brauchbar sind, jedoch muss an deren Weiterentwicklung gearbeitet werden. Es wurden in zwei Sprühstrahlen ppmh39 und ppmh35 Messungen ausgeführt, die nun diskutiert werden.

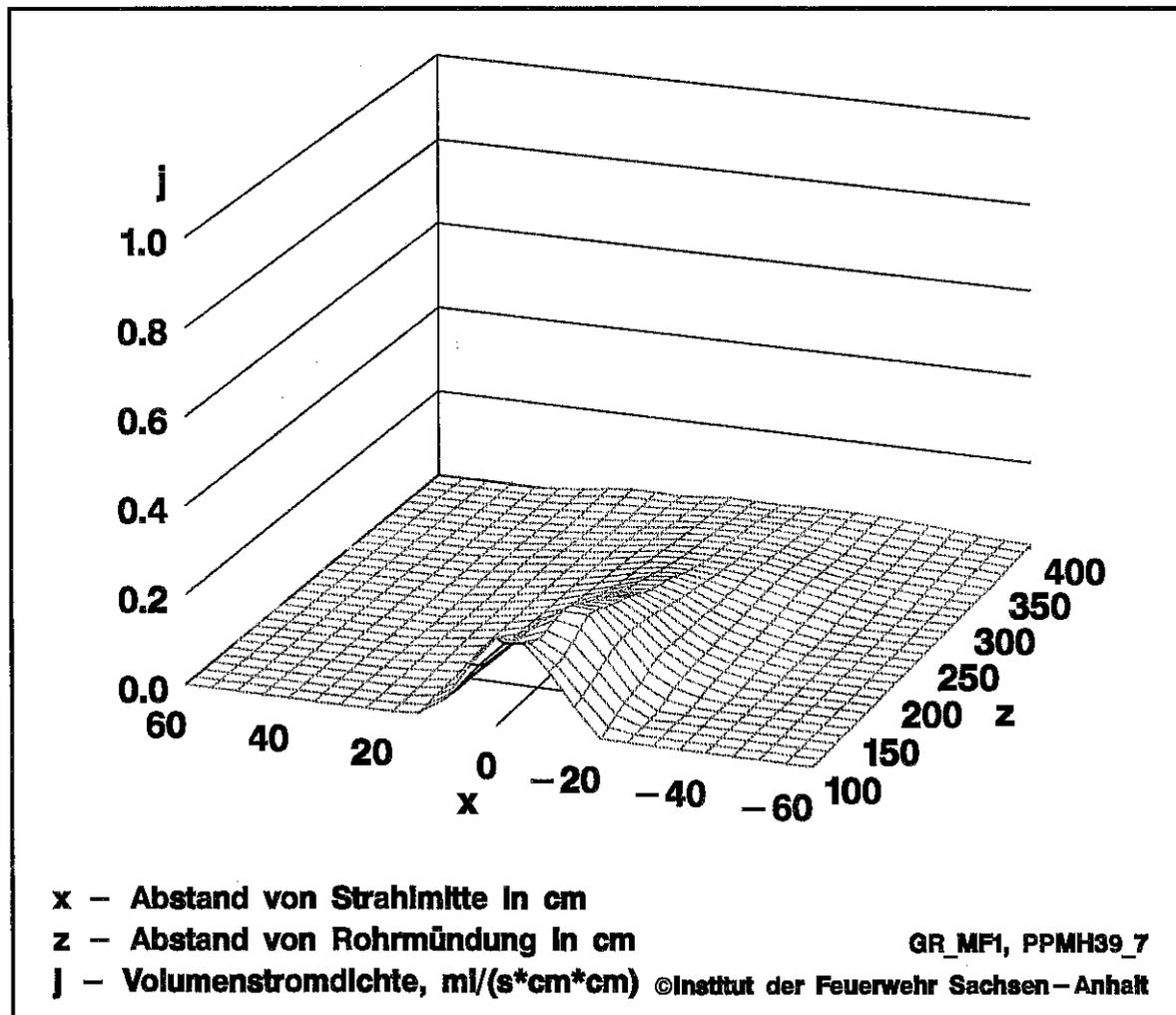


Bild 4.42: Volumenstromdichte im Sprühstrahl ppmh39

Bild 4.42 zeigt die Volumenstromdichte für den Sprühstrahl ppmh39 und Bild 4.43 die für den Sprühstrahl ppnh35. Grundlage dieser Grafiken waren Messungen der Volumenstromdichte in der horizontalen Ebene der Strahlrohrmündung. Gemessen wurden die Werte in einer Querschnittsfläche $A=25 \text{ cm}^2$, d. h. das durch diese Fläche strömende Wasser wurde „aufgefangen“ und ausgelitert. Der Mittelpunkt der Messsonde hatte die Koordinate $(x_i, 0, z_i)$. Die Meßwerte wurden normiert, sodass sie in der Dimension $\text{ml}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ zur Verfügung standen. Der erhaltene Wert ist der Messwert für die Volumenstromdichte im Punkt $(x_i, 0, z_i)$.

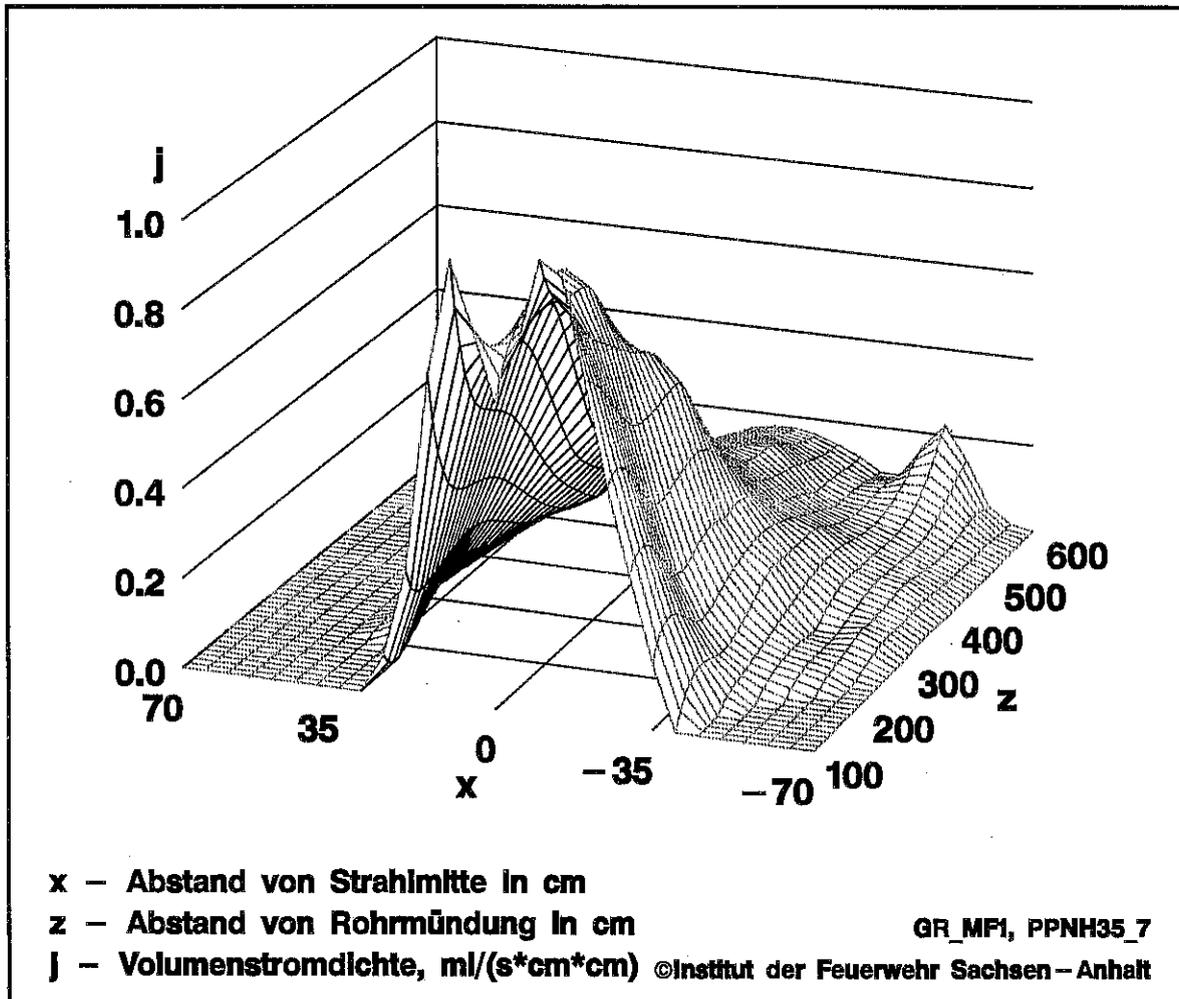


Bild 4.43: Volumenstromdichte im Sprühstrahl ppnh35

Zur Validierung der Messwerte wurde folgende Überlegungen angestellt. Die Sprühstrahlachse hat die y -Koordinate 0. Der Abstand dieser Achse vom Fußboden hat den Wert h . Aus der Volumenstromdichte kann nach (4.3) der Volumenstrom berechnet werden. Integriert man nun die Volumenstromdichte über die gesamte (x,y) -Halbebene oberhalb des Fußbodens, so erhält man den Volumenstrom des Wassers, das durch die Fläche $z = z_{const}$ hindurchtritt. Da Querschnittsfläche der Messsonde parallel zur (x,y) -Ebene lag, kann das Flächenintegral aus (4.3) in der folgenden Form geschrieben werden:

$$I_V = \iint_{y>-h} j_V(x, y, z_{const}) dx dy . \quad (4.4)$$

Da die Volumenstromdichte nur in der Ebene $y=0$ gemessen wurde, kann das Doppelintegral (4.4) nicht ohne Weiteres berechnet werden. Hier wird die zusätzliche Annahme getroffen, dass der Sprühstrahl rotationssymmetrisch ist. Die Berechnung erfolgte in mehreren Schritten:

- ◆ Die in der Entfernung z_{const} für $y=0$ gemessenen Werte sind bzgl. $x=0$ nicht symmetrisch, was in den Bildern 4.42 und 4.43 zu erkennen ist. Die Werte wurden nach der Beziehung

$$\frac{j_V(-x, 0, z_{const}) + j_V(x, 0, z_{const})}{2} \quad (4.5)$$

gemittelt.

- ◆ Im nächsten Schritt wurden entsprechend der angenommenen Rotationssymmetrie im Abstand von 10° diese Messwerte auf den jeweiligen Vollkreis übertragen. Die so erzeugten Werte entsprechen einer Polarkoordinatendarstellung. Da die hier benötigten Integrationsgebiete achsenparallele Rechtecke sind, ist eine Polarkoordinatendarstellung jedoch ungeeignet.
- ◆ Nunmehr wurde mit einem SAS-Baustein die Volumenstromdichte für Punkte auf einem euklidischen Gitter in der (x,y) -Ebene berechnet. Die so generierte SAS-Datenbankdatei ist Grundlage der weiteren Berechnungen.

Die Bilder 4.44 und 4.45 zeigen die nach (4.4) berechneten Ergebnisse für die Sprühstrahlen ppmh39 und ppnh35. Der gesamte Löschwasservolumenstrom $I_{V,gesamt}$ wurde mit einem Durchflussmesser ermittelt, der ein induktives Messverfahren zur Grundlage hat. Diese Messungen sind als relativ genau zu bewerten und in den Bildern als horizontale gestrichelte Linie eingezeichnet. In der Legende werden sie als „real“ bezeichnet.

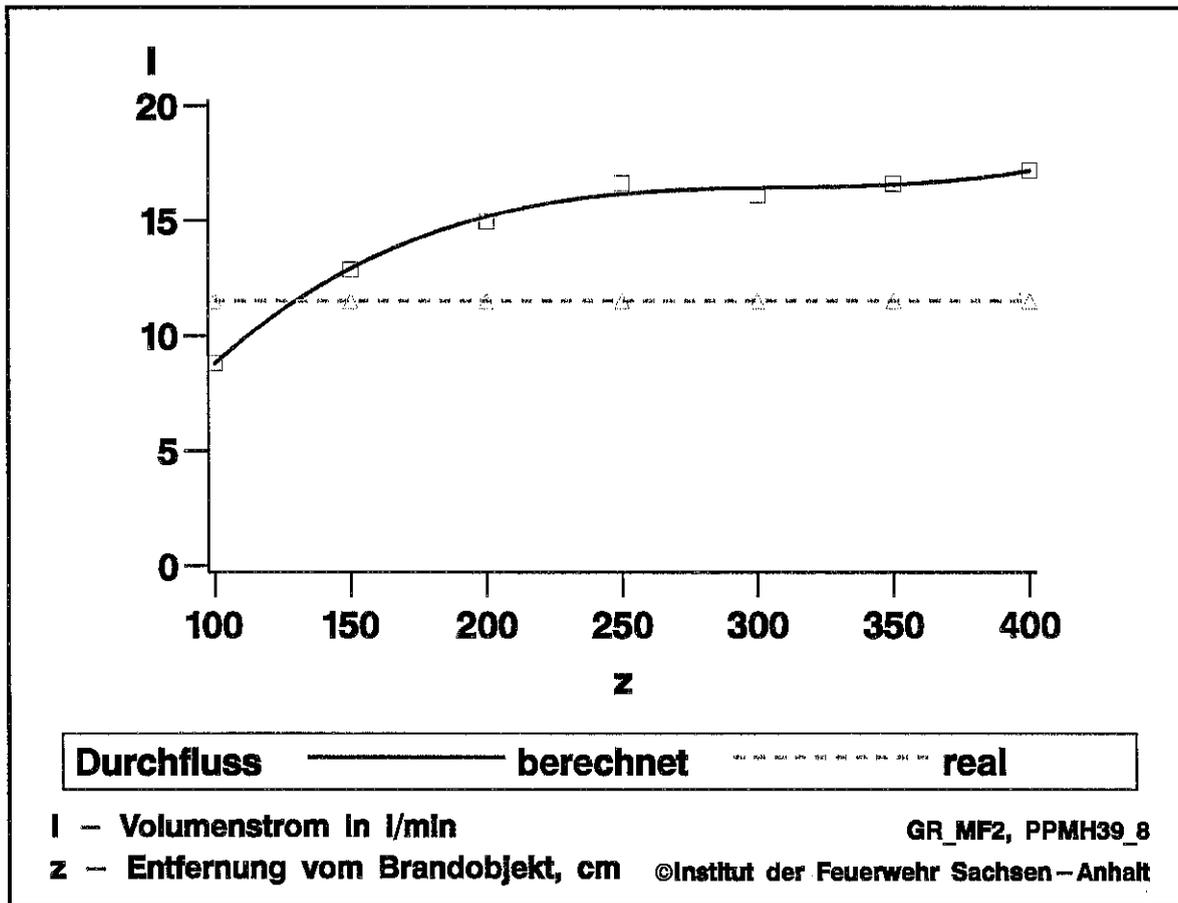


Bild 4.44: Vergleich des gesamten Löschwasservolumenstromes mit den aus den Messungen der Volumenstromdichte berechneten Werten für den Sprühstrahl ppmh39

Der Anstieg der berechneten Werte im Bild 4.44 für den Sprühstrahl ppmh39 ist inhaltlich nicht zu begründen. Die Ursachen können im Messverfahren oder an einer ungünstigen Lage der Messpunkte liegen.

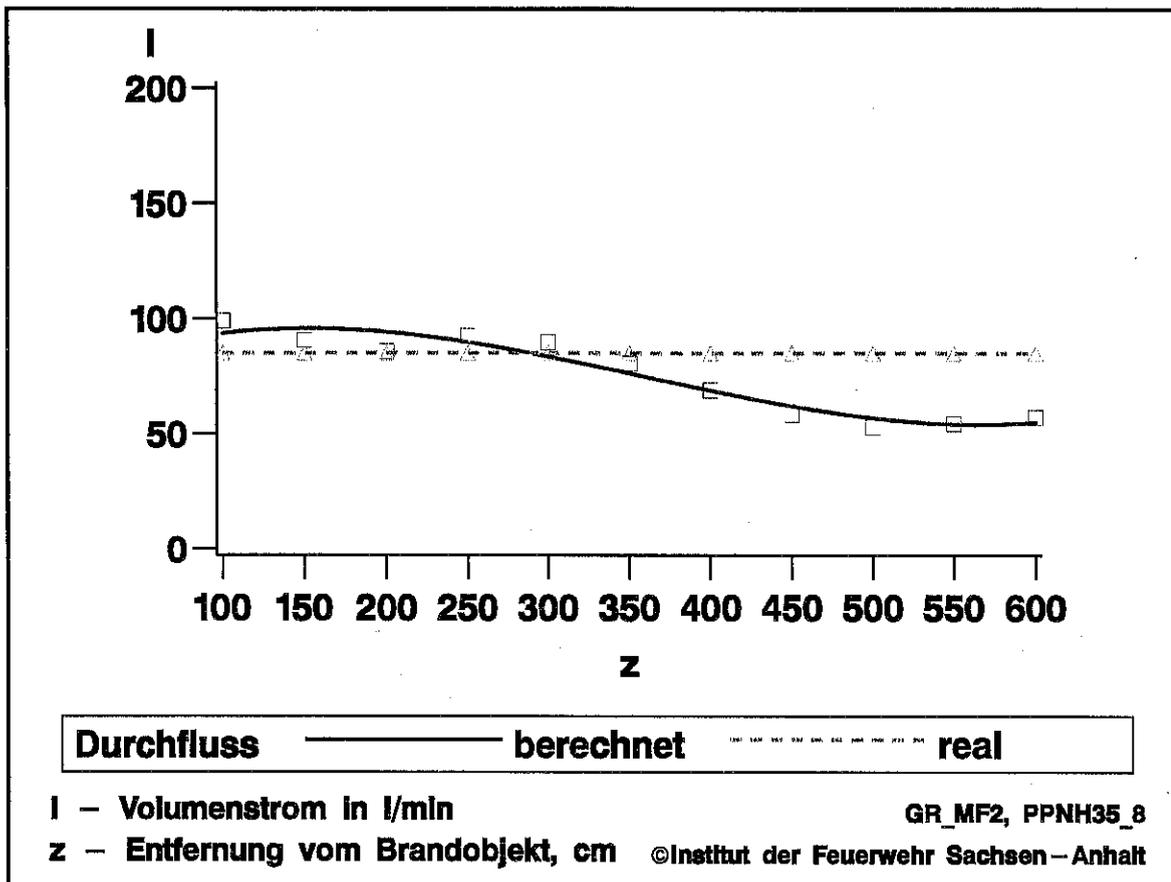


Bild 4.45: Vergleich des gesamten Löschwasservolumenstromes mit den aus den Messungen der Volumenstromdichte berechneten Werten für den Sprühstrahl ppnh35

Die Kurve für den Sprühstrahl ppnh35 (Bild 4.45) entspricht prinzipiell dem zu erwartenden Verlauf. Mit zunehmender Entfernung nimmt das im Sprühstrahl mitgeführte Wasser ab, da Wassertropfen auf den Boden fallen. Bei dem hier dargestellten Weg zur Verifizierung der Volumenstromdichtemessung wurden mehrere Annahmen gemacht, wie z. B. die Rotationssymmetrie des Sprühstrahls. Aus dieser Sicht ist das Überschreiten des maximal möglichen Wertes durch die berechnete Kurve um ca. 10% als gutes Ergebnis zu bewerten.

5 Komplexe Auswertungen

5.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt werden einige Messergebnisse, die auf verschiedenen Versuchsständen ermittelt wurden, gemeinsam ausgewertet. Dies ermöglicht die Ableitung weiterer Aussagen.

Zunächst wird untersucht, wie die auf das Brandobjekt auftreffende Löschwassermenge das Löschresultat beeinflusst. Insbesondere ist zu prüfen, ob die Aussage „Viel hilft viel“ zutrifft, d. h. ob mit steigender Wasserbeaufschlagung auch generell ein besserer Löscherfolg eintritt.

Bei den Polypropylenbränden ist bei der visuellen Beobachtung der Löschversuche deutlich erkennbar, dass die Strömungsverhältnisse von starker Bedeutung sind. Der einzige Strömungsparameter, der gemessen wurde, ist die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung bei den PDA-Messungen. Es wird der Zusammenhang zwischen dieser Geschwindigkeit und dem Löschergebnis betrachtet.

Zuletzt werden die Messungen der Sprühversuche auf dem AFF-Versuchsstand mit den Ergebnissen der Bestimmung der Massenstromdichte im Nasslabor des IdF LSA verglichen.

5.2 Löschergebnisse in Abhängigkeit von der auftreffenden Wassermenge

Die Ausgangsdaten stehen in zwei verschiedenen SAS-Datenbankdateien mit unterschiedlicher Datenstruktur. Das sind die Dateien **AFFF.SD2** und **AFFS.SD2** (vgl. Abschnitt 3.3 Tabellen 3.2 und 3.3). Mit Hilfe geeigneter Datenbankfunktionen werden die erforderlichen Daten selektiert und miteinander verbunden. Die Bilder 5.1 bis 5.4 zeigen im Fall der Holzkrippenbrände für die Sprühstrahlen ppan06, ppmh39, ppnh20 und ppnh35 die Gegenüberstellung der Löscherfolge zu den Wassermengen, mit denen das Brandobjekt beaufschlagt wurde. Die Bilder 5.5 bis 5.8 geben die entsprechenden Darstellungen für die Polypropylenbrände wieder.

Bild 5.1 soll etwas ausführlicher erläutert werden. Auf der linken Seite ist der Volumenstrom in l/min abgetragen, d. h. das Löschwasservolumen, das bei den Sprühversuchen auf dem AFF-Versuchsstand auf die Holzkrippe auftraf und aufgefangen wurde (vgl. Abschnitt 4.3). Das waren bei 450 cm 20.2 l/min , bei 600 cm 15,2 l/min und schließlich bei 750 cm nur noch 4.3 l/min . Auf der rechten Seite ist der Löscherfolg abgetragen. Es ist ersichtlich, dass die 4.3 l/min bei der Entfernung von 750 cm nahezu wirkungslos sind. Ein Löschversuch wurde gerade noch mit dem Löscherfolg „5“ bewertet und der zweite mit „6“, d. h. die Holzkrippe war in ihrer Struktur abgebrannt und zusammengebrochen. Zu sehen ist dies in der Abbildung daran, dass die entsprechende Linie für den Löscherfolg zwischen „5“ und „6“

verläuft. Die Markierungen für den Löscherfolg, hier sind es Kreise, sind bei „5“ und „6“ abgetragen. Bei den kürzeren Entfernungen von 450 und 600 cm werden die Löscherfolge mit dem Löscherfolg „1“ bewertet, d. h. die Holzkrippe ist in ihrer Struktur völlig erhalten. Durch den Sprühversuch ist somit der Grund für den plötzlich schlechter werdenden Löscherfolg erklärbar, der im Bild 4.14 mit den zugehörigen Löscherfolgen dargestellt ist. Die Wurfweite der Löschdüse ist bei dieser Einstellung einfach zu klein, um bei einer Entfernung von 750 cm noch eine akzeptable Löscherwirkung zu erzielen. Ein Strahlrohrführer hätte das aufgrund des ausgedehnten Sprühstrahls nur schwer erkennen können, wenn er hinter dem Strahlrohr steht. Analog sind die drei Abbildungen 5.2 bis 5.3 zu interpretieren.

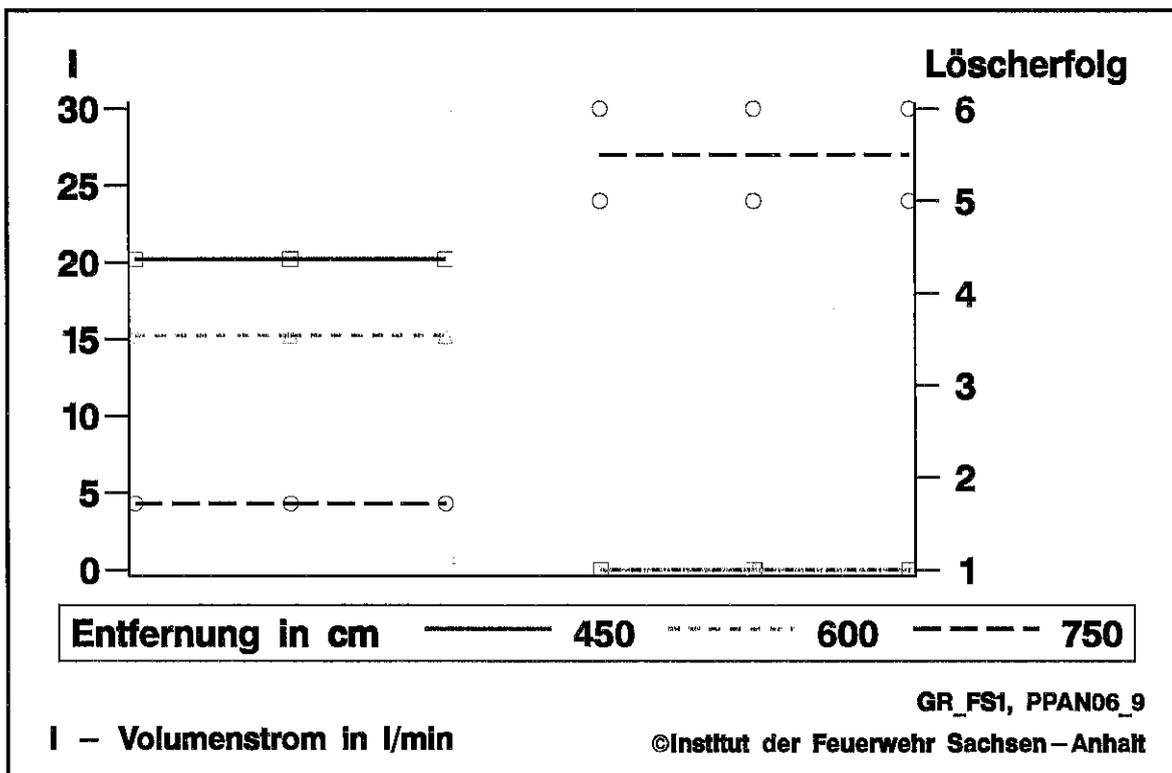


Bild 5.1: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkippenbränden für den Sprühstrahl ppan06

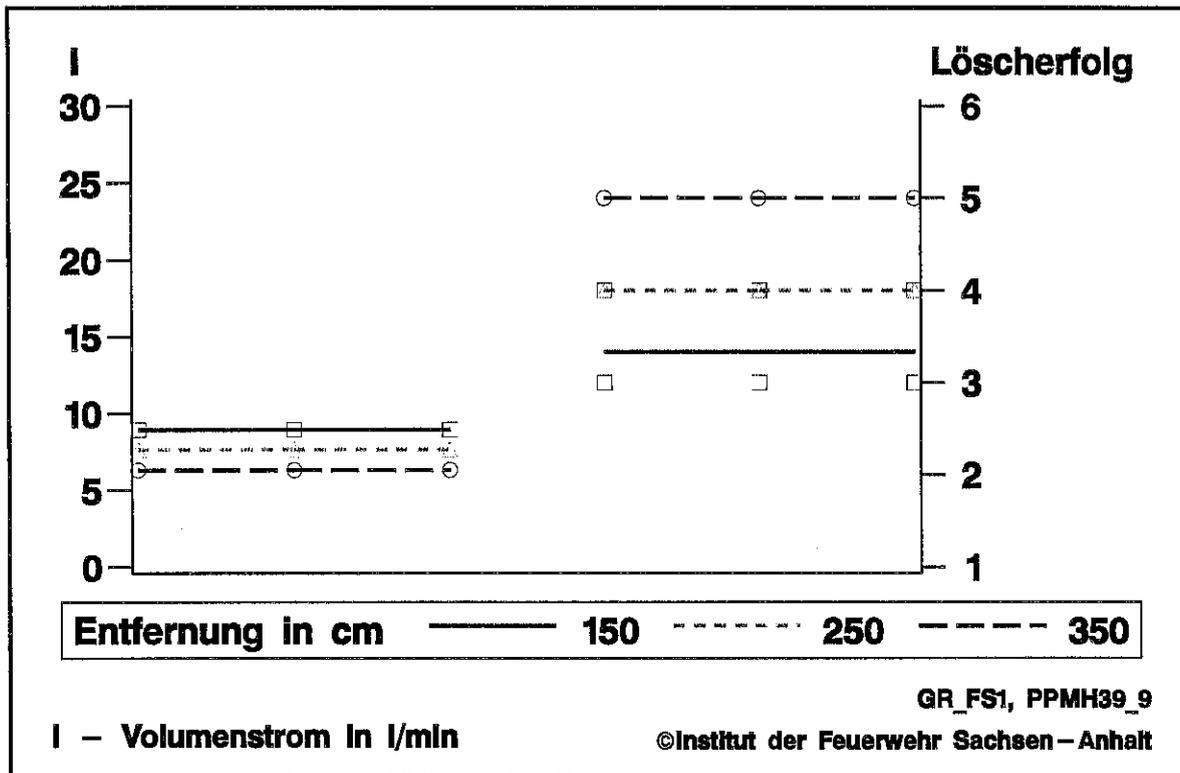


Bild 5.2: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppmh39

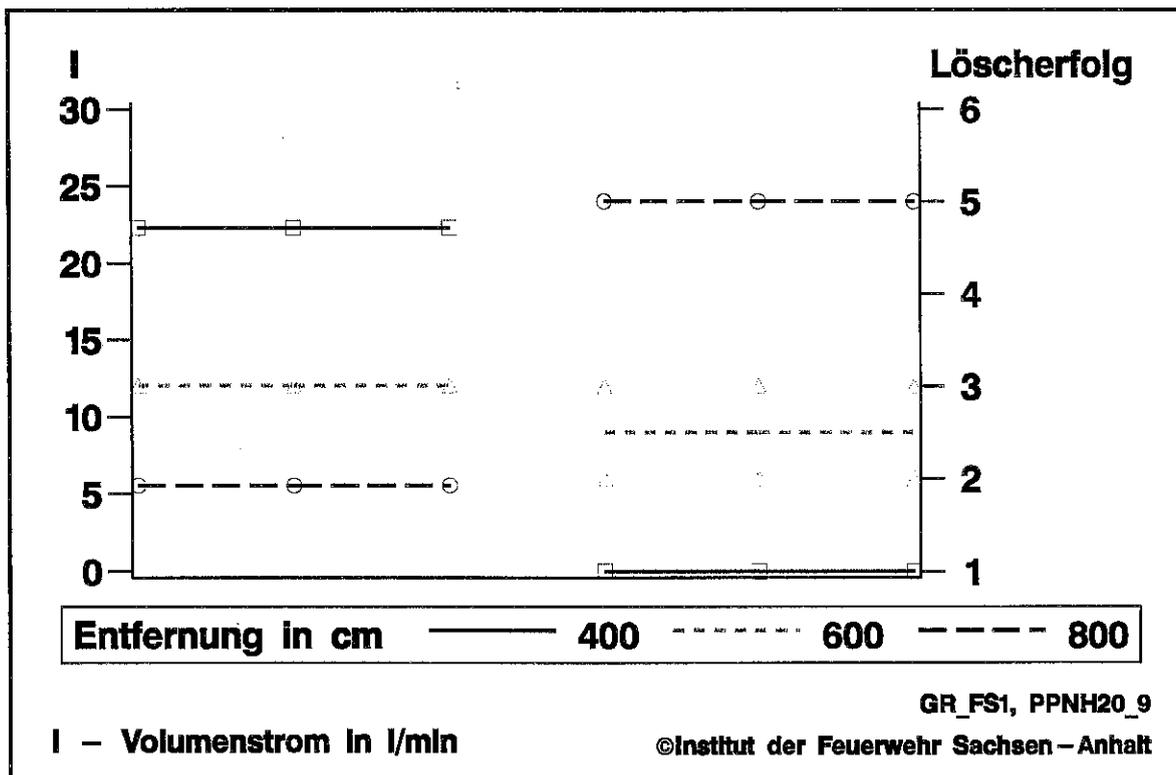


Bild 5.3: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl pph20

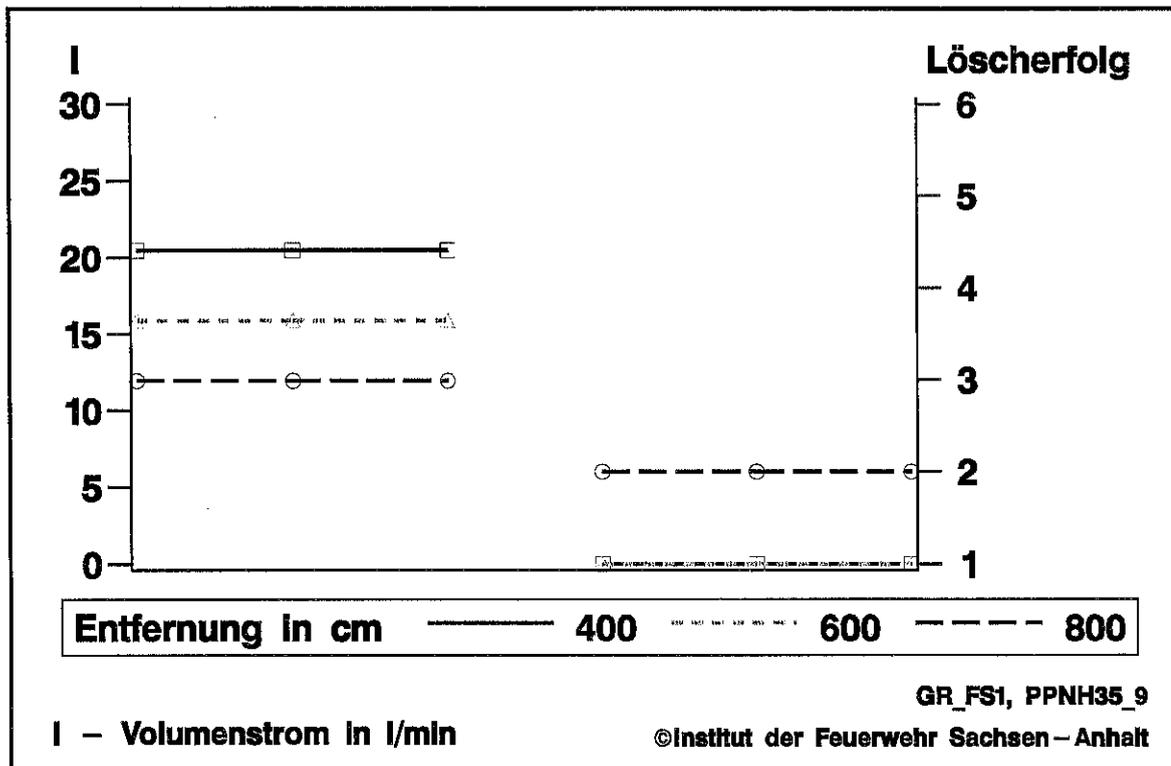


Bild 5.4: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl pph35

Die Bilder 5.5 bis 5.8 enthalten die analogen Darstellungen für die Polypropylenbrände. Da bei diesen Brandversuchen keine Größe definiert ist, die dem Löscherfolg bei den Holzkrippenbränden entspricht, werden hier die Löscheziten verwendet und zwar die Gesamtlöscheziten **ctime(3)** (vgl. Tabelle 4.2). Diese Zeiten können bei gleichen Versuchsbedingungen erheblich schwanken. Im Bild 5.6 liegt dieser Bereich für die Löscheziten beim Sprühstrahl pph39 bei der Entfernung von 150 cm zwischen 14 und 30 s. In diesem Fall wurden 3 Löscheziten durchgeführt. Diese Abweichungen sind auf die schon besprochene Sprüschattenwirkung der Brandwannenkante zurückzuführen.

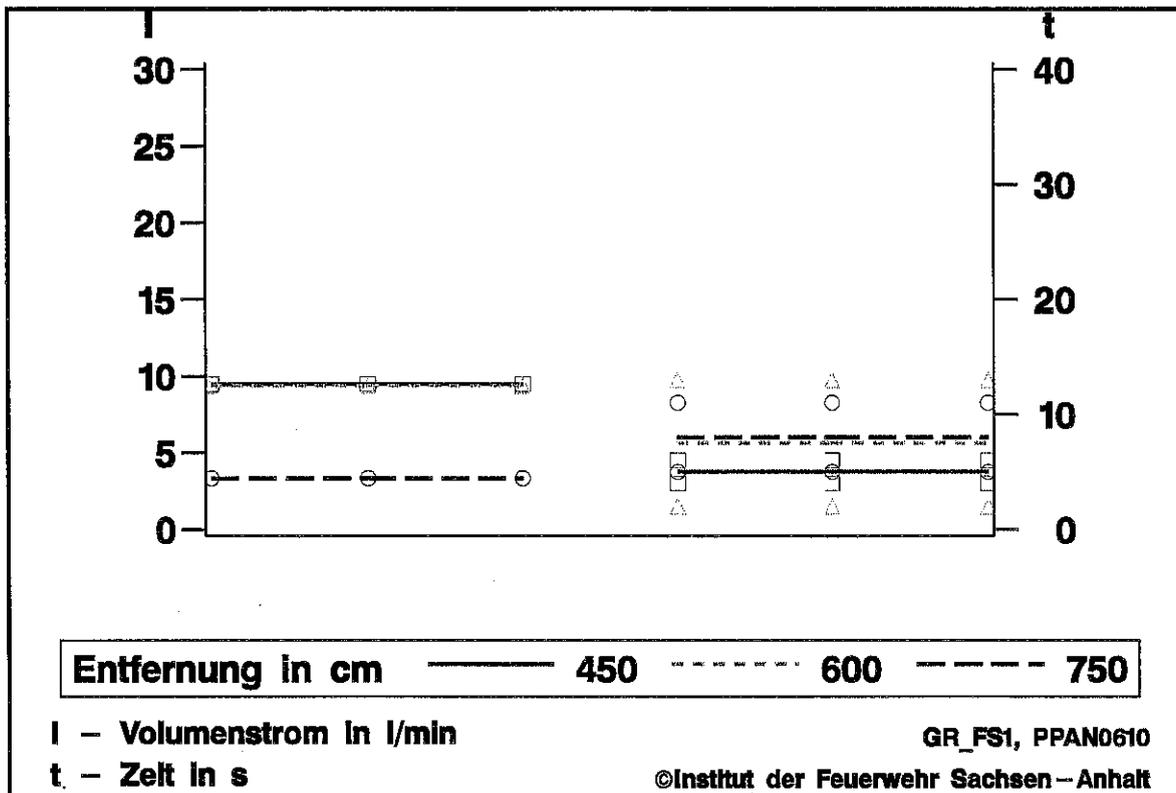


Bild 5.5: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für denSprühstrahl ppan06

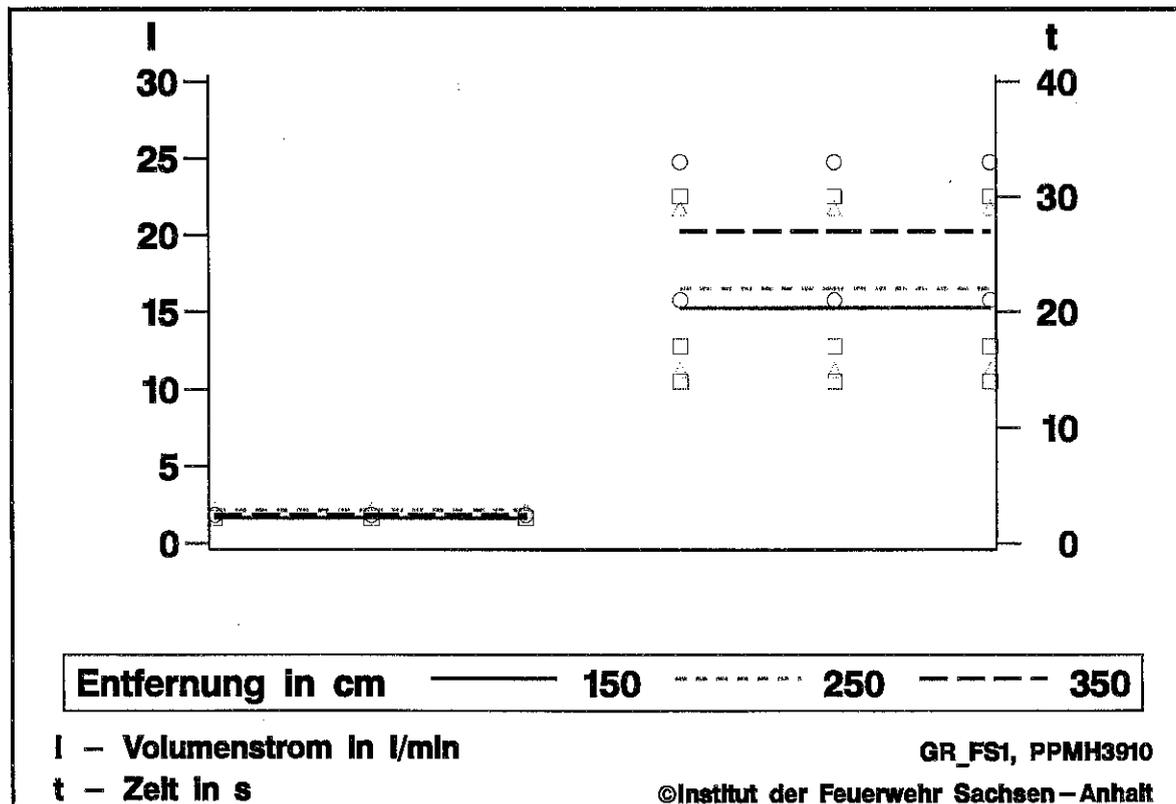


Bild 5.6: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für denSprühstrahl ppmh39

Die eben analysierten Bilder vermitteln für jeden Sprühstrahl einen guten Überblick. Eine generelle, einheitliche Bewertung fällt allerdings schwer. Zu diesem Zweck wurde eine andere Grafik entwickelt, deren Interpretation am Beispiel des Bildes 5.9 erfolgt. Abgetragen ist auf der horizontalen Achse der Löscherfolg. Unabhängig vom Sprühstrahl werden nun für jeden Brandversuch mit Holzrippen über dem Löscherfolg die Volumenströme in l/min abgetragen, d. h. das in den Sprühversuchen aufgefangene Wasser. Durch die so entstandene „Punktwolke“ wird mittels kubischer Regression eine Kurve gelegt, die im Bild 5.9 als geschlossene Linie dargestellt ist. Eine derartige Kurve kann prinzipiell durch jede Punktwolke gelegt werden, allerdings ist das Resultat oft nur schwer bewertbar. Um über die Qualität dieser Kurve eine Aussage treffen zu können, wurde ein Konfidenzbereich berechnet und in der Grafik mit unterbrochenen Linien eingetragen. Dieser ist so zu interpretieren, dass mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von 95% die reale Mittelwertkurve zwischen beiden Linien verläuft. Einzelne Werte können natürlich auch außerhalb liegen. Im Fall der Holzrippenbrandversuche ergibt sich ein statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen dem auftreffenden Wasser und dem Löscherfolg.

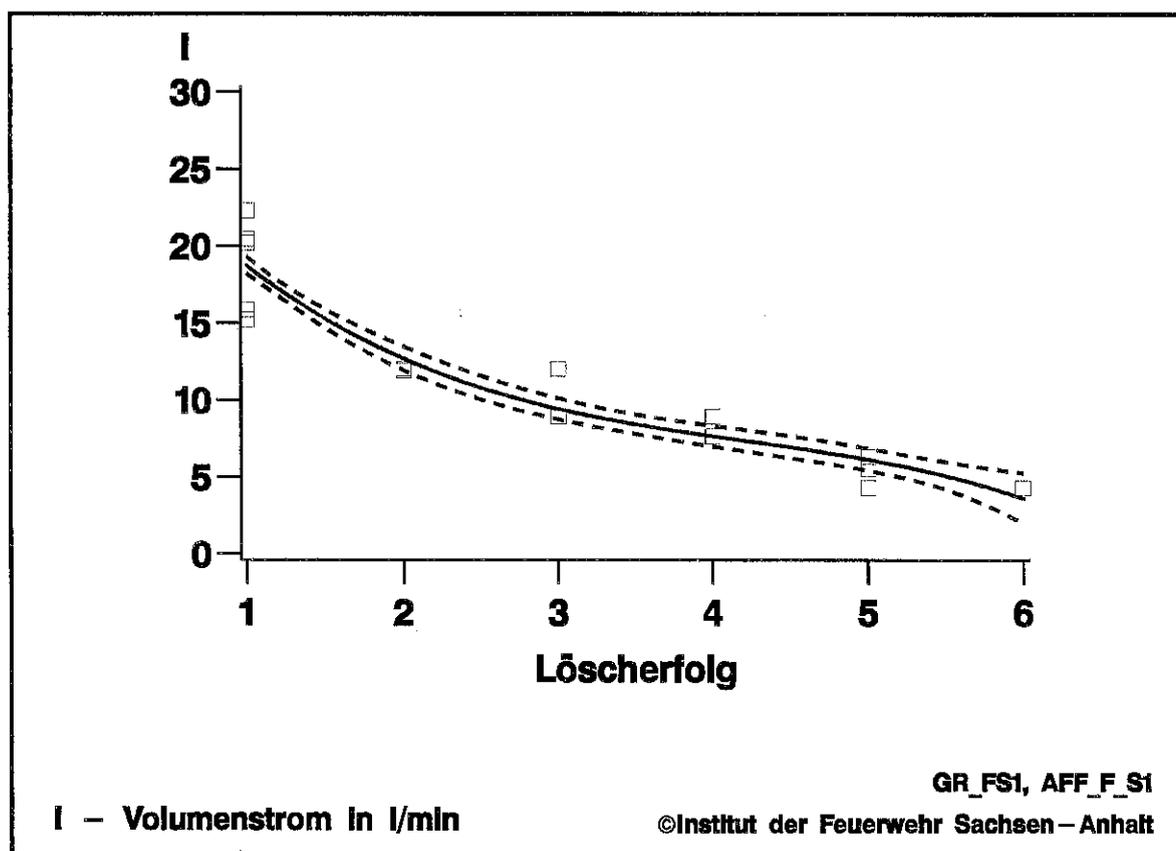
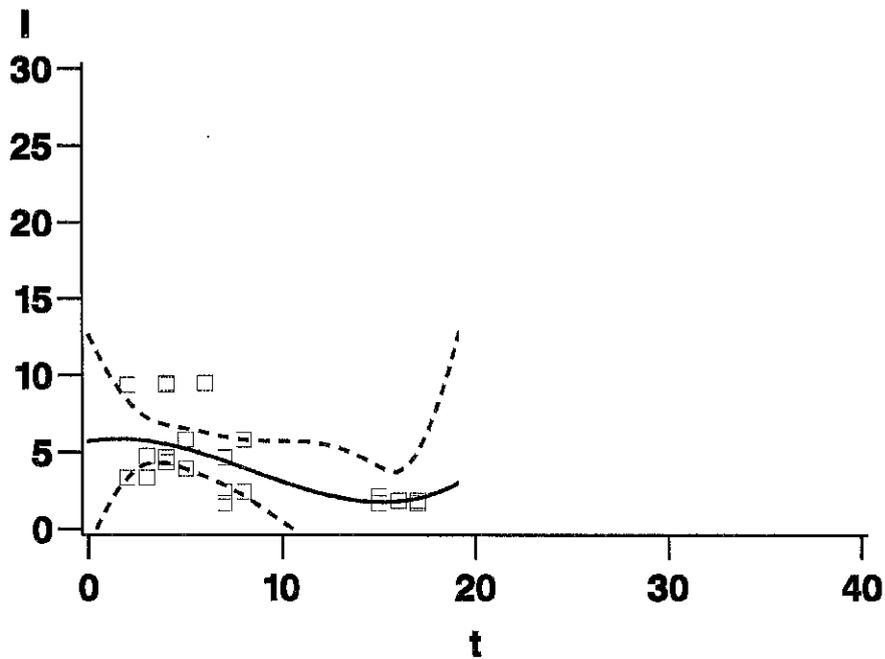


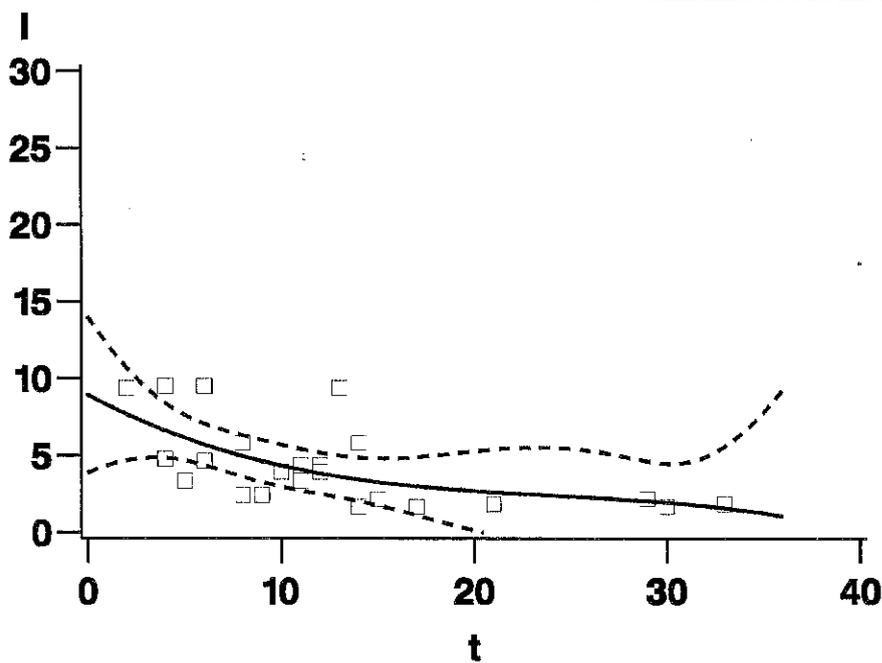
Bild 5.9: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Holzrippenbränden für alle Versuche



I – Volumenstrom in l/min
t – Zeit in s

GR_FS1, AFF_F_S2

©Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt



I – Volumenstrom in l/min
t – Zeit in s

GR_FS1, AFF_F_S3

©Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Bild 5.10: Löschwasserbeaufschlagung und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für alle Versuche für die charakteristischen Löscheziten „2“ und „3“ (vgl. Tabelle 4.2)

Für die Polypropylenbrandversuche wurden zwei Grafiken erstellt. Eine für die Löschzeit „2“, wo nur noch ein kleiner Brand aufgrund der Sprühschattenwirkung vorhanden ist, und eine für die Gesamtlöschzeit „3“. Bei diesen Brandversuchen lässt sich keine klare Aussage analog zu den Holzkrippenbränden treffen. Bei der Löschzeit „2“ kann man im Bild 5.10 sogar fast eine waagrecht verlaufende Gerade legen. In diesem Fall würde die Schlussfolgerung lauten, dass es keinen Zusammenhang zwischen Löschzeit und Volumenstrom gibt. Insgesamt ist zwar eine ähnliche Tendenz erkennbar, jedoch wesentlich weniger ausgeprägt und statistisch nicht gleichermaßen gesichert.

Bemerkungen

- ◆ Bei den Holzkrippenbränden nimmt die Löschzeit mit wachsendem Volumenstrom an Löschwasser ab. Hier ist der Volumenstrom des Wassers gemeint, der auf das Brandobjekt auftrifft und in den Sprühversuchen ermittelt wurde.
- ◆ Um den Holzkrippenbrand wirkungsvoll zu bekämpfen, muss ein Volumenstrom von 12.5 l/min an Löschwasser garantiert werden, der auf die Holzkrippe auftrifft.
- ◆ Bei den Polypropylenbränden ist der Trend, dass mit wachsendem Löschwasservolumenstrom die Löschzeit abnimmt zwar erkennbar, aber statistisch nicht so deutlich nachweisbar.

5.3 Löschzeiten in Abhängigkeit von den Sprühstrahlgeschwindigkeiten

In diese Betrachtungen wurden Versuchsdaten aus den SAS-Datenbankdateien der Brandversuche **AFFF.SD2** und der PDA-Messungen **PDA.SD2** einbezogen (vgl. Abschnitt 3.3 und Tabellen 3.2 sowie 3.4).

Bei den Bildern zur Auswertung der Tropfengeschwindigkeiten der PDA-Messungen im Abschnitt 4.4 ist zu sehen, dass diese von der Lage des Messpunktes im Sprühstrahl abhängen, d. h.

$$v = v(x, y, z). \quad (5.1)$$

Es kann also für den Sprühstrahl nicht **eine einzige charakteristische Geschwindigkeit** angegeben werden.

Es werden nun einige rein empirische Überlegungen angestellt, um dennoch eine geeignete Größe zu definieren. In die Überlegungen werden zwei Punkte einbezogen:

- ♦ Die Geschwindigkeit wird bestimmt, indem die durch die PDA-Messungen erhaltenen Werte für die Tropfengeschwindigkeiten in einem bestimmten Sprühstrahlbereich gemittelt werden. Gewählt wird ein Bereich um die Sprühstrahlmitte, da der Sprühstrahl bei den hier betrachteten Versuchen auf das Brandobjekt gerichtet wurde. Somit wird ein Bereich für x-Koordinaten aus dem Intervall $-a < x < +a$ festgelegt. Er sollte in der Größenordnung des Brandobjektes liegen.
- ♦ Der gewählte Bereich muss im Inneren des Sprühstrahls liegen, da am Rand des Sprühstrahls Geschwindigkeiten nahe bei Null gemessen werden. Diese sind für den Löschprozess nicht entscheidend. Da zunächst alle Sprühstrahlen in die Auswertung einbezogen werden sollen, muß er auch für den kleinsten Sprühstrahl noch anwendbar sein.

Die Analyse der Daten führte schließlich zu der Festlegung, einen Bereich mit $a=20 \text{ cm}$ zu berücksichtigen. Die resultierende Breite gestattet auch die Auswertung für den kleinsten Sprühstrahl ppmh39 in einer Entfernung von 150 cm . Auf der anderen Seite liegt der Wert fast in der Größe der schmalen Holzkrippenseite. Es sei hier bemerkt, dass die Rechnungen auch für andere a-Werte durchgeführt wurden. Dabei wurden sowohl kleinere a-Werte als auch Werte bis zu 40 cm berücksichtigt. Die Resultate werden dadurch in der Grundaussage nicht wesentlich verändert, abgesehen vom Sprühstrahl ppmh39, bei dem die großen Werte nicht mehr sinnvoll sind.

Somit wird durch diese empirische Festlegung eine Sprühstrahlgeschwindigkeit als Mittelwert der Tropfengeschwindigkeiten aus dem eben erläuterten Teilbereich berechnet nach

$$\bar{v}(a, z_{const}) = \frac{1}{2 * a} \int_{-a}^a v(x, 0, z_{const}) dx. \quad (5.2)$$

Die Diskretisierung von (5.2) für äquidistante Stützstellen x_i lautet

$$\bar{v}(a, z_{const}) = \frac{1}{n} \sum_{-a \leq x_i \leq +a} x_i, \quad (5.3)$$

wobei n die Zahl der Summanden von (5.3) ist. Für z_{const} ist jeweils die Entfernung der Löschdüse von der Vorderkante des Brandobjektes zu setzen.

Die Bilder sind analog zu den Darstellungen für den Volumenstrom im vorhergehenden Abschnitt zu interpretieren. Es wurde lediglich die Volumenstromachse durch eine Geschwindigkeitsachse ersetzt.

Bei den Holzkrippenbränden gilt für jeden Sprühstrahl, dass mit steigender Entfernung die Geschwindigkeiten abnehmen und die Löscherfolge schlechter werden.

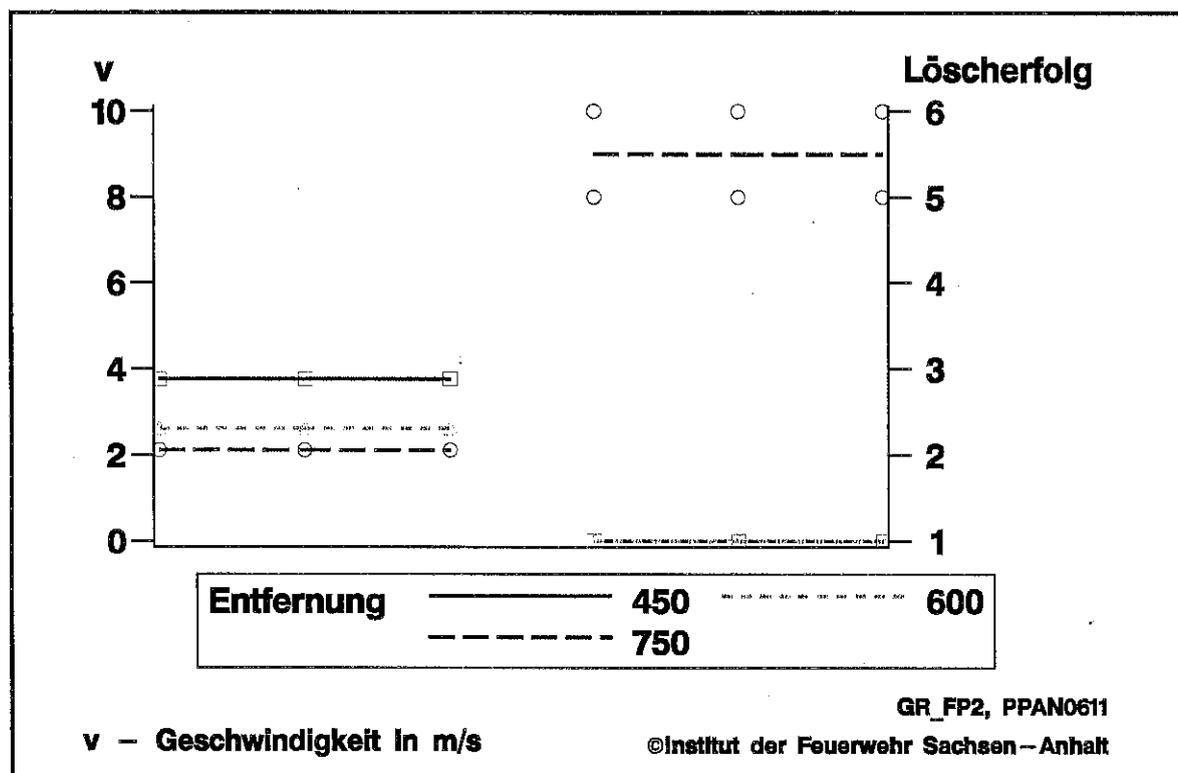


Bild 5.11: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzrippenbränden für den Sprühstrahl ppan06

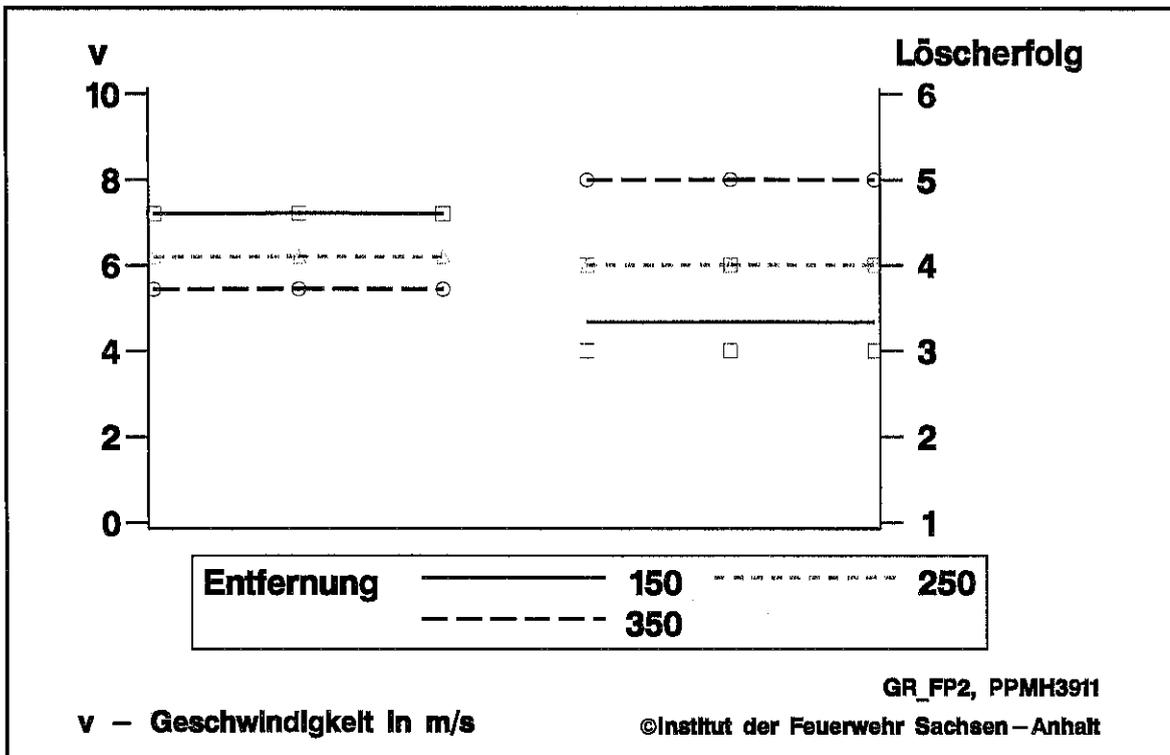


Bild 5.12: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkippenbränden für den Sprühstrahl ppmh39

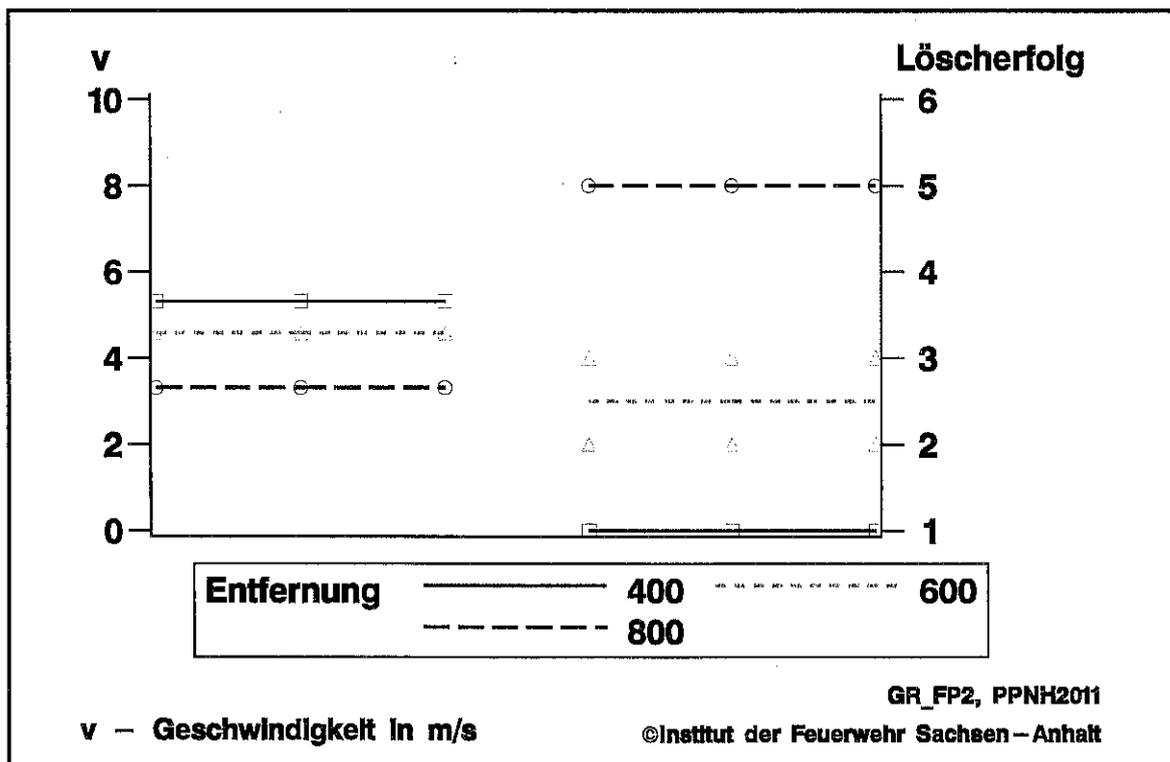


Bild 5.13: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkippenbränden für den Sprühstrahl ppnh20

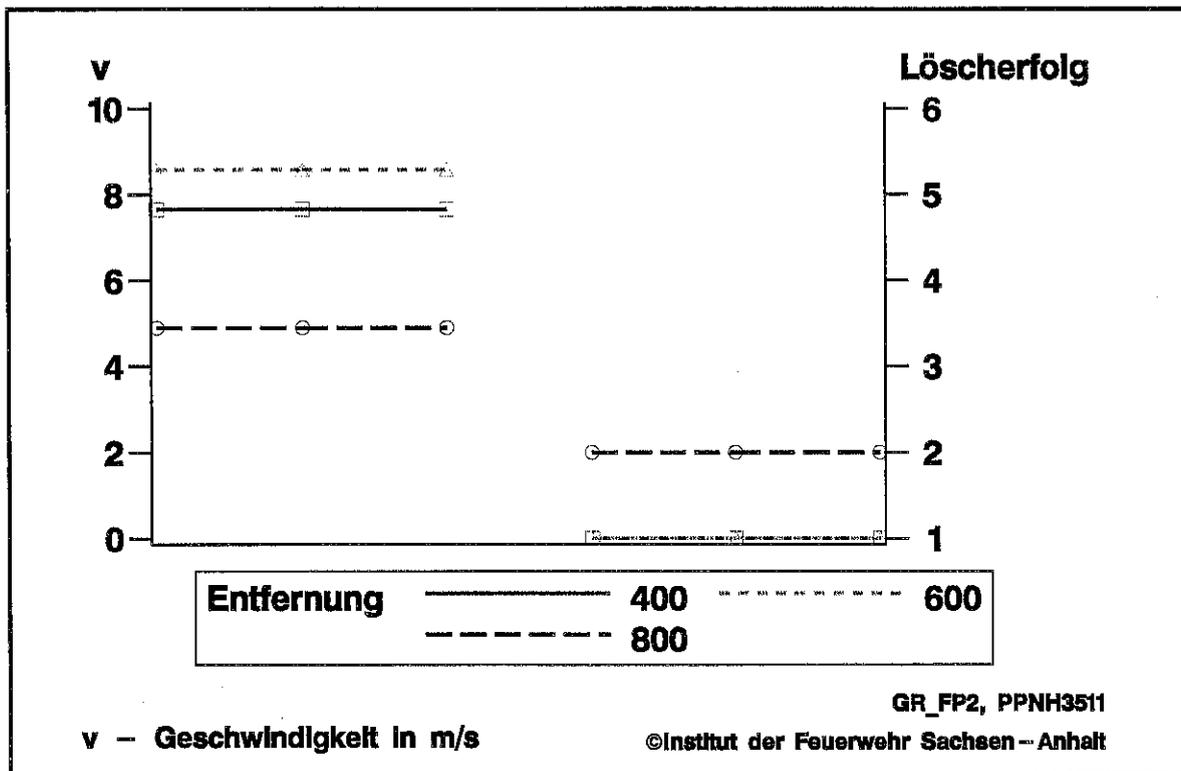


Bild 5.14: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl pph35

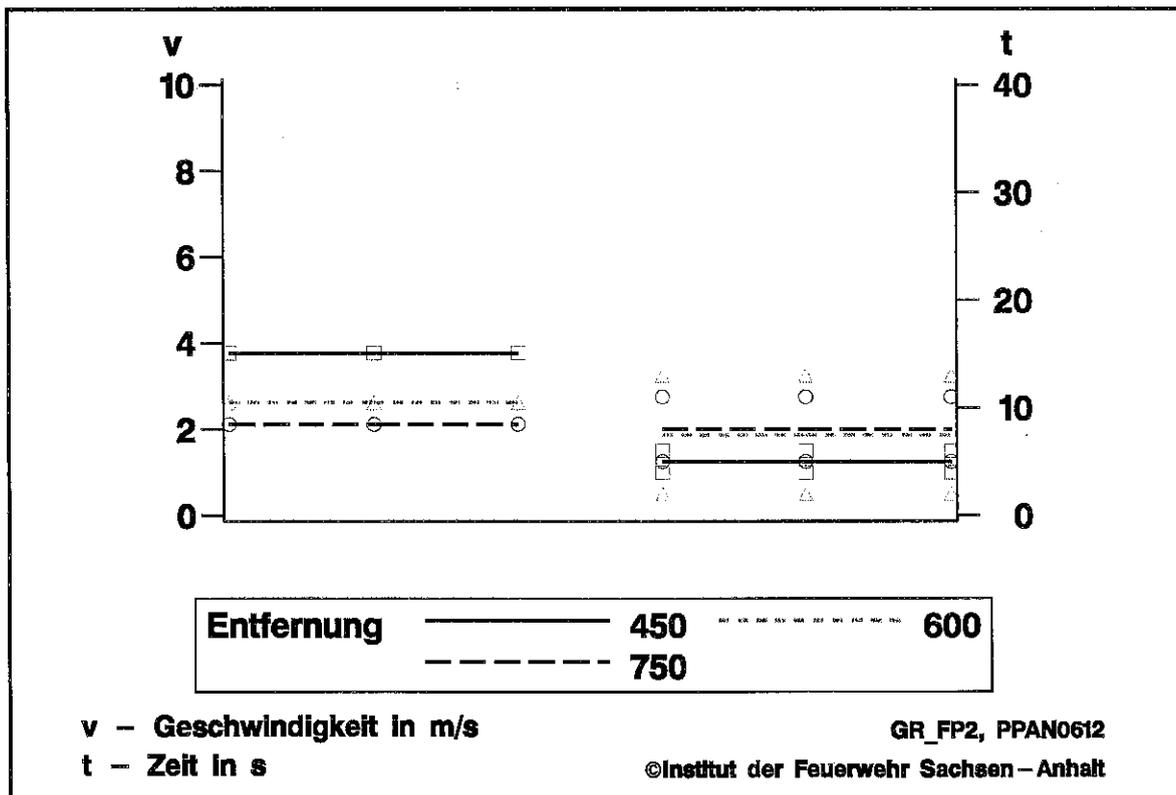


Bild 5.15: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppan06

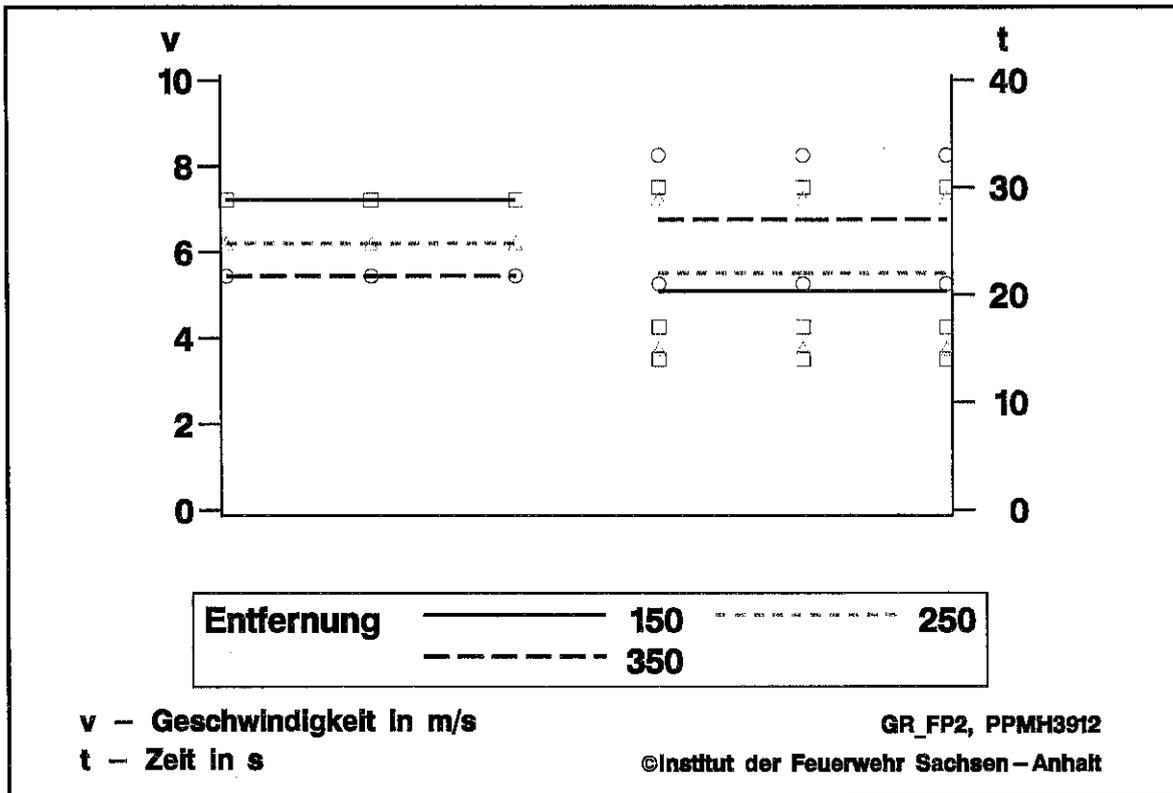


Bild 5.16: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppmh39

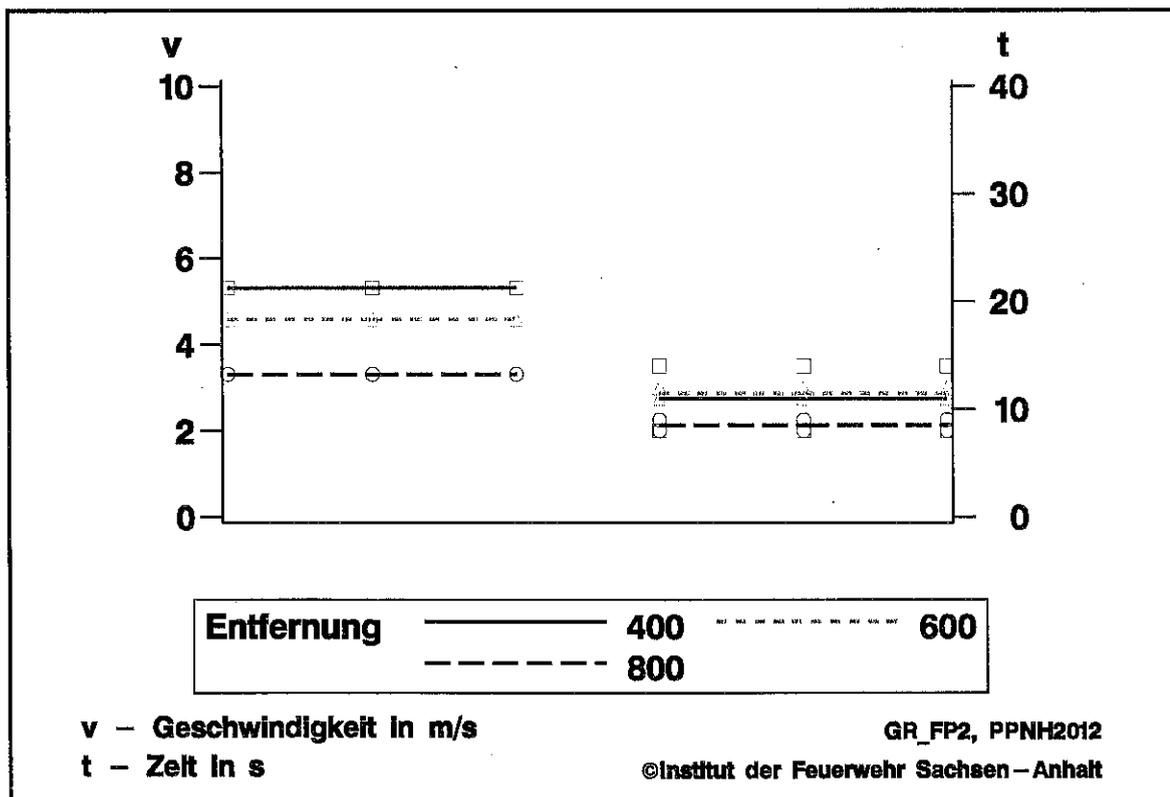


Bild 5.17: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppnh20

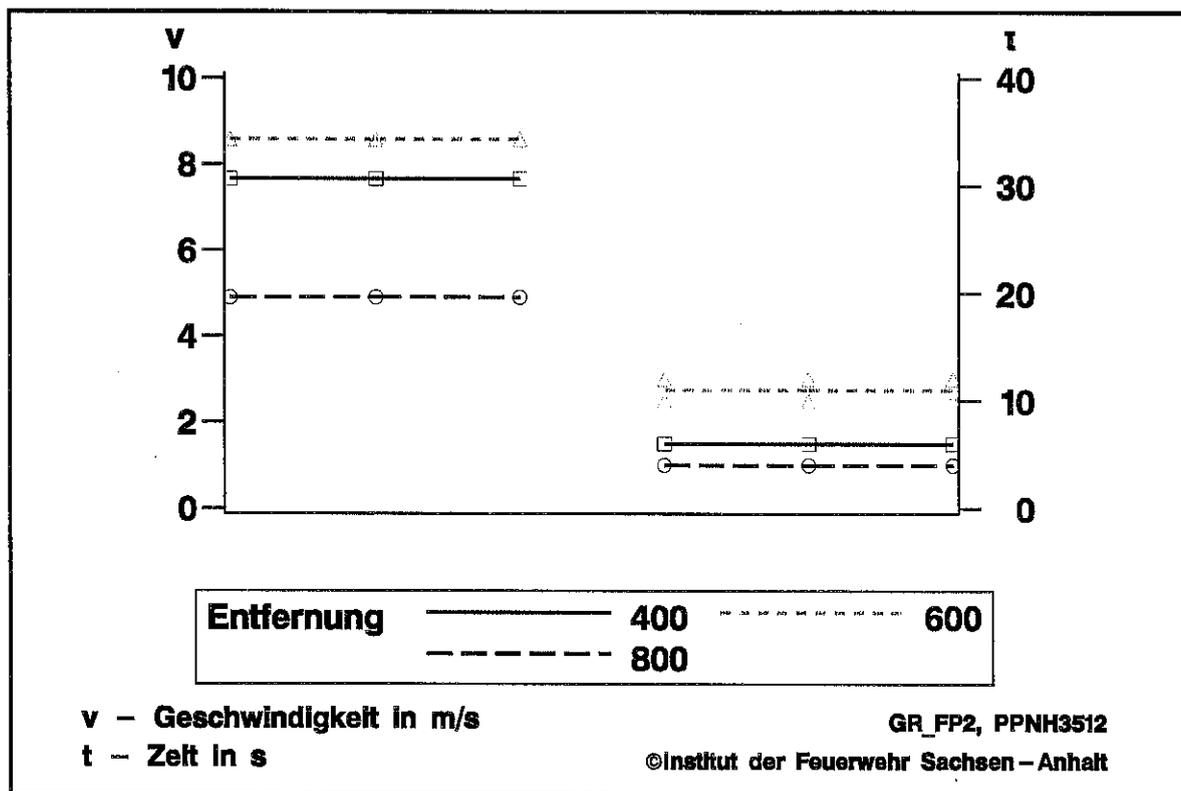


Bild 5.18: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl pph35

Bei den Polypropylenbränden trat der Löscherfolg u. a. dadurch ein, dass der Sprühstrahl durch die Strömung zum Flammenabriss führt und die nachfolgenden Wassertropfen die Oberfläche soweit abkühlen, dass diese erstarrt und keine brennbaren Gase mehr zur Verfügung stehen. Auch bei der Versuchsdurchführung war diese Erscheinung deutlich sichtbar. Dies war auch der Grund, die Tropfengeschwindigkeiten in die Überlegungen einzubeziehen, da dies die einzige gemessene Größe ist, die zur Geschwindigkeit überhaupt etwas aussagt. Betrachtet man die Einzelauswertungen 5.15 bis 5.18, so kann hier keine klare Aussage abgeleitet werden.

Aus diesem Grund wurden analog zum vorigen Abschnitt ebenfalls kubische Regressionskurven mit den entsprechenden Konfidenzintervallen betrachtet. Da der Sprühstrahl ppmh39 sich in seiner Größe sehr deutlich von den anderen unterscheidet, wurden die Auswertungen zweimal durchgeführt. Einmal für alle vier Sprühstrahlen und einmal für drei Sprühstrahlen, wobei ppmh39 nicht berücksichtigt wurde.

Bemerkungen

- ◆ Für die drei großen Sprühstrahlen ppan06, pph20 und pph30 verbessert sich mit zunehmender Geschwindigkeit auch der Löscherfolg bei Holzkrippenbränden.
- ◆ Mit der gemessenen Tropfengeschwindigkeitskomponente in z-Richtung konnte insbesondere bei den Polypropylenbränden der Einfluß der Strömung auf den Löscherfolg nicht statistisch gesichert nachgewiesen werden.

- ◆ Zum Nachweis des Einflusses der turbulenten Strömung des Sprühstrahls auf den Löscherfolg bei schmelzenden Stoffen sind geeignete Messgrößen zu definieren und Experimente anzuschließen.

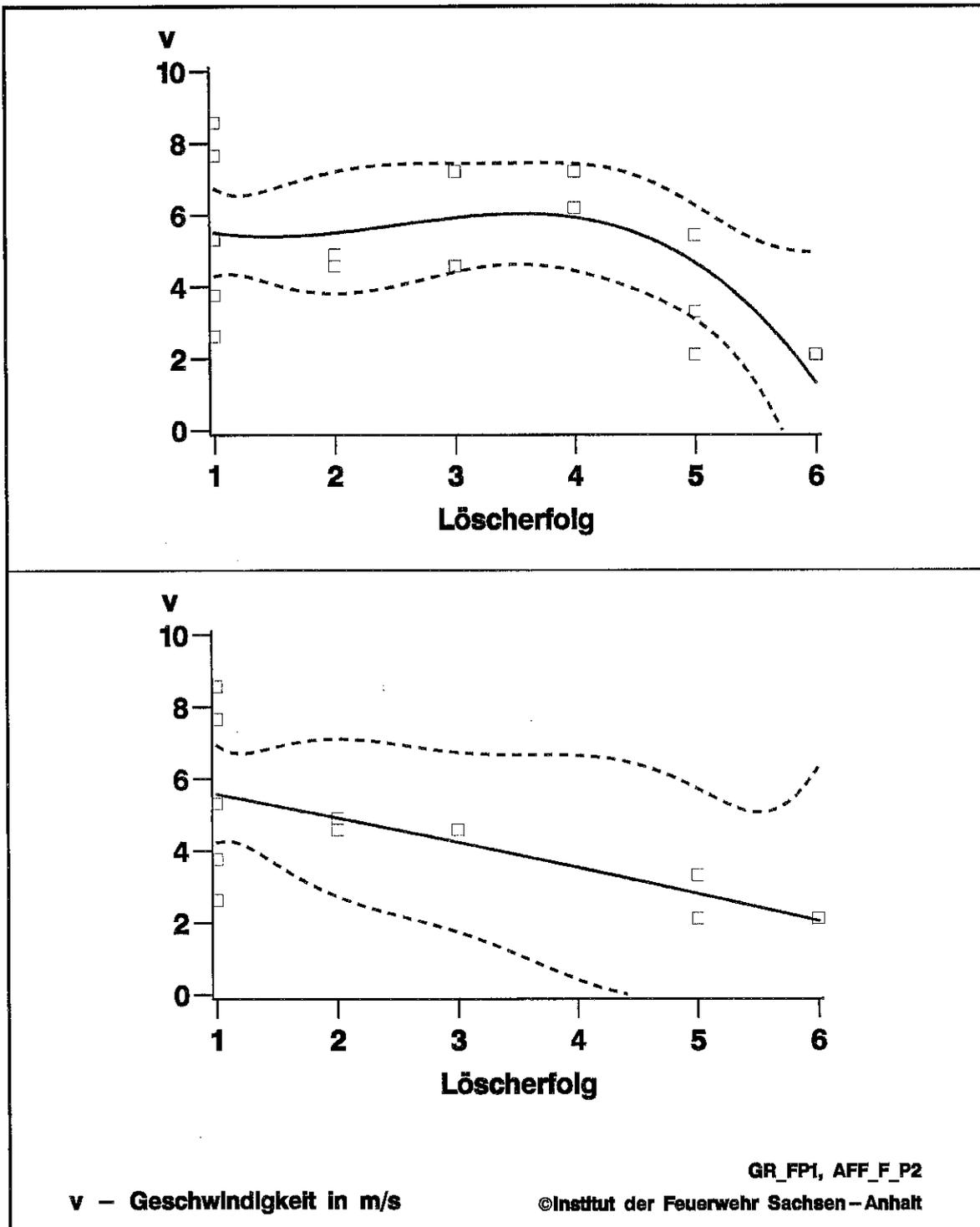


Bild 5.19: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Holzrippenbränden für alle Versuche (oben) und außer ppmh39 (unten)

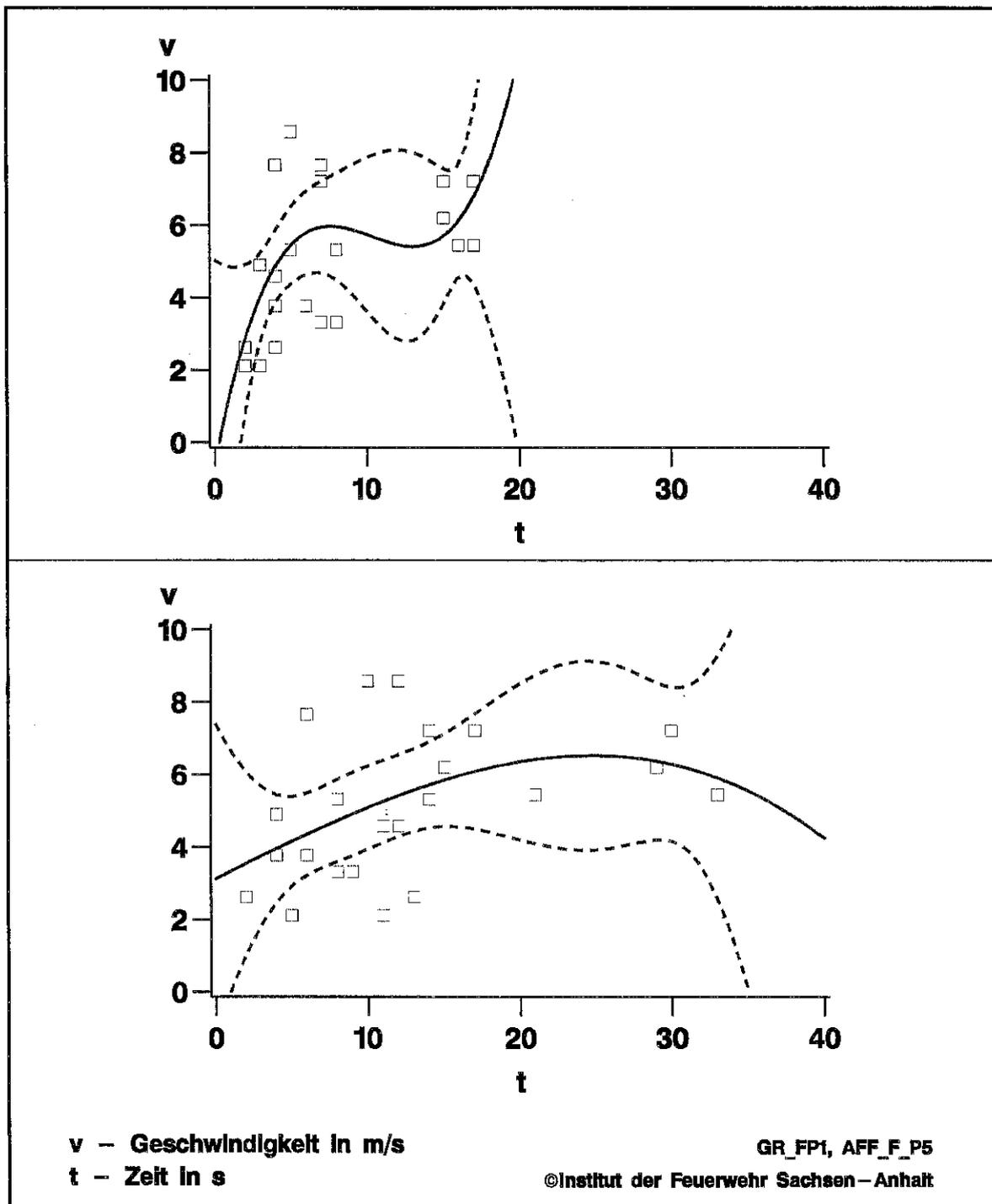


Bild 5.20: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für alle Versuche für die charakteristischen Löscherzeiten „2“ und „3“ (vgl. Tabelle 4.2)

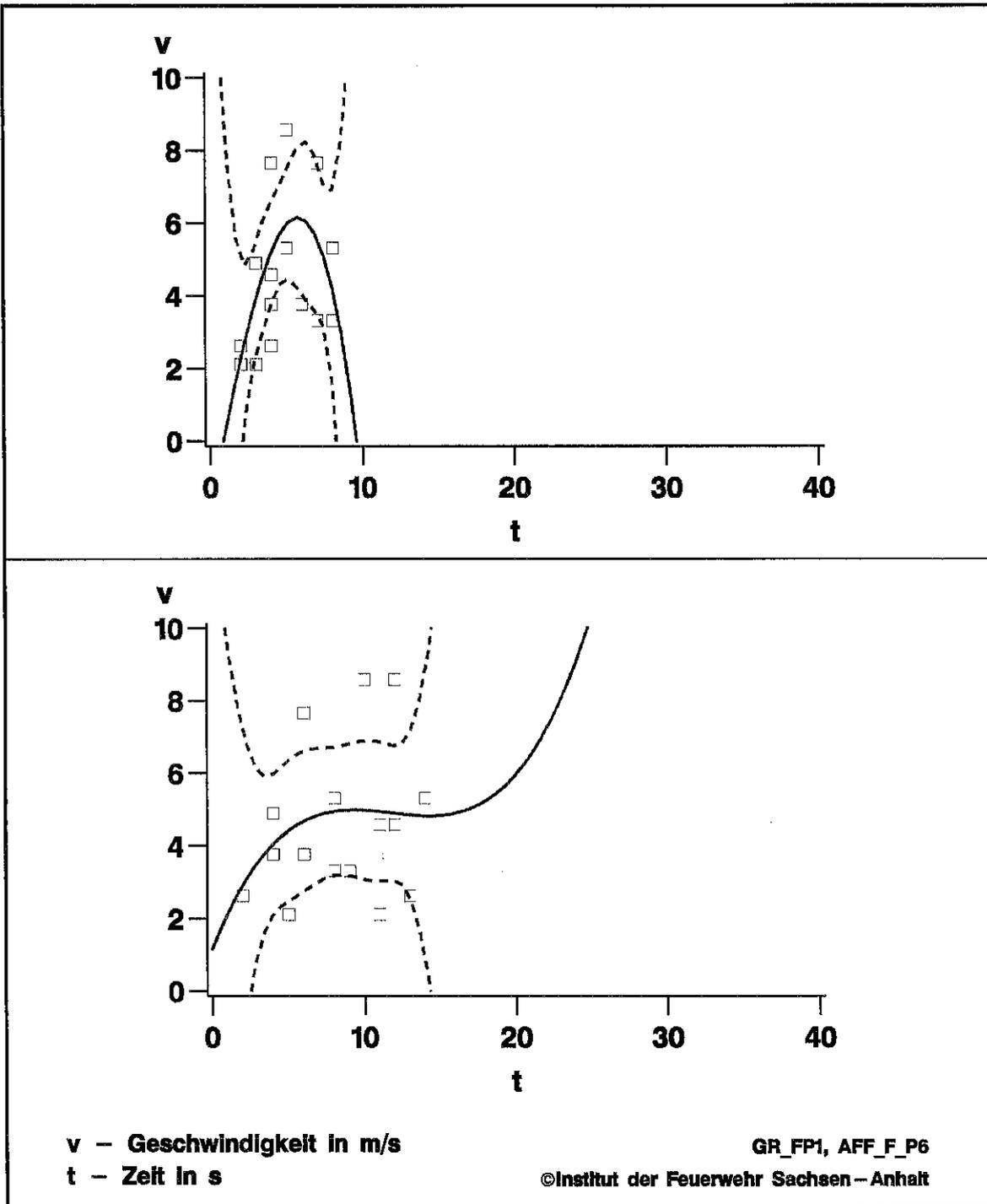


Bild 5.21: Mittlere Tropfengeschwindigkeit und Löscherfolg bei Polypropylenbränden für alle Versuche außer ppmh39 für die charakteristischen Löscherzeiten „2“ und „3“ (vgl. Tabelle 4.2)

5.4 Vergleich der Messungen der Sprühversuche mit den Messungen der Massenstromdichte

Bei den Sprühversuchen auf dem AFF-Versuchsstand wurde das auf das Brandobjekt auftreffende Wasser in Wannen aufgefangen und anschließend gewogen. Dieses Verfahren ist weder im realen Brandfall realistisch praktikierbar noch bei allen Versuchsaufbauten möglich. Die Kenntnis dieser Größe ist aber zur Einschätzung des Löschprozesses von Bedeutung.

Geht man davon aus, dass ein Sprühstrahl vermessen wurde und die Volumenstromdichte bekannt ist, so ergibt sich daraus eine Möglichkeit, das auf das Brandobjekt auftreffende Wasser zu berechnen. Ist $j_V(x, y, z)$ die im Abschnitt 4.3 eingeführte Volumenstromdichte, so kann das auf das Brandobjekt auftreffende Wasser analog zu Gleichung (4.4) nach

$$I_V = \iint_{(x,y) \in A_{BO}} j_V(x, y, z_{const}) dx dy \quad (5.4)$$

berechnet werden. A_{BO} ist hierbei die Projektion der dem Sprühstrahl zugewandten Fläche des Brandobjektes in die Sprühstrahlrichtung auf die (x, y) -Ebene, d. h. bei den in dieser Arbeit betrachteten Brandobjekten die dem Sprühstrahl zugewandte Seite der Holzkrippe bzw. der Polypropylenbrandwanne.

Ausgangspunkt für die Auswertung sind die in den SAS-Datenbankdateien der Sprühversuche **AFFS.SD2** und der Volumenstromdichtemessungen **WFD.SD2** (s. Abschnitt 3.3 Tabellen 3.3) abgelegten Daten. Die Daten der Volumenstromdichte sind zunächst so, wie im Abschnitt 4.5 dargelegt, aufzubereiten. Im Ergebnis dieser Umrechnung stehen sie für Punkte auf einem euklidischen Gitter in der (x, y) -Ebene in Form einer SAS-Datenbankdatei zur Verfügung. Die z -Koordinate z_{const} ist so zu wählen, dass sie der Entfernung zum Brandobjekt entspricht.

Für die Berechnung des auf das Brandobjekt auftreffenden Volumenstromes vom Löschwasser wurden im Einzelnen folgende Schritte abgearbeitet, die am Beispiel der Holzkrippe erläutert werden:

- ◆ Das Brandobjekt wurde gedreht, d. h. die dem Sprühstrahl zugewandte Seite A_{BO} veränderte ständig seine Größe. Bedingt durch die gleichmäßige Drehung wechselte diese Fläche periodisch zwischen der schmalen Seite der Holzkrippe und der breiten Seite. Aus diesem Grund wurde für die Berechnung angenommen, dass die Holzkrippe nicht gedreht wird. Der gesuchte Volumenstrom wurde dann für die schmale und die breite Seite getrennt berechnet. Beide Werte wurden gemittelt und das Ergebnis als Abschätzung für den gesuchten Volumenstrom verwendet.
- ◆ Der Bock führte eine Auf- und Abwärtsbewegung im Winkel von 10° durch. Diese bewirkt, dass sich das Zentrum des Sprühstrahls auf und ab bewegt. Es ändert sich zwar nicht die Größe A_{BO} der dem Sprühstrahl zugewandten Seite, jedoch variiert der Ausschnitt des Sprühstrahls, der auf das Brandobjekt trifft. Dies hat zur

Folge, dass der Wert des Integrals (5.4) sich mit änderndem Winkel bei der Auf- und Abwärtsbewegung ebenfalls ändert. Es wurde das Winkelintervall diskretisiert und das Integral für jeden Winkel getrennt numerisch berechnet. Diese Werte wurden anschließend gemittelt.

Die einzelnen Schritte wurden in ein SAS-Programm umgesetzt. Für die verschiedenen Entfernungen wurden die Berechnungen ausgeführt.

Die Bilder 5.22 bis 5.25 zeigen für die zwei Sprühstrahlen ppmh39 und pph35 die in den Sprühversuchen gemessenen Volumenströme, d. h. das auf die Brandobjekte auftreffende Wasser. In den Bildern sind diese Werte mit „real“ bezeichnet. Diesen „realen“ Werten werden die aufgrund der Volumenstromdichtemessungen nach oben erläuterten Verfahren berechneten Werte gegenübergestellt.

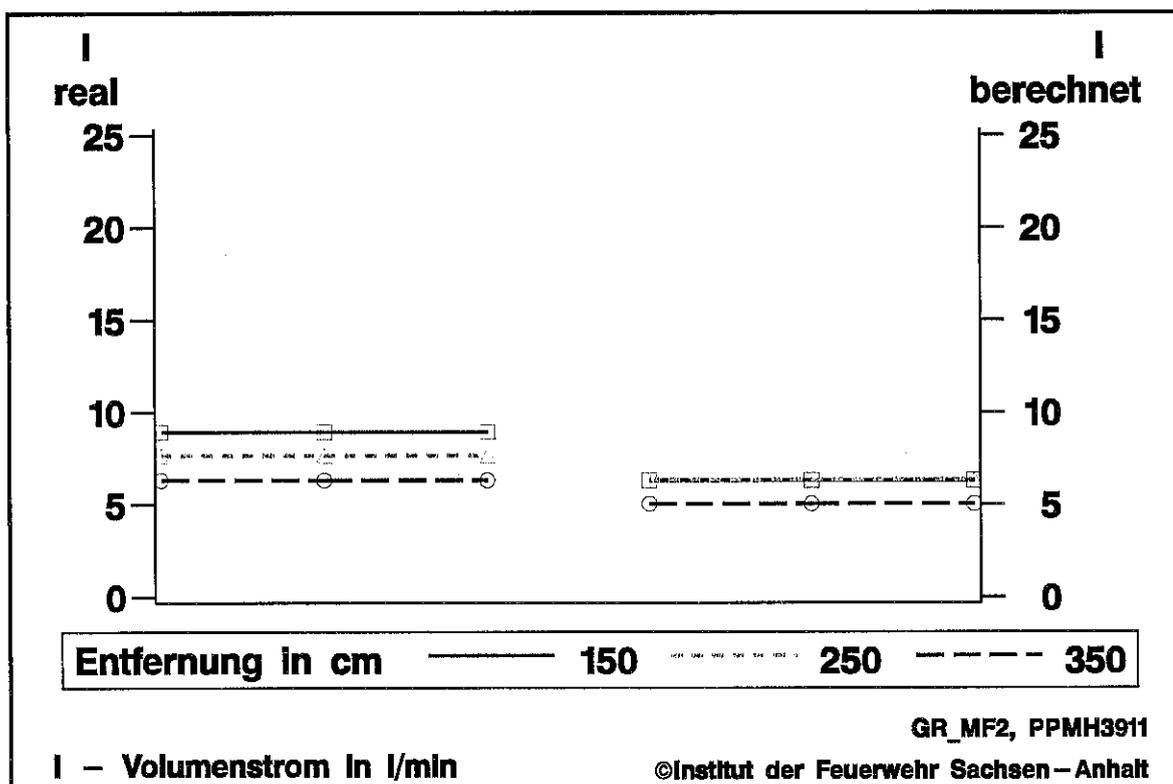


Bild 5.22: Realer und berechneter Volumenstrom bei Holzkrippenbränden für den Sprühstrahl ppmh39

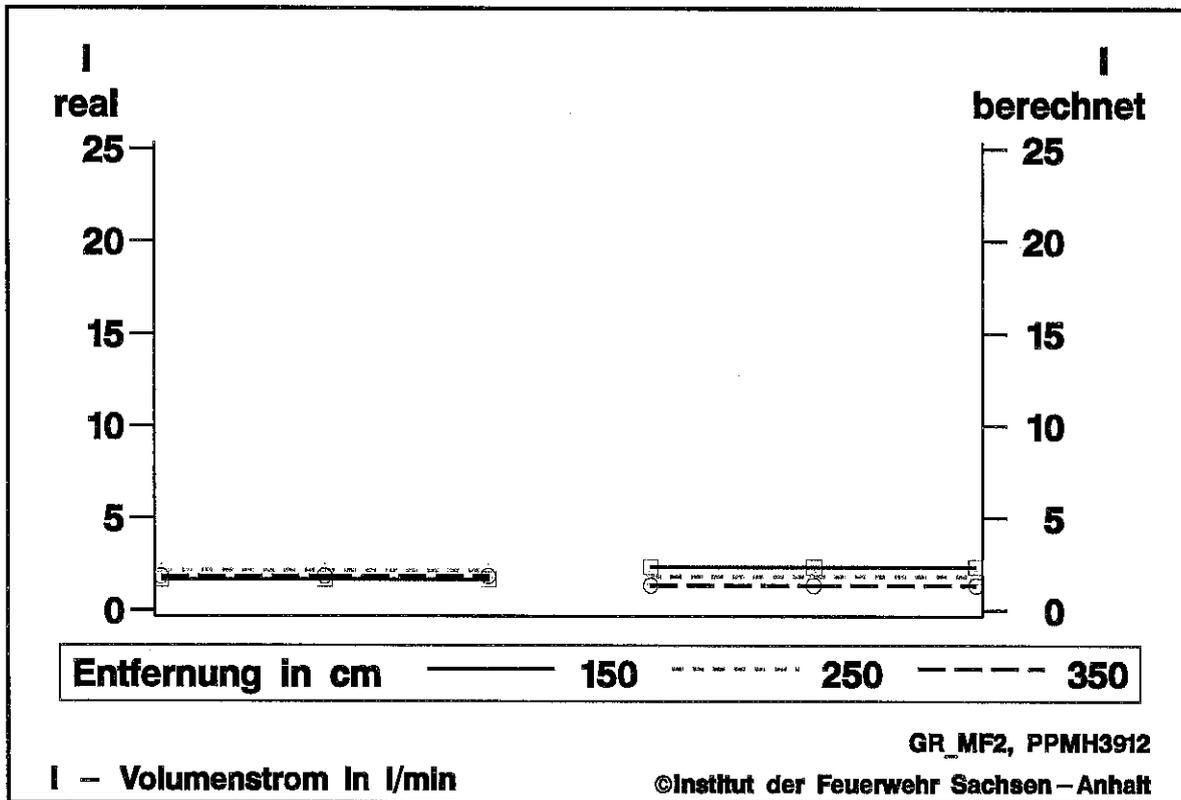


Bild 5.23: Realer und berechneter Volumenstrom bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl ppmh39

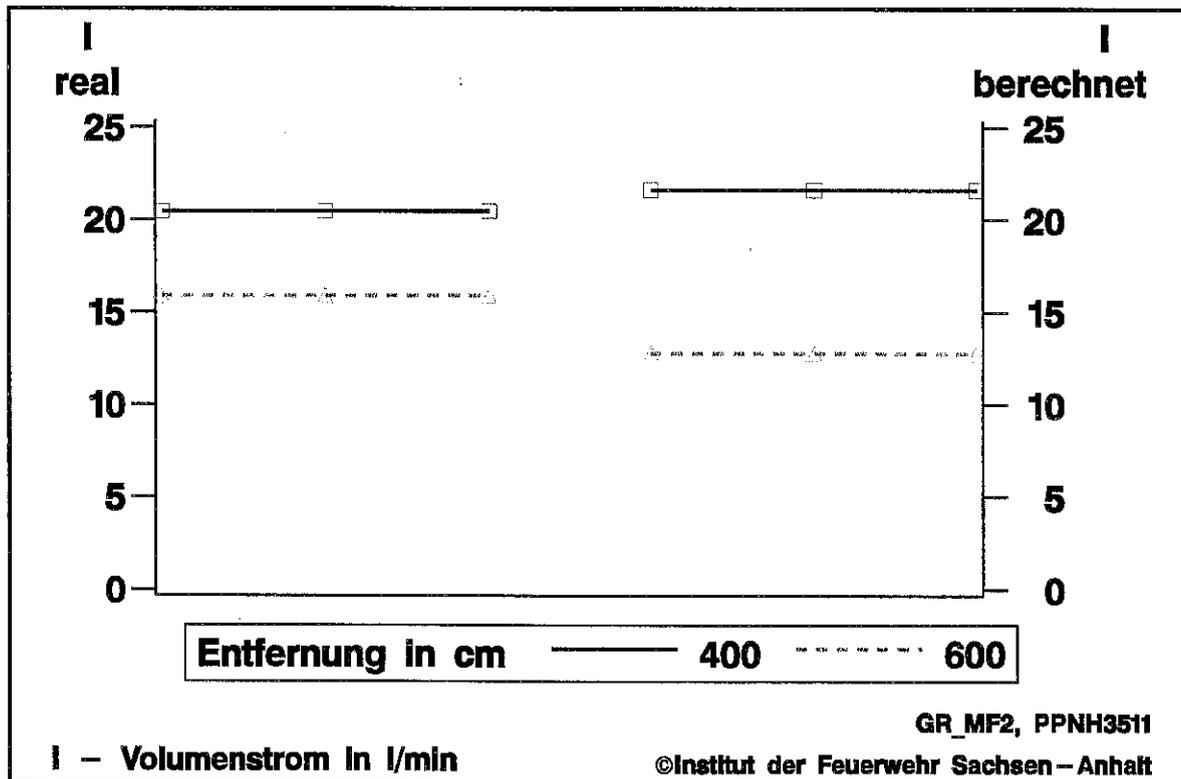


Bild 5.24: Realer und berechneter Volumenstrom bei Holzkippenbränden für den Sprühstrahl ppnh35

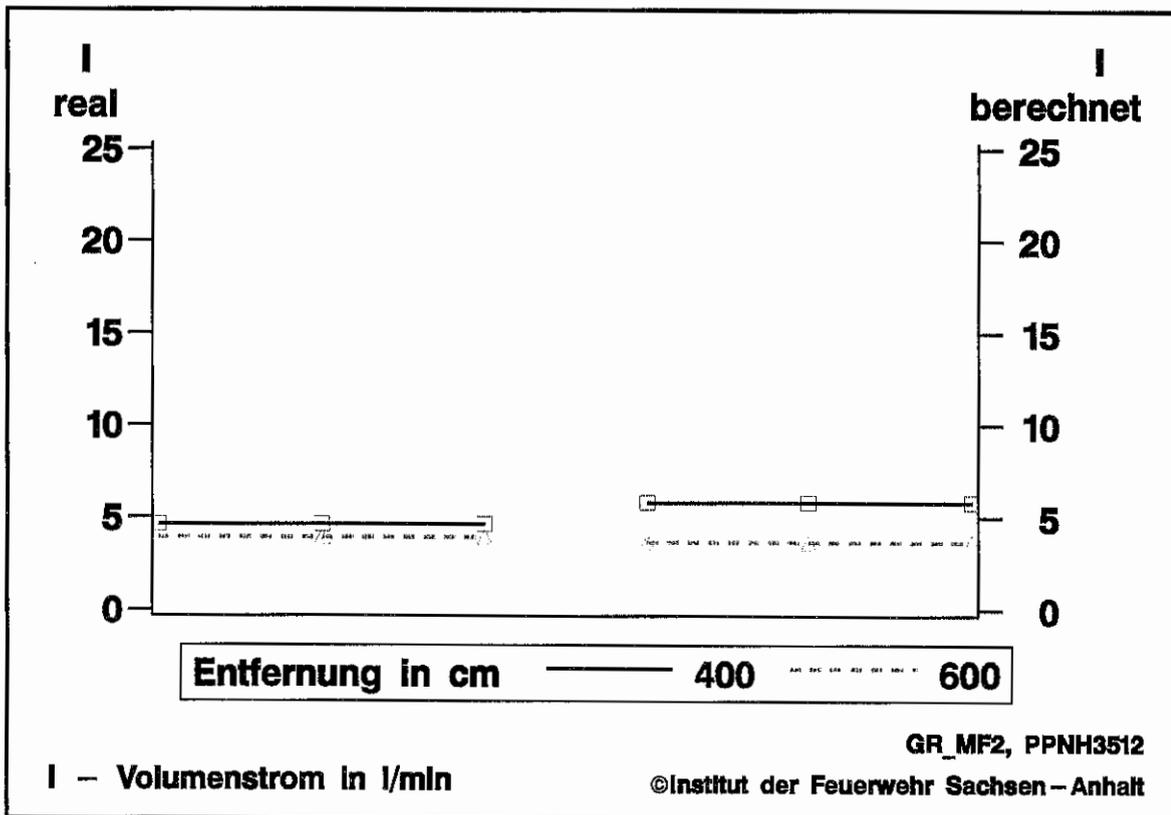


Bild 5.25: Realer und berechneter Volumenstrom bei Polypropylenbränden für den Sprühstrahl pph35

Bemerkungen

- ◆ Die Berechnungen sind für eine Abschätzung geeignet.
- ◆ Mit Verfügbarkeit einer weiterentwickelten Messsonde für die Volumenstromdichtemessung, sollte das Berechnungsverfahren validiert und gegebenenfalls weiterentwickelt werden.

6 Zusammenfassung

Zielstellung des Forschungsthemas

Der erste Teil des Forschungsthemas [Starke et al. 96] hatte das Vermessen und die statistische Beschreibung von Sprühstrahlen zum Inhalt. Zu diesem Zweck ist im Nasslabor des IdF LSA ein Versuchsstand aufgebaut worden, dessen Kernstück ein Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) ist, der lasergestützt die Messung von Tropfendurchmessern und -geschwindigkeiten erlaubt.

In dem zweiten Teil des Vorhabens sollten die Löscheigenschaften von Sprühstrahlen untersucht werden, die im mobilen Feuerwehreinsatz Verwendung finden. Besonderer Wert war auf den Aufbau eines Versuchsstandes zu legen, der es gestattet, Versuche reproduzierbar durchzuführen. Das ist eine notwendige Voraussetzung zur Bearbeitung dieser Fragestellung.

Bei den Versuchen wurde ausschließlich Leitungswasser zum Löschen verwendet. Es wurden keine Schaummittel oder ähnliches zugesetzt.

Ergebnisse

Es wurde der AFF-Versuchsstand (automatic fire fighter) konzipiert und aufgebaut. Er ist universell für eine Vielzahl von Brandversuchen einsetzbar. Bei gleichem Versuchsaufbau und Umgebungsbedingungen wurde eine hohe Reproduzierbarkeit erreicht.

Es wurden in die Untersuchungen weitere Größen einbezogen, die in diesem Zusammenhang bisher nur wenig betrachtet wurden. Das sind die Massen- und Volumenstromdichten. Diese Größen haben einen wesentlichen Einfluss auf den Löschprozess. Es wurden auf der Basis einer selbst entwickelten Messsonde erste Messergebnisse erzielt und einige Berechnungen angeschlossen, die die Nützlichkeit dieser Größen belegen.

In die Untersuchung wurden Löschdüsen einbezogen, die für den mobilen Einsatz konstruiert sind. Der Löscherfolg wird dadurch erzielt, dass der durch die Strömung der Düse getragene Sprühstrahl die brennende Oberfläche erreicht. Die Strömung des Sprühstrahl ist gegenüber der durch die Thermik des Brandes erzeugten Strömung dominant.

Bei glutbildenden Stoffen hängt der Löscherfolg vor allem von der Menge des dem Brand durch die Strömung der Löschdüse direkt zugeführten Wassers ab.

Bei schmelzenden Stoffen ist der Trend ähnlich, jedoch nicht so ausgeprägt. Hier spielen die Strömungsverhältnisse eine wichtige Rolle, d. h. durch Veränderung der Strömungsverhältnisse kann der Löscherfolg verbessert werden. Um die Effekte statistisch sichern zu können, sind weitere Versuche nötig.

Ein Volumenlöscheffekt ist bei den betrachteten Sprühstrahlen und Brandobjekten nicht nachweisbar. Er spielt eine untergeordnete Rolle. **Es sei darauf hingewiesen,**

dass bei stationären Löschanlagen in abgeschlossenen Räumen auch beim Einsatz von wesentlich geringeren Löschwasservolumenströmen durchaus derartige Löscheffekte erzielt werden können.

Ausblick

Der Einfluss der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten auf den Löschprozess konnte nicht statistisch gesichert herausgearbeitet werden. Es sind weitere Auswertungen auf der Basis der gespeicherten Versuchsdaten auszuführen.

Es wird eine Fortsetzung des Forschungsthemas angestrebt, bei der neben der Fortführung der Auswertungen auch ein weiteres Versuchsprogramm angeschlossen werden soll, um die Frage nach dem Einfluss der Sprühstrahlparameter auf den Löschprozess weiter aufzuklären. Diese Erkenntnisse sind erforderlich, um zielgerichtet geeignete Düsen für den jeweiligen Fall auswählen zu können.

Zugleich ist dies Grundlage für den Aufbau eines ingenieurmäßigen Berechnungsschemas für die Löschwirkung von Wasser.

Literaturverzeichnis

[Anderson et al. 96]

Anderson, Petra; Arvidson, Magnus; Holmstedt, Göran: Small scale experiments and theoretical aspects of flame extinguishment with water mist. Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Report 3080, 1996, May

[Brauer 71]

Brauer, Heinz: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmung. Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt/Main, 1971

[Covelli 93]

Covelli, B.: Löschwirksamkeit von Wassernebel – Eignung als Halon-Ersatz?. VdS-Fachtagung „Feuerlöschanlagen“, 8. und 9. Dezember 1993 in Köln, 1993, Tagungsband, 1-18

[DIN EN 3 Teil 1]

Tragbare Feuerlöscher. Benennung, Funktionsdauer, Prüfung des Löschvermögens, Prüfbjekte der Brandklassen A und B., Oktober 1990, 5 Seiten

[Domnick 95]

Domnick, J.: Charakterisierung von Sprühstrahlen. Kurzlehrgang Atomization and Sprays, 6. – 8. Nov. 1995, Universität Karlsruhe, 1995, Tagungsmaterial, 27 Seiten

[Ebert 88]

Ebert, Karl: Handbuch Feuerwehrrmaturen. Max Wiedenmann Armaturenfabrik, Gingen/Brenz, 1988

[Euteneuer 57]

Euteneuer, G. A.: Druckabhängigkeit von Tropfengröße und Wurfweite bei Sprühstrahlen. vfdb-Zeitschrift, 1957, 6, 124-128

[Grabski et al. 95]

Grabski, Reinhard; Starke, Horst: Wasser – ein universelles Löschmittel dank neuer Technologien. 4. Wagner-Symposium, 21.09.1995, Frankfurt/Main, 1995, Tagungsband, 70-91

[Grabski et al. 96]

Grabski, Reinhard; Starke, Horst: Physical Fundamentals of New Techniques for Forest Fire-Fighting with Water. Proceedings of the 3rd International Scientific Conference „Wood & Fire Safety“, May 6-9 1996, Slovakia, 1996, 283-292

[Grabski 95]

Grabski, Reinhard: Theoretische Grundlagen des Sprenglöschverfahrens. Jahresbericht 1994, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1995, 45-52

[Grabski 96]

Grabski, Reinhard: Löschen mit Wasserebeln. In: Das Große Feuerwehr Handbuch. Praxiswissen von A – Z, Kognos Verlag Braun GmbH, Stadtbergen, 1996, 7-L150-1 bis 7-L150-16

[Grabski 98]

Grabski, Reinhard: Brandschutzforschung aus der Sicht des Institutes der Feuerwehr Sachsen-Anhalt. vfdB Jahresfachtagung Erfurt, 7.-10. Juni 1998, Tagungsband, 7-30

[Grimwood 92]

Grimwood, Paul T.: Fog Attack. Firefighting Strategy & Tactics – An International View. FMJ International Publications Ltd, Redhill – Surrey, 1992

[Grimwood 93]

Grimwood, Paul T.: Water-fog in structural attack: A European view. Fire Chief, 1993, August, 86-93

[Großöhmig et al. 96]

Großöhmig, Walter; Fuchs, Elmar: Niederdruck-Wasservernebelungs-Löschanlagen. brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 1996, 8, 571-576

[Halon 97]

Anonymous: Halon Options Technical Working Conference. Proceedings, 6-8 May 1997, Albuquerque, New Mexico. University of New Mexico, 1997

[Haselhorst 98]

Haselhorst, R.: Einsatzgebiete des Turbo-Löschers. vfdB Jahresfachtagung Erfurt, 7.-10. Juni 1998, Tagungsband, 205-215

[Järvinen 92]

Järvinen, Jussi P.: Hochdruck-Wasserlöschanlagen, Funktion, Anwendung, Grenzen. VdS-Fachtagung „Feuerlöschanlagen“, 3. und 4. November 1992 in Köln, 1992, Tagungsband, 1-16

[Krüger et al. 56]

Krüger, Arnold; Radusch, Rudolf: Wasserzerstäubung im Strahlrohr. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, 1956

[Lefebvre 89]

Lefebvre, Arthur H.: Atomization and Sprays. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1989

[Mawhinney et al. 96]

Mawhinney, J. R.; Richardson, J. K.: A State-of-the-Art Review of Water Mist Fire Suppression Research and Development – 1996. National Research Council Canada, Internal Report No. 718, 1996, 34 pages

[Minimax 95]

Minimax: Hochdruck-Feuerlöschanlage HDL 250. UB Unabhängige Brandschutzzeitschrift, 1995, 5, 30

[Möbius 55]

Möbius, Kurt: Sprühstrahlen im Brandstelleneinsatz – Erfahrungen bei der Erprobung von Sprühdüsen. Wiesbaden, 1955, 40 Seiten

[Mugele et al. 51]

Mugele, R. A.; Evans, H. D.: Droplet Size Distribution in Sprays. Industrial and Engineering Chemistry, 43, 1951, 6, 1317-1324

[Pleiß et al. 93]

Pleiß, Georg; Herrmann, Hardy; Heinrich, Gert: Aufbau und Erprobung eines Abgas-Löschkomplexes auf Kettenfahrgestellen T55. Abschlußbericht für das BMFT, Förderkennzeichen 13RG9115. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1993

[Polytec 95]

Polytec: Aerometrics PDPA Operations Manual. Polytec GmbH, Waldbronn

[Rimen 88]

Rimen, J. G.: The use of High Pressure and Low Pressure Pumps with Hose Reel Systems. Home Office Scientific Research and Development Branch, Publication 34/88, 1988

[Rosin et al. 33]

Rosin, P.; Rammler, E.: The Laws Concerning the Fineness of Powered Coal. Journal of the Institute of Fuel, 7, 1933, October, 29-36

[SAS 95]

SAS System under Microsoft Windows – Release 6.11. SAS Institute Inc., Cary, 1995

[Schremmer 94]

Schremmer, Ulf: Anwendung des Wassernebel-Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdrucklöschverfahrens für stationäre Löschanlagen. TOTAL WALTHER Feuerschutz GmbH, Lösversuchszentrum, Manuskript, 1994, 36 Seiten

[Schremmer 97]

Schremmer, Ulf: Stationäre automatische Wasservernebelungsanlagen. TÜ, 38, 1997, 5, 20-25

[Sedov 93]

Sedov, Leonid Ivanovich: Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. By CRC Press Inc, Boca Raton, 1993

[Smith 95]

Smith, David P.: Water Mist Fire Suppression Systems. Fire Safety Engineering, 2, 1995, 2, 10-15

[SP REPORT 1994:03]

03, SP REPORT 1994: Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems. Boras, Sweden, November 4 – 5, 1993. Swedish National Testing and Research Institute, Boras, 1994

[SS 1192:1985]

Svensk Standard. Fire fighting equipment. 1986, 32 pages

[Starke et al. 96]

Starke, Horst; Wienecke, Friedrich-Wilhelm; Grabski, Reinhard: Fein verteiltes Wasser als Volumen- und Oberflächenlöschmittel. Brandschutzforschung der Bundesländer – Bericht Nr. 98 – Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1996

[Starke et al. 96a]

Starke, Horst; Schmeißer, Regina: Auswertung großer Versuchsdatenmengen am Beispiel der Sprühstrahlvermessung. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1996, Jahresbericht 1995, 103-110

[Starke et al. 98]

Starke, Horst; Grabski, Reinhard: Beschreibung von feinverteiltem Wasser und dessen Löscheigenschaften. vfdB Jahresfachtagung Erfurt, 7.-10. Juni, 1998, Tagungsband, 175-203

[Starke 96]

Starke, Horst: Statistische Beschreibung von Sprühstrahlen. Jahresbericht 1995, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1996, 95-102

[Strieder 97]

Strieder, Tim: Feinsprühlöschanlagen. ALBINGIA Schadenmagazin, 28, 1997, ASM 36 D/E, 13-26

[Tropea 95b]

Tropea, Cam: Laser Doppler Anemometry: Recent Developments and Future Challenges. Meas. Sci. Technol., 6, 1995, 605-619

[Wang 94]

Wang, Mingyi: Theoretische Grundlagen der Löschwirkung und Effizienz von Sprinklern. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994

[Widetschek 95]

Widetschek, Otto: Gibt es ein Universallöschmittel? Historische Entwicklung und Problemstellung. Internationales Symposium Brandschutz'95, 4. Bis 7. Oktober 1995 in Graz, Tagungsband, 91-98

[Xu 96]

Xu, T.-H.: Algorithmen zur Messung von lokaler Massenstromdichte und Konzentration, Teil 1: Burstlängen-Methode. Kurzlehrgang Turbulenz- und Partikelgrößenmessungen mit Laser-Doppler- und Phasen-Doppler-Anemometrie, 25. – 28. März 1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 16 Seiten